



Topias Peiponen

Älykäs kastelujärjestelmä jalkapallonurmille

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka

Insinöörityö

19.5.2022

Tiivistelmä

Tekijä: Topias Peiponen
Otsikko: Älykäs kastelujärjestelmä jalkapallonurmille
Sivumäärä: 53 sivua + 3 liitettä
Aika: 19.5.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Tieto- ja viestintätekniikka
Ammatillinen pääaine: Mobile Solutions
Ohjaaja: Lehtori Toni Spännäri

Insinööriyössä selvitettiin älykkään kastelujärjestelmän perusteita, hyötyjä ja haasteita sekä käytännön toteutusta. Älykäs kastelujärjestelmä on kastelulaitteiden, sensorien ja ohjaimen muodostama kokonaisuus, jossa kastelua ohjataan maaperän tai sään olosuhteiden perusteella. Työn alussa suunniteltiin tulevan järjestelmän sisältävän Rainbird Eagle 900/950 -kastelulaitteita, Soilscout Hydra100 -maaperäsensoreita ja Rainbird ESP-LXME -kasteluohjaimen.

Älykäs kastelujärjestelmä voi säästää huomattavasti vettä verrattua muihin kastelujärjestelmämalleihin, mikä edistäisi Helsingin kaupungin ympäristöystävällisyyttä ja taloudellisuutta. Älykäs kastelujärjestelmä voi myös parantaa kaupungin nurmientien kuntoa, koska kastelu perustuisi dataan eikä inhimilliseen arviointiin.

Työssä suoritettiin tutkimuksia Soilscout Hydra100 -maaperäsensoreiden soveltuvuudesta kastelun ohjaamiseen. Tutkimuksissa todettiin, että maan alle sijoitettavat Hydra100-maaperäsensorit korreloivat tarpeeksi hyvin nurmen pintakosteuden kanssa. Tutkimusmenetelmät olivat kuitenkin alkeelliset, minkä takia asiasta tarvittaisiin lisää tutkimustietoa.

Työssä luotiin web-monitorointialusta, jonka tarkoituksena oli monitoroida ja hallita älykästä kastelujärjestelmää hyödyntämällä rajapintoja. Web-monitorointialustan toteutus onnistui lukuun ottamatta Rainbird-kastelulaitteiden etähallintaa, minkä takia web-monitorointialusta lopulta hyllytettiin.

Lopuksi suunniteltiin älykkään kastelujärjestelmän prototyypin toteutus, joka perustui kiinteistöautomaatiotekniikkaan rajapintojen sijasta. Prototyyppi suunniteltiin Pirkkolan jalkapallonurmelle. Prototyyppi käyttää Rainbird Eagle 900/950 -kastelulaitteita, Soilscout Hydra100 -maaperäsensoreita, Rainbird WR2 -sade- ja pakkassensoria sekä räätälöityä kasteluohjainta, jonka ylläpitoyksikkö on tilannut.

Avainsanat: älykäs kastelujärjestelmä, sensorit, vedenkäyttö, nurmitekniikka, automaatiotekniikka, web-teknologiat

Abstract

Author: Topias Peiponen
Title: Smart irrigation for football turfs
Number of Pages: 53 pages + 3 appendices
Date: 19 May 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Information Technology
Professional Major: Mobile Solutions
Supervisor: Toni Spännäri, Senior Lecturer

The object of this thesis was to explore the fundamentals of smart irrigation systems, the possible benefits of such systems and the implementation of smart irrigation. Smart irrigation technology usually consists of sprinkler systems, sensors and controllers. The implementation of the smart irrigation system was initially planned to include Rainbird Eagle 900/950 sprinklers, Soilscout Hydra100 sensors and a Rainbird ESP-LXME controller.

A smart irrigation system can yield considerable savings in water usage, which would be environmentally and fiscally beneficial for the city of Helsinki. A smart irrigation system can also improve the conditions of the football turfs in the city, as the irrigation would not rely on human judgement, but actual data processed by a machine.

The thesis included a research study on the effectiveness of using the Soilscout Hydra100 sensors in smart irrigation control. The studies concluded that the underground moisture that the sensors measured did correlate close enough with the surface moisture of the football turfs. However, the methodology used in the studies was lacking, and more research is needed about the subject.

This thesis researched the implementation of a web-based platform for monitoring and controlling a smart irrigation system through the use of APIs. The implementation of the web-based platform was mostly successful, but the lack of remote control for the sprinklers meant that the platform had to be cancelled.

Finally, a prototype for a smart irrigation system was designed, which was based on automation technology without web technologies like APIs. The prototype was designed for use on the football turf of Pirkkola. The prototype will use Rainbird Eagle 900/950 sprinklers, Soilscout Hydra100 sensors, a Rainbird WR2 rain/freeze sensor and a custom-made controller, that the maintenance unit has ordered.

Keywords: smart irrigation, sensors, water use, turf technology, automation technology, web technologies

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Älykkään kastelujärjestelmän perusteet	1
2.1	Sensorit ja sensoriohjaimet	1
2.2	Sääsensoriohjaimet	2
2.3	Maaperäsensiohjaimet	3
2.4	Lisäosasensorit	4
2.5	Kastelulaitteet	5
2.6	Työssä käytettävät laitteet	6
3	Älykkään kastelujärjestelmän hyödyt ja haasteet	7
3.1	Vedenkäyttö ja muut hyödyt	7
3.2	Haasteet	9
4	Hydra100-maaperäsensoreiden soveltuvuus nurmikentän kastelun ohjaamiseen	10
4.1	Jalkapallonurmen hoito	10
4.2	Tutkimussuunnitelmat	14
4.3	Tutkimusten lopputulokset ja pohdinta	18
5	Älykkään kastelujärjestelmän monitorointialusta	22
5.1	Monitorointialustan käyttötarkoitus	22
5.2	Teknologiat ja työkalut	23
5.3	Selainpuoli	23
5.4	Rajapinnat ja palvelinpuoli	28
5.5	Tiedonkulku ja tunnistautuminen	31
5.6	Navigointi	32
5.7	Komponentit	34
5.8	Monitorointialustan lopputulos	39
5.9	Jatkokehitys epäonnistuneen monitorointialustan jälkeen	40
6	Älykkään kastelujärjestelmän toteutus automaatiotekniikalla	40
6.1	Toteutuksen haasteet	40

6.2	Tekninen toteutus	43
6.3	Kastelulogiikka	48
6.4	Tulevaisuus ja pohdinta	51
7	Yhteenveto	52
	Lähteet	54

Liitteet

Liite 1: Ensimmäisen tutkimusvaiheen tulokset kuvattuna erotusmuuttujilla

Liite 2: Ensimmäisen tutkimusvaiheen tulokset ilman erotusmuuttujia

Liite 3: Toisen tutkimusvaiheen tulokset erotusmuuttujilla

Lyhenteet

- PLC: *Programmable Logic Controller*. Ohjelmoitava logiikka. Perinteisesti teollisuusprosesseissa käytettävä tietokoneen hallintajärjestelmä, joka pystyy jatkuvasti tutkimaan syöttölaitteiden signaaleja, minkä perusteella logiikka tekee ohjauspäätöksiä.
- SPA: *Single Page Application*. Web-sivujen arkkitehtuurimalli, jossa käytetään vain yhtä HTML-dokumenttia, jota muokataan dynaamisesti.
- MVC: *Model-View-Controller*. Tapa jakaa ohjelmiston funktionaalisuus kolmeen osaan: näkymään (view), ohjaimen (controller) ja malliin (model). Näkymä ilmoittaa muutoksista ohjaimelle, ja ohjain tekee muutoksia malliin. Malli ilmoittaa muutoksista taas näkymälle, joka voi hakea mallilta uudet muutokset.
- MVVM: *Model-View-ViewModel*. Toinen tapa jakaa ohjelmiston funktion kolmeen osaan: näkymään (view), malliin (model) ja näkymämalliin (viewmodel). Näkymä ilmoittaa muutoksista näkymämallille, joka tekee päivitykset malliin. Malli lähettää päivitettyt tiedot taas näkymämallille, joka lähettää tiedot edelleen näkymälle.
- HTML: *Hypertext Markup Language*. Kuvauskieli, jolla voidaan ilmaista web-sivun rakennetta ja sisältöä.
- API: *Application Programming Interface*. Ohjelmointirajapinta, jonka avulla erilaiset ohjelmistot voivat kommunikoida toistensa kanssa.
- HTTP: *Hypertext Transfer Protocol*. Yleinen tiedonsiirtoprotokolla, jota esimerkiksi web-sivut ja sovellukset käyttävät siirtämään tietoa.
- JSON: *Javascript Object Notation*. Avoimen standardin tiedonesitysmuoto, joka tunnetaan sen helppolukuisuudesta.

JWT: *JSON Web Token*. RFC 7519 -standardin mukainen tapa ilmaista tunnistautumisstrategiaa kahden osapuolen välillä. JWT käyttää tunnistautumisessa JSON-pohjaisia objekteja, jotka voidaan tiedon-siirrossa salata.

VWC: *Volumetric Water Content*. Volumetrinen vesipitoisuus ilmaisee maaperässä olevan veden suhteellisen osuuden.

CRUD: *Create, Read, Update, Delete*. CRUD-toiminnot ilmaisevat ohjel-mistossa tapoja luoda, lukea, päivittää ja poistaa tietoa.

1 Johdanto

Insinööriyön tavoitteena oli tutkia älykkään kastelujärjestelmän toteutusta Helsingin kaupungin jalkapallonurmille. Ennen varsinaista toteutusta tutkittiin älykkään kastelujärjestelmän perusteita ja kannattavuutta. Projekti toteutettiin Helsingin kaupungin kulttuurin ja vapaa-ajan toimialan liikunnan ylläpitoyksikölle.

Älykäs kastelujärjestelmä on kastelulaitteiden, sensorien ja ohjaimen muodostama kokonaisuus, joka automatisoi nurmen kasteluprosessin sen tarpeiden mukaisesti. Älykkäässä kastelujärjestelmässä kastelua säädetään sensorien mittaaman datan perusteella. Järjestelmän avulla voidaan säästää huomattavia määriä vettä, millä on ympäristöllisesti ja taloudellisesti positiivisia vaikutuksia.

Työssä sensoreina käytettiin langattomia Soilscout Hydra100 -maaperäsensoreita, jotka voidaan asentaa ilman kaapeleita nurmen maaperään. Ennen järjestelmän toteutusta tutkittiin Hydra100-maaperäsensoreiden toimivuutta kosteuden muutoksien havaitsemisessa.

Työssä luotiin web-monitorointialusta, jonka tarkoituksena oli yhdistää rajapintojen avulla kastelulaitteiden hallinta, sensorien ja vedenkulutuksen monitorointi sekä kastelulogiikka. Lopulta työssä kehitettiin automaatiotekniikkaan perustuva prototyyppi, joka on tulevaisuudessa määrä asentaa testikäyttöön Helsingissä Pirkkolan jalkapallonurmelle.

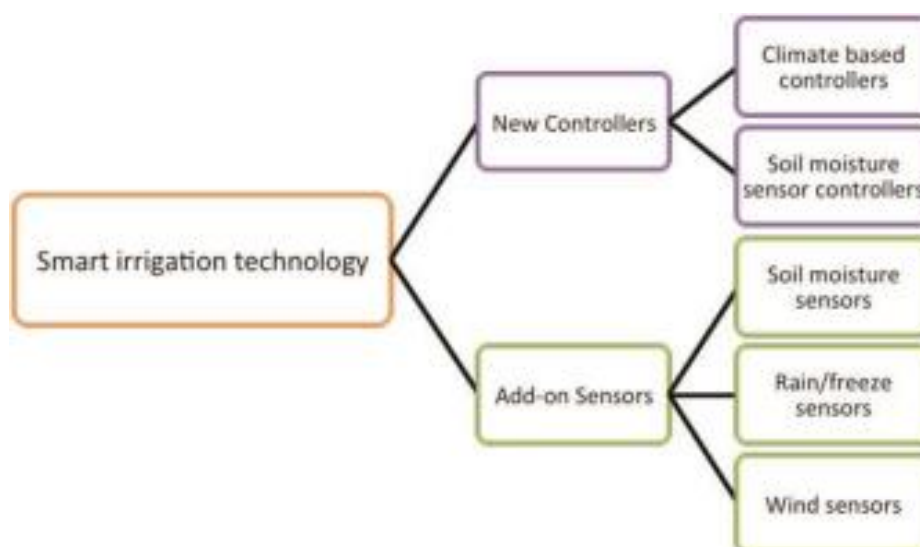
2 Älykkään kastelujärjestelmän perusteet

2.1 Sensorit ja sensoriohjaimet

Sensorien tarkoitus on mitata maaperän tai sään olosuhteita. Älykkäissä kastelujärjestelmissä voi olla tyypillisesti kahdenlaisia sensorijärjestelmiä: sensoriohjaimia ja lisäosasensoreita. Sensoriohjaimet ovat sensorikokonaisuuksia, joissa

on valmiit ominaisuudet älykkään kastelujärjestelmän luomiseen. Lisäosensensorit ovat yksittäisiä sensoreita, joita voidaan lisätä entisiin kastelujärjestelmiin ja luoda siten uusi älykäs kastelujärjestelmäkokonaisuus. [1.]

Sensoriohjaimet voidaan jakaa edelleen kahteen eri luokkaan: sää- ja maaperäsensensoriohjaimiin. Lisäosensensorit myös voidaan jakaa useampaan luokkaan kuten kuvassa 1: maaperän kosteussensoreihin, sade- ja pakkassensoreihin sekä tuulisensoreihin. [1.]



Kuva 1. Mahdollisia sensorivaihtoehtoja älykkäisiin kastelujärjestelmiin [1].

2.2 Sääsensensoriohjaimet

Sääsensensoriohjaimet (kuva 2) perustuvat kokonaishaihduntaan eli evapotranspiraatioon. Kokonaishaihdunta on alueelta eri tavoin haihtuvan veden kokonaismäärä, joka koostuu evaporaatiosta (maanpinnasta tapahtuvasta haihdunnasta) ja transpiraatiosta (kasvien kautta tapahtuvasta haihdunnasta). [2.] Ohjaimet keräävät paikallista säätietoa, jonka perusteella ne säätelevät kastelulaitteiden vedenkäyttöä. Ohjaimet käyttävät neljää eri sääolosuhdeparametria: lämpötila, tuuli, auringon säteily ja ilman kosteus. Sääsensensoriohjaimet voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan: signaalin perustuva ohjain, historialliseen tietoon perustuva ohjain ja paikan päällä mitattuun dataan perustuva ohjain. [3.]

Signaalin perustuva sääsensoriohjain hyödyntää julkista meteorologista dataa, jonka avulla se laskee esimerkiksi nurmikkoalueelle kokonaishaidunta-arvon. Historialliseen tietoon perustuva ohjain laskee historiallisen vedenkäytön avulla tarvittavan veden määrän, minkä perusteella luodaan ennalta määritetty vedenkäyttöohjelma. Paikan päällä mitattuun dataan perustuva ohjain nimenomaisesti käyttää kastelualueella mitattuja arvoja vedenkäytön laskemiseen. [3.]



Kuva 2. Esimerkki kokonaishaiduntaan perustuvasta sääsensoriohjaimesta (Rainbird) [1].

2.3 Maaperäsensensoriohjaimet

Maaperäsensensoriohjaimen (kuva 3) mittauspää haudataan kastelualueen maaperään, missä se havaitsee maaperän kosteuden ja lähettää datan ohjaimelle.

Maaperäsensensoriohjaimet voidaan jakaa kahteen luokkaan: jaksoittainen kasteluohjain (engl. suspended cycle irrigation system) ja tarpeen mukainen kasteluohjain (engl. water on demand irrigation). [3.]

Jaksoittainen kasteluohjain toimii kuten tyypillinen kastelujärjestelmä, eli sillä on ennalta määritetty kasteluaikataulu, mutta jaksoittainen kasteluohjain pysäyttää seuraavan kastelukerran, jos se havaitsee maaperän olevan tarpeeksi kostea. Tarpeen mukainen kasteluohjain ei käytä ennalta määritettyä aikataulua, vaan

se hyödyntää kosteuden raja-arvoja, joiden puitteissa kastelulaitteet toimivat. [3.]



Kuva 3. Esimerkki maaperäsensiorihjaimesta (Rainbird) [1].

2.4 Lisäosasensorit

Joissain tapauksissa kastelujärjestelmän uusiminen kokonaan ei ole kannattavaa, jolloin kastelujärjestelmää voidaan päivittää lisäosasensoreilla. Lisäosasensorit tyypillisesti mittaavat yhtä tai useampaa ominaisuutta. Ne ovat usein yhteensopivia vanhojen järjestelmien kanssa ja niitä on helppo asentaa. Yleisimmät lisäosasensorit ovat maaperäsensorit (kuva 4), sade- ja pakkasensorit sekä tuulisensorit. [1.]

Maaperäsensorit mittaavat pääasiassa maaperän kosteuden, mutta mahdollisesti muitakin arvoja, kuten lämpötilaa tai suolapitoisuutta. Ne yleensä sisältävät suoraan ominaisuuksia, jotka entiseen kastelujärjestelmään yhdistettäessä mahdollistavat kastelusyklien automatisoinnin kosteuden raja-arvojen puitteissa. Sade- ja pakkasensorit estävät kastelusyklin, jos ne havaitsevat pakkasta tai sadetta. Tuuli voi vaikuttaa kastelulaitteiden kastelupinta-alaan, minkä takia tuulisensoreita voidaan käyttää. Tuulisensorit estävät kastelusyklin, mikäli tuulen nopeus ylittää tietyn raja-arvon. [1.]



Kuva 4. Langaton Soilscout-maaperäsensori [6].

2.5 Kastelulaitteet

Jokainen kastelualue on erilainen, minkä takia myös kastelulaitteiden pitää sopia maaston ja alueen vaatimuksiin. Kastelulaitteet voidaan jakaa pääasiassa kolmeen eri luokkaan: suihkuttaviin laitteisiin (engl. spray sprinklers), pyöriviin laitteisiin (engl. rotating sprinklers) ja kupla- ja valutuslaitteisiin (engl. bubbler and drip irrigation devices). [4.]

Kastelulaitteita valitessa on hyvä ottaa huomioon seuraavat asiat:

- kastelualueen koko ja maaston muoto
- kasteltavan kasviston laji
- saatavilla oleva vedenpaine ja virtaus
- paikalliset olosuhteet, kuten tuuli, lämpötila ja sateen mahdollisuus
- maaperän tyyppi ja veden absorbointikyky
- kastelulaitteiden yhteensopivuus.

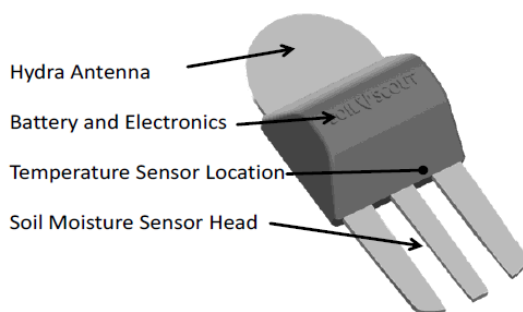
Kun valitaan sopivat kastelulaitteet alueelle, voidaan saada huomattavia säästöjä veden käytössä. [4.]

2.6 Työssä käytettävät laitteet

Helsingin kaupungin kulttuurin ja vapaa-ajan toimialan liikunnan ylläpitoyksikkö on asentanut kastelulaitteet ja kasteluohjaimen Pirkkolan liikuntapuiston nurmikentälle ja Käpylän liikuntapuiston nurmille. Kastelulaitteet ovat Rainbird-yhtiön Eagle 900- ja 950-sarjaa, jotka molemmat ovat pyöriviä kastelulaitteita (rotating sprinklers). Jokaiselle nurmelle on asennettu laidoille yhteensä 8 Eagle 950 -kastelulaitetta, ja ne suihkuttavat 180° ympärillensä. Lisäksi nurmien keskelle on asennettu kaksi Eagle 900 -kastelulaitetta, jotka suihkuttavat 360° ympärillensä. Kasteluohjain, malliltansa ESP-LXME, on ohjelmoitava logiikka (Programmable Logic Controller, PLC), joka hallitsee kaikkia kentällä olevia kastelulaitteita. Ohjelmoitava logiikka on perinteisesti teollisuusprosesseissa käytettävä tietokoneen hallintajärjestelmä, joka pystyy jatkuvasti tutkimaan syöttölaitteiden signaaleja, minkä perusteella logiikka tekee ohjauspäätöksiä. [7.]

Helsingin kaupunki on hankkinut Soilscout Hydra 100 -maaperäsensoreita (kuva 5) samoille alueille, minne uudet kastelujärjestelmät on asennettu. Sensoreissa on kolme anturia, jotka mittaavat kosteutta, lämpötilaa ja suolapitoisuutta maaperässä. Sensorit asetetaan maan alle, josta ne pystyvät lähettämään mitaustuloksia langattomasti joko Echo Repeater -signaalivahvistinasemalle tai Base Station -tukiasemalle, joista kumpikin asennetaan maan yläpuolelle. Echo Repeater -signaalivahvistinasema ei ole pakollinen osa järjestelmää, vaan sitä

käytetään vain, jos alue on niin suuri, että uloimpien sensorien signaalin kantavuus ei ylety Base Station -tukiasemalle.



The underground Soil Scout™ Hydra device

Kuva 5. Soilscout-maaperäsensoren osat [9].

