

Maatalouden alkutuotannon tehostaminen ja turvaaminen nanokokoluokan kaasukuplien tuottamiseen perustuvan teknologian avulla

Yhteenveto hankkeesta

Hankkeessa tuotettu innovaatio oli uusi happilannoitusmenetelmä, missä tyypillisiä lannoitekemikaaleja eli ravinteita ja mikroravinteita sisältävään kasvien kasteluveteen lisättiin happea ja happinanokuplia. Happinanokuplat tuotettiin kasteluveteen hydrodynaamisella kavitaatiolla siten, että ravinteita ja mikroravinteita sisältävä kasteluvesi ajettiin läpi hydrodynaamisesta kavitaattorista ja osa liuenneesta hapesta siirtyi vedessä nestefaasista kaasua sisältäviksi nanokupliksi, joilla on negatiivinen pintavaraus ja korkea pintajännitys. Happinanokuplat ovat vedessä hyvin stabiileja ja ne voivat säilyä jopa kuukausia. Lisäksi ne tuottavat veteen hyvin reaktiivisia happiradikaaleja, jotka toimivat hapettimina. Hankkeessa osoitettiin happinanokuplien ja kehitetyn laitteiston toimivuus käytännön olosuhteissa sekä selvitettiin vaikutusmekanismeja, toimintaan vaikuttavia tekijöitä sekä rajoitteita.

Satakunnan ammattikorkeakoulun Tutkimuskeskus WANDER oli hankkeen päätoteuttaja ja muina toteuttajina olivat sen lisäksi teknologiakehittäjä EOD Oy sekä alkutuottajat Agrifutura Tomaatit Oy, Nonre Oy ja Robbes Lilla Trädgård Ab. Nämä organisaatiot muodostivat yhdessä maaseudun innovaatioryhmän eli EIP-ryhmän. Hanketta toteutettiin kolmessa pilot-kohteessa. Salaattituotannossa Robbes Lilla Trädgård Ab:n kasvihuoneilla Lapinjärvellä, tomaatinkasvatuksessa Agrifutura Tomaatit Oy:n kasvihuoneilla Porissa sekä mansikan tunnelikasvatuksessa Nonre Oy:llä Sauvossa. Jokaiseen näihin pilot-kohteisiin koottiin ja asennettiin laitteisto siten, että luotiin toisiaan mahdollisimman hyvin vastaavat tutkimus- ja vertailuosastot.

Innovaation avulla tuotannossa saavutettiin parhaimmillaan mansikalla lähes 20 % lisäys. Happinanokuplien tehoon vaikuttavia tekijöitä havaittiin olevan ainakin valon ja lämmön määrä, koska tuotantolisäys toteutui pääsääntöisesti ns. yläkouruissa sekä päivittäin pidempään valon suorassa vaikutuksessa olevassa kasvutunnelissa. Mansikalla ja salaattilla huomattiin, että tuotantolisäys liittyi myös siihen, milloin happinanokupliilla varustetulla kasteluvellä aloitettiin kastelu. Hapen ja happinanokuplien lisäyksellä kasteluveteen saavutettiin tuotannon lisäys, mutta se vaatii osaamista happinanokuplien oikeasta käytöstä, esim. liuenneen hapen ja happinanokuplien suhde, ravinneliuoksen koostumus ja määrät, kastelun ajoitus, kasvualustamateriaali sekä olosuhteet yleisesti vaikuttavat tulokseen.

Ravinteiden ja mikroravinteiden määrissä havaittiin isoja eroja sekä lehdissä että marjoissa riippuen tuotannon vaiheesta. Kasvun alussa ravinteita ja mikroravinteita kulkeutui happinanokuplakastelulla enemmän lehtiin, mutta marjojen muodostuessa niiden määrä lehdissä putosi selvästi nopeammin kuin vertailukastelluissa. Satokauden lopussa sekä lehdissä, että marjoissa oli nanokuplakastelluissa keskimäärin selvästi enemmän ravinteita. Kasvualustanäytteistä havaittiin happinanokuplakastelun seurauksena enemmän ravinteita ja mikroravinteita kuin vertailussa. Vastaavasti puristevesinäytteissä ravinteita ja mikroravinteita oli happinanokuplakasteluilla yleisesti enemmän ja ylikasteluvesinäytteissä puolestaan vähemmän kuin vertailunäytteissä. Kaikki yksittäiset ravinteet ja mikroravinteet eivät kuitenkaan käyttäytyneet keskenään samalla tavalla. Erityisesti mansikkatuotannossa havaittiin kasvitautien määrän vähentyminen. Aiemmin vaivannut härmä eli kasveilla esiintyvä sienitauti poistui kokonaan.

Happinanokuplilla on vaikutusta ravinteiden ja mikroravinteiden kulkeutumiseen kasviin ja kasvissa, jolloin käytettyjen lannoitteiden määriä voisi optimoida ja todennäköisesti myös vähentää, koska kasvukauden jälkeen kasvualustaan niitä jäi selvästi enemmän kuin vertailukasteltuun kasvualustaan. Happinanokuplien vaikutukset näkyivät selvästi, mutta vaikutusmekanismien tarkempi selvittäminen on haastavaa.

Happinanokupliin on ladattu paljon odotuksia monilla eri sovellusaloilla kuten maatalous, jätevedenkäsittely, saostumien sekä biofilmien hallinta, lääketieteen sovellukset ja lämmönsiirto. On myös kehitetty erilaisia tekniikoita tuottaa nanokuplia, mutta ongelmia on skaalautuvuudessa esim. isojen vesimäärien käsittely sekä vaikutusmekanismien puutteellinen ymmärtäminen. Edellinen on ongelma esim. jätevedenkäsittelyssä ja jalkimäinen maataloustuotannossa. Lisäksi ongelmana on nanokuplien analysointi kiintoainetta sisältävistä vesistä.

Tulevaisuudessa tarvitaan helposti skaalautuva vähän energiaa kuluttava tekniikka nanokuplien tuottamiseen. Tarvitaan tietoa vaikutusmekanismeista liittyen jätevedenkäsittelyyn ja maataloustuotantoon sekä kehittää mahdollisimman reaaliaikaista analytiikkaa nanokuplien pitoisuuksien määrittämiseen erilaisista vesistä.

Hankkeen tarve ja tausta

Maatalouden alkutuotanto on Suomelle varsin keskeinen elinkeino ja sen yleisenä haasteena on heikko kannattavuus. Lisäksi ilmastonmuutos ja sääolosuhdetekijät yleisimminkin ovat iso tekijä, joka pitää huomioida tulevaisuudessa entistä paremmin. Koronapandemian aiheuttama poikkeustilanne osoitti selvästi sen, että alkutuotannon tarve ja merkitys lisääntyy ongelmatilanteissa. Samanaikaisesti maatalouden alkutuotannon pitää myös itse kehittää omaa sopeutumiskykyään mahdollisiin muuttuviin olosuhteisiin eli käytännössä hallita riskejä, jonka mahdolliset olosuhteiden muutokset voisivat aiheuttaa. Maatalouden alkutuotanto tarvitsee uusia teknologisia ja digitaalisia ratkaisuja kilpailukykyänsä turvaamiseen ja niitä on myös kehitetty ja otettu käyttöön. Huomioitavaan on, että alkutuotannon kehittäminen ja sen turvaaminen edistää myös siirtymistä vihreään talouteen.

