



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 24/2026

Hyvinvointiteknologiaa lihanautatiloille

TeknoNauta -hankeparin loppuraportti

Maiju Pesonen, Leena Tuomisto ja Arto Huuskonen



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 24/2026

Hyvinvointiteknologiaa lihanautatiloille

TeknoNauta -hankeparin loppuraportti

Maiju Pesonen, Leena Tuomisto ja Arto Huuskonen



**Euroopan unionin
osarahoittama**

Viittausohje:

Pesonen, M., Tuomisto, L. & Huuskonen, A. 2026. Hyvinvointiteknologiaa lihanautatiloille : TeknoNauta -hankeparin loppuraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 24/2026. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 56 s.

Arto Huuskonen ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0003-0938-5675>



ISBN 978-952-419-174-6 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-419-174-6>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Maiju Pesonen, Leena Tuomisto ja Arto Huuskonen

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2026

Julkaisuvuosi: 2026

Kannen kuva: Maiju Pesonen/Luke

Tiivistelmä

Maiju Pesonen¹, Leena Tuomisto² ja Arto Huuskonen²

¹ Luonnonvarakeskus (Luke), Ruukki

² Luonnonvarakeskus (Luke), Maaninka

Erilaisten teknologioiden käyttö naudanlihatuotannossa ei ainoastaan paranna eläinten hyvinvointia ja tuotannon tarkkuutta. Teknologioilla on myös merkittäviä taloudellisia ja valvontatyötä keventäviä vaikutuksia. Automaattiset seuranta- ja valvontajärjestelmät vähentävät rutti- ja nomaisten tarkastusten ja manuaalisen havainnoinnin tarvetta. Kun eläimiä ja ympäristöolosuhteita voidaan valvoa etänä, työkuorma kevenee ja työajan voi kohdentaa tehokkaammin eläinten hoitoon ja tuotannon kehittämiseen. Luonnonvarakeskuksen (Luke) toteuttamassa TeknoNauta-hankeparissa täydennettiin Luke Ruukin tutkimuspihaton tutkimuslaitetekantaa uusilla laitteistoilla ja testattiin ja pilotoitiin hankittuja laitteita. Nyt käsillä olevaan raporttiin on koottu tietoa ja havaintoja keskeisimmistä TeknoNauta-hankeparissa hankituista ja testatuista laitteistoista.

Emolehmätiloilla laidunkausi on keskeinen osa vuoden kiertoa. Jos karja laiduntaa kaukana tilan talouskeskuksesta, eläinten valvonta voi olla haastavaa ja aikaa vievää. Erityisesti laajoilla luonnonlaitumilla eläinten paikannus voi olla haasteellista ja valvonta rajallista. Paikannuksen avulla voidaan nähdä, missä eläimet oleskelevat, kuinka paljon ne liikkuvat ja mitkä alueet laidunnuksesta kuormittuvat eniten. Tämä tukee laidunkierron suunnittelua ja rauhoittaa karjankasvattajan mieltä, kun tiedetään, missä eläimet ovat.

Loppukasvatettavilla naudoilla eläinten valvonnan painopiste on hyvinvoinnissa ja sairauksien ennaltaehkäisyssä. Seuranta perustuu ryhmätason käyttäytymisen, aktiivisuuden ja ympäristöolosuhteiden jatkuvaan tarkkailuun. Seuranta on työlästä etenkin suurten eläinmäärien kohdalla. Kasvavilla naudoilla voidaan käyttää kiihtyvyyssantureihin perustuvia terveyden ja hyvinvoinnin seurantajärjestelmiä. Sovellukset voivat tunnistaa ontumia, epätavallista liikkumista, levottomuutta tai apatiaa, jotka viittaavat kipuun tai sairastumiseen. Toisaalta jatkuva videokuvan analyysi mahdollistaa ryhmän aktiivisuustason seurannan, ruokinta- ja lepoalueiden käytön tarkastelun sekä stressin tai hierarkiakäyttäytymisen havaitsemisen.

TeknoNauta-hankeparin laitteista maatilakäyttöön sopivia ovat karjarahjat, lintujen karkotusjärjestelmät, UV-desinfiointilaitteet, rehuviljan mykotoksiinimittari, NIR-spektroskopia rehuarvojen määrittämiseen, eläinten paikannusjärjestelmä sekä navetan olosuhdeseuranta- ja kameravalvontajärjestelmät. Tutkimuskäyttöön soveltuvia laitteistoja ovat nautojen hengityskaasumittarit, bioaerosolien keräyslaite, kiihtyvyyssanturiperusteinen aktiivisuusmittaus, diagnostinen lämpökuvantamislaitteisto ja ruhon koostumusta määrittävä ultraäänilaitteisto.

Asiasanat: naudanlihantuotanto, emolehmät, lihanaudat, teknologia, terveys, eläinten hyvinvointi, laidunnus

Abstract

Maiju Pesonen¹, Leena Tuomisto² and Arto Huuskonen²

¹ Natural Resources Institute Finland (Luke), Ruukki

² Natural Resources Institute Finland (Luke), Maaninka

The use of various technologies in beef production not only improves animal welfare and production accuracy but also has significant economic benefits and reduces the workload related to monitoring. Automated monitoring and surveillance systems decrease the need for routine inspections and manual observation. When animals and environmental conditions can be monitored remotely, the workload is reduced and working time can be allocated more efficiently to animal care and production development. In the TeknoNauta project pair implemented by the Natural Resources Institute Finland (Luke), the research equipment of Luke's Ruukki research barn was supplemented with new devices, and the acquired equipment was tested and piloted. This report compiles information and observations on the key devices acquired and tested in the TeknoNauta project pair.

On suckler cow farms, the grazing season is a central part of the annual cycle. If the herd grazes far from the farmstead, monitoring the animals can be challenging and time-consuming. Especially on extensive natural pastures, locating animals can be difficult and supervision limited. With positioning technology, it is possible to see where the animals are located, how much they move, and which areas are most heavily affected by grazing. This supports grazing rotation planning and provides peace of mind for the farmer by ensuring they know where the animals are.

For finishing cattle, the focus of monitoring is on welfare and disease prevention. Monitoring is based on continuous observation of group level behaviour, activity and environmental conditions. This can be labor intensive, particularly with large number of animals. Growing cattle can be monitored using accelerometer-based health and welfare systems. Applications can detect lameness, abnormal movement, restlessness, or apathy, which may indicate pain or illness. In addition, continuous video analysis enables monitoring of group activity levels, evaluation of feeding and resting area use, and detection of stress or hierarchical behaviour.

Among the devices acquired in the TeknoNauta project pair, those suitable for farm use include cattle brushes, bird deterrent systems, UV Disinfection devices, mycotoxin meters for feed grain, NIR spectroscopy for determining feed values, animal positioning systems, and barn environmental monitoring and camera surveillance systems. Equipment suitable for research use includes cattle respiratory gas analyzers, a bioaerosol sampling device, accelerometer-based activity measurement systems, a diagnostic thermal imaging device, and ultrasound equipment for determining carcass composition.

Keywords: beef production, suckler cows, growing cattle, technology, health, animal welfare, grazing

Sisällys

1. TeknoNauta-hankeparin tausta ja tarkoitus.....	6
2. Laitehankinnat ja havainnot	7
2.1. Tiloille soveltuvat laitteet.....	7
2.1.1. Torju tylsyyttä virikkeillä – karjarahjat.....	7
2.1.2. Paranna bioturvallisuutta – UV-desinfiointilaitteet	10
2.1.3. Pidä linnut loitolla – lintujen karkotusjärjestelmät.....	11
2.1.4. Tiedä pihattosi olosuhteet – reaaliaikainen olosuhdeseuranta	14
2.1.5. Väsymätön apu valvonnassa – tallentava kamerajärjestelmä	17
2.1.6. Nuku yösi rauhassa – eläinten paikannuslaitteet laitumelle.....	21
2.1.7. Vältä myrkkylviljat – pikamittari mykotoksiinien määrittämiseen	23
2.1.8. Optimoi ruokintaa – käsikäyttöinen NIR-laite	25
2.2. Tutkimuslaitteet.....	26
2.2.1. Monikaasumittari	26
2.2.2. Bioaerosolien keräyslaite	28
2.2.3. Metaani- ja hengityskaasumittarit.....	30
2.2.4. Ultraäänilaite.....	32
2.2.5. Diagnostinen lämpökuvantamislaitte.....	35
2.2.6. Käyttötymisen kiihtyvyyssanturiperusteinen seurantalaitteisto.....	39
3. Yhteenveto.....	43
Viitteet.....	46

1. TeknoNauta-hankeparin tausta ja tarkoitus

Erilaisten teknologioiden käyttö naudanlihatuotannossa ei ainoastaan paranna eläinten hyvinvointia ja tuotannon tarkkuutta. Teknologioilla on myös merkittäviä taloudellisia ja valvontatyötä keventäviä vaikutuksia. Automaattiset seuranta- ja valvontajärjestelmät vähentävät rutiininomaisten tarkastusten ja manuaalisen havainnoinnin tarvetta. Kun eläimiä ja ympäristöolosuhteita voidaan valvoa etänä, työkuorma kevenee ja työajan voi kohdentaa tehokkaammin eläinten hoitoon ja tuotannon kehittämiseen.

Kustannusvaikutukset konkretisoituvat erityisesti sairauksien ennaltaehkäisyssä ja tuotantotappioiden vähentymisessä. Aikainen sairauksien havaitseminen pienentää lääkintäkuluja, vähentää kuolleisuutta ja parantaa kasvutuloksia. Anturiteknologian hankinta vaatii alkuinvestointeja, mutta järjestelmät maksavat usein itsensä takaisin muutamassa vuodessa parantuneen tehokkuuden, kohentuneen eläinten hyvinvoinnin ja vähentyneen työmäärän kautta.

Emolehmätiloilla laidunkausi on keskeinen osa vuoden kiertoa. Jos karja laiduntaa kaukana tilan talouskeskuksesta, eläinten valvonta voi olla haastavaa ja aikaa vievää. Erityisesti laajoilla luonnonlaitumilla eläinten paikannus voi olla haasteellista ja valvonta rajallista. Paikannuksen avulla voidaan nähdä, missä eläimet oleskelevat, kuinka paljon ne liikkuvat ja mitkä alueet laidunnuksesta kuormittuvat eniten. Tämä tukee laidunkierron suunnittelua ja rauhoittaa karjankasvattajan mieltä, kun tiedetään, missä eläimet ovat.

Loppukasvatettavilla naudoilla eläinten valvonnan painopiste on hyvinvoinnissa ja sairauksien ennaltaehkäisyssä. Seuranta perustuu ryhmätason käyttäytymisen, aktiivisuuden ja ympäristöolosuhteiden jatkuvaan tarkkailuun. Seuranta on työlästä etenkin suurten eläinmäärien kohdalla. Kasvavilla naudoilla voidaan käyttää kiihtyvyyssantureihin perustuvia terveyden ja hyvinvoinnin seurantajärjestelmiä. Sovellukset voivat tunnistaa ontumia, epätavallista liikkumista, levottomuutta tai apatiaa, jotka viittaavat kipuun tai sairastumiseen. Toisaalta jatkuva videokuvan analyysi mahdollistaa ryhmän aktiivisuustason seurannan, ruokinta- ja lepoalueiden käytön tarkastelun sekä stressin tai hierarkiakäyttäytymisen havaitsemisen.

Vuosien 2023–2026 aikana Luonnonvarakeskuksen (Luke) Ruukin toimipisteessä toteutetussa Edistyksellisellä teknologialla tukea nautakarjatalouteen (TeknoNauta) -hankeparissa testattiin erilaisia nautatiloille soveltuvia laitteita. Hankepariin kuuluivat investointihanke ja kehittämisshanke. Hankeparin yleistavoitteena oli resurssitehokkuuden, eläinterveyden ja kilpailukyvyyn edistäminen naudanlihantuotantoketjussa. Yksityiskohtaisina tavoitteina oli parantaa Luken Ruukin koetoiminta-asemalla sijaitsevan tutkimuspihaton tutkimusmahdollisuuksia, parantaa naudanlihantuotannon resurssitehokkuutta ja edistää vähähiilistä tuotantoa sekä edistää tuotantoeläinteknologiaan liittyvää yritystoimintaa Pohjois-Pohjanmaan alueella.