Sensorit lähettävät mittaustuloksia riippumatta siitä, onko vastaanottavaa asemaa signaalialueella. Jos Echo Repeater -signaalivahvistinasema vastaanottaa signaalin, asema lähettää mittaustiedot ilman muutoksia eteenpäin suuremmalla signaalikantavuudella. Base Station -tukiasema on sensorien ja signaalivahvistinaseman lähettämien signaalien lopullinen kohde, koska Base Station -asema vastaanottaa mittaustiedot ja lähettää ne mobiiliverkkoyhteydellä Soilscoutin omaan pilvipalveluun. [9.] Perinteinen haaste maaperäsensoreilla on ollut langallisuus, epäluotettavuus ja laitteiden keho elinikä. Soilscout on kehittänyt ratkaisun ongelmaan luomalla langattoman sensorin, joka ei vaadi huoltoa ja jonka odotettu elinikä on 20 vuotta. [8.]

3 Älykkään kastelujärjestelmän hyödyt ja haasteet

3.1 Vedenkäyttö ja muut hyödyt

Helsingin kaupunki käyttää liikunta-alueiden kasteluun ja jäähdytykseen vuosittain 380 000 m³ vettä. Kokonaiskustannus käytetylle vedelle on 400 000 €. [51.] Monella Helsingin kaupungin liikunta-alueella vedenkulutus ei ole optimaalista.

Jalkapallonurmillä käytetään tyypillistä ajastinpohjaista kastelujärjestelmää, jossa määritellään, milloin kastelu tapahtuu ja kuinka pitkään kastelulaitteet kastelevat. Jalkapallonurmien kastelusta ovat perinteisesti olleet vastuussa liikuntapaikanhoitajat, jotka joutuvat itse arvioimaan, kuinka usein ja kuinka paljon nurmea kastellaan, jolloin inhimilliset virhearviot ovat mahdollisia.

Ylläpitoyksikkö on havainnut Helsingin kaupungin liikuntapaikanhoitajilla kahta negatiivista käyttäytymismallia kastelun suhteen: ylikastelu ja alikastelu. Ylikastelu on yleisempää, ja se perustuu inhimilliseen virhearviointiin sekä opetetun tiedon epäyhdenmukaisuuteen. Jalkapallonurmen tila arvioidaan silmämääräisesti, tai hyvin vähäisellä mittauksella, minkä jälkeen tehdään päätös kastella nurmea, vaikka nurmen kosteusprosentti olisi enemmän kuin tarpeeksi. Liikuntapaikanhoitajille opetettu tieto ei myös ole yhdenmukaista. Kaupungilla ei ole keskeistä kastelustrategiaa, jota pitäisi noudattaa. Kenttähenkilökunta oppii kastelustrategiat muilta, vanhemmilta työntekijöiltä perehdytysvaiheessa, jolloin epäoptimaaliset kastelustrategiat monien kymmenien vuosien takaa voivat nykypäivänäkin olla käytössä. Alikastelu on harvinaisempaa, mutta sitäkin on esiintynyt Helsingin kaupungin liikunta-alueilla. Yleisin syy alikastelulle on ollut liikuntapaikanhoitajien välinpitämättömyys.

Älykäs kastelujärjestelmä estää turhan vedenkulutuksen. Perinteiset ongelmat kuten yli- ja alikastelu voidaan estää, sillä dataan perustuva koneellinen arviointi nurmen tarpeista on luotettavampi kuin inhimillinen arviointi. Sen lisäksi optimaaliseen kasteluun tarvittavaa tietotaitoa ei tarvitse opettaa, vaan halutut parametrit voidaan suoraan syöttää järjestelmään. Erilaiset kastelujärjestelmät kuluttavat noin 70 % koko maapallon vedenkulutuksesta. [5.] Järkevät ja kustannustehokkaat kastelujärjestelmät voivat olla ratkaisu paikallisen tason haasteisiin kuten urheilukenttien kasteluun, mutta myös globaalin tason ongelmiin.

Urheilukenttien kasteluvaatimukset vaihtelevat jokaisen kentän kohdalla erilaisen olosuhteiden takia. Urheilukentän nurmikon kunto vaikuttaa urheilijoiden turvallisuuteen ja suorituskykyyn. Huonosti hoidettu nurmikko voi mahdollistaa esimerkiksi liukastumisia, jotka vaarantavat urheilijoiden turvallisuutta. Nurmikon

laatu myös vaikuttaa urheilupeleihin, sillä esimerkiksi pallon liikkuminen kentällä voi muuttua nurmikon kunnan takia. Oikein hoidetulla nurmikolla on urheilijoiden turvallisempi ja helpompi pelata. [27; 28; 29.]

Tyypillisesti urheilukentän nurmikon ylläpito vaatii päivittäistä huoltoa henkilökunnalta. Nurmikon maaperästä pitää kerätä dataa manuaalisesti ja sen perusteella säädellä kastelulaitteiden toimintaa. Älykäs kastelujärjestelmä automatisoi prosessin, jolloin ei tarvita enää päivittäistä huoltoa henkilökunnalta, ja voidaan säästää henkilöstö- ja ylläpitokustannuksissa. [6.]

3.2 Haasteet

Uuden kasteluohjaimen, lukuisten sensoreiden ja mahdollisesti uusien kastelulaitteiden hankinta ei ole halpaa, minkä takia ylläpitoyksikössä heräsi huoli siitä, onko investointi kannattavaa. On kuitenkin huomattava, että monella Helsingin jalkapallonurmella on entuudestaan vanhat kastelujärjestelmät, joiden päivitys on ylläpitoyksiköllä edessä. Ei ole tarpeellista päivittää kaikkia kastelujärjestelmiä älykkäiksi, vaan muutos voi olla asteittaista. Vanhoja kastelujärjestelmiä voidaan päivittää älykkääseen versioon silloin, kun järjestelmiä ollaan jo valmiiksi päivittämässä.

Liikuntaviraston sisällä heräsi myös kysymyksiä siitä, voiko vedenkulutuksessa säästää kouluttamalla liikuntapaikanhoitajia paremmin ja parantamalla organisaation sisäisiä esimies-työntekijäsuhteita. Kastelujärjestelmän täysi automatisaatio silti vaikuttaa helpommalta ratkaisulta, koska silloin järjestelmän toiminnasta poistetaan melkein kokonaan inhimilliset virheet, jotka välttämättä tulisivat eteen paremmasta koulutuksesta huolimatta.

Älykkäässä kastelujärjestelmässä tärkeässä asemassa ovat maaperäsensorit, jotka asennetaan nurmen maaperään, jolloin ne eivät mittaa suoraan pintatason kosteutta sadetustapahtuman jälkeen. Maaperäsensoreiden mittauksien on oltava luotettavia, ja niiden on heijastettava tarpeeksi tarkasti nurmen pintatason olosuhteita, koska nurmen terveyden kannalta oleellisin taso on nurmen ruohon

kasvutaso, jossa juuret kasvavat. Sport England -yhdistyksen mukaan kasvutason on oltava vähintään 150 mm [49, s. 14]. Pirkkolan jalkapallonurmella kasvutason havaittiin olevan keskimäärin 150–250 mm. Kasvutason asetettavien sensoreiden olisi hyvä heijastaa läheltä pintaa mitattuja lukemia, koska silloin maaperä ilmoittaa kosteuden suoraan kastelutapahtumien jälkeen ja ennen liiallista imeytymistä juuriin. Asian selvittämiseksi olisi suotavaa suorittaa tutkimusta, jotta voitaisiin varmistua Hydra100-maaperäsensoreiden soveltuvuudesta älykkääseen kastelujärjestelmään.

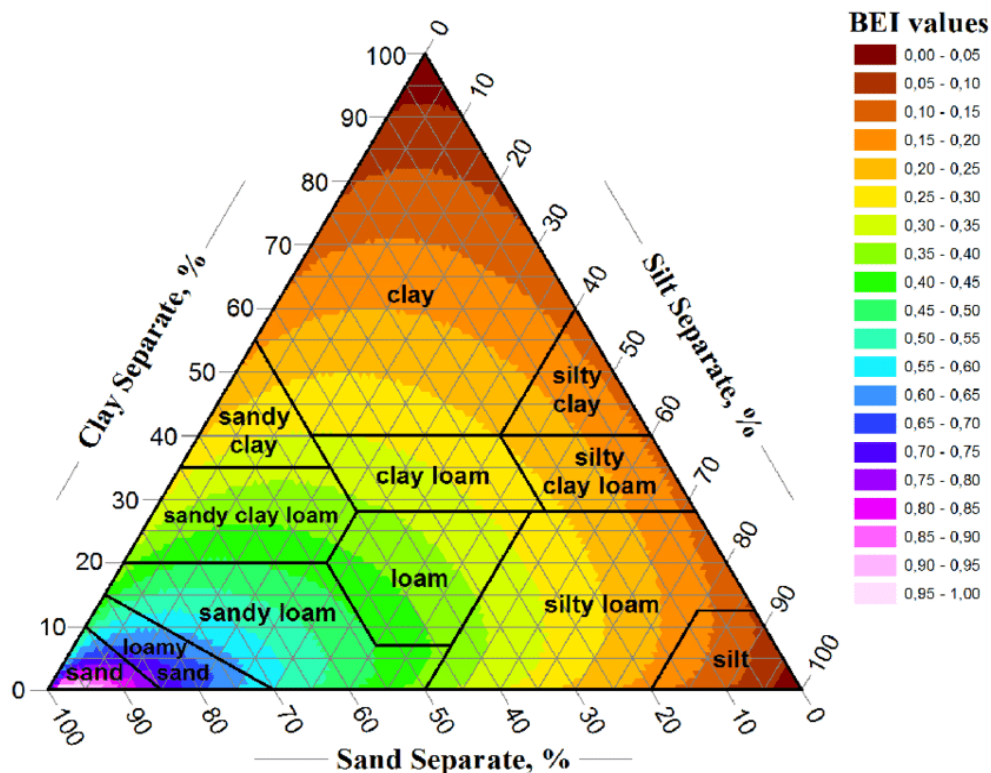
4 Hydra100-maaperäsensoreiden soveltuvuus nurmikentän kastelun ohjaamiseen

4.1 Jalkapallonurmen hoito

Jalkapallonurmen hoito alkaa nurmen perustamisesta. Perustamisessa on otettava huomioon alueen ilmasto. Kansainvälisen jalkapalloliiton (*Fédération Internationale de Football Association, FIFA*) julkaisemien jalkapallonurmen perustamisohjeiden mukaan Suomen ilmasto kuuluu ilmastoalueelle 3, joka on nimetty ”viileäksi mannerilmastoksi”. Ilmastoalue on luonnehdittu ohjeissa alueeksi, jossa on lämpimät kesät ja kylmät talvet ja jossa on kehnot olosuhteet alkukevällä ja loppusyksyllä. [34.]

Nurmen perustamisessa on otettava huomioon maaperän koostumus. Tarvittaessa on myös mahdollista rakentaa uusi maaperä nurmea varten. Maaperän ominaisuudet vaikuttavat nurmen hapenottokykyyn, veden kantokykyyn ja läpäisevyyteen sekä ravintoaineiden imeytymiseen. Kuvassa 6 nähdään, kuinka maaperän koostumus määräytyy sen sisältämän hiekan, lietteen ja saven suhteellisten määrien perusteella. Karkearakenteiset maaperät, kuten hiekka ja hiekan yhdistelmät, ovat suurihiukkaisia, jolloin ne eivät kykene pitämään suuria määriä vettä tai ravintoaineita. Karkearakenteiset maaperät kuivuvat nopeammin, ja ne eivät tiivisty. Hienorakenteiset maaperät, kuten savi ja saviyhdistelmät, ovat pienihiukkaisia, jolloin niillä on hyvä ravintoaine- ja vedenkantokyky.

Ne kuivuvat hitaammin kuin suurihiukkaiset maaperät, ja niille on tyypillistä pakautua tiiviiksi, jolloin ne läpäisevät vain niukasti vettä. [36.]

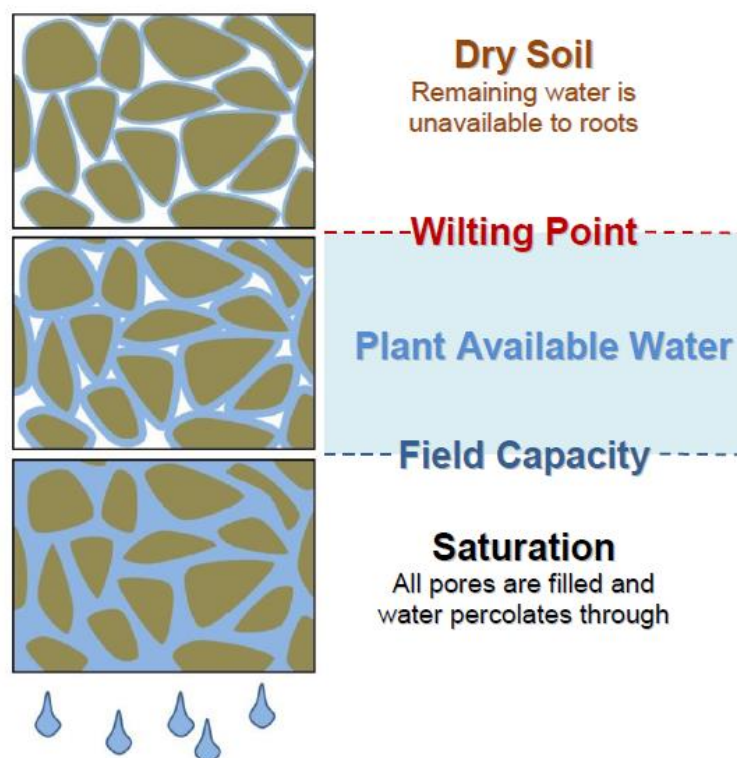


Kuva 6. Maaperän koostumuksen määräytyminen [40, s. 2].

Maaperän koostumus vaikuttaa huomattavasti nurmen kuntoon ja tarvittaviin huoltotoimenpiteisiin. Esimerkiksi erittäin sateisessa ilmastossa ei kannata perustaa jalkapallonurmea, jossa on vahvasti savinen maaperä. Maaperä kyllästyy eikä läpäise enää vettä, jolloin sadevesi tulvii nurmen päällä. Toisaalta kuivassa ilmastossa ei kannata perustaa vahvasti hiekkaista jalkapallonurmea, koska vesi läpäisee maaperän nopeasti eikä se ehdi imeytyä maaperään. [36.] Useimmissa tapauksissa maaperä kuitenkin on sekoitusyhdistelmä.

Maaperän optimaalinen vesipitoisuus riippuu maaperän koostumuksesta. Jokaisella maaperällä on ominainen lakastumispiste ja kenttäkapasiteetti. Lakastumispiste on piste, jossa maaperässä kasvaville kasveille ei ole enää saatavilla vettä. Kenttäkapasiteetti on piste, jossa maaperä sisältää maksimaalisen määrän vettä painovoiman aiheuttaman valumisen jälkeen. Lakastumispiste ja kent-

täkapasiteetti vaihtelevat riippuen maaperän koostumuksesta. Kuvassa 7 voidaan nähdä, että lakastumispisteen ja kenttäkapasiteetin välissä on tila, jossa maaperään valuva vesi on kasvien saatavilla. Optimaalinen vesipitoisuus sijaitsee pisteiden välitilassa, koska silloin vesi ei valu maaperän läpi, jolloin se ei saavuttaisi kasveja. Vettä ei myöskään ole kasveille liian vähän. [9, s. 9; 35.]



Kuva 7. Maaperän vesikylläisyysasteet [9, s. 9].

FIFA suosittelee jalkapallonurmen perustamisohjeissa, että Suomen ilmastossa käytetään vain viileään ilmastoon sopivia ruoholajeja: niittynurmikkaa (*Poa pratensis*) ja englanninraiheinää (*Lolium perenne*). Nurmi voidaan kasvattaa itse siemenillä suoraan jalkapallonurmen kasvualustalle tai tilaamalla valmis siirtoturmi muualta. Nurmikon kasvukykyyn vaikuttaa saatavilla olevien ravintoainemäärien määrä ja tasapaino sekä saatavan veden määrä. Tärkeimmät ravintoaineet nurmelle ovat typpi, fosfori ja kalium. On olemassa maaperän ravintoainetes-

tejä, joiden avulla ravintoaineiden määriä voidaan mitata. [37.] Jalkapalloanurmea on myös leikattava säännöllisesti lyhyemmäksi. Optimaaliseen leikkauskorkeuteen vaikuttavat voivat vaikuttaa esimerkiksi ruohon lajike tai nurmen käyttöaste. Liian lyhyeksi leikatun nurmikon juuret ovat matalat ja ravintoaineiden kantokyky laskee, jolloin nurmikon kunto heikkenee ja nurmikko tarvitsee enemmän lannoitteita ja kastelua. [37.]

Kun jalkapallonurmea käytetään tai nurmea hoidetaan raskailla koneilla, maaperä tiivistyy painosta. Vesi ei läpäise liian tiivistä maaperää, eikä happi pääse nurmikon juuriin. Maaperän tiivistymisen lievittämiseksi voidaan nurmikkoa ilmastaa (aerate). Ilmastamisessa tehdään reikiä tai viiltoja maa-ainekseen, jolloin vesi, happi ja ravintoaineet pääsevät kulkemaan juuriin asti. Ilmastaminen myös pehmentää maaperää ja vähentää orgaanisen aineksen kerääntymistä pinnalle. Orgaanisen aineksen kuten kuolleen nurmikon ja muiden kasvien kerääntyminen nurmen pinnalle vaikeuttaa veden ja ravinnon kulkeutumista nurmikon juuriin. Pieni kerros kuollutta orgaanista ainetta nurmikolla voi olla käyttäjille hyödyllistä, koska se pehmentää nurmea ja vähentää iskun vaikutusta, mikä puolestaan vähentää loukkaantumisen mahdollisuutta. [38.]

Erilaisilla ilmastussyvyyksillä ja työkaluilla saadaan erilaisia tuloksia aikaan [39; 34]. Suorapiikkisellä ilmastuskoneella saadaan luotua reikiä matalalle juuritasolle, joka sijaitsee noin 10–20 cm:n syvyydessä. Suorat piikit kuitenkin tiivistävät maaperää piikkien sivuilla ja pohjassa, jolloin ne voivat jättää tiiviitä alueita maaperään. Viiltävällä ilmastuskoneella voidaan luoda nurmikkoon viiltoja matalalla syvyydellä, mitä voidaan käyttää esimerkiksi nurmikon vaakatasokasvun lisäämisessä ja lisänurmikon kylvämisessä. Jatkuva tavallinen ilmastus voi aiheuttaa maaperän syväkerroksen entistä tiiviimmän pakkautumisen. Pakkautunut syväkerros tarkoittaa, että vesi läpäisee kerroksen hyvin kehnosti, mikä näkyy myös ylemmissä kerroksissa. Syväkerroksen pakkautumisen estämiseksi voidaan nurmella tehdä syväilmastusta. Syväilmastuksessa käytetään yli 25 cm pitkiä suoraa piikkejä, joilla luodaan syviä reikiä maaperään. [39.] Hyvän jalkapallonurmen hoito-ohjelmaan kuuluu yhdistelmä eri ilmastustekniikoita.

Työssä tutkitaan pääasiassa veden merkitystä jalkapallonurmessa. Jalkapallonurmen vedenottokykyyn ja veden läpäisevyyteen vaikuttavat maaperän koostumus, ilmavuus ja orgaanisen aineen määrä pinnalla. Jotta voidaan todeta Soilscout-sensoreiden olevan käyttökelpoisia automatisoinnissa, on varmistettava, että kasvualustan pohjalle tai keskelle laitettavat sensorit korreloivat nurmen pinnalla olevien kosteuslukemien kanssa. Sen lisäksi on selvitettävä optimaalinen syvyys Soilscout-sensoreille. Tutkimusten perusoletuksena on, että mitä lähempänä nurmen pintaa ollaan, sitä vähemmän on vettä ehtinyt imeytyä nurmeen, jolloin mittaukset kertovat maaperän todellisen kosteuden sadetusta-
pahtuman jälkeen

4.2 Tutkimussuunnitelmat

Tutkimusvaiheen suunnitelma oli suorittaa kaksi tutkimusta ja olosuhteiden sal-
liessa enemmän. Lopulta päädyttiin suorittamaan vain kaksi tutkimusta ai-
heesta. Ensimmäisen tutkimusjakson pituus oli kokonaisuudessaan 9 päivää.
Toisen tutkimusjakson pituus oli kokonaisuudessaan 4 päivää. Tutkimukset
suoritettiin työaikojen puitteissa, minkä takia toimistotyöaikojen jälkeen ja viikon-
loppujen aikana ei kerätty mittauksia. Mittauspaikaksi valikoitui Pirkkolan urhei-
lupuiston jalkapallonurmi.

Tutkimuksien tarkoitus oli tutkia veden kulkeutumista jalkapallonurmen maape-
rän läpi. Tavoitteena oli saada selkeä kuva siitä, kuinka paljon maaperän pinta-
kosteudesta heijastuu maanalaisissa maaperäsensoreissa ja miten sääolosuh-
teet vaikuttavat kosteuslukemiin. Ensimmäisen tutkimuksen jälkeen tavoitteita
laajennettiin ja lisätavoitteeksi lisättiin sensorien syvyyden vaikutus kosteusluke-
miin. Tutkimuksissa tarkkailtiin seuraavia muuttujia:

- Soilscout-maaperäsensoreiden kosteusmittaukset
- manuaalisesti tehdyt kosteusmittaukset nurmen pinnalta
- sateen määrä (mm/h)

- sateen intensiteetti
- ilman lämpötila
- pilvien määrä.