Vesi on olennainen tekijä alkutuotannossa riippumatta siitä, onko kyseessä puutarhatuotanto vai kasvinviljely. Vesi on keskeinen tekijä sekä itse tuotteessa että kasvuprosessin mahdollistajana. Veden saatavuuden kannalta on olennaista varautua myös ilmastonmuutoksen aiheuttamiin seurauksiin, missä vesi tulee näyttelemään isoa roolia. Eteläisen Euroopan alueilla lisääntyneen kuivuuden vuoksi lähivuosikymmeninä maataloustuotanto saattaa yhä enemmän siirtyä Euroopassa pohjoisemmille alueille. Toinen keskeinen seikka on, että myös meillä Suomessa kuivat ja sateiset ajat tulevat vaihtelevaan voimakkaammin ja aiheuttavat menetyksiä, mikäli niihin ei ole varauduttu riittävästi. Tämän perusteella on helppoa arvioida, että tehtävät kehittämistoimet maatalouden veden ja sen käytön suhteen tulevat luomaan pohjan suomalaisen maatalouden kasvuun ja kilpailukykyyn pitkälle tulevaisuuteen. Samalla ko. kehittämistoimet mahdollistavat omalta osaltaan elinvoimaisen maaseudun säilymisen, ympäristön tilan paranemisen ja uusiutuvien luonnonvarojen kestävästä käytöstä maataloudessa.

Kasteluveden määrä ja laatu ovat tärkeitä tekijöitä, ja laatu- ja määrähäiriöt ovat mahdollisia myös kasvintuotantotilojen kastelujärjestelmien vesissä. Tyypillisesti kasteluvesinä käytetään puhdistamattomia pintavesiä, jotka saattavat sisältää mikrobiologista saastumista sekä myös kemikaaleja, joiden vaikutus kasteluvedessä voi olla haitallista viljelyskasvin kasvuun tai varsinaisen tuotteen laadulle. On olemassa tapauksia, joissa kasteluveden heikko laatu on aiheuttanut tuotannonmenetyksiä.

Tieteellisiin tutkimusartikkeleihin perustuen oli tieto, että kasvin- ja viljanviljelyä voitaisiin tehostaa veden laatua muuttamalla. Laboratoriotutkimuksissa oli havaittu, että kun kasteluveden happi- ja hiilidioksidimääriä kasvatetaan tuottamalla veteen hyvin pitkäikäisiä nanokokoluokan kaasukuplia (alle 180 µm) siementen itävyys nopeutuu ja kasvien kasvunopeus lisääntyy. Lisäksi nanokokoluokan happikuplat voisivat tuottaa veteen hapettavia radikaaleja estämään kasteluveden ja kasteluvesivesijärjestelmän mikrobien ja biofilmien kasvua. Tarkasteltaessa yleisesti tuotannon taloutta, siirtymistä vihreään talouteen sekä alkutuotantoon liittyvien riskien vähentämistä, nähtiin selkeä tarve tuottavuuden parantamiselle ja kasvunopeuden kiihdyttämiselle.

Hankkeen tavoitteet

Suomessa on lukuisia kasvin- ja marjanviljelyyn erikoistuneita maatiloja, jotka käyttävät huomattavia määriä vettä. Vesi muodostaa tärkeän osan näiden toimintaedellytyksistä, ja veteen liittyvät ongelmat heikentävät taloudellista kannattavuutta. Käytännössä kasteluveteen liittyvät kehitystoimet tähtäävät liiketoiminnan parantamiseen.

Hankkeen ensimmäisenä konkreettisena tavoitteena oli innovoida ja kehittää teknologiaa, millä tuotetaan nanokokoluokan kaasukuplia kasteluveteen. Toisena tavoitteena oli tutkia käytännön kokeilla innovaation ja teknologian toimivuutta ja soveltuvuutta kolmessa EIP-innovaatioryhmässä mukana olevassa alkutuotannon yrityksessä. Kolmantena tavoitteena oli tutkia teknologian vaikutusta kasteluveden ja kasteluvesijärjestelmän mikrobiologiaan ja biofilmeihin. Neljäntenä tavoitteena oli tukea elintarviketuotannon toimijoita vihreässä siirtymässä pellolta pöytään sekä kemikaalikuorman pienentäminen ja hiilijalanjäljen minimoiminen kemikaalittomalla teknologialla. Viidentenä tavoitteena oli tuotteiden hygienian ja säilyvyyden parantaminen.

Lisäksi tavoitteena oli käydä läpi yleisemmin kasvihuoneviljelyn kasteluvesien ongelmakohdat ja löytää niihin ratkaisuja. Varsinaisten kehittämistoimien lisäksi tämän hankkeen tavoitteena oli lisätä maatilojen osaamista vesiasioista, parantaa tiedonsaantia ja kehittää toimintavarmuutta.

Toteutus

Aloititus

Hanke aloitettiin 1.1.2022 keräämällä tieteellistä kirjallisuutta liittyen nanokuplien tuottamiseen, niiden detektointiin ja erilaisiin käyttösovelluksiin. Lisäksi koottiin kaksi laboratorioyksikköä, joilla tutkittiin nanokuplien määrittämistä erilaisista vesistä. Nanokuplien tarkka pitoisuusmäärittäminen osoittautui erityisen vaikeaksi, koska useimmat määrittämenetelmät eivät pystyneet erottamaan nanokuplia nanopartikkeleista. Tästä syystä esim. laservaloon perustuva Dynamic Light Scattering-tekniikka on käyttökelpoinen vain ultrapuhtaassa vedessä. Muissa vesissä liuenneen hapen mittaaminen on toistaiseksi paras vaihtoehto. Käytännössä hankkeen aikana parhaiten havaitut tekniikat perustuivat nanokuplien jäädyttävään vaikutukseen vettä kuumennettaessa sekä kahdenarvoisen raudan hapettumisen nopeuttamiseen.

Hankkeessa selvitettiin aluksi kaikkien kolmen pilot-kohteen eli Robbes Lilla Trädgård Ab, Agrifutura Tomaatit Oy:n ja Nonre Oy:n asennuspaikat sekä käytettävän kasteluveden happipitoisuus. Kaikissa näissä veden happipitoisuus oli hyvällä tasolla. Innovoidun ja kehitetyn koottavan pilot-laitteiston asentaminen sekä toisiaan mahdollisimman hyvin vastaavien tutkimus- ja vertailuosastojen valinta oli haastavaa ja kaikissa kolmessa kohteessa asennusratkaisu oli erilainen. Mansikankasvatus Nonre Oy:llä tapahtui vuosittain kasvutunneleissa huhtikuu-lokakuun välisenä aikana. Tomaatinkasvatus puolestaan Agrifutura Tomaatit Oy:n kasvihuoneilla tapahtui kahdessa 6 kk:n jaksossa. Kolmas pilot-kohde Robbes Lilla Trädgård Ab:n salaattituotannossa toimii jatkuvasti 8 viikon tuotantosykleissä.

Laitteisto ja laitteistoasennukset suunniteltiin sekä tarvittavat komponentit hankittiin. Koekohteita varten suunniteltiin mitattavat ja seurattavat suureet, joilla kehitetyn teknologian vaikutus kasvien ja marjojen kasvuun pyrittiin osoittamaan verrattaessa niitä perinteiseen kasteluun.