Investointihankkeessa täydennettiin Luke Ruukin tutkimuspihaton tutkimuslaiteteknologiaa uusilla laitteistoilla. Kehittämisshankeessa puolestaan testattiin ja pilotoitiin hankittuja laitteita tutkimuspihatossa ja kumppanuustiloilla sekä välitettiin hankkeessa kerättyä tietoa kohderyhmille. Nyt käsillä olevaan raporttiin on koottu tietoa ja havaintoja keskeisimmistä TeknoNauta-hankeparissa hankituista ja testatuista laitteistoista. Hankeparia rahoitettiin Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) Uudistuva ja osaava Suomi 2021–2027-ohjelmasta.

2. Laitehankinnat ja havainnot

2.1. Tiloille soveltuvat laitteet

2.1.1. Torju tylsyyttä virikkeillä – karjajarjat

Kehonhoito on nautojen tärkeä lajityypillinen käyttäytymismuoto. Siihen kuuluvat itsensä nuoleminen, itsensä rapsuttaminen sorkalla ja itsensä hankaaminen sopivaa materiaalia vasten. Keskinäinen kehonhoito (sosiaalinen nuoleminen) on naudoilla myös tapa hoitaa sosiaalisia suhteita. Hankaaminen irrottaa pölyä, likaa ja loisia ihosta ja karvapeitteestä.

Naudoilla on voimakas tarve kehonhoitoon. Laidunolosuhteissa naudat hankaavat itseään mm. puihin, aitoihin ja kiviin, erityisesti niiltä kehon alueilta, joihin kieli ei yllä (Goncu ym. 2019, Strappini ym. 2021, Reyes ym. 2022). Erilaisia kohteita käytetään luovalla tavalla. Sopivilla korkeuksilla olevat puiden rungot, kannot ja kivet hyödynnetään tehokkaasti kokonaisvaltaiseen kehonhoitoon. Luonnon tarjoamia mahdollisuuksia kannattaakin hyödyntää esimerkiksi laitumia ja laajoja jaloittelutarhoja suunniteltaessa. Rakennetussa ympäristössä sopivia hankauskohteita on vähemmän. Niiden puute voidaan ratkaista asentamalla eläintiloihin karjajarjoja tai muita kehonhoitoon tarkoitettuja rakenteita. Tuoreessa Euroopan Ruokaviraston julkaisemassa lihanautojen hyvinvointia käsittelevässä raportissa (EFSA 2025) suositellaan, että lihanaudoilla on käytössään karjajarja tai jokin muu sopiva virike.

Naudat ovat motivoituneita ja ahkeria karjajarjojen käyttäjiä. Karjajarjojen asentaminen karsinaan on moninkertaistanut kehonhoitoon käytetyn ajan ja vähentänyt hankaamista muihin rakenteisiin (De Vries ym. 2007). Nautojen motivaatio päästä käyttämään karjajarjaa on todettu korkeaksi. Naudat ovat valmiita työskentelemään karjajarjalle pääsyyn lähes yhtä paljon kuin rehun saatavuuden eteen (McConnachie ym. 2018). Vieroitetut liharotuiset vasikat ja nuoret naudat käyttivät pyöriviä heiluriharjoja keskimäärin 7–8 kertaa päivässä, 4–6 minuuttia kerralla (Horvath ym. 2020). Tämä muodostaa yhteensä 24–36 minuuttia karjajarjan käyttöä päivässä. Jos eläimen mahdollisuus kehonhoitoon on rajoitettu, naudat hinkkaavat itseään aitoihin, putkiin tai mihin tahansa ulokkeisiin. Tämä voi lisätä iho- ja hankaustapaturmia (Goncu ym. 2019). Karjajarja säästää rakenteita, koska tällöin kehonhoito tehdään juuri karjajarjalla.

Karjajarjat vaikuttavat positiivisesti eläinten hyvinvointiin rakennetussa ympäristössä. Karjajarjat toimivat nautakasvattamoissa virikkeinä, jotka mahdollistavat naudoille kehonhoidon toteuttamisen ja vähentävät turhautumista, tekemättömyyttä ja epänormaaleja käyttäytymismuotoja (Goncu ym. 2019, Ninomiya ym. 2019, Reyes ym. 2022). Parkin ym. (2020) kokeessa harjalla varustetussa karsinassa havaittiin vähemmän puskemista, stereotyyppisiä käyttäytymismuotoja ja astumiskäyttäytymistä kuin harjattomissa karsinoissa. Kokeessa oli yksi kiinteä harja 25 nuorta härkää kohden. Kiinnostus karjajarjan käyttöön säilyi koko 64 päivän kokeen ajan. Tästä voi päätellä, että karjajarja tarjoaa eläimille mielekästä puuhaa ja voi vähentää sosiaalista jännitettä eläinryhmässä. Turhautuminen, joka muutoin voi ilmentyä epätoivottuna käyttäytymisenä, pääsee purkautumaan karjajarjaan. Dunston-Clarken ym. (2024) tutkimuksessa selvitettiin karjajarjan vaikutusta nuorten nautojen tunnetiloihin. Eläinten, joilla oli karjajarja, arvioitiin olevan tyytyväisempiä ja sosiaalisempia sekä vähemmän levottomia kuin eläinten, joilla ei ollut karjajarjaa. Vasikoilla karjajarjat myös herättävät ja lisäävät leikkikäyttäytymistä (Unsal ym. 2025), joka on positiivisen hyvinvoinnin merkki. Kasvutuloksiin tai

rehunkäyttöön karjaharjalla ei ole ollut vaikutusta (Ninomiya ym. 2019, Park ym. 2020, Duns-ton-Clarke ym. 2024).

Karjaharjan käyttö parantaa/tukee:

- Ihon ja karvan puhtautta ja mahdollisten ulkoloisten poistoa
- Ihon verenkiertoa ja lihasten hieromista
- Lämmönsäätelyä
- Positiivista tunnetilaa ja stressin vähentymistä
- Leikkiä nuorilla naudoilla
- Karsinarakenteiden säilymistä ehjänä

Lihanaudoilla kestävyys ja turvallisuus ovat tärkeitä harjojen ominaisuuksia. Loppukasvatetta-vat naudat ovat voimakkaita ja harjojen tulee kestää vuodesta toiseen kovaa käyttöä. Tekno-Nauta-hankkeessa Luke Ruukin tutkimuspihattoon hankittiin mekaaniset, nimenomaan kasva-ville lihanaudoille suunnitellut FinnEasyn EasySwing Midi -harjat heilurivarrella (Kuva 1). Kysei-nen harja ei vaadi sähköä. Harjaosa liikkuu heilurivarren varassa, mikä mahdollistaa harjan monipuolisen käytön. Eläimet voivat rapsuttaa päätään ja kylkiään harjaan ja halutessaan nos-taa harjan selkensä päälle, mikä mahdollistaa ylettymisen muutoin vaikeasti tavoitettaville ke-hon alueille (Kuva 2). Jokaiseen tutkimuspihaton viiden eläimen karsinaan hankittiin yksi hei-luriharja.

Karjaharjat sijoitettiin karsinan puoliväliin kuivitetulle alueelle, jotta pohja olisi pitävä eläimen käyttäessä harjaa. Harjan sijoittelussa on syytä huomioida eläinliikenne. Harjan ympärillä on oltava vapaata tilaa. Harjaa ei kuitenkaan pidä laittaa makuualueen perälle, jotta makuurauha säilyy lepäävillä eläimillä ja kuivikepohja säästyy ylimääräiseltä tallaamiselta, mikä puolestaan hillitsee kuivikkeen menekkiä. Harjat ovat olleet tutkimuspihatossa kasvavien sonnien käy-tössä lähes vuoden ajan, eikä vikoja ole ilmennyt. Eläimet käyttävät niitä päivittäin kehonhoi-toon. Lisäksi harjat herättävät eläimissä leikkikäyttäytymistä.

Karjaharjat tulisi sijoittaa:

- Hyvälle, pitävälle alustalle karsinassa
- Harjalle tulisi olla pääsy mahdollisimman monesta suunnasta
- Alueelle, jossa eläimet liikkuvat paljon
- Korkeuden tulee sopia karsinassa oleville eläimille (kasvu)
- Hyvinvointia tukeva suositus voisi olla 1 karjaharja/20–30 eläintä.
- EFSA (2025) korostaa, että virikkeiden tulee olla vapaasti ja helposti saavutettavissa.



Kuva 1. a) Luke Ruukin tutkimuspihatossa EasySwing Midi -karjarahjat kiinnitettiin karsina-aitaan. Harja voidaan kiinnittää myös seinään. b) Karjarahja on mahdollista lukita yläasentoon karsinan puhdistuksen ajaksi. Kuvat: Leena Tuomisto/Luke.



Kuva 2. EasySwing Midi -karjarahjan heilurivarsi mahdollistaa sen monipuolisen käytön ja ylettymisen kehon muutoin vaikeasti saavutettaville alueille. Kuvat: Leena Tuomisto/Luke.

2.1.2. Paranna bioturvallisuutta – UV-desinfiointilaitteet

Kotieläintuotantoyksikköjä voidaan pitää korkean riskin ympäristöinä erilaisten bioturvallisuusriskien osalta. Jokaisessa kotieläinyksikössä on toiminallisia tekijöitä, jotka lisäävät bioturvallisuusriskiä. Näitä ovat mm. suuri eläintiheys, eläinten vastaanottaminen useilta tiloilta, eläinten siirrot, tilan toimintatavat, käytetyt rehut ja vesi. Bioturvallisuusriskit voivat muodostua erilaisista tartuntataudeista, jotka voivat kulkeutua kaikkien tilalla vierailevien ja työskentelevien mukana. Bioturvallisuus muodostuu ulkoisista ja sisäisistä toimenpiteistä tilan toimintatavoissa. Ulkoisilla toimenpiteillä estetään mahdollisten taudinaiheuttajien pääsy tilalle ja sisäisillä toimenpiteillä estetään jo olemassa olevien taudinaiheuttajien leviäminen kotieläintuotantoyksikössä. Bioturvallisuuteen kuuluvat tilalla tapahtuvan liikennöinnin valvonta, riskien ennaltaehkäisy, puhdistus, desinfektio ja tuholaiistorjunta (Brandt ym. 2008). Järjestelmällisten biosuojauksikäytäntöjen toteutus on edelleen epä johdonmukaista, erityisesti vierailijoiden hallinnan, kirjallisten bioturvallisuussuunnitelmien ja tuholaiistorjunnan osalta. Kiinnittämällä huomiota bioturvallisuuteen voidaan paremmin ehkäistä tauteja, minkä seurauksena mikrobilääkkeiden käyttö vähenee. Tämä korostaa ns. kovien fyysisten toimenpiteiden, kuten UV-desinfiointilaitteiden, merkitystä yhtenä osana biosuojauksjärjestelmää.