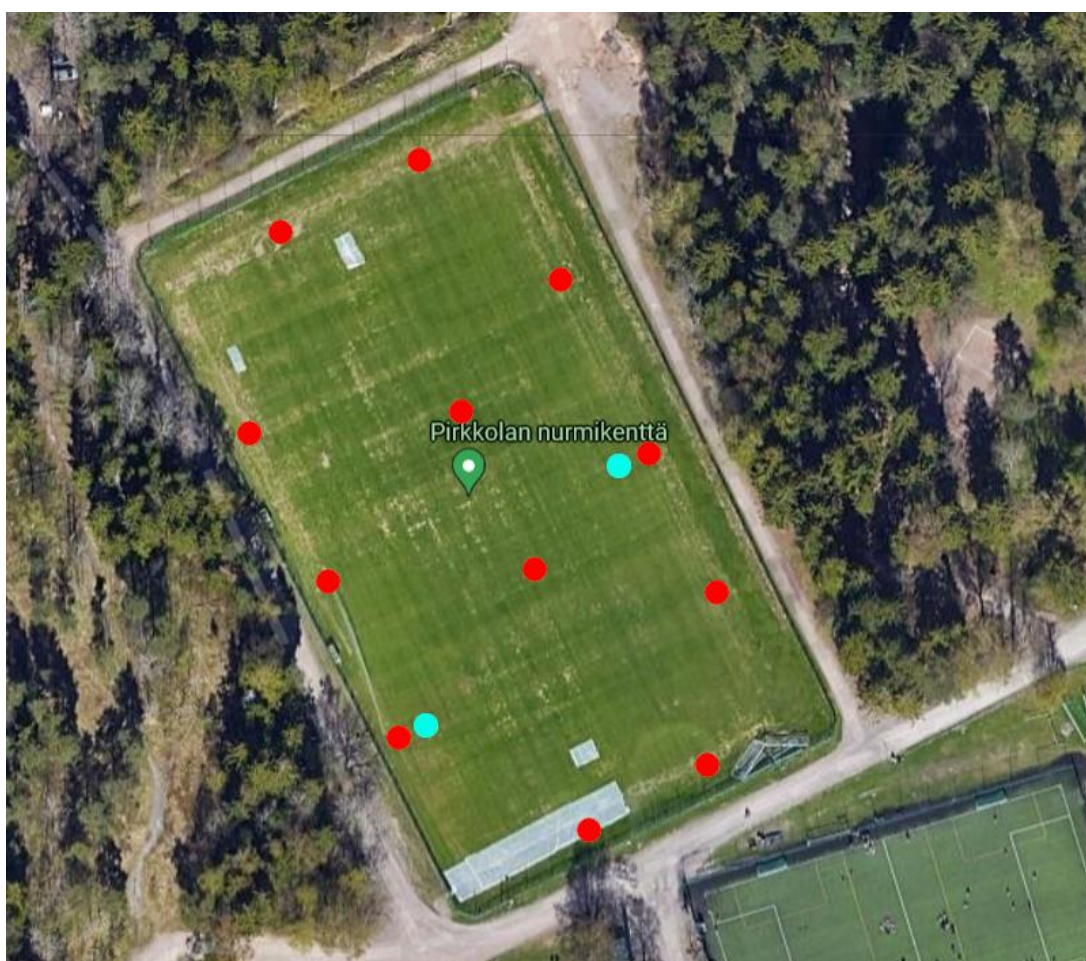
Soilscout-maaperäsensorit mittaavat asetetussa syvyydessä kosteutta ja lähetävät mittaukset langattomasti tukiasemalle, joka on asennettu jalkapallonurmen viereen. Tukiasema lähettää datan eteenpäin pilvipalveluun, josta data voidaan hakea rajapintaa käyttämällä. Soilscout Hydra 100 -maaperäsensori mittaa vesipitoisuutta mittaamalla maaperän reagointia sähkökenttään. Vesipitoisuuden mittaaminen sähkökenttää hyödyntämällä vaatii monta kalibrointiin liittyvää laskentakaavaa. Maaperäsensoren toimintaa hallitaan ohjelmistolla, joka määrittää, miten maaperän vesipitoisuutta mitataan.

Maaperässä alle 200 MHz:n vaihtovirrassa on olemassa pääasiassa kaksi ilmiötä, jotka määrittävät, miten maaperän vesi reagoi sähkökentän kanssa: kapasitanssi ja johtavuus. Kapasitanssi ilmenee maaperässä, kun vesimolekyylit (sähködipolit), liikkuvat sähkökentässä. Liike kuluttaa energiaa, jolloin maaperässä sähkövaraus latautuu ja purkautuu. Sähkövarauksen latausmäärä korreloi maaperässä olevan vesimäärän kanssa. Johtavuus ilmenee maaperässä, koska veden sisällä olevat ionit sisältävät sähkövirtaa. Negatiiviset ionit kulkevat positiivista anodia kohti, ja positiiviset ionit kulkevat negatiivista anodia kohti. Mitä vähemmän maaperässä on vettä, sitä vaikeampi näiden ionien on kulkea, jolloin nähdään, että sähköjohtavuus on suhteessa maaperän kosteuteen. [9, s. 6–7.]

Jalkapallonurmen pintakosteutta mitataan kosteusmittarilla. Ensimmäisessä tutkimuksessa käytetään Fieldscout TDR100 -kosteusmittaria, jossa on 12 cm:n pituiset maahan upotettavat anturit. Toisessa tutkimuksessa käytetään Fieldscout TDR150 -kosteusmittaria, jossa on 7,5 cm:n pituiset maahan upotettavat anturit. Kosteusmittareissa voidaan valita kosteuden mittaustapa. Tutkimuksissa käytettiin VWC-asetusta (Volumetric Water Content). VWC-mittauk-

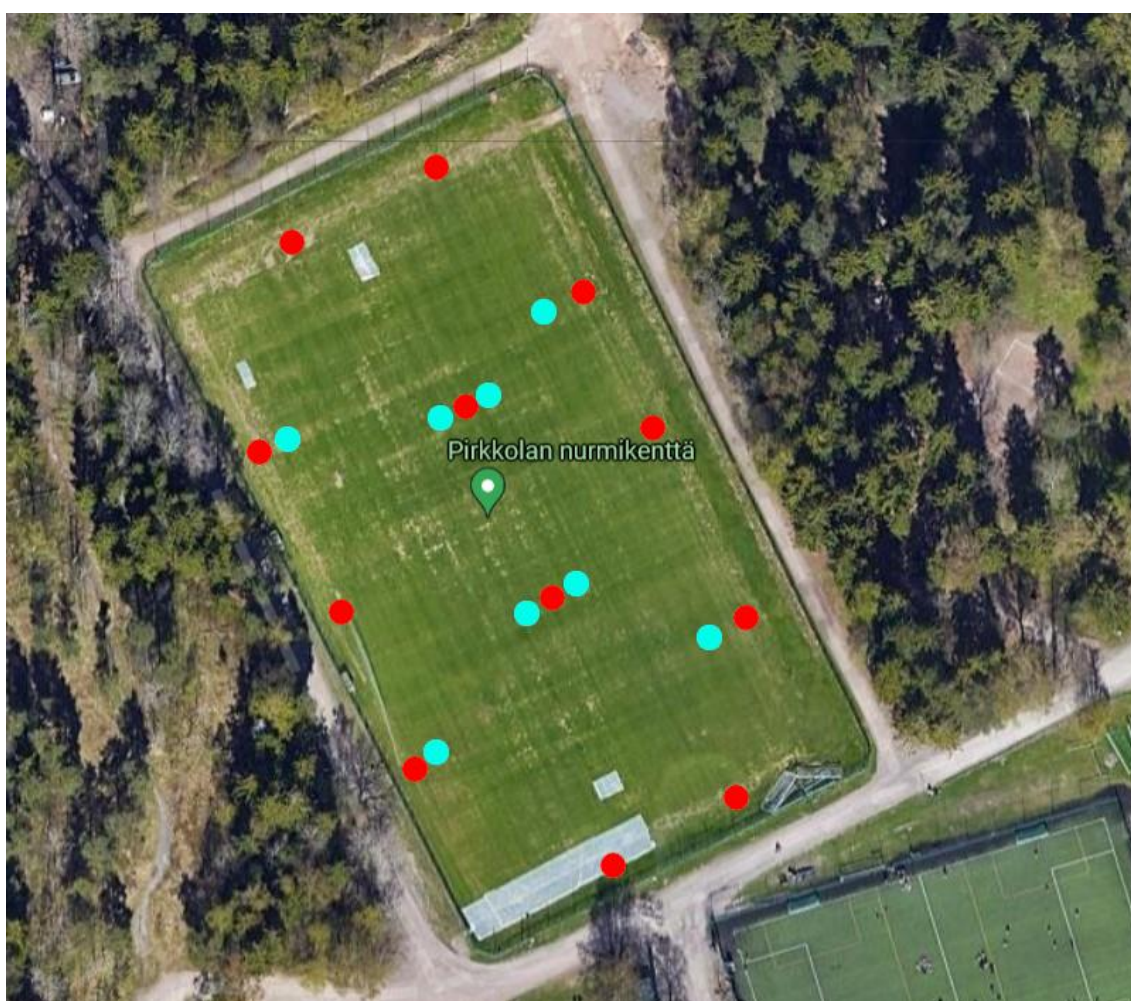
sessä ilmaistaan vesipitoisuus vertaamalla veden tilavuutta suhteessa maaperän tilavuuteen. Esimerkiksi 25 %:n vesipitoisuus voi tarkoittaa, että maaperäosuudesta, jonka tilavuus on 2 m^3 , vettä on $0,5 \text{ m}^3$. [35.] Manuaaliset kosteusmittaukset tehtiin samoissa paikoissa, kuin missä maaperäsensorit ovat, mutta vain nurmen pinnalta. Jokaisen paikan kohdalla mitattiin 5–10 kertaa lähialuetta (noin 10 cm^2 :n alue), josta kosteusmittari laski automaattisesti kosteuden keskiarvon. Sääolosuhteiden mittaamisessa käytetään julkisesti saatavilla olevia Ilmatieteenlaitoksen säätietoja, jotka voidaan saada joko rajapinnan kautta tai suoraan Excel-tiedostona.

Ensimmäisessä tutkimuksessa käytettiin kahta Soilscout Hydra 100 -maaperäsensoria. Sensorit asetettiin 15 cm:n syvyyteen ja metrin päähän nurmen laidalla olevista kastelulaitteista. Kuvassa 8 nähdään ensimmäisen vaiheen sensorien sijainnit kartalla.



Kuva 8. Ensimmäisen tutkimusvaiheen sensorien paikat (sensorit ovat vaaleansinisiä ja kastelulaitteet punaisia).

Toisessa tutkimuksessa käytettiin yhteensä kahdeksaa Soilscout Hydra 100 - maaperäsensoria. Sensorit asetettiin joko 25 cm:n tai 10 cm:n syvyyteen, sillä toisessa tutkimusvaiheessa haluttiin myös vertailla syvyyden merkitystä kosteuskemissa. Sensorit asetettiin 60 cm:n, 150 cm:n tai 250 cm:n päähän kastelulaitteista. Kuvassa 9 nähdään toisen vaiheen sensorien sijainnit kartalla. Kastelulaitteet sijaitsevat kentän reunoilla, minkä takia laitojen sensoreita ei toisessa vaiheessa haluttu asettaa kastelulaitteiden viereen, koska ne olisivat liian kaukana pelialueelta. Nurmen länsilaidalla (kuvassa 9 vasemmalla) sijaitsevien sensorien etäisyys kastelulaitteista on 150 cm. Itälaidan (kuvassa 9 oikealla) sensorien etäisyys on 250 cm, sillä itälaidan kastelulaitteet ovat kauimpana pelialueelta. Keskellä sijaitsevien sensorien etäisyys kastelulaitteista on vain 60 cm, koska ne sijaitsevat keskellä pelialuetta.



Kuva 9. Toisen tutkimusvaiheen sensorien paikat (sensorit ovat vaaleansinisiä ja kastelulaitteet punaisia).

4.3 Tutkimusten lopputulokset ja pohdinta

Tutkimustuloksissa havainnollistettiin pinta- ja syväkosteuden välinen ero käytämällä erotusmuuttujaa. Erotusmuuttuja on kahden luvun erotus, ja tutkimuksessa erotusmuuttuja laskettiin vähentämällä syväkosteuden mittaustulos pinta-kosteuden mittaustuloksesta. Mikäli erotusmuuttujat olisivat täysin samat otantojen havaintojen välillä, voitaisiin todeta, että pinta- ja syväkosteudet korreloivat täydellisesti. Positiivinen erotusmuuttuja tarkoittaa, että mittauskohdalla nurmen pinta oli kosteampi kuin syvemmillä. Toisinpäin, negatiivinen erotusmuuttuja tarkoittaa, että mittauskohdassa nurmen alla oli kosteampaa kuin pinnalla. Kummankin tutkimuksen aikana kastelujärjestelmä oli ajastettu kastelemaan nurmea päivittäin tasan 21.30. Laidalla sijaitsevat kastelulaitteet kastelivat 15 minuutin ajan kastelulaitetta kohden, ja keskellä kastelulaitteet kastelivat 30 minuutin ajan, koska ne pyörivät ympäri 360°. Tutkimuksissa ei mitattu, kuinka paljon vettä kastelujärjestelmä laittaa nurmelle neliöjuurta kohden.

Ensimmäisen tutkimusvaiheen lopputulokset kuvattuna erotusmuuttujilla nähdään liitteessä 1 ja kuvattuna puhtailla kosteusprosentteilla liitteessä 2. Ensimmäisessä tutkimuksessa mittaukset otettiin klo 7.00, 11.00 ja 15.00, eli kolme kertaa päivässä ja neljän tunnin välein. Tutkimus suoritettiin heinäkuussa 7.7.–15.7.2021. Tuloksista voidaan huomata, että tutkimuksen aikavälillä sade oli vähäistä, jolloin ainoa merkittävä kosteuden nousu tapahtui vain kastelujärjestelmän kastelun toimesta.

Liitteessä 1 huomataan, että itäpuolen mittauspaikalla erotusmuuttuja oli melkein aina positiivinen, eli pinnalla oli kosteampaa kuin maan alla. Toisaalta taas länsipuolen mittauspaikalla tilanne oli toisinpäin. Ilmiön voi selittää maaperän koostumuksen ja ilmavuuden satunnaisvaihtelu, eli maaperän koostumus tai ilmavuus voi vaihdella paikoittain nurmen sisällä. Ilmiöön voivat myös vaikuttaa nurmen laidoilla sijaitsevat puut, jotka varjostavat kenttää riippuen auringon kulkemasta. Auringonnousun aikaan nurmen länsipuoli saa enemmän säteilyä ja lämpöä, koska puut varjostavat nurmen itäpuolta. Lämpö aiheuttaa haihtumista,

minkä takia lounaspuolen mittauspaikalla pintakosteus on pienempi kuin syväkosteus. Koska mittaukset suoritettiin aamu- ja päiväsaikaan, lounaspuolella on ehtinyt haihtua enemmän kosteutta pinnalta. Liitteessä 1 on myös vaikea tehdä johtopäätöksiä siitä, onko pilvien määrä tai ilman lämpötila vaikuttanut erotusmuuttujiin. Liitteessä 2 nähtävissä puhtaissa kosteusprosentteissa kuitenkin huomataan, että kosteusprosentit laskevat, kun pilvien määrä vähenee. On todennäköistä, että suora auringonpaiste kiihdyttää veden haihtumista maaperästä, mikä vähentää pinta- ja syväkosteutta.

Itäpuolen mittauspaikalla erotusmuuttuja on lähempänä nolla-arvoa, mikä tarkoittaa, että kosteus siirtyy tasaisemmin pinnalta maan alle verrattuna lounaspuolen mittauspaikkaan. Kumpikin mittauspaikka osoittaa, että yksittäishavainnot eivät eroa huomattavasti keskiarvosta, enimmillään muutaman prosenttiyksikön verran. Tuloksien perusteella voidaan todeta, että Pirkkolan jalkapallonurmen maaperän kosteus 15 cm:n syvyydessä korreloi pinnan kosteuden kanssa. Erotusmuuttujan suuruus (pinta- ja syväkosteuden ero prosentteina) voi kuitenkin vaihdella kentällä, mikä tarkoittaa, että vesi liikkuu pinnalta maaperään eri tahtia riippuen sijainnin maaperän koostumuksesta ja ilmavuudesta.

Toisen tutkimusvaiheen lopputulokset kuvattuna erotusmuuttujilla nähdään liitteessä 3. Toisesta tutkimusvaiheesta ei luotu kuvaajaa puhtailla kosteusprosentteilla, koska otoksia oli liikaa, jotta ne olisi voitu näyttää selvästi kuvaajassa. Toisessa tutkimuksessa mittaukset otettiin klo 7.00, 10.30 ja 14.00. Tutkimuksen toisena päivänä jouduttiin viimeinen mittaus ottamaan poikkeuksellisesti klo 12.00. Tutkimus suoritettiin syyskuussa 6.9.–9.9.2021. Toisessa tutkimuksessa asetettiin sensoreita 10 cm:n ja 25 cm:n syvyyteen. Sensorit oli asetettu symmetrisesti kummallekin nurmen puoliskolle (kuva 9). Toisessa tutkimuksessa sateen määrä oli myös vähäistä, jolloin ainoa merkittävä kosteuden nousu tuli kastelujärjestelmän kastelun toimesta. Toisessa tutkimuksessa keskilämpötila oli laskenut verrattuna ensimmäiseen tutkimukseen.

Tuloksissa voidaan nähdä, että vain kahden mittauspaikan erotusmuuttujat olivat huomattavasti negatiiviset. Mittauspaikat olivat nimeltään ”Pohjoispuolen

keskisprinkleriltä vasemmalle 25 cm” ja ”Luodepuolen laita 25 cm”. Kummallakin mittauspaiikalla syväkosteus oli suurempi kuin pintakosteus, ja kummallakin paikalla sensorin sijainti 25 cm:n syvyydessä. Tuloksista voidaan huomata, että nolla-arvoa hipovat havainnot ovat myös mittauspaiikoista, jossa sensori sijainti 25 cm:n syvyydessä. Lopuissa mittauspaiikoissa, joissa sensori on 10 cm:n syvyydessä, erotusmuuttujat ovat aina positiiviset. Voidaan todeta, että kun sensori asetetaan 10 cm:n syvyyteen, niin pintakosteus on korkeampi kuin kosteus 10 cm:n syvyydessä. Kun sensori on 25 cm:n syvyydessä, pintakosteus on harvoin suurempi kuin syväkosteus. Mahdollinen selitys ilmiölle on, että maaperän ylimmät kerrokset läpäisevät vettä paremmin kuin alemmat kerrokset. Toinen mahdollisuus on, että ylin maaperän kerros on ilmavampi kuin pohjakerrokset. Kummassakin tapauksessa vesi läpäisee kerroksen 10 cm:n syvyydessä nopeammin kuin 25 cm:n syvyydessä.

Tutkimuksien lopputuloksista voidaan päätellä, että nurmen pintakosteus keskimäärin korreloi pinnanalaisen kosteuden kanssa 10:n, 15:n ja 25 cm:n syvyyksissä. Tuloksista nähdään, että erotusmuuttujaan, eli pinta- ja syväkosteuden väliseen eroon, vaikuttaa se, kuinka syvältä mittauksia otetaan. Kaikkien otoksien havainnoissa näkyi satunnaisvaihtelua, jonka tarkkaa syytä ei pystytty selittämään. Otoksien erotusmuuttujilla oli vaihtelevat keskiarvot, vaikka mittaussyvyys oli sama. On mahdollista, että vaihtelevuuteen vaikuttavat maaperän koostumus ja ilmavuus, jotka vaikuttavat siihen, kuinka vesi käyttäytyy maaperässä. [35.] Tutkimukset osoittavat, että kastelun älykäs automatisaatio on mahdollista, koska Soilscout Hydra100 -sensorit korreloivat nurmen pinnan kosteuden muutoksien kanssa.

Tutkimukset tuottivat uutta tietoa Soilscout Hydra100 -sensorien soveltuvuudesta älykkään automatisaation saavuttamiseksi. Tutkimusmenetelmät olivat kuitenkin osittain alkeelliset, mikä tarkoittaa, että lopputuloksista ei voida tehdä vakuuttavia johtopäätöksiä. Tutkimukset suoritettiin toimistotyöaikojen puitteissa, mutta optimaalisessa tilanteessa mittauksia suoritettaisiin ympäri vuorokauden viikon jokaisena päivänä tietyllä intervallilla. Tutkimusjaksot olivat myös

lyhyet. Pinta- ja syväkosteuden käyttäytymisestä saisi laajemman kuvan, jos tutkimusjakso olisi vähintään 2–4 viikon pituinen. Tutkimuksissa käytetyt mittaustintervallit olivat tyydyttäviä, sillä tutkimuksien perusteella kosteuden vaihtelu normaaleissa sääolosuhteissa (ei sadetta) on hidasta.

Tulevissa tutkimuksissa olisi suotavaa suorittaa perusteellinen nurmen maaperän koostumuksen selvitys. Pirkkolan jalkapallonurmen maaperä oli vaihtelevaa, päällimmäisin savikerros oli osittain 25 cm syvä ja joissain paikoissa alle 15 cm. Maaperän koostumusta mittauspaikeilla ei kuitenkaan selvitetty tutkimuksia varten. Tutkimuksissa ei selvitetty mittauspaikeilla maaperän vedenläpäisykykyä eli ilmavuutta. Ilmavuus vaikuttaa huomattavasti siihen, kuinka nopeasti vesi läpäisee maaperän, mikä vaikuttaisi tutkimusten mittauksiin. Mikäli tutkimuksia suoritettaisiin hyvin perustetulla ja hoidetulla jalkapallonurmella, voitaisiin olettaa, että maaperän koostumuksella ja ilmavuudella ei olisi suuria eroja. Kuitenkin tulevien tutkimusten oikeellisuuden varmistamiseksi olisi silti suotavaa, että ilmavuus mitattaisiin mittauspaikeilla.