Näytteiden analysoimiseksi tehtiin kirjallisuusselvityksiä mitattavista parametreista, joihin nanokuplaveden oletettiin vaikuttavan. Selvitysten perusteella parametrit voitiin jakaa kolmeen luokkaan:

1. Kasvien kasvun määrittäminen ja arviointi

- Kasvin ja juurien pituuden mittaaminen
- Kasvien klorofyllisisällön määrittäminen
- Kasvin kasvuun liittyvien geenien aktivoinnin arviointi eli RNA-perusteinen transkriptomi-analyysi juurista ja lehdistä
- Verson pituus, varren paksuus, juurien pituus, kasvin/juurien kuivapaino, juurien tiheys, juurien pinta-ala, kylvön kasvunopeus ja tuoton määrä
- Kasvien vihreiden osien klorofyllipitoisuus
- Ravitsemukselliset, tuotteesta riippuvaiset parametrit: hehkutusjäännöksen, tärkkelyksen, rasvan, vitamiinien, proteiinien ja kuitujen pitoisuudet

2. Geeniekspressio ja hormonisynteesin analyysi, ympäristötekijät esim. lämpö ja ravinteiden määrä vaikuttavat kasvin kasvuun genomisen vasteen kautta.

- OsBT geeni yhteydessä typen talteenoton säätelyyn ja typen käyttöön
- PiT-1, fosfaatin (Pi) transportteri geeni säätelee fosfaattitasapainoa ja tunnistaa sen saatavuutta
- SKOR, kaliumi (K⁺) ionien porttigeenin ilmentyminen juurien soluissa eli tärkeä rooli K⁺-ionien vapautumisessa ksyleemiin ja K⁺-ionien kuljettamisessa juurista
- Gibberelliinihormonit (GA-hormonit) vaikuttavat siementen itämiseen, juurten ja versojen pidentymiseen, kukintaan ja hedelmien kuvioimiseen

3. Aistinvarainen analyysi (maku)

Asennukset

Ensimmäiseksi keväällä 2022 koottiin, asennettiin ja otettiin käyttöön pilot-laitteisto Nonre Oy:n tilalle. Laitteiston toimintaa seurattiin lähinnä tuotetun liuenneen hapen määrän perusteella, ja laite toimi heti alusta asti moitteettomasti. Toinen pilot-laitteisto asennettiin Agrifutura Tomaatit Oy:n tiloihin alkusyksystä 2022 laboratoriossa suoritettua esitestauksen jälkeen. Tämä on esitetty kuvassa 1. Myös kolmas pilot-laitteisto asennettiin syksyllä 2022 Robbes Lilla Trägårdin tilalle, ja se oli myös kahta aiemmin koottua kehittyneempi ja tuotetta muistuttavampi versio. Myös tämä on esitetty kuvassa 1.

Kaikissa kolmessa kohteessa kastelu- ja tutkimussysteemi oli jonkin verran erilainen johtuen kunkin kohteen alkuperäisestä kastelujärjestelmästä, jotka poikkesivat huomattavasti toisistaan. Tämän vuoksi kehitettiin kolme erilaista asennusratkaisua:

- Veden esikäsittely. Nanokuplat tuotettiin kasteluveden puskurisäiliöön ja verrokkialueella käytettiin käsittelemätöntä vettä. Asennuksen edellytyksenä oli, että kummankin osion kasvien oli oltava samassa tilassa huolimatta siitä, että kasteluvettä otettiin kahdesta eri puskurisäiliöstä. Tämä toteutustapa oli teknisesti yksinkertainen eikä vaatinut liittymistä tilan kasteluautomaatioon. Tätä ratkaisua sovellettiin Robbes Lilla Trägårdin tilalla.
- Veden käsittely kastelun aikana. Asennus toteutettiin kastelujärjestelmän alkupäähän esim. lannoitesekoittajaan, jolloin käsittely voitiin ohjata päälle kastelun ollessa käynnissä. Myös tämän toteutustavan tekninen asennus oli yksinkertainen, mutta liityntä kasteluautomaatioon oli välttämätön.

Erityisesti vertailukoeasetelmassa erilaisten viiveiden huomioiminen vaati tarkkuutta, jotta käsitelty ja käsittelemätön vesi saatiin ohjattua halutuille osille tuotantoa. Tätä asennustapaa hyödynnettiin Nonre Oy:n tilalla.

3. Panoskäsittely. Asennus toteutettiin kastelujärjestelmän loppupäähän, esim. yhden kastelurivin yhteyteen. Tässä toteutustavassa kasteluvesi otettiin välisäiliöön ja pumpattiin kasveille käsittelyn jälkeen. Menetelmän etuna oli hyvin tarkka kontrolli käsittelyn osalta. Lisäksi toteutustavasta johtuen käsitelty vesi ei voinut päätyä missään olosuhteissa verrokkina toimivalle osiolle. Toteutustapa oli kuitenkin hyvin haastava ja asetti reunaehdoja kastelujärjestelmän käytölle. Tämä asennustapa oli käytössä Agrifutura Tomaatit Oy:n tuotannossa.

Lisäksi kehitettiin analytiikkaa suunnittelemalla ja toteuttamalla läpivirtaukseen perustuva mittauskenno, mihin voitiin asentaa kolme sensoria esim. lämpötila, liuennut happi ja johtokyky. Pitkien välimatkojen vuoksi mittari toteutettiin etäluettavana, eli tuloksia voitiin tarkastella tarpeen mukaan reaaliaikaisesti. Tämän lisäksi kaikki tulokset tallennettiin pilvipohjaiseen tietokantaan, jolloin koelaitteiston toimintaa voitiin tarkastella säännöllisesti.



Kuva 1. Koottu pilot-laitteisto asennettuna Agrifutura Tomaatit Oy:n tiloissa vasemmalla ja Robbes Lilla Trägård Ab:lle asennettu kehitetympi laitteistokokonaisuus.

Ensimmäinen tuotantokausi

Ensimmäisen tuotantokauden aikana asennettujen pilot-laitteistojen toimintaa seurattiin kuten myös kasvun edistymistä ennen kuin tuotantoon liittyvät analysoitavat näytteet kerättiin. Mansikalla (Nonre Oy) kesän tuotantotulosten perusteella havaittiin, että tunnelissa 4, jota kasteltiin happinanokuplavedellä, saavutettiin 15,3 % suurempi tuotanto per metri kuin tunnelissa 2, jonka kasteluveteen ei happinanokuplavettä syötetty. Koska tunnelien sijainnissa oli suuri ero ei voida varmuudella sanoa kuinka paljon sijainti vaikutti tulokseen. Agrifutura Tomaatit Oy:n kasvihuoneella ensimmäisen istutuksen tuotanto jatkui kesäkuuhun 2023 asti. Sieltä kerättiin vesinäytteitä ja niistä tehtiin analyyskejä. Vaihtelut mittauksen välillä olivat melko isoja ja lisäksi laitteiston toiminta katkesi muutamaksi viikoksi, johtuen kasteluvesiletkujen katkeamisesta. Tomaattikasvatuksen tulokset ensimmäiseltä tuotantokaudelta analysoitiin ja tuotantotuloksien perusteella eroa vertailurivistöihin ei havaittu. Syynä on todennäköisesti kastelun katkeamisen lisäksi myös mikroravinteiden mangaanin ja raudan alentuneet määrät kasvissa. Myönteistä on se, että tuotanto ei kuitenkaan vähentynyt

vertailuun nähden vaan happinanokuplat kuitenkin todennäköisesti auttoivat kompensoimaan ravinteiden vähenemistä ja kastelun ongelmia.