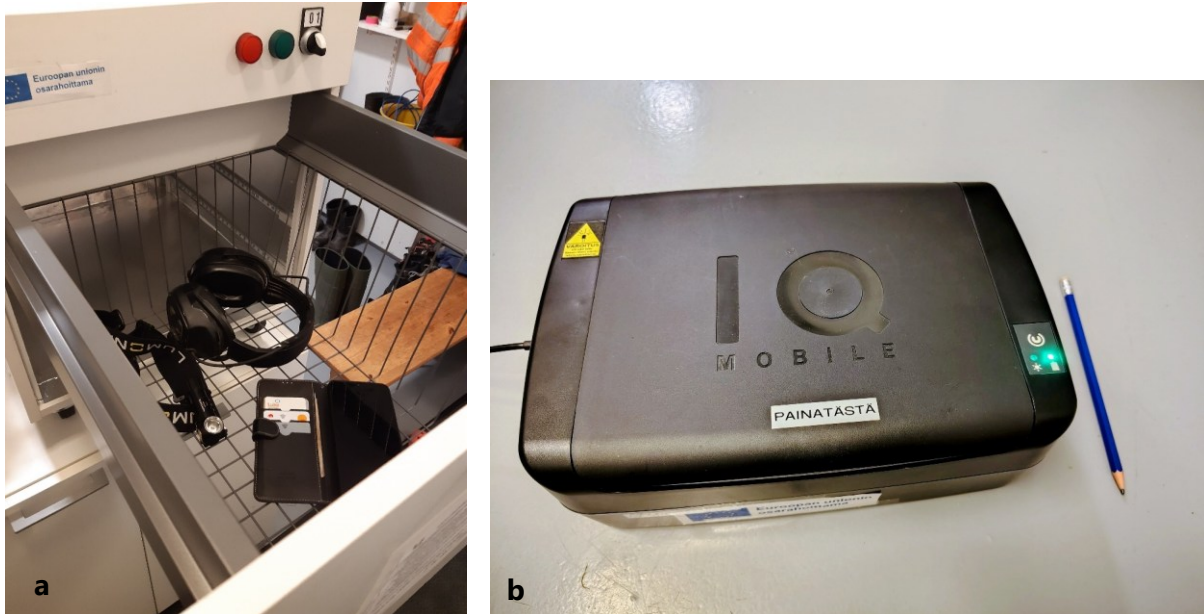
UV-desinfiointilaitteet toimivat tyypillisesti UV-C-säteilyn aallonpituusalueella 200–280 nm. Tämä aallonpituusalue inaktivoi mikro-organismeja aiheuttamalla fotokemiallisia vaurioita nukleiinihappoihin, mikä estää niiden replikaation ja mikro-organismien lisääntymisen (Mendes Peter ym. 2022). UV-desinfiointilaitteet on tehokas desinfektio menetelmä bakteereita, viruksia ja monia sieniä vastaan. Tehokkuuden edellytys on kuitenkin, että käsiteltäville pinnoille osuu riittävä annos säteilyä.

Kaupallisia UV-desinfiointilaitteita kutsutaan usein UV-laatikoiksi. Näitä käytetään maataloudessa ja terveydenhuollossa kädessä pidettävien esineiden (puhelimet, työkalut, pienet laitteet) desinfiointiin ennen niiden viemistä biosuojatulle alueelle. UV-laatikoiden käyttö voi vähentää erilaisten vektorivälitteisten bioturvallisuusriskien esiintymistä kotieläinyksiköissä, jotka voivat siirtyä ”puhdas-likainen”-rajan yli esimerkiksi työvälineiden, diagnostisten laitteiden ja henkilökohtaisten tarvikkeiden välityksellä (Ruston ym. 2021, Mendes Peter ym. 2022). Jo lyhyet jaksot (1–5 min) voivat inaktivoida erilaisia mikrobeja erilaisilta kiinteiltä pinnoilta. Huokoisilla pinnoilla desinfektio teho on heikompi (Ruston ym. 2021, Mendes Peter ym. 2022).

Varjostuminen ja esineiden monimutkaiset muodot voivat aiheuttaa haasteita UV-desinfektio tehoon. UV-desinfektio toimii näkölinjan kautta, jolloin varjoon jäävät alueet saavat pienemmän annoksen, mikä voi aiheuttaa elinkykyisten mikrobien jäljelle jäämistä epäsäännöllisen muotoisissa esineissä (Geldert ym. 2021, Mendes Peter ym. 2022). Orgaaninen aines, esimerkiksi lanta, multa, pöly tai biofilmit heikentävät merkittävästi UV-desinfektio tehoa. Tämä korostaa mekaanisen puhdistuksen tärkeyttä ennen jokaista desinfektio tapahtumaa (Ruston ym. 2021). Toistuva UV-valo/desinfektio heikentää muoveja ja kumeja ja voi aiheuttaa silmä- ja ihohaittoja käyttäjille. Riittävä suojaus ja koteloointi on välttämätöntä näiden laitteiden käytössä (Geldert ym. 2021). UV-desinfektion käyttö voi vähentää kemiallisten desinfektio aineiden tarvetta kotieläinyksiköissä. Käyttöönottoa voivat rajoittaa alkuinvestointi ja epävarmat hyödyt mahdollisesta desinfektio tehosta (Fountain ym. 2023, Mehmedi ym. 2025).

TeknoNauta-hankkeessa hankittiin kaksi Led Futuren osin eri käyttöön tarkoitettua UVC-laatikkoa parantamaan Luke Ruukin tutkimuspihaton bioturvallisuutta (Kuva 3). Laitteita käytetään erityisesti ”puhdas-likainen” -rajalla estämään mikrobien siirtymistä eläinhalliin tai ulos eläinhallista. LF CAB -desinfiointikaappi seisoo omilla jaloillaan ja sopii hieman suurempien

esineiden desinfektioon. Valmistajan mukaan esimerkiksi kannettavat tietokoneet, näppäimistöt, VR-lasit, radiopuhelimet voidaan desinfioida kaapilla. Desinfiointisykli on kolme minuuttia ja laite toimii verkkovirralla. Pienempi IQ-mobile-desinfiointilaatikko on siirrettävä ja sitä voi käyttää akulla tai verkkovirralla. Sen desinfiointisykli kestää 2 minuuttia. Molemmat laitteet käyttävät UVC-säteilyn aallonpituutta, mikä on tehokas mikrobien DNA- ja RNA-ketjut tuhoamisessa. UVC-desinfioimislaiteita on hyödynnetty tutkimuspihatossa eläinhallissa mukana kulkevien, muutoin hankalasti puhdistettavien, esineiden desinfiointissa. Esimerkiksi matkapuhelimia, kuulosuojaimia, otsalamppuja ja kyniä desinfioidaan laitteilla.



Kuva 3. Luke Ruukin tutkimuspihattoon hankitut UVC-desinfiointilaitteet. a) LF CAB -desinfiointikaappi sopii monenlaisten eläintiloissa mukana kulkevien esineiden desinfiointiin. b) IQ-mobile-desinfiointilaatikko on siirrettävä ja sillä voidaan desinfioida pienempiä esineitä kuten matkapuhelimia. Kuvat: Leena Tuomisto/Luke.

2.1.3. Pidä linnut loitolla – lintujen karkotusjärjestelmät

Pahimmillaan linnut (erityisesti kottaraiset, varpuset, kesykyyhkyt ja varislinnut) kokoontuvat suurina määrinä suljettujen nautatilojen ympärille. Linnut löytävät nautatilojen ympäristöstä paljon ruokaa. Suuri määrä lintuja aiheuttaa riskin rehujen ja veden mikrobikontaminaatiolle (Shwiff ym. 2012). Linnut tunnetaan *Escherichia coli* O157:H7 -bakteerin, salmonella- ja kampylobakteerisukuihin kuuluvien bakteerien sekä muiden elintarviketurvallisuutta ja nautaterveyttä uhkaavien merkittävien patogeeneiden kantajina. Lintujen aiheuttamat mikrobikontaminaatiot ovat suurimmillaan talviolosuhteissa (Medhaine ym. 2014). Lintujen karkottaminen alueilta, joihin lintuja ei toivota, on tilan bioturvallisuudesta huolehtimista.

Karkottimilla tai pelotelaitteilla pyritään muuttamaan lintujen käyttäytymistä niitä tappamatta. Menetelminä käytetään usein erilaisiin aisteihin perustuvia menetelmiä. Karkottimet luokitellaan visualisiin (heijastinteipit, petoleijat, laserit), auditiivisiin (tykit, bioakustiikka) ja kemiallisiin (aversiiviset aineet). Säikähdys- tai pakoreaktio perustuu äkilliseen ääneen tai valoon. Näihin kuuluvat erilaiset propaanitykit, pyrotekniikka, hälytys- tai hätähuutoja käyttävät äänilaitteet ja erilaiset vilkkuvalot (USDA 2006). Saalistusuhan tuntemusta voidaan aiheuttaa käyttämällä petoeläintä esittäviä siluetteja, leijoja, liikkuvia hahmoja tai lasereita. Aistiärsytykseen voidaan käyttää erilaisia kemiallisia aineita (Klug ym. 2023, Hornain & Rosely 2025).

Lintujen karkotus on usein haastavaa, koska linnut oppivat ja tottuvat karkotteisiin helposti (Gilsdorf ym. 2003). Kun käytetään usean eri karkotemenetelmän yhdistelmää, petomallit ja erilaiset heijastinkarkotteet toimivat johdonmukaisesti noin 60 minuutin ajan. Vastaavasti äänilaitteiden ja kemiallisten karkotteiden teho on vaihtelevampaa (Hornain & Rosely 2025). Tottuminen ja käyttöstrategia, ajoitukset, satunnaisuus ja yhdistelmät, vaikuttavat merkittävästi pitkäaikaiseen tehokkuuteen (Gilsdorf ym. 2003, Klug ym. 2023) (Taulukko 1).

Taulukko 1. Lintujen karkotuslaitteiden hyödyt ja haasteet.

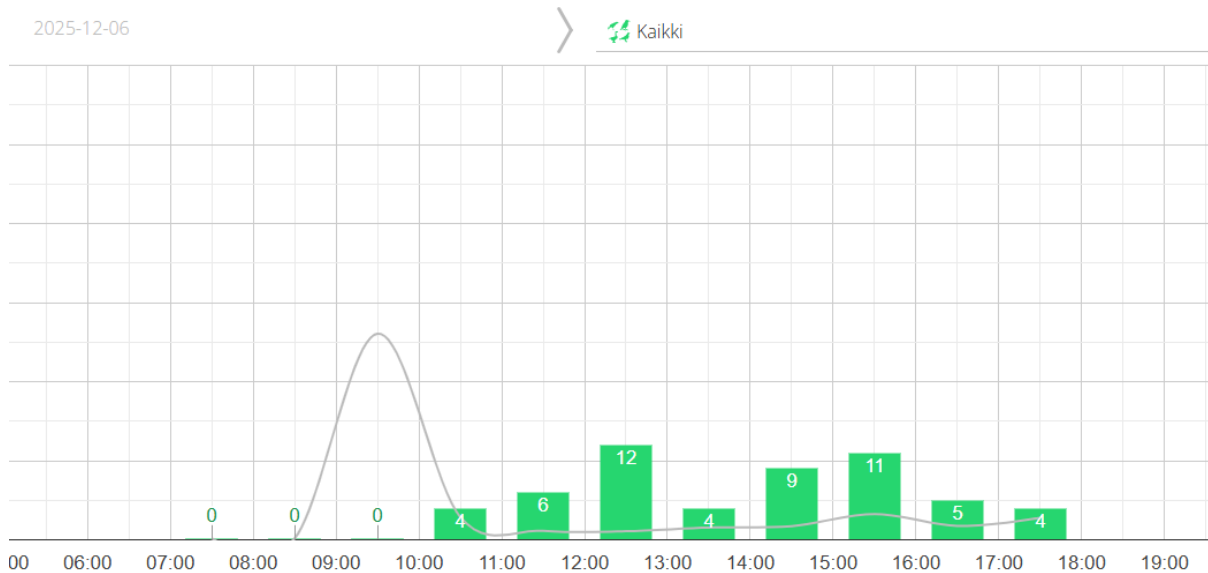
Hyödyt	Peruste	Kirjallisuus
Automaattiset laserkarkottimet	Jatkuvasti skannaavat laserit voivat suojata laajoja alueita vähäisellä työmäärällä.	Klug ym. 2023
Ohjelmoidut äänikarkottimet ja bioakustiset laitteet	Järjestelmät, jotka yhdistävät lajikohtaisia hälytys- ja hätähuutoja, tulisi ohjelmoida vaihteleviin taajuuksiin ja integroida vilkkuvaloihin.	Gilsdorf ym. 2003, Hornain & Rosely 2025
Tee lintujen olemisesta haasteellista	Yhdistä karkotelaitteisiin olosuhdemuutos. Poista lintujen istumapaikat, suojaa rehu, kohdenna karkottimen käyttö.	Klug ym. 2023
Haasteet	Peruste	Kirjallisuus
Tottuminen	Linnut tottuvat helposti paikalla pysyviin visualisiin laitteisiin tai ennustettaviin ääniin. Laitteita kannattaa siirtää, satunnistaa tai yhdistellä.	Gilsdorf ym. 2003
Melu- ja valohaitta	Tykit, pyrotekniikka ja kirkkaat valot voivat häiritä muuta asutusta. Lainsäädäntö voi rajoittaa näiden karkotteiden käyttöä.	Gilsdorf ym. 2003
Lajikohtaisuus ja mitta-kaava	Pelotteet voivat olla hyvin lajikohtaisia. Laaja-alaisuus voi olla este laitteen tehokkuudelle.	Gilsdorf ym. 2003, USDA 2006

TeknoNauta-hankkeessa hankittiin erilaisia lintujen karkotukseen tarkoitettuja laitteita käytettäväksi Luke Ruukin tutkimuspihaton läheisyydessä. BirdAlert 2.0 -laitteisto yhdistää eri karkotusmenetelmiä (Kuva 4). Laitteen mikrofoni kuuntelee ympäristön ääniä ja tunnistaa lähitöällä oleskelevan lintulajin sen äänien perusteella. Laite soittaa kaiuttimien kautta kyseisen lajin hätähuutoa. Laite tunnistaa hanhet, varislinnut, lokit ja kottaraiset. Laitetta voidaan käyttää verkkovirralla tai sen virtalähteeksi voidaan yhdistää aurinkopaneeli. BirdAlert 2.0 -laitteiston lisälaitteita ovat verkkovirralla toimiva kaasutykki ja akkukäyttöinen ilmalla täyttyvä pelotinhahmo. Ääni ja valo lisäävät pelotinhahmon tehoa.