Tutkimuksissa ei selvitetty kastelujärjestelmän vedenkulutusta, eli kuinka paljon vettä nurmelle laitettiin yhdellä kastelukerralla. Helsingin kaupunki käyttää muutamalla jalkapallonurmella Smartvatten-vesimittareita, jotka mittaavat, kuinka paljon vettä tuloputken läpi menee. Määrä on tyypillisesti vaihdellut välillä 30 m³ – 60 m³, mutta tutkimusten aikana ei määriä mitattu. Tulevissa tutkimuksissa olisi suotavaa käyttää vesimittareita, joiden avulla laskettaisiin jokaisen kastelukerran käyttämä veden määrä. Oikein asennetut kastelulaitteet myös kastelevat nurmea tasaisesti, jolloin paikallisten kastelumäärien vaihtelun pitäisi olla pientä. Kun voidaan olettaa kastelun tasaisuus ja tiedetään käytetyn veden määrä sekä nurmen pinta-ala, voidaan laskea keskimääräinen vedenkäyttö neliometriä kohden. Yleinen tapa ilmaista veden määrä neliometriä kohden on sadanta eli sademäärä. Yksi millimetri sadetta tarkoittaa, että neliometrillä kokoiselle alueelle on kertynyt yksi litra. [42.] Tieto kastelussa käytetystä veden määrästä voi kertoa, kuinka paljon vedestä valuu alimmille kerroksille ja miten se ilmenee sensorin mittauksissa.

5 Älykkään kastelujärjestelmän monitorointialusta

5.1 Monitorointialustan käyttötarkoitus

Insinööriyössä luotiin uusi web-sivu, jonka tarkoituksena oli toimia älykkään kastelujärjestelmän hallintakeskuksena. Web-sivulla käyttäjä pystyy tutkimaan nurmelle asennettujen maaperäsensoreiden lähettämää dataa ja hallitsemaan järjestelmän sisäistä logiikkaa ja kastelulaitteiden toimintaa. Monitorointialustan kautta voidaan tutkia älykkään kastelujärjestelmän toimivuutta ja hallita tarvittaessa sen toimintaa.

Helsingin kaupungin kulttuurin ja vapaa-ajan toimialan liikunnan ylläpitoyksikkö esitti seuraavat vaatimukset monitorointialustan toiminnoista:

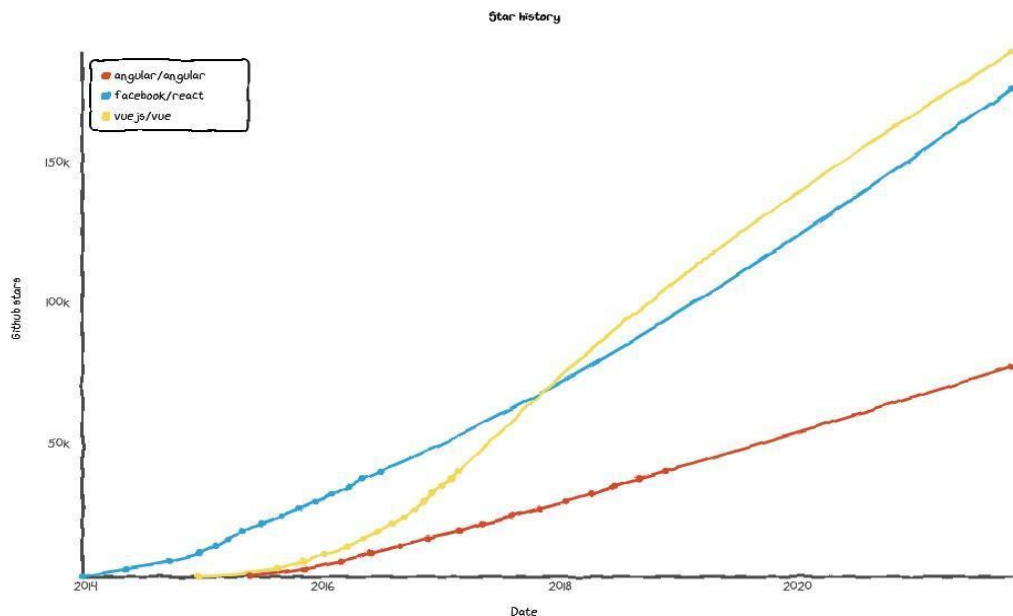
- nurmikohtaiset näkymät visualisoituna
- maaperäsensoreiden nykyiset sekä historialliset arvot
- vedenkulutuksen tiedot ja vertailu
- graafiset käyrät ja tilastot visualisoinnin apuna
- kastelulaitteiden etähallinta
- kastelulaitteiden toiminnan monitorointi
- sisäinen kastelulogiikka
- käyttäjähallinta
- liikuntakiinteistöjen ja jalkapallonurmien hallinta järjestelmässä.

5.2 Teknologiat ja työkalut

Nykyaikainen web-ohjelmistokehitys jaetaan kahteen osa-alueeseen: selainpuoli ja palvelin. Selainpuoli (front-end) tarkoittaa graafisen käyttöliittymän kokonaisuutta, jonka käyttäjä näkee. Palvelinpuoli (back-end) tarkoittaa sivuston palvelimella pyörivän koodin kokonaisuutta, joka käsittelee esimerkiksi tunnistautumisen tai tietokantojen käsittelyn. Selainpuolen teknologiaksi valikoitui Vue.js-ohjelmistokehitys. Palvelinpuolen teknologiaksi valikoitui Nest.js-ohjelmistokehitys.

5.3 Selainpuoli

Selainpuolen ohjelmistokehityksessä on noussut viime vuosina suosioon kolme ohjelmistokehystä: React, Angular ja Vue (kuva 10). Työn alussa punnittiin kunkin ohjelmistokehityksen vahvuuksia ja heikkouksia. Kaikissa kolmessa ohjelmistokehityksessä voidaan käyttää ohjelmointikielenä Javascriptiä, mutta niissä on myös mahdollista käyttää Typescriptiä, joka on vahvasti tyypitettyä Javascriptiä. Selainpuolen ohjelmistokehityksen valinnassa otettiin huomioon projektin laajuus, käyttötarkoitus ja ohjelmistokehityksen helppokäyttöisyys.

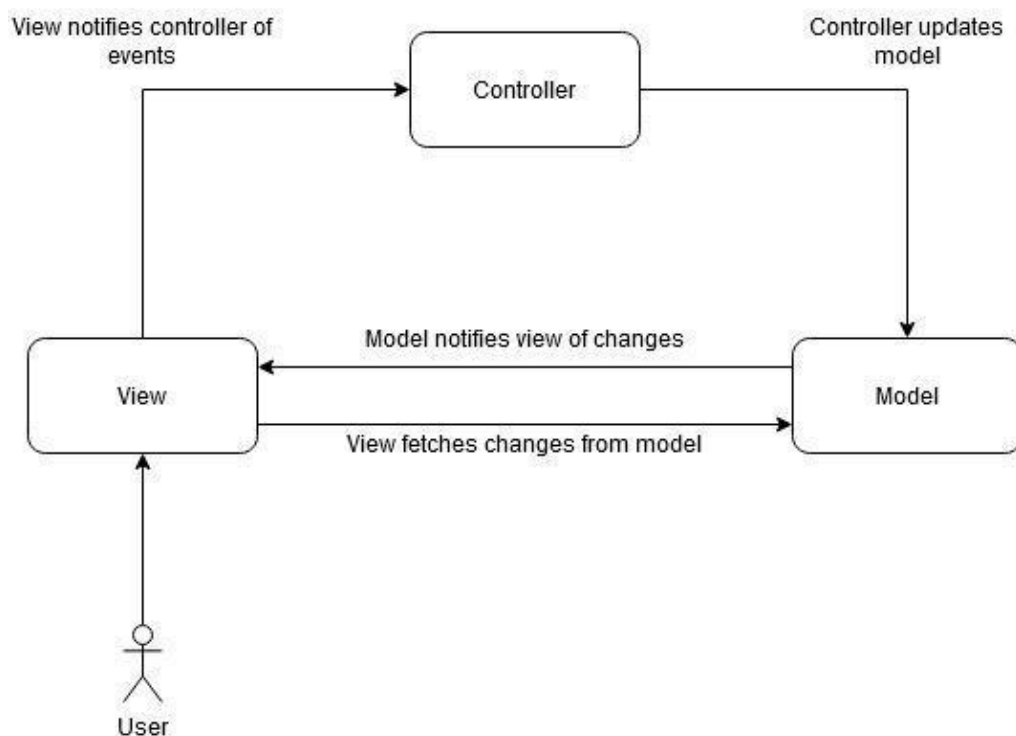


Kuva 10. Vertailtujen ohjelmistokehysten suosio Star History -sivustolla [12].

Perinteisissä web-ohjelmistoissa jokainen interaktio on lähettänyt HTTP-pyyntöön palvelimelle. Pyyntö on palauttanut käyttäjälle halutun HTML-sivun, kuvan tai muun sisällön. Perinteisessä mallissa selain päivittyy jokaisella kerralla, kun palvelin lähettää vastauksen. [16.] Nykyajan web-ohjelmistot käyttävät SPA-mallia (Single page application). Siinä on vain yksi aloitus HTML-sivu, jonka palvelin palauttaa. HTML-sivu muokkaa sisältöään käyttäjän vaikutuksesta, jolloin palvelimen ei tarvitse palauttaa erillistä HTML-sivua jokaisen käyttäjän toiminnon jälkeen. Sivun muokkaaminen tapahtuu selaimen sisällä hyödyntämällä Javascript-toimintoja. [16.] Jokainen tässä työssä vertailtu ohjelmistokehitys käyttää SPA-mallia.

Nykyaikainen web-sivu koostuu komponenteista. Komponentti on looginen kokonaisuus, joka pitää sisällään graafisen näkymän sekä oman toiminnallisuuden. Komponenttien käyttötarkoitus on luoda uudelleenkäytettäviä ja muusta ohjelmistosta eristettyjä osia web-sivulle, mikä helpottaa ohjelmiston luettavuutta ja nopeuttaa tulevaisuuden ohjelmistokehitystä. Komponentin graafinen näkymä on tyypillisesti HTML-formaatissa. Komponenteilla on tyypillisesti yksi tai useampia käyttötarkoituksia, jotka määrittävät komponentin sisäisillä funktioilla. [49.] Esimerkiksi kalenterikomponentissa voi olla graafinen näkymä, joka näyttää kuukauden päivät. Kalenterikomponentin sisällä voi olla funktioita, jotka hakevat palvelimelta tapahtumia, jotka merkitään päivämäärän mukaan kalenterin graafiseen näkymään.

AngularJS on vuonna 2010 julkaistu Googlen kehittämä ohjelmistokehys. Vuonna 2016 julkaistiin Angular 2, usein nimetty pelkästään Angulariksi, joka uudisti ohjelmistokehysten kokonaan. Angular käyttää MVW (Model-view-whatever) -arkkitehtuuria, mutta usein arkkitehtuuria sovelletaan MVC (Model-view-controller) -muodossa. MVC-arkkitehtuuri tarkoittaa ohjelmiston funktionaalisuuden jakamista kolmeen kokonaisuuteen: malli, näkymä ja ohjain (kuva 11). Malli (model) tarkoittaa ohjelmistossa tiedon tallentamisen ja käsittelyn kokonaisuutta. Näkymä (view) tarkoittaa ohjelmiston graafisen käyttöliittymän kokonaisuutta. Ohjain (controller) käsittelee ja suorittaa käyttäjän antamia käskyjä. [17.]



Kuva 11. MVC-arkkitehtuurin toimintatapa [17].

MVC-arkkitehtuuri luokittelee ohjelmiston osat loogisiin kokonaisuuksiin, mikä parantaa koodin luettavuutta. Angular myös käyttää komponenttien mallipohjana tavallisia HTML-tageja, mikä helpottaa koodin luettavuutta. Angularissa on mahdollista käyttää Javascriptiä, mutta suuri osa ohjelmistokehyksestä on suunniteltu Typescriptille, minkä takia Typescriptin käyttäminen on suositeltavaa. Angularilla on suuri kehittäjäyhteisö, jonka ansiosta Angularille on saatavilla monia kolmannen osapuolen ratkaisuja ja kehityspaketteja. Ohjelmistoke-

hys ei käytä virtuaalista dokumenttioliomallia (DOM). Dokumenttioliomalli kuvaillee web-dokumentin (esimerkiksi web-sivun) rakennetta. Virtuaalinen dokumenttioliomalli on kopio mallista. Virtuaalinen DOM mahdollistaa web-sivun osittaisen renderöinnin, sen sijaan, että koko DOM pitäisi ladata uudestaan. Angular on suunniteltu monimutkaisille ja suurille ohjelmistoille, minkä takia sen käsitteiden ja syntaksin opettelu voi olla haastavaa verrattuna muihin vertailtaviin ohjelmistokehyksiin. [13; 14.]

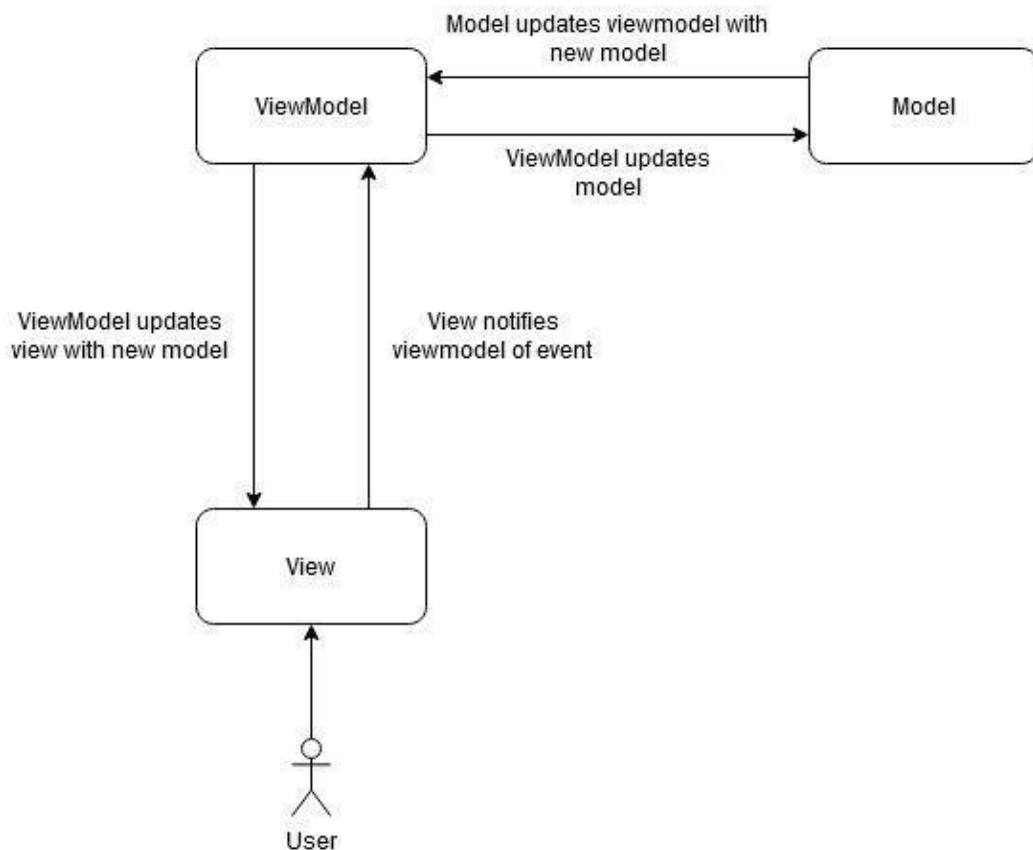
ReactJS ei ole varsinainen ohjelmistokehys, vaan se on Javascript-kirjasto. Sen on kehittänyt Facebookin ohjelmistokehittäjä Jordan Walke, ja se julkaistiin toukokuussa 2013. ReactJS ei käytä tyypillisiä mallipohjia. Perinteinen HTML-rakenne on paikattu JSX-laajennuksella. JSX (Javascript XML) on syntaksi, jonka avulla HTML-rakenteita voidaan ilmaista Javascriptin avulla. Se tarkoittaa, että HTML-rakenteen käsittelyssä voidaan käyttää kaikkia Javascriptin ominaisuuksia. ReactJS käyttää virtuaalista dokumenttioliomallia, joka nopeuttaa käyttöliittymän muutoksien renderöintiä.

ReactJS on yksi suosituimmista teknologioista selainpuolen kehityksessä, ja sen kehittäjänä toimii suuri teknologiayritys Facebook, minkä takia ReactJS saa paljon tukea ja sille on kehitetty lukuisia kolmannen osapuolen kirjastoja ja moduuleja. Koska ReactJS on kirjasto, se tarkoittaa, että pelkän ydinkirjaston käyttömahdollisuudet ovat rajalliset. Kehittäjän täytyy hyödyntää kolmannen osapuolen kirjastoja ja moduuleja ohjelmiston kehittämiseen, mikä voi vaikeuttaa oppimista ja pidentää käyttöönottoaikaa. ReactJS ei käytä varsinaista arkkitehtuurimallia, kuten MVC-mallia. Ohjelmiston rakenteesta päättää itse kehittäjä, mikä lisää kehittäjän vastuusta ohjelmiston suunnittelussa. ReactJS:n, ja sille kehitettyjen oheiskirjastojen opettelu voi olla haastavaa, mutta toisaalta ne tarjoavat laajat mahdollisuudet ohjelmistokehityksessä. [13; 14.]

Vue.js on Evan Youn vuonna 2014 kehittämä ohjelmistokehys. Evan You on ennen ollut ohjelmistokehittäjä Googlella, missä hän käytti AngularJS-ohjelmistokehystä. Hänen filosofiansa Vue.js:n kehityksessä oli ottaa AngularJS-ohjelmistokehysten parhaat osat ja tehdä siitä kevyt versio. Vue.js käyttää perinteisiä

mallipohjia, jotka ilmaistaan HTML-syntaksilla. Vue.js myös käyttää virtuaalista dokumenttioliomallia kuten ReactJS. Vue.js käyttää MVVM-arkkitehtuuria (Model-View-ViewModel). MVVM-arkkitehtuurissa on samoja ominaisuuksia kuin MVC-arkkitehtuurissa. Kummassakin arkkitehtuurissa on malli- ja näkymäosat, mutta ne eroavat ohjainosiossa. MVC-arkkitehtuurissa näkymä (view) lähettää käyttäjän toiminnasta tiedon ohjaimelle (controller), joka lähettää tiedon eteenpäin mallille (model). Malli päivittyy ja ilmoittaa näkymälle, joka hakee päivitettyt tiedot mallilta. [13; 14; 15.]

MVVM-arkkitehtuurissa (kuva 12) näkymä (view) lähettää käyttäjän toiminnasta tiedon näkymämallille (ViewModel), joka lähettää tiedon mallille (model). Malli lähettää päinvastaisesti päivitetyn tiedon näkymämallille ja takaisin näkymälle.



Kuva 12. MVVM-arkkitehtuurin toimintatapa [18].

Vue.js on nuorempi ohjelmistokehys kuin muut vertailussa olleet kehukset. Vuen kehittäjäyhteisö ei ole yhtä suuri, eikä kolmannen osapuolen moduuleita ja kehityspaketteja ole kehitetty yhtä paljon. Vue.js on myös tunnettu sen mata-lastasta oppimiskynnyksestä, koska Vuen ohjelmistokehys on tiivistetty kokonaisuus verrattuna sen vertailukohteisiin.

Monitorointialustan toimintavaatimukset eivät olleet laajat. Sen lisäksi monitorointialusta luotiin samanaikaisesti nurmitutkimuksien ja kastelun automatisaation kanssa, minkä takia saattoi työn aikana esiintyä aikarajoitteita. Siksi selainpuolen teknologian valintakriteereistä tärkein oli teknologian helppokäyttöisyys ja käyttöönottonopeus. Monitorointialustan pieni koko tarkoitti myös sitä, että valitun teknologian suorituskyky ei ollut oleellista.

Angular ei soveltunut monitorointialustan luontiin, koska se on laaja ja monimutkainen ohjelmistokehys, jonka oppimisessa kuluu aikaa. ReactJS sisältää enemmän muokattavuutta kuin Vue.js, joka kuluttaa kehittäjän aikaa. Esimerkiksi kun komponentti päivittyy, koko HTML-dokumentin päivittämisen sijasta pitää ReactJS-ohjelmistokehyksessä määrittää, mitkä komponentit päivittyvät. Vue.js-ohjelmistokehyksessä komponenttien päivityksen hoitaa itse ohjelmistokehys, jolloin ohjelmistokehittäjän ei tarvitse käyttää aikaa optimisointiin. [14.] ReactJS-ohjelmistokehys ei myöskään noudata itsestään arkkitehtuurimallia, minkä takia ohjelmistokehittäjä joutuu käyttämään aikaa ohjelmistorakenteen suunnitteluun. Vue.js-ohjelmistokehyksen käyttämä MVVM-arkkitehtuuri tarkoittaa, että kehys automaattisesti järjestee osia loogiseen järjestykseen, jolloin kehittäjän tarvitsee käyttää vähemmän aikaa arkkitehtuurin suunnitteluun. Vue.js-ohjelmistokehyksen syntaksi ja ohjelmointikäytännöt on helpompi opetella kuin ReactJS-ohjelmistokehyksessä. [13; 14.] Lopulta monitorointialustan selainpuolen teknologiaksi valikoitui Vue.js-ohjelmistokehys.

5.4 Rajapinnat ja palvelinpuoli

Pekka Korhonen, CGI:n tekninen arkkitehti, määrittelee rajapinnan seuraavasti:

API (Application Programming Interface) on ohjelmointirajapinta, jota käyttäen sovellukset kommunikoivat keskenään [19].