Robbes Lilla Trägård Ab:lla päästiin aloittamaan viimeisenä eikä ensimmäisellä kaudella tehty analytiikkaa vaan seurattiin laitteiston toimintaa ja pohdittiin sitä mihin kohtaa tuotantoa se olisi järkevintä laittaa toimimaan.

Toinen tuotantokausi

Mansikankasvatus Sauvossa Nonre Oy:n kasvatustunneleissa ei ole toiminnassa talvella vaan uusi kasvatuskausi alkaa aina suunnilleen huhtikuun alussa. Koska edellisellä kaudella tunnelien sijainnissa oli suuri ero eikä voitu varmuudella sanoa kuinka paljon sijainti vaikutti tulokseen, päätettiin koeasetelma järjestää yhteen yksittäiseen tunneliin kesäksi 2023. Muutoksen myötä tutkittava alla ja vertailuala saatiin sijoitettua tunnelin 1 vastakkaisille reunoille. Kaikkiin muihin tunneleihin 2-4 kasteluveteen tuotettiin happinanokuplia. Happinanokuplien tuotantoa säädettiin optimoimalla painetasoja kavitaattorissa ja sinne syötettävässä hapessa. Lisäksi rakennettiin ja asennettiin uusi mittalaite seuraamaan kasteluveden laatua. Laite on esitetty alla olevissa kuvissa 2 ja 3. Vasemmalla koko laite anturipäineen ja oikealla ohjausyksikkö asennettuna Nonre Oy:n kastelusysteemiin tuottaen jatkuvaa mittausdataa. Mitattavat suureet olivat lämpötila, liuennut happi ja johtokyky.



Kuva 2. Laite anturineen.



Kuva 3. Mittausdataa kasteluvdestä.

Mansikoille tehtiin ensimmäinen aistinvarainen analyysi juhannusviikolla. Analyysillä pyrittiin selvittämään sitä, havaitseeko kuluttaja eroa happinanokuplakastelulla tuotetun mansikan ja perinteisellä kastelulla tuotetun välillä. Tätä aistinvaraista analyysiä varten kerättiin, koulutettiin ja testattiin soveltuva makuraati. Koulutukseen osallistuneesta ryhmästä noin puolet läpäisi testin ja vain läpäisseet osallistuivat varsinaiseen aistinvaraiseen analyysiin. Aistinvaraisen analyysin tulos oli, että makueroa ei pystytty havaitsemaan, oli mansikan kastelussa käytetty happinanokuplia tai ei. Aistinvarainen analyysi tehtiin standardin SFS-EN ISO 5495 mukaisesti. Mansikankasvatustunneleista otettiin vesinäytteet kasteluvdestä, kastelusta kasvuturpeesta puristamalla sekä ylikasteluvdestä kasvukauden aikana kahdesti. Ensimmäinen näyte otettiin kasvukauden alussa 12.6.2023 ja toinen lopussa 5.9.2023. Näytteet analysoitiin Eurofins Oy:llä. Vesinäytteistä mitatut tulokset eivät ole yksiselkoisia. Joidenkin ravinteiden ja mikroravinteiden välillä havaittiin selviä eroja happinanokuplaveden ja perinteisen kasteluveden välillä, mutta johtopäätösten tekeminen oli tässä vaiheessa vielä vaikeaa. Ravinteiden kulkeutumisen tarkastelemiseksi mansikoista otettiin myös vesinäytteiden kanssa samaan aikaan lehtinäytteitä, jotka analysoitiin myös Eurofins Oy:llä. Tavoitteena oli seurata ja saada tietoa ravinteiden ja mikroravinteiden kulkeutumisesta mansikan lehtiin. Lisäksi Oulun yliopiston sekä Tarton yliopiston analyysejä varten otettiin kasvualustasta mikrobiologisia näytteitä analysoitavaksi molekyylibiologisin menetelmin. Näytteet kerättiin syyskuun lopussa. Analysoinnissa tarkasteltiin sekä bakteereja että sieniä eristämällä ensin näytteistä DNA ja sitten monistamalla DNA:sta 16S-RNA geeniiä. Tavoitteena oli selvittää sitä, miten mikrobilajisto muuttuu maa-

aineksessa ja juuristossa nanohappikuplakasteluveden vaikutuksesta. Näytteet kerättiin kahdessa vaiheessa kasvukautta 2.7.2023 sekä 4.9.2023, jolloin nähtiin myös muutosta kasvukauden aikana. Tuloksissa erot olivat melko pieniä ja suurempi ero syntyi juuri näytteenottoajankohdasta. Heinäkuun näytteet poikkesivat syyskuun näytteistä enemmän kuin happinanokuplavedellä kastellut näytteet poikkesivat perinteisen kastelun näytteistä. Joitain alustavia varovaisia päätelmiä kuitenkin voitiin tehdä siitä, että happinanokuplavedellä kasteluissa juuri/maanäytteissä siitä, että sekä bakteerien että sienien diversiteetti oli hieman isompi. Diversiteettianalyysiin käytettiin Shannon indeksia (Alfa-diversiteetti) Principal Coordinate Analysis (Beta-diversiteetti). Lisäksi bakteereista Massiliabakteerin määrä oli happinanokuplilla kasteluissa näytteissä hieman pienempi ja Flavobakteerin vastaavasti hieman isompi. Syksyllä Baulia-bakteeria oli hieman enemmän kaikissa näytteissä kuin kesällä ja Rhodanobakteeria taas päinvastoin. Nonre Oy:n mansikankasvatuksen kesän 2023 tuloksia analysoitiin ja pohdittiin syitä tuloksiin. Käytännössä kesän 2023 poikkesivat selvästi kesän 2022 tuloksista tuotannon suhteen siten, että happinanokuplien kasvatusrivissä ei saavutettu samaa tuotantotulosta kuin vertailurivissä. Lehtianalyysien ja puristevesianalyysien perusteella havaitaan happinanokuplavedellä kasteluissa vähenemistä mangaani-, rauta-, kalsium-, magnesium- ja boorimäärissä verrattuna vertailuriviin. Tämän perusteella pystytään päättelemään, että osa lannoitteiden sisältämistä mangaanista ja raudasta ei jostain syystä siirtynyt kasveihin. Lisäksi havaittiin analysoimalla kasvukauden lopun lehtimassa sekä vastaava viimeinen mansikkamäärä, että mansikoiden taimien sijainnin on vaikutusta tuloksiin.

Agrifutura Tomaatit Oy:n pilot-laitteistoa ei käytetty tuotantokaudella 2, koska jouduttiin pohtimaan muutoksia kastelun parempaan hallintaan ensimmäisen kauden havaintojen perusteella.