Kuva 4. BirdAlert-lintujen karkotuslaitteistoon kuuluvat mikrofoni ja kaiuttimet, jotka toimivat verkkovirralla tai aurinkopaneelilla, sekä lisälaitteet pelotinhahmo ja kaasutykki. Kuva: Leena Tuomisto/Luke.

BirdAlert 2.0 -laitteistoa hallitaan etänä nettisovelluksen kautta. Sovelluksen avulla voidaan määritellä, mitä lintulajeja laite kuuntelee ja karkottaa sekä kaiuttimien asetukset ja laitteen mahdollinen nukkumisaika. Karkotusäänien historiatietoja voidaan seurata kuvaajista (Kuva 5). Äänikarkotus ja pelotehahmo ovat ehtineet olla käytössä tutkimuspihaton läheisyydessä rehunvalmistusalueella usean kuukauden ajan syksyllä ja syystalvella (pelotehahmo vain sulan maan aikana) ja käyttökokemus on ollut positiivinen: naakkojen ja varisten määrä alueella on tuntunut vähentyneen.



Kuva 5. BirdAlert-lintujen karkotuslaitteiston äänikarkotuksen historiatietoja voidaan tarkastella nettisovelluksen kautta.

BirdX BroadBand Pro -laitteisto käyttää karkoteääninä petolintujen ääniä, saalislintujen hätähuutoa ja ultraääntä. Se karkottaa eri lintulajeja ja lepakoita laajalta, 2,4 hehtaarin alueelta. Laitteiston ohjausyksikkö sijoitettiin Luke Ruukissa viljankuivaamon sisään ja neljä kaiutinta ulkoseinälle kohdistettuna eri ilmansuuntiin (Kuva 6). Ohjausyksiköstä säädetään kaiuttimien äänen voimakkuutta, eri ääniä ja taukojen pituutta. Laitteen käyttöohjeissa kehoitetaan vaihtelemaan asetuksia, jolla ehkäistään lintujen tottuminen ääniin. Laitteistoa on ehditty käyttää muutaman kuukauden ajan syyskaudella ja käyttökokemus on ollut positiivinen: lintuja tuntuksi liikkuvan alueella vähemmän.



Kuva 6. BirdX BroadBand Pro -lintujen karkotuslaitteiston ohjausyksikkö kiinnitettiin säänsuojaan viljankuivaamoon sisätilaan (a) ja kaiuttimet eri puolille viljankuivaamons ulkoseinään (b). Kuvat: Leena Tuomisto/Luke.

2.1.4. Tiedä pihattosi olosuhteet – reaaliaikainen olosuhdeseuranta

Rakennetussa ympäristössä ilman laatu, lämpötila ja kosteus vaikuttavat suoraan eläinten hyvinvointiin. Heikko ilman laatu heikentää eläinten terveyttä ja altistaa taudeille. Liian kuuma ja kostea ilma aiheuttaa lämpöstressiä ja heikentää tuotantoa. Olosuhdeanturien keräämä data helpottaa ympäristöolosuhteiden hallintaa. Automaattisesta tiedonkeruusta hyödytään ongelmatilanteiden selvittelyssä ja korjaavien toimenpiteiden suunnittelussa esimerkiksi eläinten sairastuessa tai kuivituksen epäonnistuessa. Jatkuva reaaliaikainen ympäristöolosuhteiden seuranta on nousemassa yhdeksi keskeiseksi osaksi täsmäkarjataloutta (PLF) ja IoT-pohjaista kotieläintalouden hallintaa (Bordignon ym. 2025, Losacco ym. 2025).

Kylmissä kasvattamoissa rakennuksen mikroilmastoa mittaavat olosuhdeanturit voivat antaa arvokasta tietoa olosuhteiden muutoksista, jotka voidaan yhdistää muihin tuotantotuloksiin. Mikroilmastoa kuvaavat mitattavat ominaisuudet muodostuvat lämpötilasta, lämpö-kosteusindeksistä (THI), ilmanlaadusta (NH₃, H₂S, CO₂, CH₄, hiukkaspitoisuudet ja pöly) ja ilman liikkeestä (Ozger & Cihan 2024, Provolo ym. 2025). Kylmissä kasvattamoissa lämpö-kosteusindeksin seuranta on yleistymässä eläinten hyvinvointiarvioinnissa ja ammoniakkipäästöjen mallinnuksissa (Waldrip ym. 2013, Lee ym. 2025). Olosuhdemittaustulokset tulisi yhdistää eläinperusteisiin mittauksiin, kuten käyttäytymis- ja aktiivisuusdataan. Näin saadaan kattava kuva tuotantoympäristöstä ja siinä tapahtuvista muutoksista, jotka vaikuttavat eläinten hyvinvointiin ja tuotantoon (Bordignon ym. 2025, Losacco ym. 2025, Zurnawita ym. 2025).

IoT-antureihin perustuvissa järjestelmissä lämpötila, kosteus, kaasupitoisuudet ja ilmanvaihtoparametrit mitataan tiheästi ja tiedot välitetään langattomasti palvelimelle, jossa ne visualisoidaan ja hyödynnetään päätöksen teossa (Ozger & Cihan 2024, Provolo ym. 2025).

Lämpötila- ja kosteusmittaukset tehdään useimmiten digitaalisilla T/RH-antureilla, jotka soveltuvat pitkään jatkuvaan mittaukseen pihatto-olosuhteissa (Provolo ym. 2025). NH₃ ja H₂S-mittauksiin käytetään joko elektrokemiallisia tai metallisioksiantureita (Shi ym. 2023).

Tutkimuskäyttöön voidaan käyttää fotoakustisia monikaasuanalysointilaitteita ja laserpohjaisia spektrometrejä, joilla saavutetaan korkea tarkkuus (Lee ym. 2025).

Hiukkaspitoisuuksien seurantaan käytetään optisia hiukkaslaskureita tai gravimetrisia keräimiä, kun on tavoitteena arvioida hengitysteiden ärsytystä tai pölypäästöjä (Bordignon ym. 2025). Ilmavirtausta mitataan kuumalanka-anemometreilla tai paine-eroantureilla (Leliveld ym. 2024).

IoT-järjestelmissä nämä anturit liitetään langattomiin solmuihin, jotka lähettävät mittaustiedot tukiasemalle LoRaWan-, Wi-Fi tai mobiiliverkon kautta. Tiedot tallennetaan pilvipalveluun tai tilan paikalliselle palvelimelle. Tietoja voidaan tarkastella käyttöliittymän tai mobiilisovelluksen kautta reaaliaikaisesti (Ozger & Cihan 2024, Provolo ym. 2025).

Anturit sijoitetaan tyypillisesti eläinten korkeudelle edustaviin paikkoihin ja/tai kuivikkeen tasolle, jotta olosuhteet vastaavat mahdollisimman hyvin eläinten todellista altistusta (Moser ym. 2024, Zurnawia ym. 2025). Antureiden keräämän tiedon hyödyllisyys muodostuu pitkäaikaisessa käytössä, jossa eri vuodenaikojen olosuhde-erot voidaan yhdistää mm. eläinten terveystietoihin (Moser ym. 2024, Lee ym. 2025) (Taulukko 2).

Taulukko 2. Olosuhdeantureiden hyödyt ja haasteet naudanlihantuotannossa.

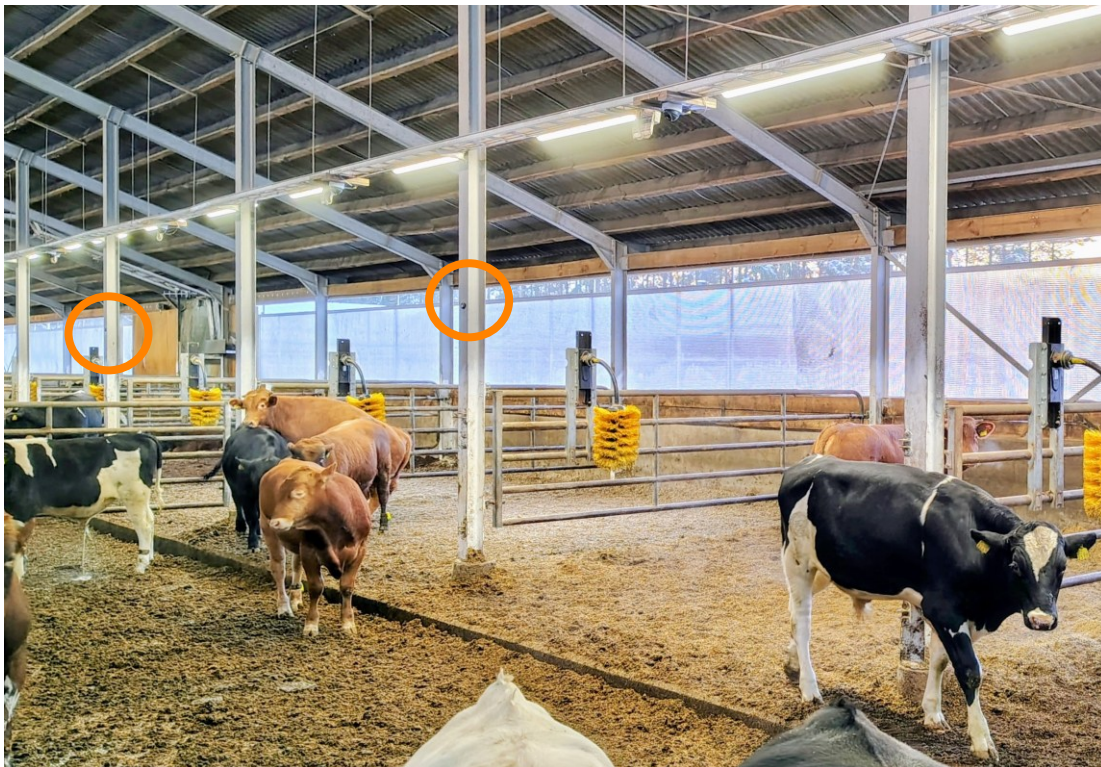
Hyödyt	Peruste	Kirjallisuus
Jatkuva hyvinvoinnin ja lämpötilan seuranta	Reaaliaikainen THI-seuranta mahdollistaa kuuma- tai kylmästressiin liittyvien kynnsarvojen käytön hälytyksiin.	Bordignon ym. 2025, Lee ym. 2025, Zurnawita ym. 2025
Haitalliset kaasut	Haitallisten kaasujen jatkuva seuranta voi auttaa vähentämään hengitystieongelmia. Kuivikepohjan NH ₃ , H ₂ S, CH ₄ ja CO ₂ -mittaukset mahdollistavat tarkemmat päästömallit ja -kertoimet, joita voidaan käyttää ympäristöraportoinnissa ja erilaisten kuivikestrategioiden rakentamisessa.	Waldrup ym. 2013, Wu ym. 2020, Lee ym. 2025
Integraatio PLF-järjestelmiin	Olosuhdemittausdata voidaan yhdistää eläinten käyttäytymis- ja tuotantotietoihin.	Losacco ym. 2025, Provolo ym. 2025, Zurnawita ym. 2025
Haasteet	Peruste	Kirjallisuus
Antureiden kestävyys ja kalibrointi	Pöly, kosteus ja syövyttävät kaasut aiheuttavat antureille drift-ongelmaa. Anturit tarvitsevat säännöllistä kalibrointia ja riittävän suojauksen.	Shi ym. 2023, Provolo ym. 2025
Tilan sisäinen vaihtelu	Ilmanvaihto, lannankertyminen ja eläinten sijoittuminen aiheuttavat vaihtelua lämpötilassa ja kaasupitoisuuksissa. Pieni määrä antureita ei välttämättä kuvaa kaikkien eläinten kokemia olosuhteita.	Zhang ym. 2016, Moser ym. 2024
Yhteydet ja virransyöttö	Metallirakenteet, suuri pinta-ala ja langattomien verkkojen kuuluvuus voi rajoittaa IoT-solmujen toimintaa. Pitkä käyttöaika rajoittaa akkukäyttöisten laitteiden näytteenottotaajuutta.	Ozger & Cihan 2024, Provolo ym. 2025
Datan määrä ja tulkinta	Jatkuva monianturiseuranta tuottaa suuria tietomääriä. Tarvitaan helpokäyttöisiä työvälineitä analytiikkaan ja yksinkertaistettuihin tunnuslukuihin.	Bordignon ym. 2025, Losacco ym. 2025
Kylmien kasvattamoiden vertailudatan puute	Valtaosa sensorijärjestelmistä ja validoinneista on tehty lypsykarjapihatissa tai vasikkakasvattamoissa.	Leliveld ym. 2024, Moser ym. 2024, Lee ym. 2025, Zurnawita ym. 2025