Rajapintoja on yleisesti kahdenlaisia: sisäisiä ja ulkoisia. Sisäistä rajapintaa käytetään sovelluksen sisäisissä toiminnoissa. Ulkoinen rajapinta on sovelluksen ulkoisille tahoille tarkoitettu rajapinta, joka julkaistaan yleensä joko SOAP (Service Oriented Architecture)- tai REST (Representational State Transfer) -arkkitehtuurityylillä. SOAP-arkkitehtuuri käyttää XML-esitysmuotoa, ja sen tiedonsiirtoprotokolla on yleensä HTTP. REST-arkkitehtuuri on alan standardi, joka on sidottu käyttämään HTTP-tiedonsiirtoprotokollaa. REST-arkkitehtuuri on helppokäyttöisempi ja kevyempi kuin SOAP-arkkitehtuuri, minkä takia siitä on kehittynyt alan standardi. Yleisin tiedonesitysmuoto REST-arkkitehtuurissa on JSON (Javascript Object Notation), mutta on olemassa myös muita tiedonesitysmuoto vaihtoehtoja, kuten XML. [19.]

Monitorointialustan pitää kommunikoida kolmen ulkoisen rajapinnan kanssa: Soilscout-maaperäsensiorajapinnan, Smartvatten-vesimittarirajapinnan ja Rainbird-kastelulaiterajapinnan. Soilscout-rajapinnan avulla voidaan hakea maaperäsensoreiden laite- ja mittaustietoja. Tiedoilla voidaan luoda web-ohjelmistolle komponentteja, jotka monitoroivat Soilscout-maaperäsensoreiden tilannetta ja sitä kautta kokonaisen jalkapallonurmen maaperän tilannetta. Smartvatten-rajapinnan avulla voidaan hakea vedenkulutustiedot kenttien kastelujärjestelmistä. Vedenkulutustiedoilla voidaan web-sivulle luoda komponentteja, joilla tutkitaan nurmien vedenkulutustietoja ja lasketaan vesilaskun määriä. Rainbird-kastelulaiterajapinnan avulla voidaan kommunikoida kastelulaitteiden ohjausyksikön kanssa, jolloin voidaan rajapinnan kautta hallita kastelulaitteiden kasteluaikoja, ajankohtia ja pituuksia. Hallinnan lisäksi voidaan Rainbird-rajapinnasta hakea kastelulaitteiden laitetietoja.

Monitorointialustan palvelinpuolen teknologiaksi valikoitui Nest.js-ohjelmistokehys. Se on ohjelmistokehys, jolla voidaan luoda Node.js-ohjelmistokehykseen perustuvia palvelinpuolen sovelluksia. Node.js on alan standardi palvelinpuolen sovellutuksissa. Se on palvelinpuolen ohjelmaksi helppokäyttöinen, ja se käyt-

tää Javascript-koodikieltä, joka on ennestään tuttu monelle ohjelmistokehittäjälle. Nest.js ei pelkästään helpota Node.js-sovellusten luomista, vaan se myös helpottaa muiden Node.js-ympäristössä olevien oheisohjelmistokehysten (esimerkiksi Express) sisällyttämistä sovellukseen. Nest.js-ohjelmistokehityksen dokumentaatioissa kuvaillaan kehityksen toiminnallisuutta seuraavasti:

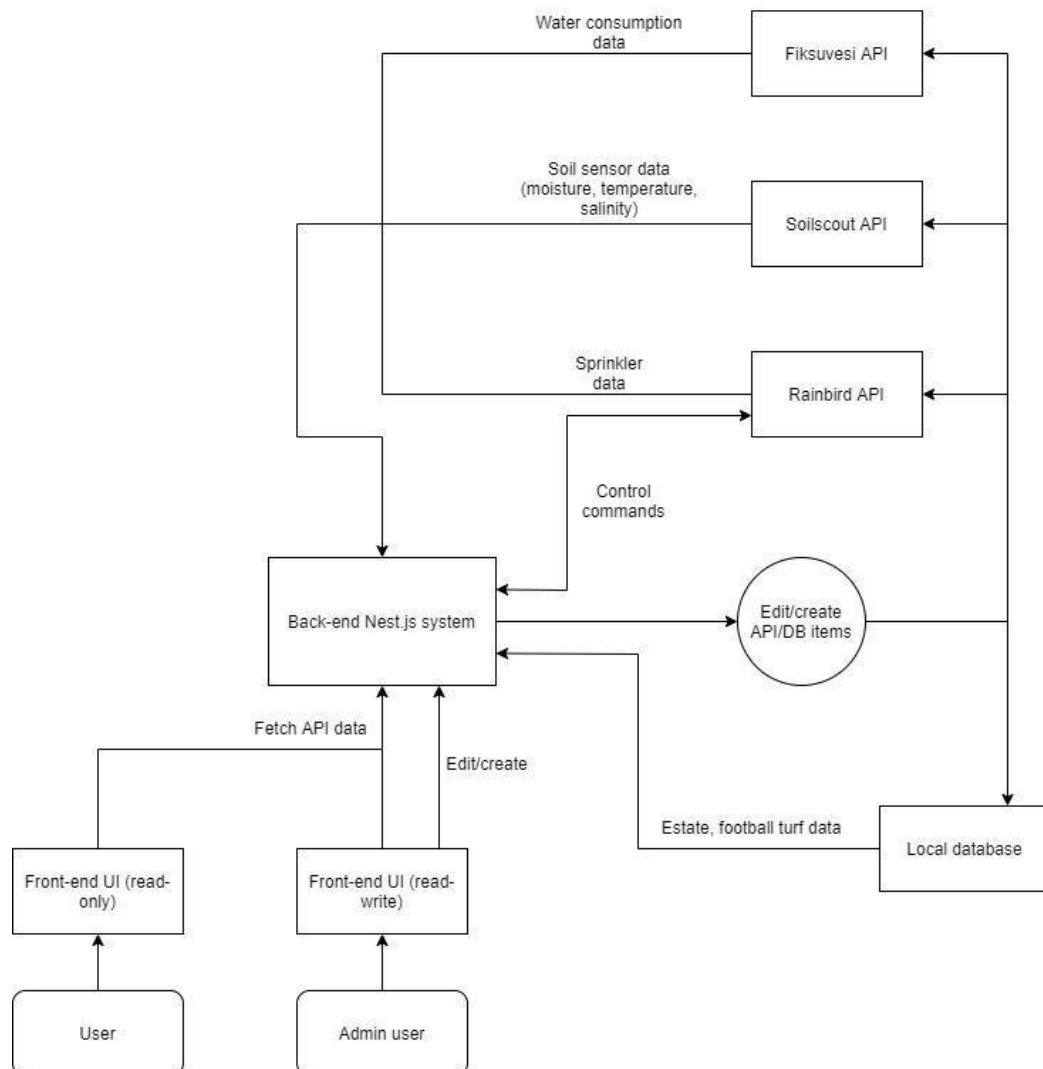
Nest provides an out-of-the-box application architecture which allows developers and teams to create highly testable, scalable, loosely coupled, and easily maintainable applications. The architecture is heavily inspired by Angular. [21.]

Nest.js pyrkii luomaan loogisen ja helppokäyttöisen arkkitehtuurin palvelinpuolen ohjelmistolle. Monitorointialustan teknologioiden valinnassa tärkein kriteeri oli helppokäyttöisyys ja lyhyt käyttöönottoaika, minkä tunnusmerkit Nest.js täyttää.

Työssä luotiin uutta dataa, joka piti tallentaa tietokantaan. Tieto monitorointialustassa käsiteltävistä liikuntapuistoista ja niiden sisällä sijaitsevista jalkapallonurmista oli tallennettava omaan paikalliseen tietokantaan. Se myös tarkoitti, että uusien kohteiden lisääminen monitorointialustaan on helppoa, koska uuden kohteen tiedot on vain lisättävä tietokantaan. Tietokantaohjelmistoksi valikoitui MySQL-relaatiotietokantaohjelmisto. Se on MySQL AB:n kehittämä ohjelmisto, jonka on myöhemmin ostanut Oracle Corporation, joka kehittää sitä nykypäivänäkin. MySQL on avoimen lähteen relaatiotietokantaohjelmisto. Relaatiotietokannassa tavallisen datan tallennuksen ja lukemisen lisäksi voidaan luoda riippuvuussuhteita datapisteiden välille. Esimerkiksi tietokantataulukko nimeltä "liikuntapuistot" voi sisältää liikuntapuiston nimen, osoitteen ja tunnuksen. Tietokantataulukko nimeltä "jalkapallonurmet" voi sisältää nurmen nimen, sinne asennettujen sensoreiden tunnuksset ja sen liikuntapuiston tunnuksen, missä jalkapallonurmi sijaitsee. "Jalkapallonurmet"-tietokantataulukko sisältää suoran riippuvuussuhteen liikuntapuistoon, jossa oikea jalkapallonurmi sijaitsee. [22.]

5.5 Tiedonkulku ja tunnistautuminen

Monitorointialustan päätoiminto, jalkapallonurmilla toimivien järjestelmien monitorointi ja hallinta, perustuu käytettävistä rajapinnoista saatavaan dataan. Kuvas-
vassa 13 on esitetty monitorointialustan tiedonkulku kaaviona. Smartvatten-,
Soilscout- ja Rainbird-rajapinnat lähettävät pyynnöstä dataa Nest.js-palvelil-
melle, joka pyydettyä lähettää datan selainpuolelle. Palvelin kommunikoi
paikallisen MySQL-tietokannan kanssa, josta palvelin saa datan esimerkiksi lii-
kuntapuistoista ja jalkapallonurmista. Palvelin myös pystyy lähettämään muok-
kaus- ja luontipyynnöitä rajapinnoille tai paikalliselle tietokannalle.



Kuva 13. Monitorointialustan tiedonkulku tietovuokaaviona.

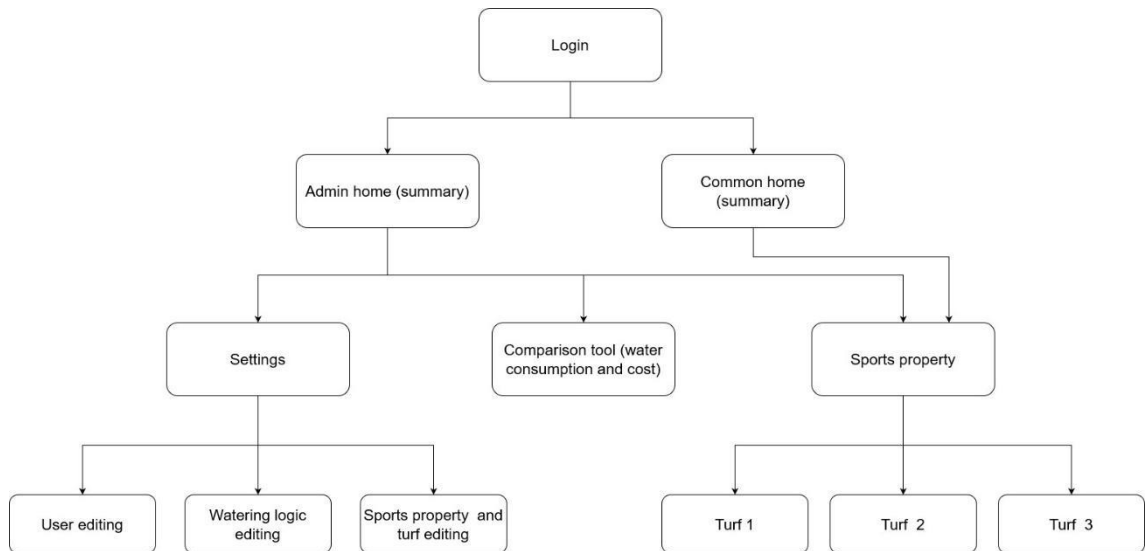
Kuvasta 13 nähdään, että selainpuoli ei kommunikoi suoraan rajapintojen tai tietokantojen kanssa. Kaikki kommunikointi tapahtuu palvelimen kautta. Selainpuolella on kaksi versiota käyttöliittymästä: peruskäyttäjän ja järjestelmänvalvojan versiot. Peruskäyttäjällä on oikeudet pelkästään lukea dataa. Järjestelmänvalvojalla on lukuoikeuksien lisäksi oikeus muokata ja lisätä dataa.

Monitorointialusta vaatii käyttäjältä kirjautumisen, ja käyttäjätilejä voi luoda vain pääkäyttäjä. Alusta ei käytä tyypillistä rekisteröintimallia, jossa kuka tahansa käyttäjä voi luoda käyttäjätilin. Alusta on suljettu ympäristö, jota käyttävät vain kaupungin työntekijät. Käyttäjän tunnistautuminen tapahtuu Nest.js-palvelimella käyttämällä Passport-kirjastoa, joka on suoraan integroitu Nest.js-ohjelmistokehykseen. Passport-kirjasto on Node.js-ohjelmistokehykselle suunniteltu tunnistautumiskirjasto. Se sisältää lukuisia valmiita tunnistautumisstrategioita, mikä helpottaa tunnistautumisjärjestelmän käyttöönottoa. [23.] Monitorointialustassa käytetään tavallista "passport-local"-strategiaa, joka luo perinteisen käyttäjänimi-salasanatunnistautumisen. [23.] Tässä tapauksessa, kun käyttäjä tunnistautuu käyttäjänimellä ja salasanalla, palvelin palauttaa käyttäjälle tunnistautumisavaimen (token), joka tallentuu selaimen paikalliseen muistiin. Seuraavat pyynnöt, jotka käyttäjä lähettää palvelimelle, sisältävät kyseisen tunnistautumisavaimen. Palvelin tarkistaa pyynnön yhteydessä, onko tunnistautumisavain oikea ja onko se voimassa. Mikäli vaatimukset täyttyvät, palvelin palauttaa halutun datan. Monitorointialustan tapauksessa käytetään JWT-tunnistautumisavainta (json web token). Se on salattu avain, joka voi sisältää tietoa. JWT-tunnistautumisavain luodaan käyttämällä "salaisuutta" (secret) tai vastapariavainta, jonka avulla JWT-tunnistautumisavain voidaan avata, jos sen sisältö halutaan varmistaa. [24.]

5.6 Navigointi

Monitorointialustaan kirjautumisen jälkeen käyttäjä laitetaan "yhteenveto"-sivulle, joka on myös alustan kotisivu. Sivuston päänavigointi tapahtuu sivuvalikosta, josta pääsee muille alustan sivuille. Kuvasta 14 nähdään, että etusivulta käyttäjä pääsee jokaiselle sivulle enintään kahdella klikkauksella. Peruskäyttäjä

näkee vain liikuntakiinteistöt ja jalkapallonurmet niiden sisällä. Järjestelmänvalvoja näkee liikuntakiinteistöjen ja jalkapallonurmien lisäksi asetukset ja vertailutyökalun.



Kuva 14. Monitorointialustan navigointi.

”Yhteenveto”-sivulle kootaan yleiskatsaus monitorointialustan muista funktioista, kuten esimerkiksi yksittäisten nurmien keskiarvokosteudet, liikuntakiinteistöjen vedenkulutus tai viimeisimmät nurmikastelukerrat. ”Liikuntakiinteistöt”-sivulle kootaan kaikki mahdolliset kiinteistöllä olevat jalkapallonurmet välilehdiksi, joiden välillä käyttäjä voi vaihtaa. ”Jalkapallonurmi”-välilehti sisältää web-komponentin, joka näyttää karttakuvan nurmesta ja nurmella sijaitsevat laitteet sekä niiden tietoja, kuten maaperäsensoreiden kosteus. Välilehdet sisältävät myös ilmoituksia, jotka on luotu nurmen antamien tietojen perusteella. ”Vertailutyökalu”-sivulle kootaan käyrädiagrammi, jonne käyttäjä voi syöttää erilaisia parametreja: tarkasteltava suure (vesilasku euroina tai vedenkulutus kuutiometreinä), liikuntakiinteistöt tai yksittäiset jalkapallonurmet ja tarkasteltava aikaväli. ”Asetukset”-sivu sisältää eri alisivuja eri muokkaus- ja luontifunktioille. ”Käyttäjät”-sivulla järjestelmänvalvoja voi luoda, muokata tai poistaa käyttäjiä. ”Logiikka”-sivulla järjestelmänvalvoja voi muokata kastelujärjestelmän logiikkaa ja

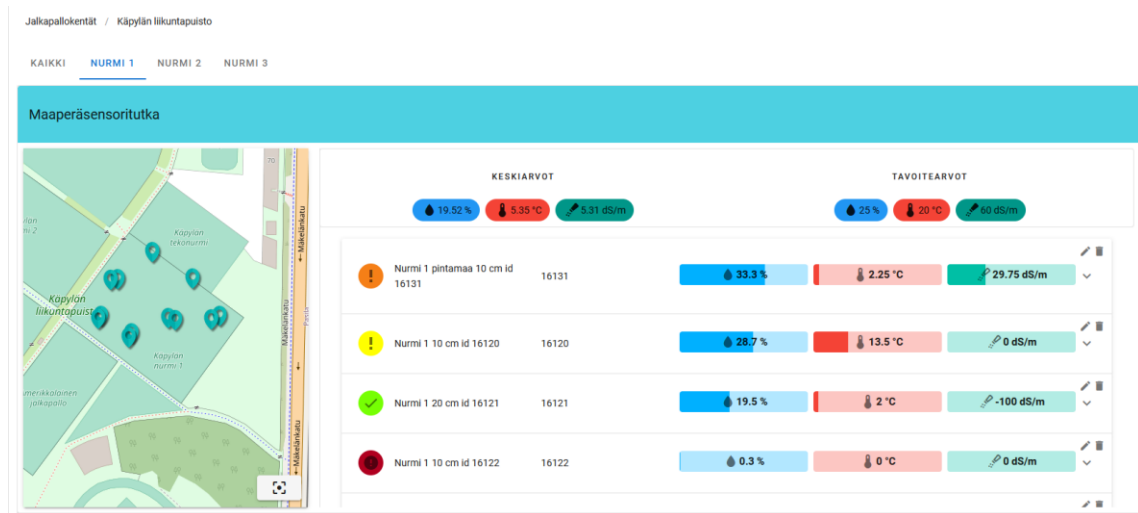
raja-arvoja. ”Kiinteistöt ja nurmet” -sivulla järjestelmänvalvoja voi luoda, muokata ja poistaa liikuntakiinteistöjä ja nurmia.

5.7 Komponentit

Komponentti tarkoittaa web-ohjelmistokehityksessä muusta ohjelmistosta eristettyä kokonaisuutta, joka pitää sisällään oman käyttöliittymän ja funktionaalisuuden ja jota voidaan uudelleen käyttää ohjelmiston sisällä [27]. Liikuntakiinteistön jalkapallonurmi-välilehdillä on maaperäsensoritutkakomponentti (kuva 15). Komponentti sisältää datan Soilscout-maaperäsensoreista. Komponentissa on OpenStreetMaps-karttakuva (OSM), johon jokainen maaperäsensori on sijoitettu koordinaattien perusteella. Jokainen maaperäsensori on asetettu kartan viereen listaan, josta voidaan nähdä sensorien mittaustuloksia. Jokaisen listatavaran vasemmassa laidassa on ympyrä, joka kertoo sensorin mittauksien tilan:

- Vihreä tarkoittaa, että arvot ovat hyväksyttävät.
- Keltainen tarkoittaa, että arvoissa on huomioitavaa.
- Oranssinpunainen tarkoittaa, että arvoissa on vakava ongelma.
- Kirkkaan punainen tarkoittaa, että laitteessa on vikaa.

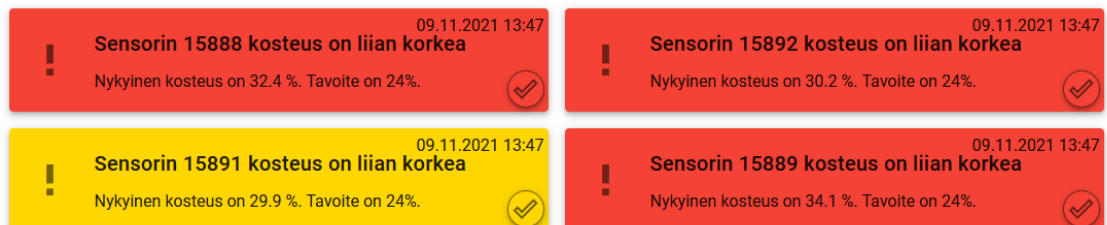
Listan yläpuolelle on sijoitettu nurmen keskiarvomittaukset sekä järjestelmän logiikan perusteella määritellyt tavoitearvot. Keski- ja tavoitearvojen tarkoitus on helpottaa peruskäyttäjien eli liikuntapaikanhoitajien käyttökokemusta, jotta heidän ei tarvitse tehdä omia laskelmia tai päätelmiä maaperäsensoreiden tiedoista. Järjestelmänvalvoja pystyy muokkaamaan ja poistamaan maaperäsensoreita. Maaperäsensoreiden tiedot ovat suoraan Soilscout-rajapinnasta, johon myös lähetetään muokkaus- ja poistopyynnöt.



Kuva 15. Käpylän liikuntapuiston 1. nurmen maaperäsensoritutkakomponentti.