Robbes Lilla Trägård Ab:n kasvihuoneella happinanokuplaveden syöttö päätettiin muuttaa salaattien vertikaaliviljelyyn siten, että yhtä tasoa kastellaan happinanokuplavedellä ja toista tasoa perinteisellä kasteluvedellä. Lisäksi laitteiston ohjaussysteemiä kehitettiin ja ohjelmaan tehtiin muutoksia. Toisella tuotantokaudella tutkittiin kaksi tuotantoerää. Taimipainojen perusteella havaittiin, että happinanokuplilla kastellut taimet olivat 9 % isompia kuin perinteisesti kastellut vertailusalaatit. Lisäksi happinanokuplilla kasteluissa salaateissa pienien taimipainojen lukumäärä oli vähentynyt vertailuun nähden ja taimipainojen keskihajonta oli hieman pienempi.

Kolmas tuotantokausi

Kehitettiin edelleen reaaliaikaista analytiikkaa, jotta kastelujen tilannetta voidaan seurata aiempaa paremmin. Aloitukset Nonre Oy:n ja Agrifutura Tomaatit Oy:n pilot-kohteiden mansikan- ja tomaatinkasvatuksissa tapahtui huhti-toukokuussa 2024.

Nonre Oy:n mansikankasvatuksen kesän 2023 tuloksiin perustuen Tutkimuskeskus WANDERin laboratoriossa tutkittiin mansikan lehdistä havaittujen mangaanin ja raudan pitoisuuksien laskun syitä. Koska lannoitteissa mikroravinteet ovat EDTA:lla tai DTPA:lla kelatoituina, ei niissä happinanokuplien vaikutuksesta havaittu tapahtuvan hapettumista. Sen sijaan, jos raakavedessä tai lannoitteiden mukana veteen päätyy kationeja, jotka pystyvät muodostamaan EDTA:n tai DTPA:n kanssa pysyvämpiä kelaatteja kuin mangaani ja rauta, niin niiden havaittiin syrjäyttävän mangaanin ja raudan kelaateissa ja aiheuttavan mangaanin ja raudan saostumista hapettumisen seurauksena.

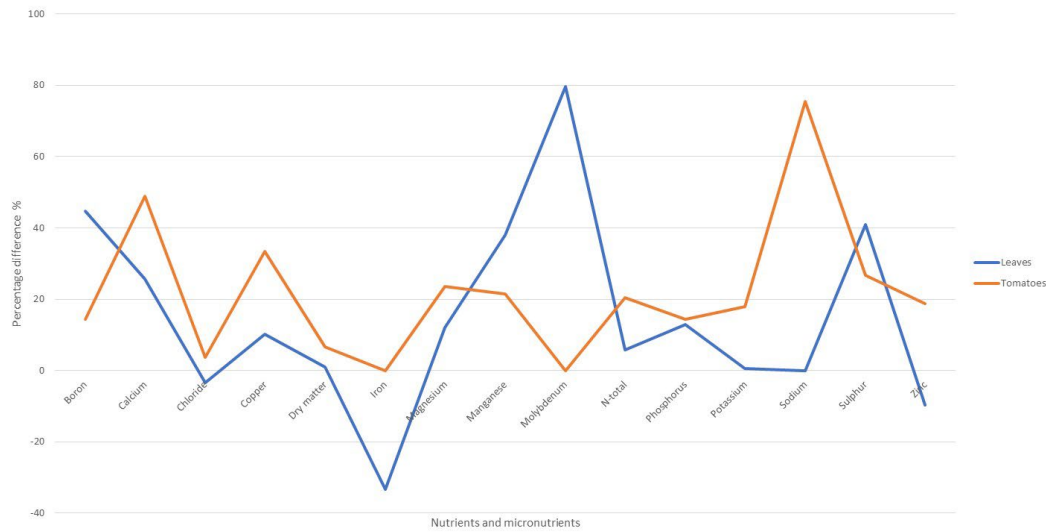
Nonre Oy mansikankasvatuksesta otettiin kesällä 2024 mansikkänäytteitä, lehtinäytteitä, vesinäytteitä sekä kasvualustänäytteitä neljä kertaa eli 30.5., 12.7., 6.8. ja 4.9. Kemialliset ravinne ja mikroravinne analyysit teetettiin Eurofinsin laboratorioissa, koska heiltä oli saatavilla sopivat analyysipaketit ravinteille kaikissa tarvittavissa erilaisissa mediuumeissa. Nonre Oy toteutti tuotannon seuraamista happinanokuplilla tunneliriveistä, joita kasteltiin happinanokuplia sisältävällä vedellä sekä vertailuksi rivistä, jota kasteltiin vain tavallisella kasteluvedellä. Kummatkin vedet sisälsivät muutoin samat lannoitteet ja lannoitemäärät. Havaittu tuotannonlisäys oli 8 %, mikä syntyi pääosin heinäkuun puolenvälin jälkeen. Muutoin tulosten lopullinen

tarkastelu on vielä kesken, mutta happinanokuplilla toteutettu ns. happilannoitus muuttaa ravinteiden kulkua kasvin lehtiin ja marjoihin merkittävästi ja käyttäytyminen eri alkuaineiden kohdalla on vaihtelevaa. Esimerkiksi ravinteiden kulkeutuminen marjoihin oli poikkeavaa kesäkauden aikana. Satokauden alussa vertailurivien mansikoissa oli selvästi enemmän ravinteita kuin happinanokuplilla kastelluissa riveissä ja tämä havaittu ero kasvoi heinäkuun alkupuolelle saakka, minkä jälkeen tilanne kääntyi päinvastaiseksi. Aika selvää kuitenkin on, että happinanokuplien vaikutukset ravinteisiin ja sitä kautta tuotantoon ovat hyvin monimutkaisia, mutta vaikuttaa siltä, että lannoitus suunnitelmalla pitänee happinanokuplia käytettäessä muuttaa ja optimoida. Lannoitteiden käytön optimoinnin puolesta puhuu myös se, että syyskuun alussa happinanokuplia sisältävällä vedellä kastelluiden rivien kasvualustasta löytyi keskimäärin lähes kaksi kertaa enemmän lannoitteina syötettyjä ravinteita kuin vertailurivien kasvualustoista. Poikkeuksena tähän olivat boori, jota oli nanohappikuplilla kastelluissa vähemmän sekä typpi, mangaani ja molybdeeni, joissa eroa ei ollut. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että osa lannoitteiden ravinteista jäi happinanokuplia käytettäessä käyttämättä.

Robbes Lilla Trägårdin salaatin kohdalla kesäkuussa otettiin lehtinäytteet, ravinnepitoisuusmittauksiin, aistinvaraisen analyysiin sekä säilyvyystutkimukseen. Lisäksi analysoitiin tuotantomäärää sekä otettiin vesinäytteet kasteluvesikierrosta, ylikasteluvdestä sekä puristevedestä. Varsinaiset ravinne- ja mikroravinneanalyysit teetettiin Eurofins Oy:llä kuten jo aiemminkin hankkeessa oli tehty. Kasteluvesissä raakavetenä käytetyn veden suolapitoisuus oli noussut kevään aikana melko korkeaksi, mikä näkyi natrium- ja kloridipitoisuuksissa sekä veden johtokyvyssä. Tämä vaikutti salaatin kasvuun siten, että salaatit olivat tavanomaista pienempiä. Kokoeroa happinanokuplilla ja perinteisesti kastellun välillä ei havaittu kuten ei myöskään aistinvaraisessa analyysissä makueroa. Ravinnetutkimuksissa havaittiin, että perinteisellä kastelulla lehdissä oli jonkin verran muita ravinteita ja mikroravinteita enemmän kuin happinanokuplia sisältäneellä kasteluvvedellä kastelluissa, mutta vastaavasti rautaa oli happinanokuplakastelluissa salaateissa kolme kertaa enemmän kuin perinteisesti kastelluissa. Salaatin säilyvyydessä ei eroa myöskään havaittu. Todennäköisesti kohonnut suolapitoisuus vaikutti jonkin verran tuloksiin.