TeknoNauta-hankkeessa Luke Ruukin tutkimuspihattoon hankittiin olosuhdemittausjärjestelmä, joka koostuu eri kemiallisia, fysikaalisia ja biologisia parametrejä mittaavista antureista (katso myös luvut 2.2.1 ja 2.2.2). Eläinhalliin hankittiin RuuvTag Pro 4-in-1-anturit, jotka mittaavat jatkuvasti lämpötilaa, ilmankosteutta, ilmanpainetta ja anturin liikettä (Kuvat 7 ja 8). Yksi anturi kiinnitettiin eläinhallin ulkopuolelle keräämään vertailudataa ulkoilmasta. Langattomien anturien keräämä tieto tallentuu reitittimen avulla pilvipalveluun. Anturien keräämien tietojen lukeminen ja tarkastelu onnistuu helposti myös bluetooth-yhteydellä omalla matkapuhelimella. Ruuvi-olosuhdemittausjärjestelmä muodostaa tärkeän työkalun tutkimuspihaton olosuhteiden päivittäiseen seurantaan ja tutkimusten taustamuuttujien keräämiseen. Pilvipalvelu mahdollistaa tiedon graafisen historiatarastelun ja lataamisen omalle työasemalle (Kuva 9).

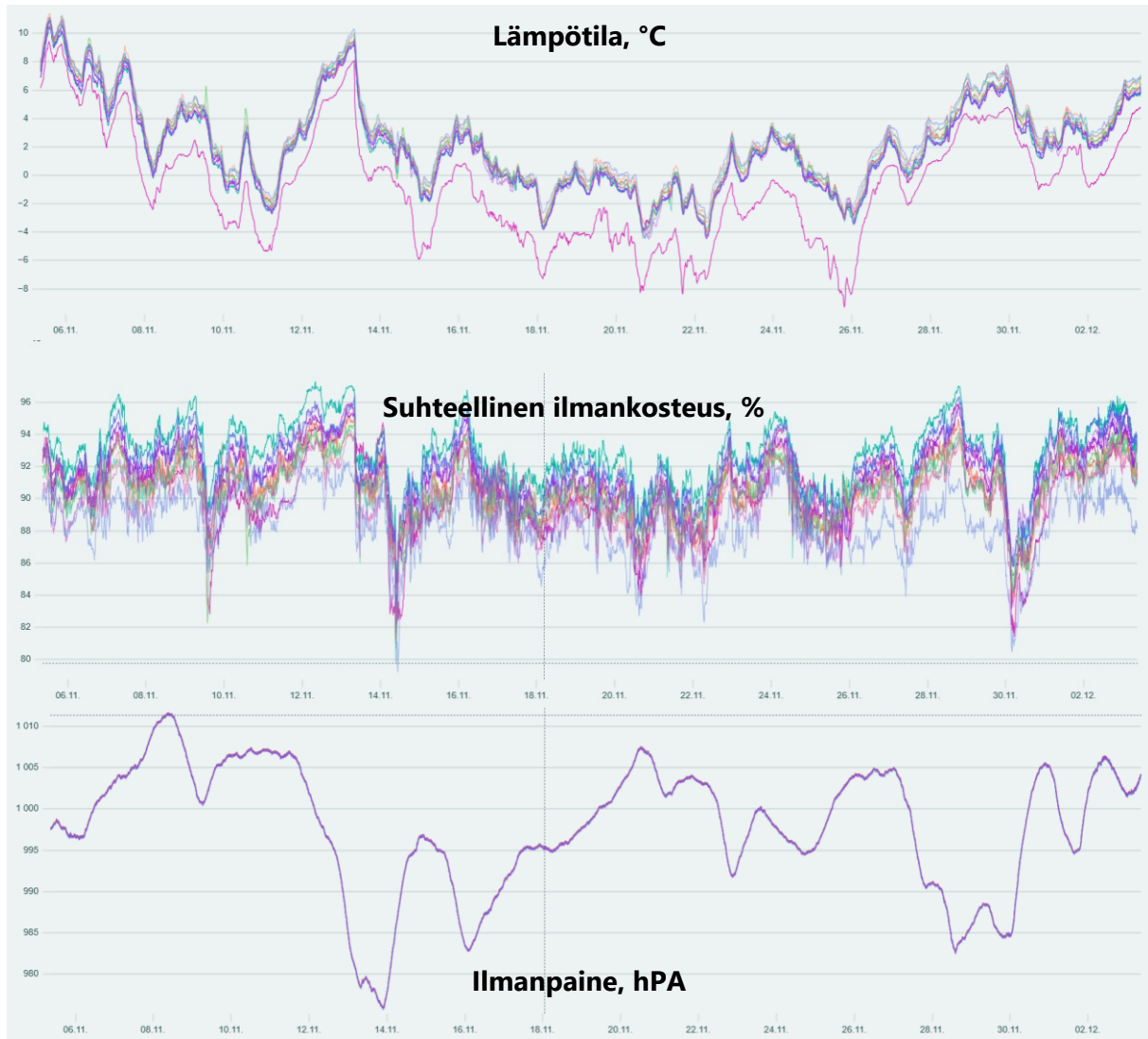
RuuvTag Pro 4-in-1-anturien suojausluokka on IP67, ja niissä on pitkäikäiset (12–14 kk), vaihdettavat paristot. Anturit ovat pölytiivitä ja roiskeveden kestäviä, mutta ne eivät sovellu kondensoiviin olosuhteisiin. Laitteisto ollut käytössä tutkimuspihatossa puolen vuoden ajan (elotammikuu) ja tänä aikana se on toiminut moitteettomasti.



Kuva 7. RuuvTag Pro 4-in-1-anturit mittaavat jatkuvasti lämpötilaa, ilmankosteutta ja ilmanpainetta. Kuva: Leena Tuomisto/Luke.



Kuva 8. RuuvTag Pro 4-in-1-anturit sijoitettiin Ruukin tutkimuspihatossa mahdollisimman lähelle eläinten tasoa. Oranssit ympyrät osoittavat anturien paikkoja. Kuva: Leena Tuomisto/ Luke.



Kuva 9. Pilvipalvelun avulla RuuviTag Pro 4-in-1-anturien keräämää lämpötila-, ilmankosteus- ja ilmanpaine-tietoa voidaan tarkastella graafisesti valitulla aikavälillä.

2.1.5. Väsymätön apu valvonnassa – tallentava kamerajärjestelmä

Eläintiloihin asennettu kameravalvontajärjestelmä mahdollistaa eläinten aktiivisuuden seurannan ryhmätasolla, ruokinta- ja lepoalueiden käytön tarkastelun sekä stressin, levottomuuden ja hierarkiakäyttäytymisen havaitsemisen.

Jatkuvan kameravalvonnan avulla voidaan seurata automaattisesti ja ei-invasiivisesti eläinten käyttäytymistä, terveyttä ja hyvinvointia karja-, karsina- ja yksilötasolla. Tallenteiden avulla analyysiä voidaan kohdentaa tarvittaessa tiettyihin karsinoihin tai yksilöihin. Jatkuvan valvonnan ja tallenteiden yhdistämisellä pystytään havaitsemaan harvinaiset ja lyhytaikaiset tapahtumat (esim. aggressiot), jotka voivat jäädä huomiotta yksittäistäisillä valvontakäynneillä (Wurtz ym. 2019). Kasvattamoissa useiden kameroiden yhdistelmät tehostavat ja nopeuttavat ihmistyöpanosta (Taulukko 3).

Taulukko 3. Jatkuvan kamerajärjestelmän hyödyt ja haasteet.

Hyödyt	Peruste	Kirjallisuus
Ei-invasiivinen koko karsinan seuranta	Kamerat seuraavat karsinan eläimiä samanaikaisesti ilman yksilökohtaista laitteisen kiinnittämistä, mikä voi vähentää käsittelystressiä ja/tai laitteiden rikkoutumismahdollisuutta	Chen ym. 2021, Besler ym. 2024
Varhainen sairauksien havaitseminen	Jatkuva kameravalvonta mahdollistaa hienovaraiset aktiivisuuden, asennon ja sosiaalisen käyttäytymismuutosten havaitsemisen ennen kliinisiä oireita	Schaefer ym. 2012, Qiao ym. 2021, Simpson 2023
Työvoimasäästö	Automaattiset hälytykset ja käyttöliittymät vähentävät tarvetta kiertää karsinoita ja pienentävät tarkkailijoiden välistä vaihtelua	Besler ym. 2024
Useiden käyttäytymistoimintojen seuranta	Samalla kamerajärjestelmällä voidaan valvoa useita erilaisia toimenpiteitä: syömiskäyttäytyminen, tilankäyttö, terveys, hyvinvointi. Kaikki nämä tiedot voidaan yhdistää terveystietoihin ja/tai kasvu- ja terveystietoihin.	Bortoluzzi ym. 2023, Guarnido-Lopez ym. 2024
Haasteet	Peruste	Kirjallisuus
Kameranäkymän peittyminen	Yksilöllinen seuranta vaikeutuu, karsinan eläimet peittävät toisensa erityisesti, jos karsinan eläintiheys on korkea. Monikamerajärjestelmät voivat vähentää haastetta, mutta lisäävät kerääntyneen datan määrää.	Wurtz ym. 2019, Fuentes ym. 2023a, Nasir ym. 2025
Valaistusolosuhteet, likaantuminen	Luonnonvalon vaihtelu, keinovalo, pöly ja kosteus voivat heikentää kuvan laatua	Antognoli ym. 2025
Datan määrä ja analysointi	Jatkuva monikamera muodostaa suuria datamääriä, joka vaatii paljon tallennustilaa ja laskentatehoa	Chen ym. 2021, Besler ym. 2024
Yleistettävyyys	Yhdellä tilalla tai rodulla valmenneet algoritmit toimivat usein heikommin muissa olosuhteissa	Chen ym. 2021, Fuentes ym. 2023a, Antognoli ym. 2025
Käytännön hyödynnä arjessa	Todellinen teknologioiden hyöty muodostuu siitä, kuinka tehokkaasti mm. hälytykset integroidaan tilan päätöksen tekoon	Prosser ym. 2025

Tietokonenäköön perustuva tutkimus on osoittanut, että videojärjestelmillä voidaan tunnistaa erilaisia käyttäytymismuotoja, esimerkiksi syöntiä, juontia, lepoa, sosiaalista käyttäytymistä ja ontumista. Kaikki nämä käyttäytymistoiminnot vaikuttavat tuotantoon ja eläimen hyvinvointiin (Chen ym. 2021, Qiao ym. 2021). Suurissa feedlot-kasvattamoissa tehdyissä pilottitutkimuksissa on havaittu, että konenäköä hyödyntäen varhaisten hengitystieoireiden havaitseminen on pystytty tekemään aikaisemmin. Konenäkö on havainnut aktiivisuuden muutokset 2–3 päivää aikaisemmin kuin ihmissilmä. Riskieläinten tunnistaminen on varhaistunut ja lääkitsemisvaste parantunut (Simpson 2023).