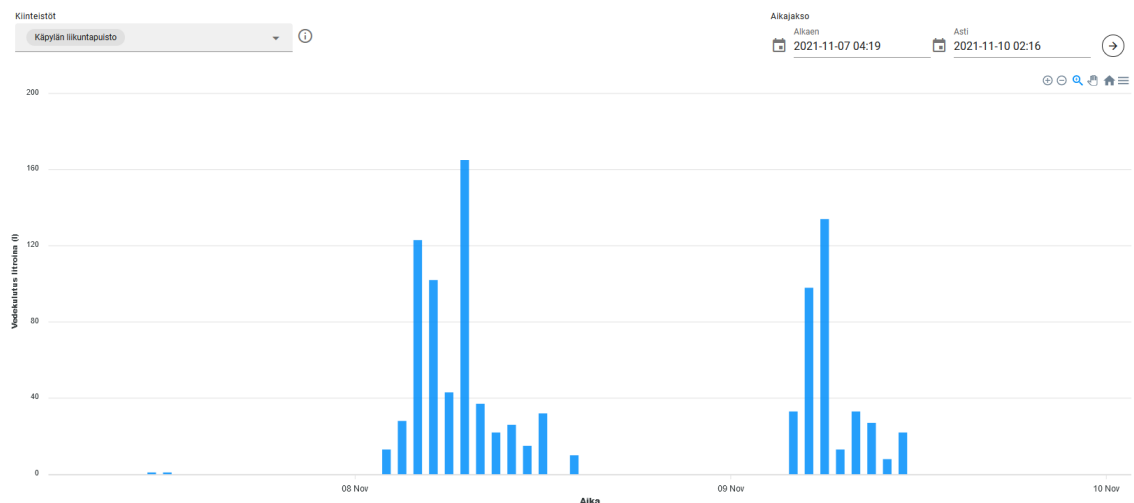
Jalkapallonurmi-välilehti sisältää myös ilmoituskomponentin (kuva 16), joka ilmoittaa maaperäsensoreiden muutoksista. Ilmoitukset luodaan, kun sensorin arvot ylittävät tai alittavat järjestelmän logiikan määrittelemän raja-arvon. Ilmoitukset luodaan palvelinpuolella 5 minuutin välein, käyttämällä Cron-ajastuspalvelua. Cron-ajastuspalvelu on Unix-pohjaisissa käyttöjärjestelmissä oleva palvelu, jonka avulla voidaan ajastaa toimintoja ja tapahtumia [26]. Nest.js-ohjelmistokehys sisältää Cron-ajastuspalvelun. Palvelinpuoli luo ilmoituksen hakemalla kastelulogiikan paikallisesta tietokannasta ja maaperäsensorit Soilscout-rajapinnasta. Palvelinpuoli vertailee maaperäsensoreiden arvoja logiikkaan ja luo sen perusteella ilmoituksen, joka tallennetaan tietokantaan. Lopulta palvelinpuoli hakee ilmoitukset Nest.js-palvelinpuolen kautta paikallisesta tietokannasta.

Ilmoitukset alueelta Nurmi 1



Kuva 16. Ilmoituskomponentti, joka ilmoittaa maaperäsensoreiden huomioitavia muutoksia.

”Vertailutyökalu”-sivulla oleva vertailukomponentti sisältää yksinkertaiset valinnat vertailukohteille ja tarkasteltavalle aikavälille. Kun käyttäjä on valinnut halutut parametrit ja painanut hakupainiketta, selainpuoli lähettää pyynnön Nest.js-palvelimelle, joka lähettää pyynnön eteenpäin Smartvatten-rajapinnalle. Rajapinnassa käytetään hakuterminä halutun alueen postinumeroa, jolloin rajapinta palauttaa aikaväliltä tietyn postinumeron kaikkien vesimittarien tiedot. Vesimittari on vesituloputkeen asennettu mittari, joka mittaa vedenkulkua putken läpi. Mittaukset näkyvät analogisessa laskurissa. Etälukemista varten vesimittareiden päälle on asennettu konenäkölaitteet, jotka lähettävät analogisen laskurin lukemia pilvipalveluun, ja sitä kautta ne ovat saatavilla rajapinnasta. Palvelinpuolella data suodatetaan käyttämällä oikean vesimittarin tunnusnumeroa, jolloin saadaan yksittäisen liikuntapuiston tai jalkapallonurmen vedenkulutustiedot (kuva 17), jotka voidaan lähettää takaisin selainpuolelle.



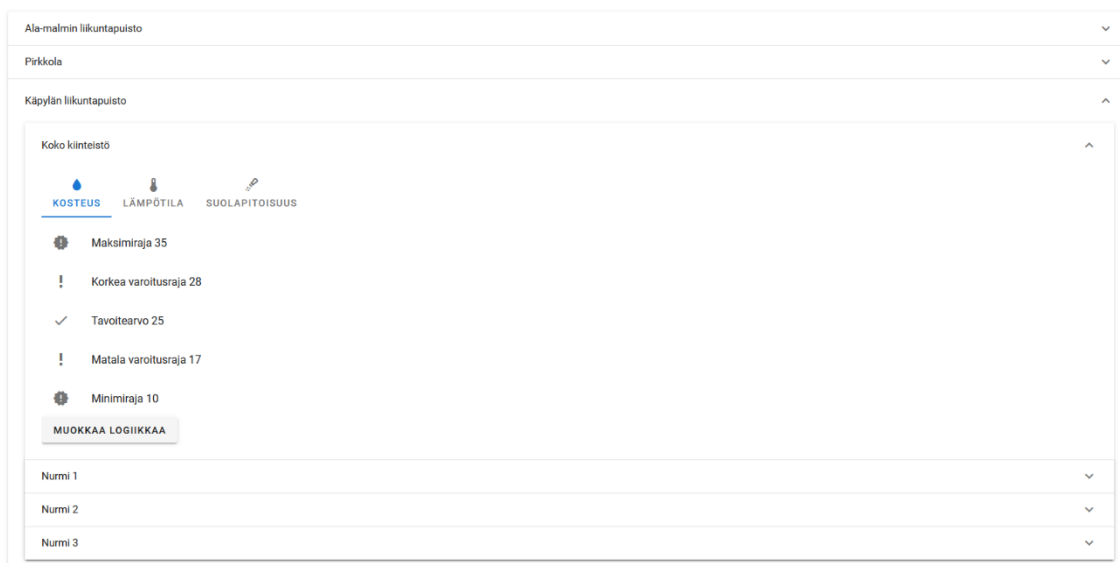
Kuva 17. Vertailukomponentin vedenkulutustiedot alueelta Käpylän liikuntapuisto.

”Asetukset”-sivun alisivut sisältävät käyttöliittymiä, jolla voidaan toteuttaa CRUD-toimintoja ohjelmiston paikalliseen tietokantaan [28]. CRUD-toiminnot (Create, Read, Update, Delete) tarkoittavat toimintoja, joilla voidaan luoda, lukea, päivittää ja poistaa säilytettyä dataa. Selainpuoli ei suoraan päivitä paikall-

lista tietokantaa, vaan se lähettää pyynnön Nest.js-palvelinpuolelle, joka suorittaa toiminnot tietokantaan. Kuvassa 18 nähdään monitorointialustan pääfunktion kannalta oleellisin CRUD-käyttöliittymä: kastelulogiikan muokkaus. Järjestelmänvalvoja pystyy muokkaamaan kastelulogiikkaa, joka hallitsee toimintaa koko monitorointialustassa. Kastelulogiikka toimii ensisijaisesti kiinteistökohtaisesti tai toissijaisesti nurmikohtaisesti. Kastelulogiikka sisältää erilliset logiikat jokaiselle Soilscout-maaperäsensoren mittaussuureelle: kosteudelle, lämpötilalle ja suolapitoisuudelle. Kastelulogiikka sisältää seuraavat raja-arvot:

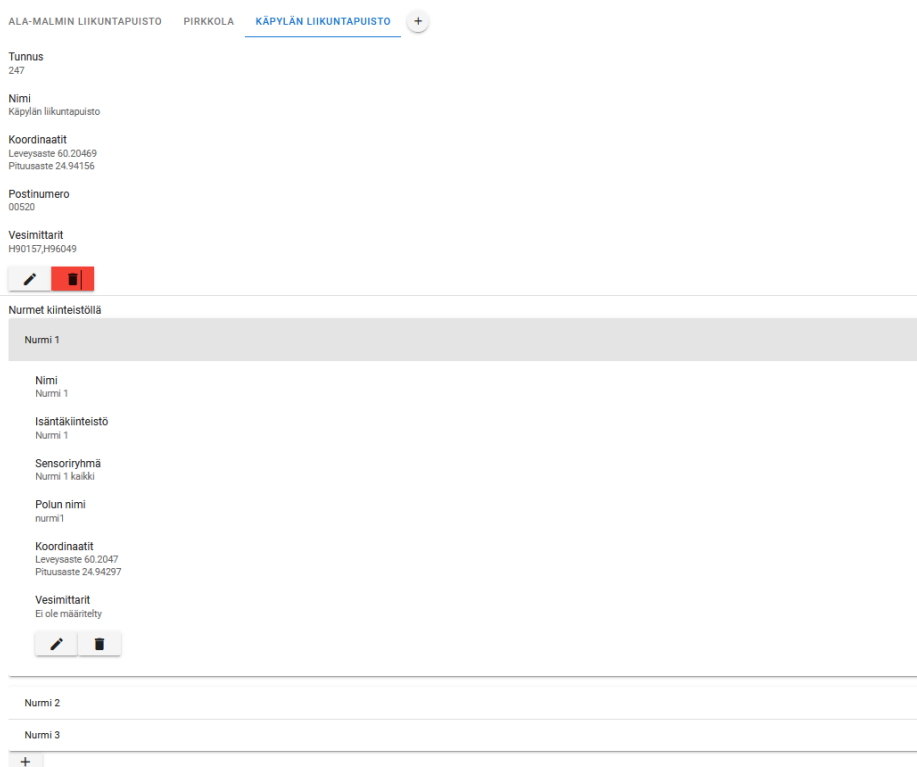
- maksimiraja, jonka ylittyessä aiheutuu hälytysilmoitus
- korkea varoitusraja, jonka ylittyessä aiheutuu varoitusilmoitus
- tavoitearvo, joka on optimiarvo suurelle
- matala varoitusraja, jonka alittuessa aiheutuu varoitusilmoitus
- minimiraja, jonka alittuessa aiheutuu hälytysilmoitus.

Kastelulogiikan tehtävä on auttaa järjestelmää tunnistamaan optimiarvot ja huomauttaa käyttäjää poikkeamista.



Kuva 18. Kastelulogiikan muokkauskomponentti.

Monitorointialustan tehtävä on monitoroida jalkapallonurmia, jonne on asennettu älykkään kastelujärjestelmän laitteita, kuten Soilscout-maaperäsensoreita, Rainbird-sadetusjärjestelmiä ja Smartvatten- vedenkulutuksen mittauslaitteita. Järjestelmänvalvoja pystyy lisäämään uusia liikuntakiinteistöjä ja jalkapallonurmia järjestelmään käyttämällä sivun CRUD-käyttöliittymää. Kuvassa 19 nähdään, että liikuntakiinteistöt on asetettu välilehtiin ja kiinteistön jalkapallonurmet on asetettu listaan välilehdelle. Kiinteistöt ja jalkapallonurmien data tallennetaan paikalliseen tietokantaan samalla tavalla kuin kastelulogiikka. Monitorointialusta luo dynaamisesti sisällön koko sivustolle tietokannan datan perusteella.



Kuva 19. Liikuntakiinteistöjen ja jalkapallonurmien muokkauskomponentti.

”Asetukset”-sivun viimeinen alasuvi on käyttäjänhallintapaneelikomponentti. Järjestelmänvalvoja näkee listan kaikista monitorointialustan käyttäjistä sekä uuden käyttäjän luontilomakkeen. Järjestelmänvalvojalla on oikeus lisätä, muokata ja poistaa peruskäyttäjiä, mutta järjestelmänvalvoja ei voi hallita muita järjestelmänvalvoja. Pelkästään pääkäyttäjä pystyy hallitsemaan järjestelmänvalvoja tilejä.

5.8 Monitorointialustan lopputulos

Monitorointialustan toteutuksessa onnistuttiin integroimaan Soilscout- ja Smartvatten-rajapintoja. Alusta täyttää seuraavat vaatimukset:

- nurmikohtaiset näkymät visualisoituna
- maaperäsensoreiden nykyiset ja historialliset arvot
- vedenkulutuksen tiedot ja vertailu
- graafiset käyrät ja tilastot visualisoinnin apuna
- sisäinen kastelulogiikka
- käyttäjähallinta
- liikuntakiinteistöjen ja jalkapallonurmien hallinta järjestelmässä.

Monitorointialustan toteutuksessa ei onnistuttu luomaan kastelulaitteiden etähallintaa tai toiminnan monitorointia. Rainbirdin kastelulaitteiden etähallintarajapintaan ei ylläpitoyksikkö päässyt käsiksi. Soilscout- ja Smartvatten-rajapintoihin saatiin laaja dokumentaatio, jolloin maaperäsensoreihin ja vesimittareihin liittyvät ominaisuudet toteutettiin onnistuneesti. Helsingin kaupungin kulttuurin ja vapaa-ajan toimialan liikunnan ylläpitoyksikkö oli ostanut Soilscout ja Smartvatten yritysten tuotteita, joiden mukana tuli laaja dokumentaatio laitteiden ja rajapintojen käytöstä. Lopulta monitorointialustan kehitys jätettiin kesken, koska alusta ei ole tarpeellinen ilman kastelulaitteiden etähallintaa. Soilscout ja Smartvatten ovat luoneet omat ohjelmistot, joista niiden laitteita ja mittauksia voidaan monitoroida. Rajapintoja keskittävälle alustalle ei siis ole tarvetta, mikäli kastelulaitteiden rajapintaa ei voida integroida alustaan.

5.9 Jatkokehitys epäonnistuneen monitorointialustan jälkeen

Helsingin kaupungin kulttuurin ja vapaa-ajan toimialan liikunnan ylläpitoyksikkö päätti monitorointialustan epäonnistumisen jälkeen, että älykkään kastelujärjestelmän kehitystä jatketaan hyödyntämällä pelkkää automaatiotekniikkaa, jolloin ei ole tarvetta rajapinnoille. Automaatio on yleistermi teknologisille prosesseille, joissa ihmisen vaikutus minimoidaan. [50.]

Aikaisemman web-monitorointialustan etuna oli, että se oli verkkoalusta, jolloin järjestelmää olisi pystynyt monitoroimaan ja hallitsemaan mistä vain. Puhtaalla automaatioteknisellä ratkaisulla ei luoda verkkoyhteyksiä, vaan järjestelmä toimisi paikallisesti kohteessa. Kastelujärjestelmää pystyisi monitoroimaan ja hallitsemaan vain kasteluohjaimesta, joka on asennettu nurmikentän lähelle. Verkottomuus voi olla myös etu, sillä se parantaa järjestelmän tietoturvasuutta huomattavasti. Web-alustan haavoittuvuudet voivat aiheuttaa huomattavan riskin koko kastelujärjestelmälle. Järjestelmään murtautunut ulkopuolinen taho voisi ohjata kastelulaitteita kastelemaan jatkuvasti, mikä voisi aiheuttaa kaupungille huomattavia kustannuksia.

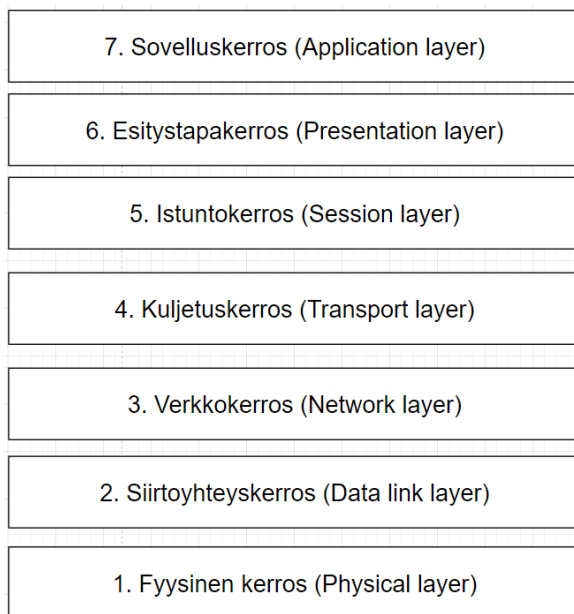
Automaatiotekninen ratkaisu voidaan nähdä myös yksinkertaisempänä, koska silloin ei tarvitse huolehtia verkon saatavuudesta tai menetetyistä verkkopakeeteista. Suurin osa laitteista on fyysisesti kytketty toisiinsa, jolloin virhekohtia on vähemmän. Automaatioteknisessä ratkaisussa älykäs kastelujärjestelmä on riippuvainen ohjelmoitavasta logiikasta (PLC). Aikaisempi Rainbird ESP-LXME ei tue haluttuja ominaisuuksia, minkä takia ylläpitoyksikön on hankittava uusi ohjain, joka voidaan integroida sensoreihin ja kastelulaitteisiin.

6 Älykkään kastelujärjestelmän toteutus automaatiotekniikalla

6.1 Toteutuksen haasteet

Älykkään kastelujärjestelmän automaatioteknisen toteutuksen oleellisin haaste on saada maaperäsensorit kommunikoimaan kastelulaitteiden ohjaimen

kanssa. Maaperäsensoreiden mittaama ja eteenpäin lähettämä tieto on vietävä erilliseen kasteluohjaimen, jonka on myös erikseen ymmärrettävä, minkälaista tietoa sensorit lähettävät sille. Usein, kun halutaan luoda täysin uusi automaation toiminnallisuus, on käytettävä laitteita eri laitetuottajilta. Laitteiden yhteensopivuus ei ole kuitenkaan itsestäänselvyys, koska eri laitetuottajat voivat käyttää erilaisia fyysisiä liitäntöjä, osia tai tiedonsiirtoprotokollia. Toisin sanoen laitteet käyttävät erilaisia protokollia OSI-mallin eri kerroksissa. OSI-malli (kuva 20) on ISO:n luoma (*International Organization For Standardization*) havainnollistettava malli, joka kuvaa, miten ja millä tieto kulkee tietoliikennejärjestelmissä. [46.]



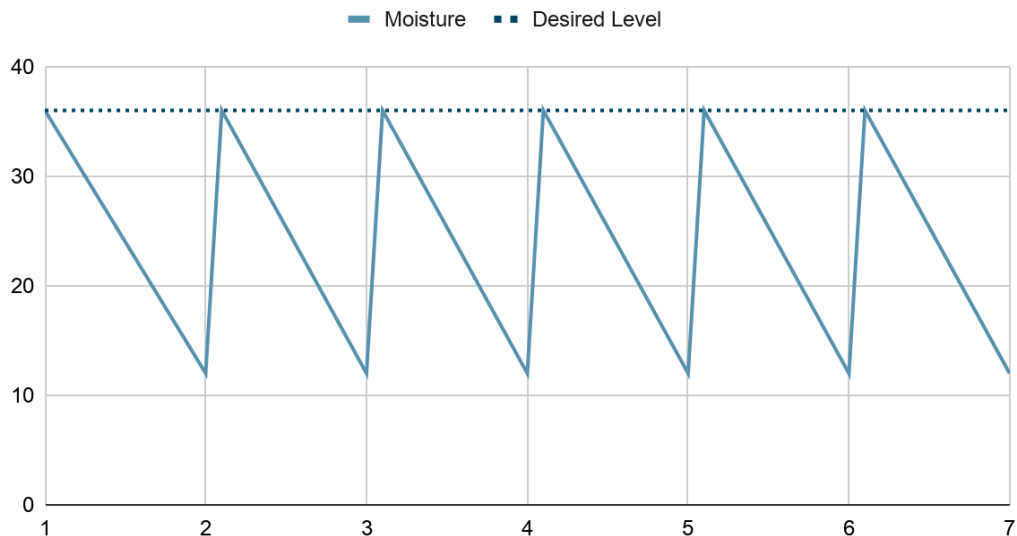
Kuva 20. OSI-mallin kerrokset [46].

Kun älykkään kastelujärjestelmän sensorilaitteet (maaperäsensorit ja mahdolliset muut sensorit) voivat keskustella kasteluohjaimen kanssa, on vielä määriteltävä logiikka, jolla kenttää kastellaan. Kastelulogiikalle ei ole varsinaisia standardeja, vaan se on määriteltävä itse riippuen kastelun alueen vaatimuksista. Esimerkiksi Johan Wendtin [44] esittelemässä artikkelissa kuvaillaan Irriot Ab:n kasteluohjaimen toimintatapaa, jossa on määriteltä kaksi eri toimintatilaa ja eri kastelulogiikoita. Irriot Ab:n kasteluohjain voi käyttää *Direct Drive* -toimintatilaa, jossa kastelulaitteet ovat maaperäsensoreiden jatkuvassa hallinnassa, eli ne eivät noudata ennalta määrättyjä aikatauluja, vaan kastelulaitteet kastelevat, kun

tietyt raja-arvot ylitetään tai alitetaan. *Direct Drive* -toimintatila ei ole monissa tapauksissa käytännöllinen, koska sen toimintaa voi rajoittaa saatavilla olevan veden määrä ja kastelualueen mahdollinen käyttö esimerkiksi urheilutarkoituksissa, jolloin ei haluta urheilutoiminnan aikana kastella. Irriot Ab:n kasteluohjain tarjoaa myös mahdollisuuden käyttää aikataulutettua toimintatilaa, jolloin pelkästään ohjelman toiminta-aikana maaperäsensorit ohjaavat kastelulaitteiden toimintaa.

Lisäksi Irriotin kasteluohjaimessa on eri kastelulogiikoita, joita voi käyttää edellä mainituissa toimintatiloissa. Kastelulogiikassa seurattavan yksikön ei tarvitse olla kosteus, vaan se voi olla myös esimerkiksi lämpötila. Yksi kastelulogiikka on *Level Conditions* (kuva 21), jossa määritellään haluttu taso mitattavalle yksikölle ja ohjelma automaattisesti kastelee, kunnes päästään haluttuun tasoon.