Seuraavat näytteet otettiin 16.9.2024, jolloin otettiin lehtinäytteet ravinnepitoisuusmittauksiin sekä analysoitiin tuotantomäärää sekä otettiin vesinäytteet kasteluvesikierrosta, ylikasteluvdestä sekä puristevedestä. Tuotantomäärässä ei happinanokuplien lisäyksellä kasteluveteen havaittu lisäystä. Sen sijaan itse salaatin lehdissä eroa havaittiin. Kaikkia muita mitattuja alkuaineita havaittiin nanohappikuplilla kastelluissa salaateissa enemmän kuin perinteisesti kastelluissa vertailunäytteissä paitsi fosforia, kuparia ja sinkkiä. Keskimääräinen ero alkuainepitoisuuksissa n. 13 %. Myös kuiva-ainetta oli kaksinkertainen määrä vertailunäytteisiin nähden. Kiertävässä kasteluvvedessä näkyi vastaava ero siten, että perinteisessä kastelussa käytettävässä vedessä alkuainepitoisuudet hieman korkeampia kuin happinanokuplavedessä, mistä ne olivat paremmin siirtyneet lehtiin. Makueroa eri kasteluilla tuotettujen salaattien välillä ei havaittu.

Agrofuturan tomaateissa näytteet otettiin 6.11.2024 kattaen tomaattinäytteet ravinnepitoisuusmittauksiin ja aistinvaraisen analyysiin, lehtinäytteet ja kasvualustanäytteet ravinnepitoisuusmittauksiin sekä vesinäytteet kasteluvesikierrosta, ylikasteluvdestä että puristevedestä. Keskeisimpänä havaintona oli, että lähes kaikkia ravinteita ja mikroravinteita oli happinanokuplia sisältävällä vedellä kastelluissa tomaateissa 20 % enemmän kuin perinteisesti kastelluissa vertailutomaateissa poikkeuksena rauta ja molybdeeni, joissa eroa ei havaittu. Puristevesi- ja kasvualustanäytteissä happinanokuplilla kastelluissa näytteissä oli myös keskimäärin hieman enemmän ravinteita ja mikroravinteita kuin vastaavissa perinteisen kastelun näytteissä, mutta ero ei ollut kovin suuri. Makueroa eri kasteluilla tuotettujen tomaattien välillä ei havaittu. Tuotantolukemissa ei yllättäen kuitenkaan eroa havaittu. Kuvassa 4 on esitetty eri ravinteiden ja mikroravinteiden suhteellinen ero tomaatin lehdissä ja itse tomaateissa on vertailtaessa happinanokuplilla kasteltuja kasveja perinteisesti kasteltuihin. Kuvasta nähdään, että esim. rauta poikkeaa käyttäytymiseltään muista.



Kuva 4. Prosentuaalinen ero eri ravinteiden ja hivenaineiden pitoisuuksissa happianokuplakasteltujen ja perinteisestikasteltujen välillä tomaateissa ja tomaattien lehdissä kasvukauden lopussa. Tomaatit esitetty kuvassa oranssilla värillä ja lehdet sinisellä.

Olennaista tulkittaessa kuvaa 4 ja yleisemminkin happianokuplien vaikutuksia ravinteisiin ja mikroravinteisiin on ymmärtää niiden keskeiset roolit:

Typpi (N): Tukee ensisijaisesti lehtien kasvua ja fotosynteesiä ja jakautuu uudelleen kukille ja hedelmille niiden kehityksen aikana.

Fosfori (P): Välttämätön energiansiirrolle, juurten kehitykselle ja hedelmien muodostumiselle. Sitä siirtyy lehdistä kukkiin ja marjoihin tukien sekä tuotannollista että vegetatiivista kasvua.

Kalium (K): On marjojen hallitseva ravintoaine kypsymisen aikana, mikä vaikuttaa marjojen laatuun (koko, maku ja sokeripitoisuus). Sillä on merkitystä myös vegetatiivisessa kasvussa, erityisesti toisessa sadossa.

Rauta (Fe): Tarvitaan klorofyllin synteesiin ja yleiseen fotosynteesiin.

Mangaani (Mn): Osallistuu fotosynteesiin ja muihin aineenvaihduntaprosesseihin sekä tukee kehittyvien hedelmien kasvua ja aineenvaihduntaa ja on avainasemassa energia-aineenvaihdunnassa hedelmien kypsytymisen aikana.

Sinkki (Zn): Tärkeä kasvun säätelylle ja entsyymiaktiivisuudelle.

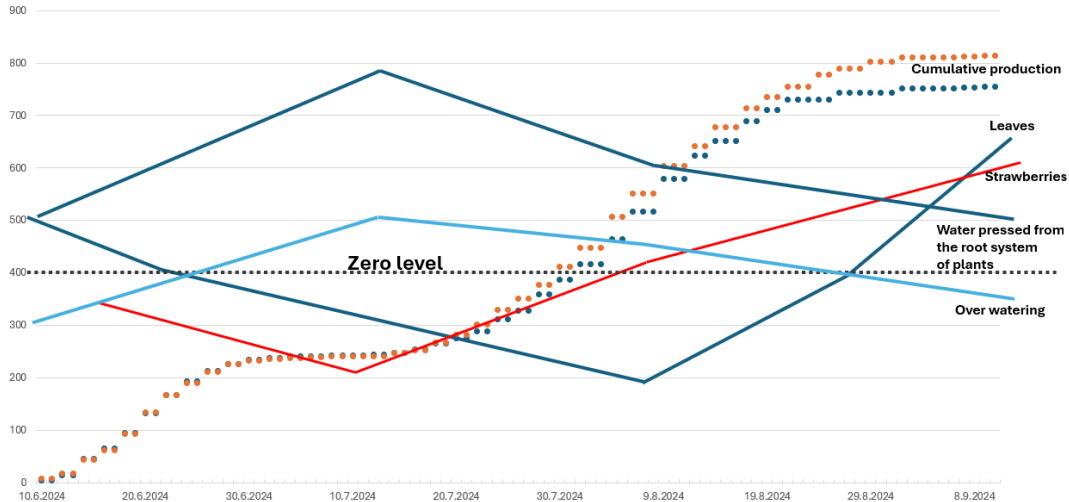
Kupari (Cu): Tukee entsyymien toimintaa ja fotosynteesiprosesseja.

Boori (B): Välttämätön kukan kehittymiselle, siitepölykanavien kasvulle ja hedelmien kiinnittymiselle.

Molybdeeni (Mo): Tärkeä typpiaineenvaihdunnalle, joka on kriittinen kukan ja hedelmien kehitykselle.