Tallentava kamerajärjestelmä sisältää:

- Kiinteät CCTV tai IP-kamerat, jotka on asennettu karsinoiden yläpuolelle (kattoon/palkkeihin) tai vaihtoehtoisesti seiniin
- Verkkovideotallentimen (NVR) tai edge-laskentayksikön paikallista tallennusta ja esikäsittelyä varten
- Yhteydet tilan palvelimella tai pilvipalveluun
- Mahdollisen ohjelmiston, joka analysoi kuvamateriaalia (tekoälyperusteinen)

Jatkuva videovalvontajärjestelmä mahdollistaisi tietokonenäön hyödyntämisen eläinten hyvinvoinnin seurannassa. Kameran tallentavat jatkuvaa videota (esim. 10–25 kuvaa/s). Tekoälyperusteisessa analyysissä kuvavirta käsitellään algoritmeilla, jotka havaitsevat eläimet, seuraavat yksilöitä ajassa ja tunnistavat toimintoja. Idris ym. (2023) osoittivat, että automaattinen videodigitointi tunnistaa lämpökuormituksesta johtuvaa levottomuutta (askellus, pään liike). Fuentes ym. (2023a) kehittivät monikamerajärjestelmän, joka tunnistaa yksittäisten nautojen käyttäytymistä (syönti, makuulla olo, liikkuminen) tekoälyn avulla. Nasir ym. (2025) laajensivat lähestymistapaa usean kameran yhteiskäyttöön ja ”bird’s eye” näkymän analysointiin. Käytössä oli neljä synkronoitua kameraa. Tällä tavoin saatiin eläinten paikannusta tarkemmaksi ja erilaisia kameranäkymiä samalle yksilölle. Laajat käyttäytymisdata-lähteet (Li ym. 2024a) ovat edesauttaneet konenäköalgoritmien muodostamisessa rakennettuihin kasvatusympäristöihin. Sohan ym. (2026) saavuttivat yli 90 % tarkkuuden erilaisten liikeratojen konenäköperusteisessa analysoinnissa.

Tavalliset RGB-kamerat (HD-4K) ovat standardi käyttäytymisen tunnistuksessa ja seurannassa rakennetuissa ympäristöissä (Fuentes ym. 2023b, Nasir ym. 2025). Infrapuna (IR) ja hämäräkamerat mahdollistavat 24/7-seurannan heikossa valaistuksessa. Kameroiden valoherkkyys korostuu yöaikaisen käyttäytymisen- ja hengitystieoireiden havainnoimisessa talviaikaan (Simpson 2023). Hengitysliikkeiden ja -tiheyden analyysiä voidaan tehdä yhdistämässä kuva ja ääniraita. Limede ym. (2024) pystyivät havainnoimaan hengitystietulehdusoireita aikaisessa vaiheessa äänen ja kuvan analyysillä. Syvyyskameroiden avulla voidaan tehdä kolmiulotteista asentoanalyysiä (Niwenshuti 2023). Yhdistämällä kameratekniikkaan lämpökameraominaisuus voi olla mahdollista tunnistaa varhaisia hengitystieoireita keskimääräistä aikaisemmassa vaiheessa analysoimalla silmänympärys- ja sierainten alueen lämpökamerakuvien muutoksia (Schaefer ym. 2012).

Tulevaisuudessa jatkuvaa kameravalvontaa voidaan käyttää tutkimuksen apuvälineenä monin tavoin. Videokuva voidaan yhdistää yksilötunnistukseen, ääni- ja erilaisiin ympäristöantureihin ja tuottaa entistä kattavampaa tietoa erilaisten kokonaisuuksien vaikutuksista eläinten käyttäytymiseen ja tuotanto-ominaisuuksiin (Wottlin ym. 2021, Limede ym. 2024). Uusissa videoanalyysihin perustuvissa käyttäytymistutkimuksissa pyritään digitaalisen kaksoismallien muodostamiseen. Digitaalisten kaksosten idea on simuloida eläinten olosuhdetta ja muodostaa erilaisia ennustemalleja, joiden tarkoitus on päästä mahdollisimman varhaiseen puuttomiskynnykseen esimerkiksi alhaisena hoitokynnyksenä tai puuttumisena hyvinvointiin uhkaavissa tekijöissä (Neethirajan & Kemp 2021). Chen ym. (2021) ja Besler ym. (2024) korostavat, että nautojen käyttäytymisestä tarvitaan lisää tieteellisesti verifioituja aineistoja ja julkaisuja. Algoritmien kehitykseen tarvitaan erilaisia olosuhteita ja eri rotuisia eläimiä. Ainoastaan riittävän datan perusteella algoritmeista voidaan rakentaa paikkaansa pitäviä. Jatkuva kameravalvonta tarjoaa ainutlaatuisen mahdollisuuden pitkän aikavälin hyvinvoinnin seurantaan, esimerkiksi käyttäytymisen synkroniamuutosten, lepäämisen ja märehtimisen sekä sosiaalisen käyttäytymisen kehittymiseen koko loppukasvatuksen ajan. Metodologista työtä tarvitaan näiden mittareiden muuttamiseksi luotettaviksi hyvinvointi-indikaattoreiksi (Wurtz ym. 2019, Chen ym. 2021, Aernouts ym. 2024).

TeknoNauta-hankkeessa Luke Ruukin tutkimuspihattoon hankittiin tallentava kameravalvontajärjestelmä. Eläinten käyttäytymisen tallentaminen on tavallinen aineistonkeruumenetelmä käyttäytymis- ja hyvinvointitutkimuksissa, minkä lisäksi hyvälaatuista kuvamateriaalia voidaan käyttää esimerkiksi konenäön kehittämisessä. Pihatton yleisvalvontaa varten kaksi kameraa kiinnitettiin eläinhallin vastakkaisiin pätyihin kuvaamaan ristiin (Kuva 10). Käyttäytymis- ja

hyvinvointitutkimuksen tarpeita varten näkymän on oltava mahdollisimman hyvä eläinten karsinoihin. Tämä toteutettiin kahdella kameralla karsinaa kohden (Kuva 11). Lisäksi kameroita kiinnitettiin eläinten käsittelyalueelle mahdollistamaan eläimen käyttäytymisen analysoinnin käsittelyn aikana. Kaikki hankitut kamerat olivat haastaviin ulko-olosuhteisiin soveltuvia Mile-sight AI Zoom Dome 5 MP valvontakameroita. Suuren tallennettavan datamäärän vuoksi järjestelmä toteutettiin suljettuna ja paikallisena vaikka myös pilveen tallentaminen olisi mahdollista.

Nautatiloilla kameroiden määrä ja kuvauskohteet päätetään tilakohtaisesti, eikä massiivinen kamerajärjestelmä ole tarpeen onnistuneelle toteutukselle. Tallentavaa kameravalvontaa voidaan käyttää yleisvalvonnassa tai kohdistettuna esim. poikima-alueelle. Kameroiden valinnassa on hyvä kiinnittää huomiota niiden kestävyys, kuvakulman laajuuteen sekä riittävän hyvään kuvan laatuun myös yöaikaan.



Kuva 10. Tutkimuspihaton yleisvalvontaa.



Kuva 11. Tutkimuspihaton karsinakamerat mahdollistavat eläinten käyttäytymisen yksityiskohtaisen analysoinnin.

2.1.6. Nuku yösi rauhassa – eläinten paikannuslaitteet laitumelle

GPS-paikannuslaitteet ovat muuttaneet laiduntavien nautojen seuranta ja jopa hallintaa. GPS-paikannin voi tuottaa korkean resoluution aika-paikka-dataa eläinten sijainnista ja liikkeistä kaikenlaisilla laidunalueilla (Bailey ym. 2018, Turner ym. 2000, Obermeyer ym. 2025).

Alkuvaiheen sovelluksissa keskityttiin laidunalueiden käytön ja kulkureittien kuvaamiseen. Uudemmissa järjestelmissä GPS-tieto yhdistetään kiihtyvyyssantureihin, virtuaalilaitoihin ja langattomaan tiedonsiirtoon. Tämä kaikki palvelee täsmäkoti-eläintuotannon (Precision Livestock Farming, PLF) tarpeita. Laiduntavat eläimet voidaan kohdentaa tietyille alueille ja laidunnuksen onnistumista voidaan seurata eläin- ja kasvustoperusteisin mittarein yhä tarkemmin. Eläinten hyvinvoinnin muutoksiin voidaan tarttua viipymättä. Aikaa ja työvoimaa säästyy, kun eläimiä pystytään seuraamaan esimerkiksi puhelimen näytöltä (Augustine & Derner 2013, Tzanidakis ym. 2023, Versluijs ym. 2024).

Naudoilla käytettävät GPS-järjestelmät ovat yleensä kaulapannassa tai korvamerkissä olevia toiminnallisia yksiköitä. Yksikkö sisältää GNSS-vastaanottimen (Global Navigation Satellite System), antennin, mikro-ohjaimen ja muistin, virtalähteen, mahdollisen lisäanturin (esim. 3-akselinen kiihtyvyyssanturi) ja tiedonsiirtomoduulin (esim. UHF/LoRa). GNSS-vastaanotin on laite, joka vastaanottaa signaaleja satelliittipaikannusjärjestelmistä (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou). Laite laskee näiden perusteella sijaintinsa, nopeutensa ja tarkan aikansa. Yleensä nautojen järjestelmissä käytetään pääasiassa GPS-paikannusta.

Laite tallentaa tietyin aikavälein ns. fixin, johon sisältyy aika, leveysaste, pituusaste sekä usein laatuindeksi ja nopeus. Tutkimuksissa käytetyt paikannusvälit laiduntavilla naudoilla vaihtelevat tyypillisesti 1–60 minuutin välillä. Tällaisella aikavälillä saadaan usein riittävästi tietoa ja toisaalta akku kestää tarvittavan ajan (koko laidunkausi) (Bailey ym. 2018, Turner ym. 2000).

Laitteen muodostama paikkatieto voidaan tallentaa laitteen muistiin ja purkaa myöhemmin. Laite voi myös lähettää paikkatietoa lähes reaaliaikaisesti GSM/LTE-, LoRa- tai satelliittiyhteyden kautta pilvipalveluun (Bailey ym. 2018, Monteiro ym. 2021, Markus ym. 2025). Laajoilla, avoimilla laidunalueilla paikannustarkkuus on tyypillisesti muutamia metrejä. Paikannustarkkuus kuitenkin heikkenee metsäisillä, paljon korkeuseroja sisältävillä alueille tai alueilla, joilla on epäedullinen satelliittigeometria (Bailey ym. 2018, Versluijs ym. 2024).

GPS-aikasarjat yhdistetään GIS-analyysiin ja spatiaaliseen tilastointiin. GIS-analyysi on tietokoneavusteinen menetelmä, jossa käsitellään, mallinnetaan ja visualisoidaan sijaintiin perustuvaa tietoa. Spatiaalinen analyysi on tilastotieteen erikoisala, joka käsittelee paikkatietoa. Tästä yhdistelmästä saadaan ulos eläimen kulkema matka, kävelynopeus ja reitin mutkikkuus. Menetelmällä voidaan ottaa selville, kuinka ryhmä ja yksilöt ovat hyödyntäneet erilaisia alueita esimerkiksi vesipisteillä käynti, varjoisat ja kaltevat alueet, milloin on leväty ja milloin on laidunnettu. Turner ym. (2000) osoittivat, että viiden minuutin välein otetut GPS-paikannukset yhdessä GIS-analyysin kanssa mahdollistavat emolehmien laitumen käytön ja paikanvalinnan tarkastelun. Yhdistämällä GPS-aikasarja ja aktiivisuusanturin antama tieto voidaan analysoida, milloin eläimet laiduntavat ja milloin ne liikkuvat muussa tarkoituksessa (Augustine & Derner 2013, Obermeyer ym. 2025). GPS ja kiihtyvyyssanturit voivat yhdessä tunnistaa käyttäytymisen muutoksia, joilla voi olla merkitystä eläinten hyvinvoinnin arvioinnissa (Bailey ym. 2018).