Daily watering occasions

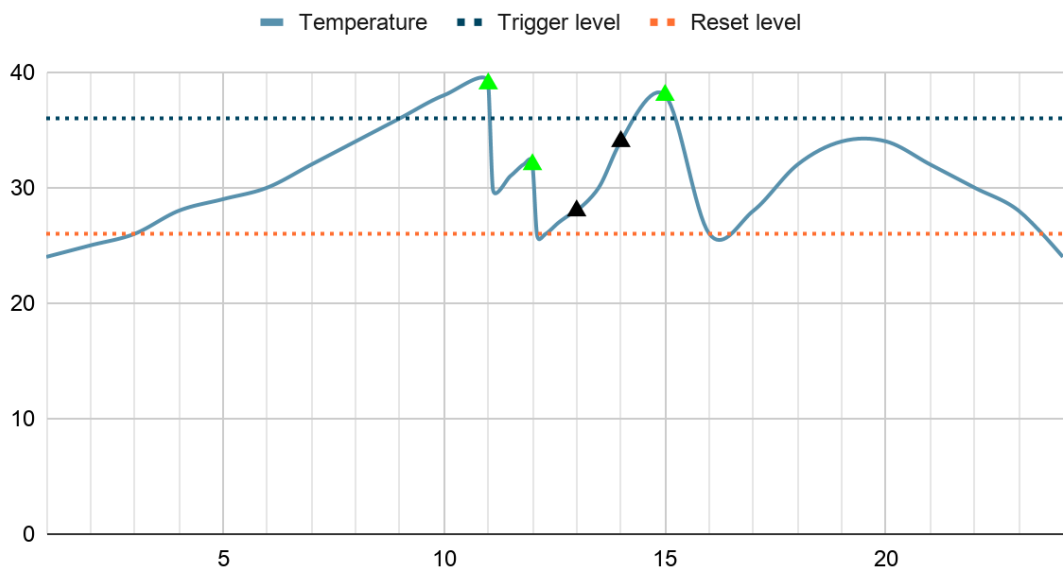


Kuva 21. Irriot Ab:n kasteluohjaimen *Level Conditions* -kastelulogiikan käyttäytyminen päivittäisessä kasteluohjelmassa [44].

Toinen kastelulogiikka on *Range Conditions*, jossa asetetaan *Trigger level* eli yläraja ja *Reset level* eli alaraja mitattavalle yksikölle. Kuvassa 22 nähdään, että

kun lämpötila nousee yli ylärajan, seuraava aikataulutettu ohjelma aloittaa kastelun. Ensimmäinen, klo 11.00 aloitettu kastelu ei laskenut lämpötilaa alle alarajan, minkä takia klo 12.00 aloitettiin toinen kastelu, kunnes alaraja alitettiin. Kello 13.00 ja 14.00 kastelu ohitettiin. Viimeisenä aikataulutettuna kasteluaikana klo 15.00 yläraja taas ylitettiin ja ohjelma kasteli. *Range Conditions* -kastelulogiikka voi olla sen hienovaraisuuden kannalta järkevämpi ratkaisu, sillä joissain tapauksissa kastelualueen kasviston halutaan kuivuvan tiettyyn pisteeseen asti ennen seuraavaa kastelua. *Range Conditions* -kastelulogiikka myös säästää enemmän vettä, koska ohjelman ei tarvitse välttämättä sadettaa jokaisella kerralla. [44.]

Leaf cooling. Scheduled Irrigation



Kuva 22. Irriot Ab:n kasteluohjaimen *Range Conditions* -kastelulogiikan käyttäytymisen aikataulutetussa ohjelmassa, joka alkaa klo 11.00, 12.00, 13.00, 14.00 ja 15.00. Vihreä kolmio on kastelun aloitus, ja musta kolmio on kastelun ohitus. [44.]

6.2 Tekninen toteutus

Älykkään kastelujärjestelmän prototyypin testausnurmeksi valikoitui Pirkkolan urheilupuiston jalkapallonurmi. Sinne on ennestään asennettu Rainbird 900- ja

Rainbird 950 -kastelulaitteet sekä kasteluohjain ESP-LXME. Ennestään asennettu ESP-LXME-kasteluohjain ei tue Soilscout-maaperäsensoreiden integrointia, minkä takia prototyyppiä varten ylläpitoyksikkö tilaa uuden kasteluohjaimen, joka on räätälöity toimimaan Soilscout-maaperäsensoreiden kanssa.

Kastelulaitteiden paikat näkyvät luvun 4.2 kuvissa 8 ja 9. Jokaisen kastelulaitteen solenoidiin on kytketty oma maanalainen johdin. Solenoidi (magneettiventtiili) on laite, joka koostuu käämistä, ankkurista ja kotelosta. Kun käämi vastaanottaa sähkövirran, käämi magnetisoituu. Magneettikenttä voi joko vetää tai työntää (riippuen halutusta toiminnallisuudesta) ankkuria, jolloin sähköenergiaa on muutettu mekaaniseksi työksi. [41.] Tässä tapauksessa avautuisi kastelulaitteen venttiili, jolloin vesi pääsisi virtaamaan kastelulaitteelle, ja kastelulaite nousisi maan alta aloittaakseen sadetuksen. Johdinten toinen pää on vedetty kentän laidalla sijaitsevaan koppiin, jonne kasteluohjain on asennettu. Kun kastelulaite halutaan kytkeä päälle, johdinta pitkin on lähetettävä 24 V AC eli 24 voltin vaihtovirta. [11.] Kastelulaitteet on helppo kytkeä räätälöidyn kasteluohjaimen I/O-paneeliin, koska ne toimivat yksinkertaisella on/off-periaatteella.

Maaperäsensoreina tullaan käyttämään Soilscout Hydra100 -sensoreita (luvun 2.4 ja 2.6 kuvat 4 ja 5). Maaperäsensoren toiminta on kuvattu luvussa 2.5. Maaperäsensoren toiminnallisuus perustuu siihen, että se asennetaan maan alle, josta se lähettää mittauspaketteja langattomalla yhteydellä tietyin väliajoin. Lähetysajan intervalli asetetaan tehtaassa, eikä sitä voi muuttaa jälkeenpäin. Jokaisella Hydra100-maaperäsensoreilla on myös oma uniikki tunnus. Jos maaperäsensoren lähettämän signaalin alueella on Soilscout Base Station tai Soilscout Echo Repeater, ottavat ne signaalin vastaan. Hydra100-maaperäsensori lähettää mittauspaketteja riippumatta siitä, onko alueella vastaanottavaa asemaa. Soilscout Echo Repeater -asema vahvistaa vastaanotetun sensorin signaalin, mikä käytännössä laajentaa maaperäsensoreiden signaalin lähetysaluetta. Soilscout Echo Repeater -asema ei muuta mittauspaketteja millään tavalla. Soilscout Base Station -asema vastaanottaa signaaleja joko maaperäsensoreilta tai Echo Repeater -asemalta ja lähettää mobiiliverkon avulla paketteja

Soilscoutin omaan pilvipalveluun. [10; 45.] Soilscout-mittausteknologian kokonaisuus esitellään kuvassa 23.

Soilscout kuvailee Hydra100-maaperäsensoren ohjeissa hyvän sensoriasettelun ohjeet:

- kartta, joka sisältää jokaisen sensorin paikan
- sensorien tunnusnumerot kuvattuna kartalla
- sensorien syvyydet maaperässä kartalla
- muistiinpanojen ottaminen asennusprosessin aikana
- laite, jolla voidaan mitata jokaisen sensorin tarkka paikka [10].



Kuva 23. Soilscout-mittausteknologian ratkaisu kokonaisuudessaan [10].

Ylläpitoyksikössä on määritelty, että sensoreita tullaan käyttämään 1–3 jokaista kastelulaitetta kohti. Lisäksi sensorit tullaan asettamaan 10–15 cm:n syvyyteen,

jotta kosteuden muutokset voidaan havaita mahdollisimman nopeasti. Ylläpito-yksiköllä on käytössään Hydra100-maaperäsensoreita, joiden mittauspakettien lähetyksajan intervalli on 20 minuuttia tai 90 sekuntia. Se tarkoittaa, että sensorit lähettävät mittauksia 20 minuutin tai 90 sekunnin välein. Pirkkolan jalkapallonurmelle ei tarvitse asentaa Echo Repeater -asemia, koska Base Station -asema on tarpeeksi lähellä jalkapallonurmea, jotta uloimpien maaperäsensoreiden signaalit yltävät siihen. Tavallisesti Base Station -asema lähettää vastaanottamansa paketit suoraan pilvipalveluun, mutta asemassa on myös D9-liitin pohjassa (kuva 24). Soilscout on kehittänyt tavan, jolla voidaan luoda fyysinen kytkentä Base Station -aseman ja toisen laitteen kanssa. Tässä tapauksessa kytkentä voidaan luoda räätälöidyn kasteluohjaimen kanssa. Insinööriyössä ei voida avata liitännän yksityiskohtia salassapitovelvollisuuden takia. Fyysinen kytkentä tarkoittaa, että sensorien mittauspaketit voidaan saada suoraan kasteluohjaimen ilman, että kasteluohjain liitettäisiin ulkoiseen verkkoon.



Kuva 24. Soilscout Base Station -asema [45].

Älykkään kastelujärjestelmän prototyyppiin päätettiin myös lisätä langaton Rainbird WR2 -sade- ja pakkasensoriohjain (kuva 25). Se sisältää sade- ja pakkasensorin (kuvassa 25 vasemmalla), joka mittaa sateen määrän ja lämpötilan. Sensori voidaan yhdistää langattomasti itse sensoriohjaimen (kuvassa 25 oi-

kealla). Sensoriohjain sisältää oman logiikan, jota voidaan säätää hallintapaneelin kautta. Sensoriohjaimesta voidaan säätää sateen raja-arvo eli se, kuinka suuri sadanta lasketaan merkittäväksi sateeksi, jolloin on pysäytettävä kastelu. Sateen raja-arvot vaihtelevat 3–13 mm sadannan välillä. Sensoriohjaimesta voidaan myös säätää lämpötilan raja-arvo pakkaselle. Lämpötilan raja-arvoja ovat 0,5 °C, 3 °C ja 5 °C. Jos lämpötilan raja-arvo alitetaan, lasketaan ulkolämpötila liian kylmäksi toiminnalle, jolloin kastelu estetään. Koska sensoriohjain sisältää täysin oman logiikan, sensoriohjain lähettää vain *on/off*-tiedon, joka kertoo, voidaanko sadettaa vai ei. Sensoriohjaimen lähettämä tieto on yksinkertainen, minkä takia sen kytkeminen räätälöityyn kasteluohjaimen ei ole ongelma. [47.] Syy erillisen sensoriohjaimen käyttöön on, että kyseinen Rainbird WR2 -sade- ja pakkassensoriohjain oli jo valmiiksi asennettu Pirkkolan jalkapallonurmelle. On mahdollista, että sateen tai pakkasen voi havaita myös käyttämällä Soilscout Hydra100 -maaperäsensoreita, mutta koska ne sijaitsevat maan alla, olisivat niiden havainnot aina myöhässä verrattuna maanpäälliseen sensoriin.



Kuva 25. Rainbird WR2 -sade- ja pakkassensoriohjain. Sensori vasemmalla ja sensoriohjain oikealla. [47.]

Räätälöity kasteluohjain tulee sisältämään tyypillisiä ominaisuuksia, joita käytetään ohjelmoitavissa logiikoissa (PLC). Ominaisuuksiin kuuluvat esimerkiksi historialliset lokit toteutetuista toiminnoista, hälytykset ja kastelulogiikan asetusten säätö.

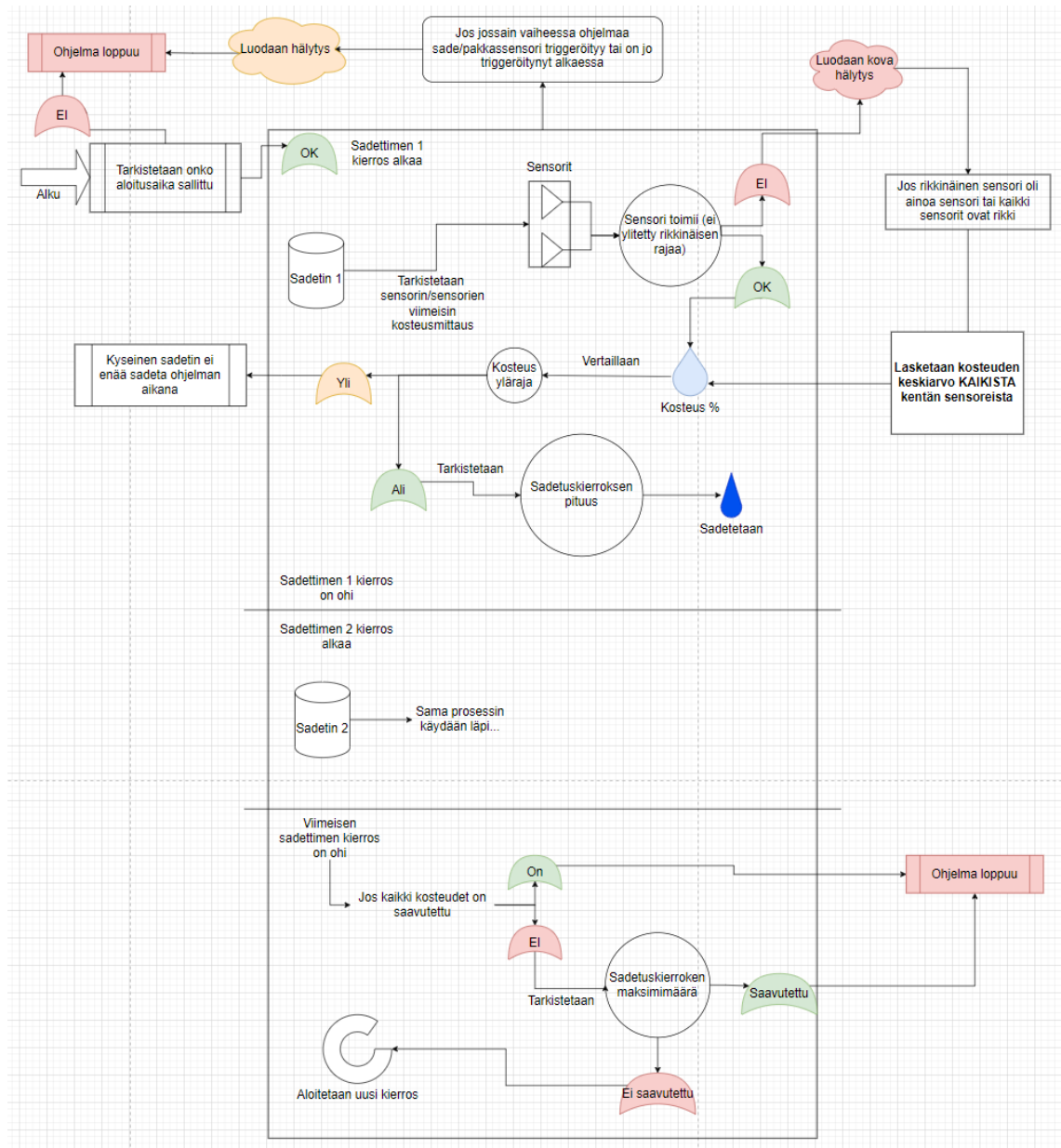
6.3 Kastelulogiikka

Ylläpitoyksikössä on määritelty seuraavat vaatimukset kastelulogiikalle:

- Kasteluaikojen pitää olla kastelulaitekohtaisia, mikä tarkoittaa, että logiikka määrittelee jokaiselle kentälle olevalle kastelulaitteelle oman sadetusajan minuutteina.
- Jokaiselle kastelulaitteelle voidaan rekisteröidä 1–3 uniikkia sensoria, joita logiikkaa käyttää kyseisten kastelulaitteiden toiminnan säätelyyn.
- Jokaiselle kastelulaitteelle voidaan asettaa yksi kosteuden yläraja, jonka avulla logiikkaa päättää, milloin kosteus on riittävä.
- Kastelulogiikka toimii vain tiettyinä päivinä ja kellonaikoina, eli samalla tavalla kuin automaattisessa kastelujärjestelmässä.

Vaatimusten pohjalta laadittiin räätälöityä kasteluohjainta varten yksityiskohtainen diagrammi koko ohjelmoitavan logiikan halutusta toiminnallisuudesta, johon sisältyy myös kastelulogiikka. Kuvassa 26 nähdään kastelulogiikan osuus diagrammista, jossa käydään läpi aikataulutetun ohjelman toiminta. Kastelulogiikka

käyttää samaa periaatetta kuin luvussa 6.1 mainitussa Irriot Ab:n *Level Conditions* -kastelulogiikassa.



Kuva 26. Räätelöityä kasteluohjainta varten laadittu kastelulogiikka älykkään ohjelman toiminnasta. Ohjelman toiminta alkaa vasemmasta yläkulmasta.

Kun aikataulutettu ohjelma alkaa, ensin tarkistetaan, onko kasteluohjaimessa kyseinen aika sallittu. Kasteluohjaimen voidaan asettaa aika- tai päivärajotuksia esimerkiksi urheilupelejä tai tapahtumia varten. Mikäli aika on sallittu, aloitetaan kastelulaitteiden kierroksien läpikäynti. Pirkkolan jalkapallonurmella ja muualla muulla nurmella ei riitä vesiputkissa vedenpainetta pitämään enempää

kuin yhtä kastelulaitetta päällä. Sen takia jokaisen kastelulaitteen logiikka käydään yksi kerrallaan läpi "kierroksina". Jos missään vaiheessa ennen ohjelman alkua tai ohjelman alettua Rainbird WR2 -sade- ja pakkassensoriohjain havaitsee sadetta tai pakkasta, ohjelma pysäytetään.

Kastelukierros alkaa tarkistamalla kastelulaitteelle rekisteröityjen maaperäsensoreiden viimeisimpiä mittauksia. Jos rekisteröityjä sensoreita on monia, lasketaan mittausten keskiarvo. Sensoreiden kosteuskokemuksille voidaan asettaa raja rikkiäiselle sensorille. Esimerkiksi sensori, jonka kosteuskokema on 0,3 %, on suurella todennäköisyydellä viallinen. Jos sensori tai sensorit ovat rikkiäisiä, luodaan hälytys kasteluohjaimen. Jos edes yksi sensori on ryhmästä ehjä, käytetään sen mittauksia. Jos kaikki sensorit ovat rikkiäisiä, käytetään koko nurmen sensoreiden mittausten keskiarvoa. Mikäli ei asetettaisi varatoimenpiteitä rikkiäisiä sensoreita varten, yksittäiset kastelulaitteet voisivat jättää kastelun kokonaan väliin, vaikka sitä tarvittaisiin. Kun kastelulaitteen huomioon otettava kosteus on saatu selville, vertaillaan sitä käyttäjän asettamaan kosteuden ylärajaan. Jos yläraja on saavutettu, kastelulaite ei enää kastele ohjelman aikana. Jos ylärajaa ei ole vielä saavutettu, tarkistetaan yhden sadetuskierroksen pituus ja aloitetaan kastelu siksi ajaksi. Kasteluohjaimen käyttäjä voi asettaa jokaiselle kastelulaitteelle erikseen sadetuskierroksen pituuden, joka määrittää, kuinka pitkään kastelulaite kastelee, kun se kerran aktivoidaan. Syy sadetuskierroksien käytölle ja sadetuskierroksien pituuden määrittämiselle on, että sensorit mittaavat 20 minuutin intervallein, jolloin kosteuden muutokset eivät heti näy mittauksissa. Kun ohjelman annetaan käydä kaikkien kastelulaitteiden läpi, on tarpeeksi aikaa kulunut, jotta voidaan nähdä uudet mittaukset sensoreista.

Kun jokaisen kastelulaitteen kastelukierros on suoritettu, tarkistetaan, ovatko kaikkien kastelulaitteiden sensorien mittaukset päässeet ylärajaan eli haluttuun lukemaan. Jos kaikki mittaukset ovat saavuttaneet ylärajan, ohjelma loppuu. Jos jotkin mittaukset jäävät vielä vajaaksi ylärajasta, tarkistetaan, onko kierroksien maksimimäärä jo saavutettu. Jos kierroksien maksimimäärä on saavutettu, ohjelma myös loppuu. Jos kierroksien maksimimäärää ei ole vielä saavutettu, ohjelma aloittaa alusta. Käyttäjä voi asettaa kierroksien maksimimäärän. Syy

kierroksien maksimimäärän olemassaololle on, että voidaan välttää ohjelman loputonta silmukkaa mahdollisissa virhetilanteissa sekä tilannetta, jossa ohjelma kiertää 1–2 jäljelle jäänyttä kastelulaitteita, joiden rekisteröidyt sensorit eivät ole vielä päivittyneet. On periaatteessa myös mahdollista, että maaperäsensoren lähettämä mittauspaketti ei pääse Base Station -asemalle asti, jolloin mittaus ei päivity. Mikäli käytetään Hydra100-maaperäsensoreita, joissa on 90 sekunnin lähetysintervallit, voidaan välttää useimpia virhetilanteita.

6.4 Tulevaisuus ja pohdinta

Insinööriyön aikana ei ehditty testata älykkään kastelujärjestelmän prototyyppiä Pirkkolan jalkapallonurmella. Ylläpitoyksikkö tilasi räätälöidyn kasteluohjaimen (eli ohjelmoitavan logiikan) kaupungin ulkopuoliselta yritykseltä. Tulevaa kasteluohjainta varten laadittiin tarkat tekniset vaatimukset laiteintegraatioiden, kastelulogiikan ja tukevien toimintojen osalta. Tulevaisuuden tehtävänä on asentaa uusi kasteluohjain Pirkkolan jalkapallonurmelle ja monitoroida sen toimintaa. Monitorointiin tulee kuulumaan Smartvatten-vesimittareiden ja Soilscout-maaperäsensoreiden mittauksien tarkastelu. Vesimittareita seuraamalla voidaan nähdä, kuluttaako järjestelmä pitkällä aikavälillä vähemmän vettä kuin aikaisempi järjestelmä. Soilscout-maaperäsensoreiden mittauksia voidaan tarkastella Soilscoutin omalta web-alustalta, josta voidaan nähdä, pysyykö kentän kosteus halutuissa lukemissa. Räätälöity kasteluohjain ei toistaiseksi tule sisältämään mahdollisuutta etähallintaan tai monitorointiin. On mahdollista, että tulevaisuudessa voidaan vastaavaa ominaisuutta kehittää tuleviin kasteluohjaimen toteutuksiin.