Esimerkiksi mansikalla kahden sadon ravinteiden ja mikroravinteiden hallinnassa on olennaista lannoituksen ajoitus, jolla varmistetaan se, että fosforia ja kaliumia ja mikroravinteita on saatavilla marjojen kriittisten kehitys- ja kypsymisvaiheiden aikana. Vastaavasti tasapainoinen ravinteiden ja mikroravinteiden saanti (= lannoitus) varmistaa, että lehdet pysyvät terveinä ja fotosynteesillisesti aktiivisina samalla, kun ne tukevat kahden peräkkäisen sadon suuria tarpeita. Ravinnekierto ja tasapaino lehtien, kukkien ja marjojen välillä varmistavat sen, että mansikkakasvit, joilla on kaksi satoa kesän aikana, voivat ylläpitää tasaista hedelmien tuotantoa ja laatua.

Kuvassa 5 on esitetty suhteellisena se keskimääräinen ero, mikä happianokuplia ja lannoitteita sisältäneellä vedellä suoritettujen kastelujen seurauksena näkyy ravinteiden ja mikroravinteiden määrissä mansikassa, mansikan lehdissä ja vesissä verrattuna pelkästään vastaavalla vain lannoitteita sisältäneellä vedellä tehtyyn kasteluun kesän aikana silloin, kun mansikka tuottaa kaksi satoa. Lisäksi kuvassa näkyy se, miten tuotanto kertyi happianokuplakastelussa verrattuna perinteiseen kasteluun kesällä 2024.



Kuva 5. Suhteellinen keskimääräinen ero ravinteiden ja mikroravinteiden määrissä mansikassa, mansikan lehdissä ja vesissä happinanokuplia ja lannoitteita sisältäneellä vedellä suoritettun kastelun ja pelkästään vastaavalla vain lannoitteita sisältäneellä vedellä tehdyn kasteluun välillä kesän aikana, kun mansikka tuotti kaksi satoa. Lisäksi kuvassa näkyy se, miten tuotanto kertyi happinanokuplakastelussa verrattuna perinteiseen kasteluun kesällä 2024.

Mansikalla ensimmäisen sadon aikana lehdet osallistuvat aktiivisesti fotosynteesiin tukeakseen hedelmien kasvua, mutta ravinteiden ja mikroravinteiden kohdistuminen lehtiin vähenee kasvin edetessä kohti toista satoa. Ensimmäisen sadon sadonkorjuun jälkeen ravinteet ja mikroravinteet jakaantuvat uudelleen vegetatiiviseen kasvuun ja kukannuppujen kehittymiseen toista satoa varten. Ravinteita ja mikroravinteita kulkeutuu runsaasti kukkiin kukinnan alkuvaiheessa tukemaan kukkien muodostumista ja varhaista marjankasvua. Marjojen puhkeamisen jälkeen ravinteet ja mikroravinteet siirtyvät enenemässä määrin marjoihin. Marjat ovat fosforin ja kaliumin pääasiallisia kohteita marjojen kehityksen ja kypsymisen aikana, erityisesti marjojen kasvuhuipun aikana. Kalium on ratkaisevan tärkeää hedelmien laadun kannalta, kun taas fosfori tukee energiansiirtoa ja marjojen kasvua. Vastaavasti mikroravinteista marjojen puhkeamiseen ja kypsymiseen tarvittavat ravinteet, kuten boori ja mangaani ovat tuolloin olennaisia.

Tulokset

Hankkeessa tuotettu innovaatio oli uusi happilannoitusmenetelmä, missä tyypillisiä lannoitekemikaaleja eli ravinteita ja mikroravinteita sisältävään kasvien kasteluveteen lisättiin happea ja happinanokuplia. happinanokuplat tuotettiin kasteluveteen hydrodynaamisella kavitaatiolla siten, että ravinteita ja mikroravinteita sisältävä kasteluvesi ajettiin läpi hydrodynaamisesta kavitaattorista ja osa liuenneesta hapesta siirtyi vedessä nestefaasista kaasua sisältäväksi nanokupliksi, joilla on negatiivinen pintavaraus ja korkea pintajännitys. Happinanokuplat ovat vedessä hyvin stabiileja ja ne voivat säilyä jopa kuukausia. Lisäksi ne tuottavat veteen hyvin reaktiivisia happiradikaaleja, jotka toimivat hapettimina. Hankkeessa lisäksi osoitettiin happinanokuplien toimivuus käytännön olosuhteissa sekä selvitettiin vaikutusmekanismeja, toimintaan vaikuttavia tekijöitä ja rajoitteita.

Tuotannossa saavutettiin parhaimmillaan mansikalla lähes 20 % lisäys. Happinanokuplien tehoon vaikuttavia tekijöitä havaittiin olevan ainakin valon ja lämmön määrä, koska tuotantolisäys toteutui pääsääntöisesti ns. yläkouruissa sekä päivittäin pidempään valon suorassa vaikutuksessa olevassa kasvutunnelissa. Mansikalla ja salaattilla huomattiin, että tuotantolisäys liittyi myös siihen, milloin happinanokuplilla varustetulla kasteluviedellä aloitettiin kastelu. Esimerkiksi mansikalla tuotannonlisäys saavutettiin vasta toisen satokauden aikana loppukesästä mutta mitään lisäystä ei havaittu ensimmäisessä sadossa alkukesästä, johtuen siitä, että taimet olivat jo varsin pitkälle kehittyneitä, kun niitä alettiin kastella nanohappikuplia sisältävällä lannoitevedellä. Vastaavanlainen ilmiö tapahtui salaattilla. Hapen ja happinanokuplien lisäyksellä kasteluveteen saavutettiin tuotannon lisäys, mutta se vaatii osaamista happinanokuplien oikeasta käytöstä, esim. liuenneen hapen ja happinanokuplien suhde, ravinneliuoksen koostumus ja määrät, kastelun ajoitus, kasvualustamateriaali sekä olosuhteet yleisesti vaikuttavat tulokseen.

Ravinteiden ja mikroravinteiden määrissä oli isoja eroja sekä lehdissä että marjoissa riippuen tuotannon vaiheesta. Kasvun alussa ravinteita ja mikroravinteita kulkeutui happinanokuplakastelulla enemmän lehtiin, mutta marjojen muodostuessa niiden määrä lehdissä putosi selvästi nopeammin kuin vertailukastelluissa. Satokauden lopussa sekä lehdissä, että marjoissa oli nanokuplakastelluissa keskimäärin selvästi enemmän ravinteita. Kasvualustanäytteistä havaittiin happinanokuplakastelun seurauksena enemmän ravinteita ja mikroravinteita kuin vertailussa. Vastaavasti puristeväsinäytteissä ravinteita ja mikroravinteita oli happinanokuplakasteluilla yleisesti enemmän ja ylikasteluväsinäytteissä puolestaan vähemmän kuin vertailunäytteissä. Huomionarvoista on, että kaikki yksittäiset ravinteet ja mikroravinteet eivät kuitenkaan käyttäytyneet keskenään samalla tavalla.

Eriyisesti mansikkatuotannossa havaittiin kasvitautien määrän vähentyminen. Aiemmin vaivannut härmä eli kasveilla esiintynyt sienitauti poistui kokonaan.