Paikannusjärjestelmien haasteet muodostuvat teknisistä rajoitteista, datan käsittelystä ja käytönoton kustannuksista. Paikannuksen tarkkuus ja fixien onnistumisprosentti heikentyvät

olennaisesti haasteellisissa maasto-olosuhteissa (Bailey ym. 2018, Versluijs ym. 2024). Virrankulutus lisääntyy johtuen tiheästä paikannuksesta ja reaaliaikaisesta tiedonsiirrosta. Tämä johtaa akkujen lyhyempään keston. Erilaisilla aurinkokennojärjestelmillä on yritetty ratkaista asiaa, mutta näiden toiminta on osoittautunut haasteelliseksi (Versluijs ym. 2024, Bork ym. 2025). Syrjäisillä alueilla GSM-verkkojen kattavuus voi olla heikko. LoRa- tai suora satelliittiyhteys voi parantaa tilannetta, mutta nostaa kustannuksia (Tzanidakis ym. 2023, Markus ym. 2025).

Uudet GPS-järjestelmät tarjoavat tiheitä paikannuksia mm. parantuneiden akkujen ansiosta. Järjestelmiin on myös integroitu 3-akselisia kiihtyvyyssantureita ja gyroskooppeja, jotka mahdollistavat käyttäytymisen luokittelun (Bailye ym. 2018, Versluijs ym. 2023, Obermeyer ym. 2025). Joihinkin järjestelmiin on liitetty erilaisia ympäristöä havainnoivia antureita mm. lämpötila. Näiden erilaisten antureiden avulla voidaan arvioida eläinten energiankulutusta erilaisissa laidunympäristöissä (Vandermark ym. 2025). GPS-järjestelmät on yhdistetty enenevässä määrin myös erilaisiin virtuaalijatjärjestelmiin (Versluijs ym. 2023, 2024, Chopra ym. 2025). Runsas tietomäärä (tuhansia datapisteitä/eläin/kuukausi) edellyttää datanhallintaa ja analyysi-osaamista. Runsas tietomäärä, ilman helppokäyttöominaisuuksia, on käytännössä tilalla haaste (Bailey ym. 2018, Monteiro ym. 2021, Tzanidakis ym. 2023). Lisäksi käyttäytymisen luokittelumallit voivat vaatia paikallista, olosuhteisiin sopivaa kalibrointia virhetulkintojen välttämiseksi (Augustine & Derner 2013, Versluijs ym. 2023, Parsons ym. 2024). Järjestelmän alkuinvestointi on iso. Kustannus eläintä kohti laskee karjakoon ja käyttövuosien lisääntyessä. Yhdistämällä GPS-järjestelmä virtuaalijärjestelmään voidaan kompensoida panostusta vähentämällä aitininvestointeja ja työvoimakustannusta (Bork ym. 2025, Gadzama ym. 2025, Musinska ym. 2025).

GPS-paikannuslaitteet tarjoavat käytännön hyötyjä ja säästöjä työvoimakustannuksessa. Jos karja laiduntaa kaukana tilan talouskeskuksesta, eläinten valvonta voi olla haastavaa ja aikaa vievää. Paikannuksen avulla voidaan nähdä, missä eläimet oleskelevat, kuinka paljon ne liikkuvat ja mitkä alueet laidunnuksesta kuormittuvat eniten. Tämä tukee laidunkierron suunnittelua ja rauhoittaa karjankasvattajan mieltä, kun tiedetään, missä eläimet ovat. Petoeläinten muodostama riski on lisääntynyt monilla alueilla. Petojen läsnäolo voi aiheuttaa lauman säikähtämisen ja hajaantumisen, mikä vaikeuttaa eläinten löytämistä. GPS-seurantajärjestelmät mahdollistavat lauman liikkeiden jatkuvan seurannan, ja äkillinen, samanaikainen liike useiden yksilöiden kohdalla voi viitata saalistajaan tai muuhun häiriöön. Tällöin karjankasvattaja saa hälytyksen mobiililaitteeseensa ja voi tarkistaa tilanteen nopeasti ilman viivettä.

TeknoNauta-hankkeen kahdella kumppanuustilalla testattiin kesällä 2025 laidunkauden ajan Laidunna.fi -paikannusjärjestelmää. Järjestelmä koostuu kevyistä eläimen kaulapantaan kiinnitettävistä GPS-paikannuslaitteista ja pilvipalvelusta (Kuva 12). Paikannustiedot tallentuvat pilvipalveluun, josta eläinten sijaintia voi tarkastella ilmakuvalta tai peruskarttapohjalta puhelimella, tabletilla tai tietokoneen selaimella. Tietokoneen selaimella voi karttapohjalle piirtää ja tallentaa laidunalueiden rajoja ja kytkeä tekstiviestihälytyksen, mikäli paikanninta kantava eläin poistuu valitulta alueelta. Laidunna.fi toimii Digitan koko maan kattavassa LoraWAN radioverkossa. Puhelinliittymäsopimuksia ja niiden SIM-kortteja ei tarvita. Paikantimissa on vaihdettavat sormiparistot, jotka kestävät koko laidunkauden.



Kuva 12. a) Laidunna.fi paikannusjärjestelmän GPS-paikannuslaitteet kaulapanttoineen. b) Paikannuslaitteet kiinnitettyinä eläimiin. Kuvat: Outi Ukkola ja Leena Tuomisto/Luke.

2.1.7. Vältä myrkkoviljat – pikamittari mykotoksiinien määrittämiseen

Deoksinivalenoli (DON), zearalenoni (ZEN), fumonisiinit (FUM), alfatoksiinit, okratoksiinit A (OTA) ja monet muut hometoksiinit esiintyvät usein viljoissa, sivutuotteissa ja säilörehuissa, joita käytetään nautojen dieettien komponentteina (Ogunade ym. 2018, Li ym. 2021, Xu ym. 2022). Analyysituloksissa käytännössä kaikki seosrehu- tai säilörehunäytteet ovat sisältäneet vähintään yhden mykotoksiinin ja useimmiten useita yhtä aikaa (Ogunade ym. 2018, Custodio ym. 2019, Manni ym. 2022, Pires ym. 2025).

Mykotoksiinit vähentävät rehun syöntiä, heikentävät rehuhyötysuhdetta sekä alentavat eläinten vastustuskykyä ja hedelmällisyyttä. Mykotoksiinien vaikutus tapahtuu usein kroonisena, jatkuvana subkliinisenä altistuksena (Gallo ym. 2015, Xu ym. 2022, Bandyk 2024). Kontaminaatioita on mahdoton estää täysin. Nopeat tilalla käytettävät mykotoksiinien mittauslaitteet ovat tärkeä osa riskienhallintaa yhdessä viljely-, korjuutapa-, varastointi- ja ruokintastrategioiden sekä mahdollisten lisäaineiden käytön kanssa (Zheng ym. 2006, Singh & Mehta 2020, Li ym. 2021).

Pikamittarit voidaan jakaa kolmeen eri menetelmäryhmään: liuskatestit (lateral flow -immuno-määritykset, LFIA) lukijalaitteella tai ilman, nopeat ELISA-kitit ja biosensorit. Biosensorijärjestelmissä käytetään sähkökemiallisia tai optisia sensoreita ja mikroarray-pohjaisia alustoja. Kaikki menetelmät perustuvat kahteen vaiheeseen, joihin kuuluvat näytteen käsittely ja laitteen suorittama analyysi. Näyte käsitellään yleensä jauhamalla, jonka jälkeen tehdään uutto, selkeytys ja laimennus. Analyysi perustuu immunokemialliseen sitoutumiseen, jonka laite lukee (Zheng ym. 2006, Anfossi ym. 2013, Singh & Mehta 2020).

Mykotoksiinit jakautuvat rehuerissä epätasaisesti. Näytteenotto on yksittäinen suurin virhelähde (Zheng ym. 2006, Custodio ym. 2019). Kokoomanäytteeseen osanäytteet tulisi kerätä useista eri kohdista ja sekoitus tulisi tehdä huolellisesti (Zheng ym. 2006). Nykyiset pikatestit hyödyntävät vesipohjaisia uuttoliuoksia. Näiden etuna on turvallisuus ja yksinkertaisuus. Uute suodatetaan tai sentrifugoidaan ja tarvittaessa laimennetaan analyysihäiriöiden vähentämiseksi, erityisesti jos näyteraaka-aine on seosrehua tai säilörehua (Zheng ym. 2006, Ogunade ym. 2018, Manni ym. 2022). Osa ELISA- ja biosensorimenetelmistä hyödyntää kiinteävaihe- tai

immunoaffiniteettipuhdistusta, kun halutaan parempi tarkkuus lähellä raja-arvoja (Singh & Mehta 2020, Li ym. 2021). Nopeat RIDASCREEN FAST- ja vastaavat kitit mahdollistavat analyysin tyypillisesti 30–60 minuutissa näytteenkäsittely mukaan lukien. Laitteet on validoitu useille eri rehunäytteille.

Mykotoksiinipikamittarien käyttö naudanlihantuotannossa ja ruokinnansuunnittelussa perustuu mykotoksiinialtiuksen kartoittamiseen ja haittojen ennaltaehkäisyyn. Mykotoksiinialtistus muodostuu viljoista ja viljapohjaisista sivutuotteista, karkearehuista (nurmi- ja kokoviljasäilörehut) ja ostetuista täydennysrehuista (Ogunade ym. 2018, Custodio ym. 2019, Manni ym. 2022). Säilö- ja seosrehun mykotoksiinikartoitus on hyvä tehdä, jos havaitaan homeita tai karjassa esiintyy selittämättömiä tuotanto- tai terveysongelmia (Ogunade ym. 2018, Xu ym. 2022). Ruokinnansuunnittelun työvälineenä kartoituksen tulos on hyödyllinen, kun rehuissa on havaittu mykotoksiineja. Kontaminoituneiden erien käyttöä voidaan rajoittaa, laimentaa puhtaammilla rehuilla ja/tai päättää erilaisten lisäaineiden käytöstä (Gallo ym. 2015, Xu ym. 2022, Bandyk 2024). Kokonaismykotoksiinikuorman arviointi yhden toksiinin sijaan on eläinten hyvinvoinnin kannalta olennaisempaa, koska useimmat rehut sisältävät samanaikaisesti useita eri mykotoksiineja (Gallo ym. 2015, Li ym. 2021, Manni ym. 2022, Xu ym. 2022).

TeknoNauta-hankkeessa hankittiin RIDA Smart Box -mittauslaitteisto viljan mykotoksiinien määrittämiseen (Kuva 13). Itse mittalaitteiston lisäksi toksiinimittauksissa tarvitaan laboratoriotarvikkeita kuten mittaliuskoja, reagenssia, pipettejä, pipettien kärkiä, putkiravistelijaa, minisentrifugi, lasisia koeputkia ja muovisia eppendorfnäyteputkia, tarkkuusvaaka, putkiteline, ajastinkello ja suodatinpaperia. Kyseisiä tarvikkeita tarvitaan, kun viljanäyte punnitaan ja jauhetaan ohjeiden mukaisesti. Laitteistoon on saatavana DON ja T-2/HT-2-toksiinien lisäksi myös aflatoksiini, zearalenoni ja fumonisiini-testit. Testiliuskojen avulla viljan hometoksiinien pitoisuudet saadaan määritettyä omatoimisesti alle puolessa tunnissa. Laitteistoa tullaan jatkossa käyttämään muun muassa Luken hallinnoimassa Tuoreviljaa entistä turvallisemmin (OptiVilja) -hankkeessa, jossa selvitetään vuosien 2026–2028 aikana mykotoksiinien esiintymistä tuoresäilötysssä rehuviljassa Pohjois-Pohjanmaan alueella.



Kuva 13. RIDA Smartbox on nopea ja helppokäyttöinen mykotoksiinien analyysilaitte. Kuva: Mediq.