Älykästä kastelujärjestelmää testataan ja kehitetään tulevaisuudessa eteenpäin. Ylläpitoyksiköllä on tavoitteena, että älykkäällä kastelujärjestelmällä voidaan saada säästöjä vedenkäytössä ja parantaa yleisesti nurmikenttien kuntoa. Mikäli prototyyppi onnistuu, on ylläpitoyksiköllä motivaatiota laajentaa älykkään kastelujärjestelmän käyttöä muille Helsingin kaupungin jalkapallonurmille.

7 Yhteenveto

Insinööriyön tarkoituksena oli perehtyä älykkäisiin kastelujärjestelmiin ja tutkia älykkään kastelujärjestelmän käytännön toteutusta. Älykäs kastelujärjestelmä voi koostua kastelulaitteiden lisäksi valmiista sensoriohjainkokonaisuudesta tai erillisestä kasteluohjaimesta, johon on kytketty lisäosasensoreita. Työssä käytiin läpi erilaisia laitteita ja niiden toimintatapoja, joita voidaan käyttää älykkäässä kastelujärjestelmässä. Helsingin kaupungin ylläpitoyksikkö päätyi käyttämään toteutuksessa Soilscout Hydra100 -maaperäsensoreita ja Rainbird Eagle 900/950 -kastelulaitteita. Kasteluohjaimena haluttiin aluksi käyttää Rainbird ESP-LXME -ohjainta, mutta lopuksi päädyttiin tilaamaan räätälöity kasteluohjain muualta.

Älykäs kastelujärjestelmä voi tuoda merkittäviä säästöjä vedenkäytössä, mikä tarjoaa ratkaisun niin taloudellisiin kuin ympäristöllisiin ongelmiin. Helsingin kaupungin jalkapallonurmilla on myös huomattu ongelmia jalkapallonurmien hoidossa, mikä on johtanut joissain paikoissa huonokuntoisiin nurmiin. Älykäs kastelujärjestelmä voi parantaa nurmien kuntoa käyttämällä raakaa dataa kastelupäätöksien teossa, mikä myös helpottaa liikuntapaikanhoitajien työtä.

Jotta voitiin varmistaa Soilscout Hydra100 -maaperäsensoreiden soveltuminen älykkääseen kastelujärjestelmään, oli tehtävä tutkimusta maaperäsensoreiden mittauksien tarkkuudesta ja optimaalisesta asettelusta. Tutkimusten perusteella nähtiin, että jalkapallonurmen pinnalla oleva kosteus keskimäärin korreloi maaperäsensoreiden mittauksien kanssa. Tutkimusmenetelmät olivat kuitenkin alkeellisia, minkä takia aiheesta tarvittaisiin tulevaisuudessa lisää tutkimustietoa.

Työssä pohdittiin älykkään kastelujärjestelmän web-alustan toteutusta. Web-alusta täytti useimmat vaatimukset, joita ylläpitoyksikkö oli asettanut alustalle, mutta siihen ei onnistuttu toteuttamaan älykkään kastelujärjestelmän etähallintaa rajapinnan kautta. Web-alusta hyllytettiin puutteen takia, mutta se silti toimii esimerkkinä mahdollisesta etämonitorointi- ja hallintasovelluksesta.

Lopuksi tutkittiin aikaisempien työvaiheiden perusteella älykkään kastelujärjestelmän käytännön toteutusta. Haasteina ilmeni laitteiden integroinnin luonti ja järkevä kastelulogiikan määrittely. Älykkästä kastelujärjestelmästä suunniteltiin prototyyppi, johon kuuluivat Soilscout Hydra100 -maaperäsensorit, Rainbird Eagle 900/950 -kastelulaitteet ja räätälöitynä tilattu kasteluohjain eli ohjelmoitava logiikka. Tulevaisuuden haasteeksi jäi älykkään kastelujärjestelmän prototyypin testaus ja kehittäminen.

Lähteet

- 1 Gotcher, Malarie; Taghaveian, Saleh & Quetone Moss, Justin. 2017. Smart Irrigation Technology: Controllers and Sensors. Verkkoaineisto. Oklahoma State University. <<https://extension.okstate.edu/fact-sheets/smart-irrigation-technology-controllers-and-sensors.html>> Luettu 29.1.2021.
- 2 Evapotranspiraatio. Verkkoaineisto. Tieteen termipankki. <<https://tieteen-termipankki.fi/wiki/Nimitys:evapotranspiraatio>> Luettu 5.3.2021.
- 3 What is smart irrigation. Verkkoaineisto. Hydropoint. <<https://www.hydropoint.com/what-is-smart-irrigation/>> Luettu 29.1.2021.
- 4 Landscape Irrigation Design Manual. Verkkoaineisto. Rainbird. <<https://www.rainbird.com/documents/professionals>> Luettu 6.3.2021.
- 5 Li, Wei; Awais, Muhammad; Ru, Weimin; Shi, Weidong; Ajmal Muhammad; Ud din, Saad & Liu, Chenchen. Review of Sensor Network-Based Irrigation Systems Using IoT and Remote Sensing. Verkkoaineisto. <<https://www.hindawi.com/journals/amete/2020/8396164/>> Luettu 7.3.2021.
- 6 Wireless Soil Moisture Sensor For Sports Fields. Verkkoaineisto. Soilscout. <<https://soilscout.com/applications/sports-fields>> Luettu 7.3.2021.
- 7 Vasanth, Arjun; L. Grabow, Garry; Bowman, Dan; L. Huffman, Rodney & L. Miller, Grady. 2008. Evaluation of evapotranspiration-based and soil-moisture-based irrigation control in turf. North Carolina State University.
- 8 What is a PLC? Verkkoaineisto. Advanced Micro Controls Inc. <www.amci.com/industrial-automation-resources/plc-automation-tutorials/what-plc/> Luettu 10.06.2021.
- 9 Tiusanen, Johannes & Skelly, Jonathan. 2017. Massively reducing irrigation through permanent wireless below-ground monitoring. FIG Working Week 2017.
- 10 Soilscout Hydra100 User Manual. Verkkoaineisto. Soilscout. <www.soilscout.com/user-guides> Luettu 10.6.2021.
- 11 Eagle 900 & Eagle 950 Performance Chart. Verkkoaineisto. Rainbird. <www.rainbird.com/products/eagle900-950-series> Luettu 10.6.2021.

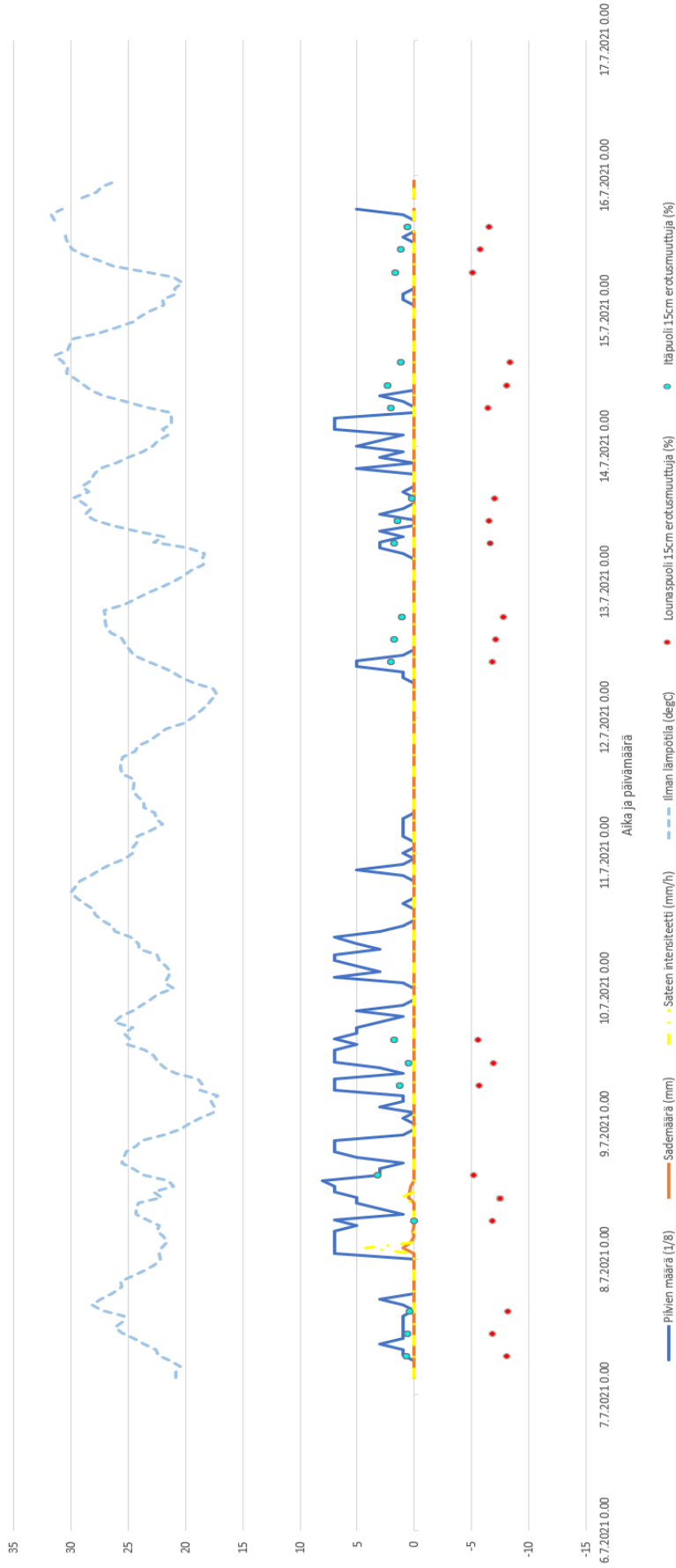
- 12 Github Star History. Verkkoaineisto. Qian, Tim. <www.star-history.t9t.io> Luettu 12.6.2021.
- 13 Hurskiy, Andrew & Merenych, Sofia. 2021. Front-end Javascript Frameworks Showdown: Vue vs React vs Angular. Verkkoaineisto. <www.clockwise.software/blog/angular-vs-react-vs-vue/> Päivitetty 21.7.2021. Luettu 21.8.2021.
- 14 Comparison with Other Frameworks. Verkkoaineisto. Vue.js. <www.vuejs.org/v2/guide/comparison.html#Angular-Formerly-known-as-Angular-2> Luettu 21.6.2021.
- 15 Martin, Matthew. 2022. MVC vs MVVM: Key Differences with Examples. Verkkoaineisto. Guru99. <www.guru99.com/mvc-vs-mvvm.html> Päivitetty 17.3.2022. Luettu 20.3.2022.
- 16 Scott Jr., Emmit A. 2015. SPA Design and Architecture: Understanding single-page applications. E-kirja. Manning Publications.
- 17 MVC. 2022. Verkkoaineisto. MDN Web Docs. <developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/MVC> Päivitetty 18.2.2022. Luettu 20.2.2022.
- 18 The Model-View-ViewModel Pattern. 2021. Verkkoaineisto. Microsoft Documentation. <docs.microsoft.com/en-us/xamarin/xamarin-forms/enterprise-application-patterns/mvvm> Päivitetty 7.8.2021. Luettu 10.8.2021.
- 19 Korhonen, Pekka. 2018. Pieni API-sanakirja. CGI. <<https://www.cgi.com/fi/fi/blogi/pieni-api-sanakirja>> Päivitetty 10.1.2018. Luettu 5.7.2021.
- 20 About Node.js. Verkkoaineisto. Node.js. <www.nodejs.org/en/about/> Luettu 10.7.2021.
- 21 Nest.js-dokumentaatio. Verkkoaineisto. Nest.js. <www.docs.nestjs.com> Luettu 10.7.2021.
- 22 What is a Relational Database (RDBMS)? Verkkoaineisto. Oracle Topics. <www.oracle.com/database/what-is-a-relational-database> Luettu 15.7.2021.
- 23 Hanson, Jared. 2022. Passport. Verkkoaineisto. <www.github.com/jared-hanson/passport> Päivitetty 29.4.2022. Luettu 5.5.2022.
- 24 Introduction to JSON Web Tokens. Verkkoaineisto. JWT. <www.jwt.io> Luettu 17.7.2021.

- 25 Components Basics. Verkkoaineisto. Vue.js dokumentaatio. <www.vuejs.org/guide/essentials/component-basics.html> Luettu 17.7.2021.
- 26 What is Cron and How Do I Use It? 2020. Verkkoaineisto. Pair Knowledge Base. <www.pair.com/support/kb/configuring-cron/> Päivitetty 27.2.2020. Luettu 21.7.2021.
- 27 Web Components. 2022. Verkkoaineisto. MDN Web Docs. <developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/Web_Components> Päivitetty 27.4.2022. Luettu 5.5.2022.
- 28 CRUD. 2022. Verkkoaineisto. MDN Web Docs. <developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/CRUD> Päivitetty 18.2.2022. Luettu 5.5.2022.
- 29 Roberts, Jonathan; Osei-Owusu, Paul; Harland, Andy; Owen, Alun & Smith, Aimée. 2014. Elite football players' perceptions of football turf and natural grass surface properties. Elsevier.
- 30 Cousins, Ben; Morris, John; Sunderland, Caroline; M. Bennet, Anthony; Shahtahmassebi, Golnaz & B. Cooper, Simon. 2021. Synthetic playing surfaces increase the incidence of match injuries in an elite Rugby Union team. Journal of Science and Medicine in Sport.
- 31 Paliobeis, Andrew; Sivasundaram, Lakshmanan; Knapik, Derrick; Labelle, Mark; Olson, Matthew; Karns, Michael; Salata, Michael J. & Voos, James E. 2021. Injury incidence is higher on artificial turf compared with natural grass in high school athletes: a retrospective cohort study. Current Orthopaedic Practice.
- 32 Construction and Maintenance of Natural Turf Grass. Verkkoaineisto. SCG fields. <www.scgfields.com/articles/construction-and-maintenance-of-natural-turfgrass/> Luettu 15.8.2021.
- 33 Neylan, John & Nickson, David. 2019. Compare possible hours of use for different sports field construction types and maintenance inputs. Sports Turf Association Victoria.
- 34 Manager's Guide to Natural Grass Football Pitches. Verkkoaineisto. FIFA. <www.fifa.com/about-fifa/official-documents> Luettu 15.8.2021.
- 35 Datta, Sumon; Taghvaeian, Saleh & Stivers, Jacob. 2018. Understanding Soil Water Content and Thresholds for Irrigation Management. Verkkoaineisto. Oklahoma State University. <extension.okstate.edu/fact-sheets/understanding-soil-water-content-and-thresholds-for-irrigation-management.html> Päivitetty 08/2018. Luettu 15.8.2021.

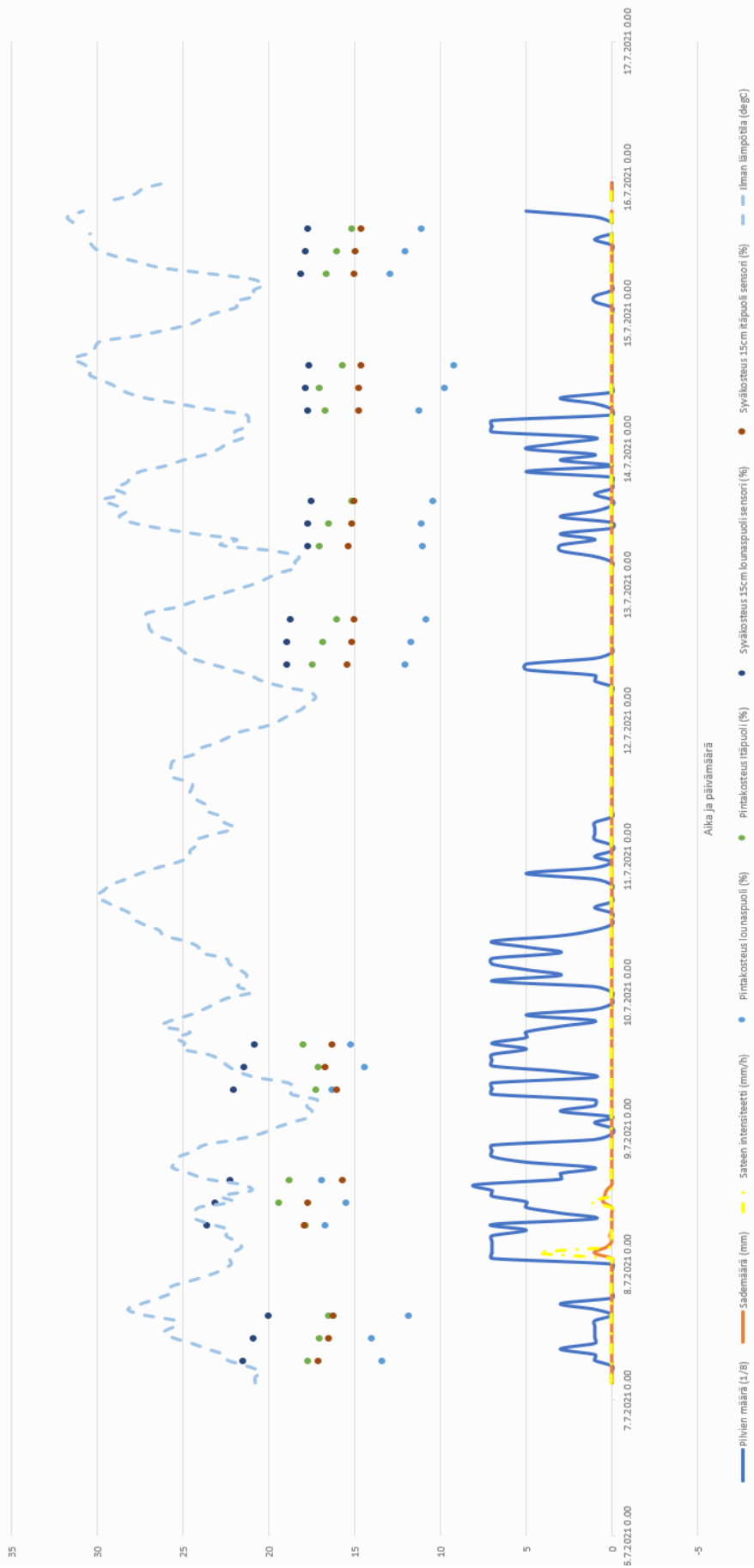
- 36 Importance of Soil Physical Properties. Verkkoaineisto. Cornell University. <www.safesportsfields.cals.cornell.edu/physical-properties > Luettu 15.8.2021.
- 37 Mowing. Verkkoaineisto. Cornell University. <www.safesportsfields.cals.cornell.edu/mowing > Luettu 15.8.2021.
- 38 Managing Thatch. Verkkoaineisto. Cornell University. <www.safesportsfields.cals.cornell.edu/managing-thatch > Luettu 15.8.2021.
- 39 Cultivating. Verkkoaineisto. Cornell University. <www.safesportsfields.cals.cornell.edu/cultivating > Luettu 15.8.2021.
- 40 Cámara, Joaquin; Lázaro, Alberto & Gómez-Miguel, Vincente. 2016. Introducing Heterogeneity Measurements in the Terroir Studies. Polytechnic University of Madrid.
- 41 Solenoid 101: What is a Solenoid? 2012. Verkkoaineisto. TLX Technologies. <www.tlxtech.com/articles/solenoid-101-what-is-a-solenoid> Päivitetty 25.8.2012. Luettu 24.8.2021.
- 42 Sadanta. Verkkoaineisto. Vesi.fi. <www.vesi.fi/sanasto/sadanta/> Luettu 24.8.2021.
- 43 Zito, Phil. 2020. The Ultimate Guide to Building Automation Protocols. Smart Buildings Academy. <www.guides.smartbuildingsacademy.com/the-ultimate-guide-to-building-automation-protocols> Päivitetty 18.8.2020. Luettu 3.3.2022.
- 44 Wendt, Johan. 2021. Sensor Based Irrigation Automation. Verkkoaineisto. Irriot Ab. <www.irriot.com/sensor-based-irrigation-automation/> Päivitetty 2.2.2021. Luettu 1.5.2022.
- 45 Soil Scout Receivers User Manual. Verkkoaineisto. Soilscout. <www.soilscout.com/user-guides> Luettu 1.5.2022.
- 46 What is the OSI Model? Verkkoaineisto. Cloudflare. <www.cloudflare.com/learning/ddos/glossary/open-systems-interconnection-model-osi/ > Luettu 1.5.2022.
- 47 WR2 Wireless Sensor User Manual. Verkkoaineisto. Rainbird. <www.rainbird.com/products/wr2-wr2-48-series-wireless-rainfreeze-sensors> Luettu 1.5.2022.

- 48 Natural Turf for Sport. Verkkoaineisto. Sport England. <www.sportengland.org/how-we-can-help/facilities-and-planning/design-and-cost-guidance/outdoor-surfaces#naturalturfsporssurfaces-5601> Luettu 8.5.2022.
- 49 Krause, Jörg. 2021. Developing Web Components with Typescript: Native Web Development using Thin Libraries. E-kirja. Apress Media.
- 50 What is Automation? Verkkoaineisto. IBM. <www.ibm.com/topics/automation> Luettu 8.5.2022.
- 51 Uusimäki, Harri. 2021. Ylläpitoyksikön päällikkö, Helsingin kaupungin kulttuurin ja vapaa-ajan toimialan liikunnan ylläpitoyksikkö. Keskustelu 11.10.2021.

Ensimmäisen tutkimusvaiheen pinta- ja syväkosteuden (15cm) erotusmuuttujat sääolosuhteiden kanssa



Ensimmäisen tutkimusvaiheen pinta- ja syväkosteus (15cm) sääolosuhteiden kanssa



Toisen tutkimusvaiheen pinta- ja syväkosteuden (10-25cm) erotusmuuttujat sää-olosuhteiden kanssa