Happinanokuplilla on vaikutusta ravinteiden ja mikroravinteiden kulkeutumiseen kasviin ja kasvissa, jolloin käytettyjen lannoitteiden määriä voisi optimoida ja todennäköisesti myös vähentää, koska kasvukauden jälkeen kasvualustaan niitä jäi selvästi enemmän kuin vertailukasteltuun kasvualustaan. Olosuhteet kuten esim. valon määrä ja lämpö vaikuttavat happinanokuplilla saavutettavaan hyötyyn. Kasteluun mahdollisesti liittyvien ongelmien kuten esim. kastelun tilapäisen katkeamisen tai liikakastelun aiheuttama haitta pienenee happinanokuplia käytettäessä. Happinanokuplien vuorovaikutus lannoitteiden kanssa vaatii lisäselvityksiä kuten myös niiden vuorovaikutus kasvualustamateriaalin kanssa. Lisäksi tarvitaan lisää kasteluihin liittyvää mittausteknologiaa ja anturointia kasvihuone- ja tunneliviljelyyn.

Hankkeesta ja sen tuloksista koostettiin video, jonka suomenkielinen tekstitetty versio löytyy osoitteesta: <https://youtu.be/jXr4uD8gbso> ja englanninkielineversio osoitteesta: https://www.youtube.com/watch?v=Nm9eitd_ivl&t=19s.

Jatkotoimenpiteet

Happinanokuplien vuorovaikutus lannoitteiden kanssa vaatii lisäselvityksiä kuten myös niiden vuorovaikutus kasvualustamateriaalin kanssa ja vaikutukset kasvualustan ja kasvien eri osien mikrobiomiin. Tarvitaan lisää kasteluihin liittyvää uutta mittausteknologiaa ja anturointia kasvihuone- ja tunneliviljelyyn, jotta erityisesti ravinteiden siirtymistä voitaisiin paremmin seurata. Suuri haaste tulee olemaan anturien hinta, koska yhden pisteen mittaaminen ei kerro koko kasvatustilan tilanteesta riittävästi. Anturien tulisi olla suhteellisen edullisia, mikä ei ole helposti toteutettavissa. Lisäksi nanokuplien määrän mittaamiseksi tarvitaan tutkimusta, koska tällä hetkellä tarkemmat mittaukset onnistuvat vain ultrapuhtaista vesistä.

Happinanokupliin on ladattu paljon odotuksia myös monilla muilla sovellusaloilla kuten jätevedenkäsittely, saostumien sekä biofilmiä hallinta, lääketieteen sovellukset ja lämmönsiirto. On myös kehitetty erilaisia tekniikoita tuottaa nanokuplia, mutta ongelmia on skaalautuvuudessa esim. isojen vesimäärien käsittely sekä vaikutusmekanismien puutteellinen ymmärtäminen. Edellinen on ongelma esim. jätevedenkäsittelyssä ja jälkimmäinen maataloustuotannossa. Tulevaisuudessa tarvitaan helpommin skaalautuva ja vähän energiaa kuluttava tekniikka nanokuplien tuottamiseen. Erittäin olennaisena jatkotoimenpiteenä on tämän tutkimuksen jatkaminen kansainvälisessä yhteistyössä.

Kirjallisuutta:

C. Jiang, S. Zhao, W. Song, T. Yamaguchi, G. L. Riskowski, Effect of micro/nano bubble water on growth, yield and quality of lettuce under substrate cultivation, International Agricultural Engineering Journal, 2016, 25, 3, 1-8. <https://www.researchgate.net/publication/309513745>

K. A. Ahmed, X. Shi, L. Hua, L. Manzueta, W. Qing, T. Marhaba, W. Zhang, Influences of Air, Oxygen, Nitrogen, and Carbon Dioxide Nanobubbles on Seed Germination and Plant Growth, J. Agric. Food Chem. 2018, 66, 20, 5117–5124. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00333>

Y. Wang, S. Wang, J. Sund, H. Dai, B. Zhang, W. Xiang, Z. Hu, P. Li, J. Yang, W. Zhang, Nanobubbles promote nutrient utilization and plant growth in rice by upregulating nutrient uptake genes and stimulating growth hormone production, Science of the Total Environment, 2021, 800, 149627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149627>

Y. Wu, T. Lyu, B. Yue, E. Tonoli, E. A.M. Verderio, Y. Ma, G. Pan, Enhancement of tomato plant growth and productivity in organic farming by agri-nanotechnology using nanobubble oxygenation, J. Agric. Food Chem. 2019, 67, 39, 10823–10831. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b04117>

K. R. Marcelino, L. Ling, S. Wongkiew, H. T. Nhan, K. C. Surendra, T. Shitanaka, H. Lu, S. K. Khanal, Nanobubble technology applications in environmental and agricultural systems: Opportunities and challenges, Critical Reviews In Environmental Science and Technology, January 2023, 53, 14, 1378-1403. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2136931>

Y. Arablousabet, A. Povilaitis, The Impact of Nanobubble Gases in Enhancing Soil Moisture, Nutrient Uptake Efficiency and Plant Growth: A Review, Water 2024, 16(21), 3074. <https://doi.org/10.3390/w16213074>
M. Javed, A. Matloob, F. Ettoumi, A. R. Sheikh, R. Zhang, Y. Xu, Novel nanobubble technology in food science: Application and mechanism, Food Innovation and Advances 2023, 2(2), 135–144. <https://doi.org/10.48130/FIA-2023-0014>

J. He, Y. Zhou, C.-M. Geilfus, J. Cao, D. Fu, S. Baram, Y. Liu, Y. Li, Enhancing tomato fruit antioxidant potential through hydrogen nanobubble irrigation, Horticulture Research, 2024, 11, 6. <https://doi.org/10.1093/hr/uhae111>

S. Oshita, S. Boerzhijin, H. Kameya, M. Yoshimura, I. Sotome, Promotion Effects of Ultrafine Bubbles/Nanobubbles on Seed Germination, Nanomaterials 2023, 13, 10, 1677. <https://doi.org/10.3390/nano13101677>

K. Ebina, K. Shi, M. Hirao, J. Hashimoto, Y. Kawato, S. Kaneshiro, T. Morimoto, K. Koizumi, H. Yoshikawa, Oxygen and Air Nanobubble Water Solution Promote the Growth of Plants, Fishes, and Mice, PLoS ONE 8(6): e65339. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0065339>

<https://extension.umn.edu/strawberry-farming/strawberry-nutrient-management>

<https://journals.ashs.org/horttech/view/journals/horttech/25/4/article-p447.xml>

<https://soiltesting.cahnr.uconn.edu/suggested-fertilizer-practices-for-strawberries/>

<https://archive.ces.ncsu.edu/wp-content/uploads/2014/10/7-FertilityCombined.pdf?fwd=no>

[https://extension.umd.edu/sites/extension.umd.edu/files/publications/Strawberry_Production - Lantz 8-3-2010.pdf](https://extension.umd.edu/sites/extension.umd.edu/files/publications/Strawberry_Production_-_Lantz_8-3-2010.pdf)

<https://convoyofhope.org/articles/plant-nutrients/>

<https://www.agroliquid.com/resources/blog/key-stages-for-fertilization-in-fruit-production/>

<https://bmcpplantbiol.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12870-020-02807-4>

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10421280/>

<https://www.nature.com/articles/s41598-024-72472-2>

<https://www.mdpi.com/2073-4395/8/3/31>

<https://extension.umn.edu/phosphorus-and-potassium/potassium-crop-production>

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7927068/>

<https://www.cropnutrition.com/nutrient-management/phosphorus/>