2.1.8. Optimoit ruokintaa – käsikäyttöinen NIR-laite

Lähialue-infrapunaspektroskopia (Near InfraRed, NIR) on laajasti käytetty, nopea ja näytteitä tuhoamaton menetelmä rehujen analysointiin. Se perustuu O-H-, N-H- ja C-H-sidosten värähtelyihin aallonpituusalueilla 700–2 500 nm (Osborne ym. 1993). Viime vuosina laitteiden koon pienentyminen on mahdollistanut käsikäyttöisten NIR-spektrometrilaitteiden käytön vaihtelevissa olosuhteissa aina pellolta ruokintapöydälle. Nopeasti tehty rehuanalyysi täydentää perinteistä laboratoriossa tehtyä rehuanalyysiä (Gullifa ym. 2023); esimerkiksi dieettien muutokset ja tarkennukset voidaan tehdä reaaliaikaisesti. Käsilaitteet soveltuvat erityisesti viljojen koostumuksen (esim. valkuaisaineet, kosteus, tärkkelys) ja karkearehujen [raakavalkuainen, kuitufraktio (NDF, ADF, ADL), sulavuus] nopeaan arviointiin (Yamada ym. 2024).

Mikro-optisten komponenttien, MEMS-tekniikan (Micro-Electro-Mechanical-System) ja tekoälypohjaisen kemometrian kehitys parantaa käsikäyttöisten NIR-laitteiden tarkkuutta ja kestävyyttä. Lisäksi niiden integrointi pilvipohjaisiin kalibrointeihin ja reaaliaikaiseen sadonkorjuun ja ruokinnan optimointiin lisääntyy (Gullifa ym. 2023).

Käsikäyttöiset NIR-laitteet sisältävät laajakaistaisen valonlähteen, diffuusi-heijastusoptiset komponentit, dispersiivisen tai säädettävän suodatinspektrometrin sekä sisäiset kemometriset mallit. Spektrialue on yleensä 900–2 500 nm (Gullifa ym. 2023).

Korkea vesipitoisuus/kosteus aiheuttaa merkittävän haasteen rehujen analysoinnissa, koska vesi absorboi voimakkaasti alueilla 1 400 ja 1 900 nm. Tämä heikentää laitteen antamaa ennustetarkkuutta karkearehujen analysoitaessa. Erityisesti sulavuusmittauksien tarkkuuksiin vaikuttaa näytteen kosteus ja mittaustapa. Näytteen liike ja/tai pyörytys parantaa mittaustulosta merkittävästi (Yamada ym. 2024) (Taulukko 4).

Taulukko 4. Käsikäyttöisten NIR-laitteiden edut ja rajoitukset.

Edut	Peruste	Kirjallisuus
Siirrettävyys	Mittaukset voidaan tehdä suoraan tilaolosuhteissa.	Gullifa ym. 2023
Nopeus	Tulokset saadaan välittömästi. Tulos hyödynnettävissä heti mm. ruokinnan optimointiin.	Cherney ym. 2021
Näytteitä tuhoamaton mittaustapa	Näytteet säilyvät muille analyyseille.	
Edullisuus ja helppokäyttöisyys	Laitteen käyttö ei vaadi erityisosaamista tai koulutusta. Laitteen ylläpito helpompaa/edullisempää kuin laboratoriolaitteiden.	
Rajoitukset	Peruste	Kirjallisuus
Kalibroinnin siirrettävyys	Laboratoriolaitteilla kehitetyt mallit eivät yleensä ole suoraan yhteensopivia käsikäyttöisten laitteiden kanssa.	Gullifa ym. 2023
Näytteen kosteuden vaikutukset	Korkea vesipitoisuus heikentää erityisesti sulavuuden mittaustuloksia.	Yamada ym. 2024
Näytteiden heterogeenisyys	Pienialainen mittauspiste ei aina edusta koko rehu-erää.	Cherney ym. 2021
Heikompi spektri-resoluutio ja signaalinkohinasuhde	Pienet optiset komponentit tuottavat tyypillisesti heikomman tuloksen toistettavuuden kuin laboratoriolaitteet.	

Vertailukelpoisten tulosten aikaan saamiseksi suositellaan, että mittaukset tehtäisiin toistuvan protokollan mukaan.

- Käsikäyttöinen NIR-laite sisältää kalibraatiomallin raaka-aineesta, jota halutaan mitata.
- Kalibraatiomallissa on vastaavan kosteuspitoisuuden omaava raaka-aine.
- Kalibraatiot tehdään laitteessa säännöllisin väliajoin.
- Käsilaitetta käytetään ensisijaisesti rehujen pikamittaukseen. Pikamittauksen tulos tarkennetaan laboratorioanalyysillä.

Käsikäyttöiset NIR-laitteet tarjoavat nopean ja käytännöllisen vaihtoehdon viljojen ja karkea-rehujen laadun arviointiin. Niiden tarkkuus ei vielä vastaa täysin laboratoriolaitteita – erityisesti vesipitoisten ja heterogeenisten rehuraaka-aineiden osalta. Käsikäyttöisten NIR-laitteiden siirrettävyys ja nopeus tekee niistä arvokkaita päätöksenteon ja tilakohtaisen ruokinnan optimoinnin välineitä.

TeknoNauta-hankkeessa hankittiin Dinamica Generalen käsikäyttöinen X-NIR laite (Kuva 14), jolla voidaan analysoida rehuista (säilörehu, kuiva heinä, vilja, seosrehu) kuiva-aine, tärkkelys, valkuainen, kuitu ja rasva. Laitteiston vakiopakettiin kuuluvan yhden vuoden huoltosopimukseen sisältyvän kalibrintipalvelun avulla kalibroitua voidaan tarvittaessa ja haluttaessa tämentää milloin tahansa käyttöönotton jälkeen.



Kuva 14. Rehuohran analysointia käsikäyttöisellä X-NIR-laitteella. Kuvat: Outi Ukkola/Luke.

2.2. Tutkimuslaitteet

2.2.1. Monikaasumittari

Eristämättömät kasvattamot (kylmäpihatot) ovat yleensä luonnollisesti tuulettuvia. Niiden sisälämpötila seuraa läheisesti ulkolämpötilaa. Kylmäpihatoissa ilma on usein lämpimämpää ja kosteampaa kuivikepohjan yläpuolella kuin ulkona (Spiehs ym. 2011). Kylmäkasvattamoiden kuivikepohjien ammoniakkipitoisuudet (NH₃) nousevat ilman lämpötilan kohotessa.

Kuivikepohjien ammoniakkipitoisuuksissa ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuuksissa on kuitenkin havaittu merkittävää vaihtelua eri mittauspisteistä mitattaessa. Ammoniakkitasot eivät ole selittyneet pelkästään kuivikepohjan paksuudella tai kosteudella. Kuivikemateriaali, kuivikepohjan ikä, ympäristön lämpötila ja eläintiheys vaikuttavat voimakkaasti ammoniakin, rikkivedyn (H_2S), metaanin (CH_4) ja hiilidioksidin (CO_2) vapautumiseen (Ayadi ym. 2015, Spiehs ym. 2019, Jaderborg ym. 2021). Ammoniakki- ja rikkivetytitoisuuksissa on vuorokautista ja vuodenaikavaihtelua. Päästöt ovat suurimmillaan lämpiminä jaksoina, eikä pihaton vapaa tuulettuminen tällöin välttämättä auta tilanteeseen (Huang & Huiqing 2018, Shi ym. 2023, Andrade ym. 2024). Lyhytkestoisia kaasupiikkejä muodostuu kuivikepohjaa myllätessä ja kun kuivikepohjaa siirretään lantalaan. Kaasuja muodostuu enemmän, jos kuivikepohja on märkä (Ayadi ym. 2015, Spiehs ym. 2019, Jaderborg ym. 2021). Kylmäpihatoiden ammoniakkipitoisuudet ovat yleensä noin 0,2–0,3 ppm ja rikkivetytitoisuudet 10–100 $\times 10^{-3}$ ppm eli alle työturvallisuusrajojen, mutta voivat olla merkityksellisiä pitkäaikaisvaikutuksiltaan ja aiheuttavat hajuhaittoja (Barrasa ym. 2012).

Kuivikepohjien, luonnollisen ilmanvaihdon ja vaihtelevien lämpötilojen yhdistelmä tuo mahdollisuuden käsikäyttöisten kaasumittarien hyödyntämiseen erilaisissa tutkimuksissa. Käsi-käyttöiset monikaasumittarit yhdistävät useita suoralla lukemalla toimivia anturityyppejä. Elektrokemialliset kennot mittaavat ammoniakkia, rikkivetyä, hiilidioksidia ja mahdollisia toksisia kaasuja. Elektrokemiallisten kennojen toiminta perustuu niiden tuottamaan sähkövirtaan, joka on verrannollinen kaasun pitoisuuteen. Elektrokemiallisia kennoja käytetään erityisesti NH_3/H_2S -mittareissa. NDIR (non-dispersive infrared) -anturit mittaavat hiilidioksidia ja metaania. Mittaus tapahtuu kaasun lajikohtaisella IR-absorptiokanavalla. Tämä menetelmä on käytössä monissa kannettavissa CO_2/CH_4 -mittareissa. Katalyyttisiä helmi-/IR-palokaasuantureita käytetään metaanille ja muille palaville kaasuille (Dräger 2016). Metallidioksidipuolijohdeanturit (MOS) sisältävät anturipiirin, joka mittaa ammoniakkia ja rikkivetyä (Moshayed ym. 2023).

Tyypillinen monikaasumittari on akun varassa toimiva, käteen sopiva laite, jossa on:

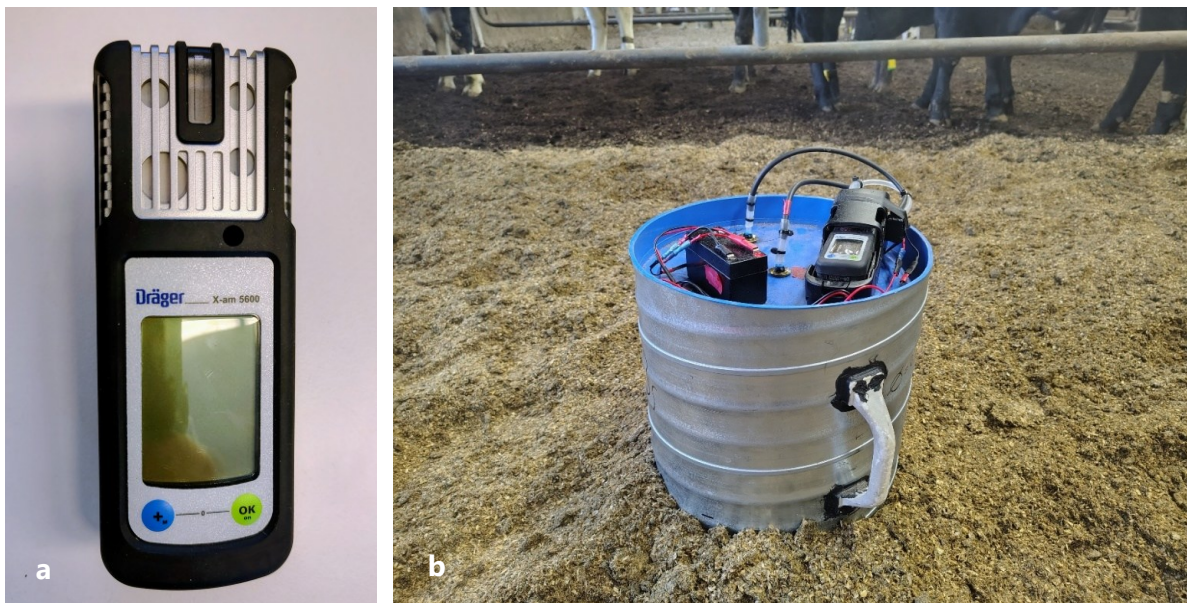
- digitaalinen näyttö (ppm, % LEL tai %-tilavuus)
- ääni-, valo- ja värinäilytys kynnyksarvojen ylittyessä
- usein dataloki (USB/Bluetooth) myöhempää analyysiä varten

Monikaasumittareita voidaan käyttää muiden tutkimuslaitteiden tukena ohjaamaan mittauspisteiden valintaa ja tarkistamaan pihaton eri osien erilaisten kaasujen tasoja (D'Urso ym. 2025). Monikaasumittareilla voidaan tunnistaa päästöjen ns. hotspotteja kuivikepohjan eri osissa erilaisissa kuivikekokeissa ja -strategioissa (Ayadi ym. 2015, Spiehs ym. 2019, Jaderborg ym. 2021, Eberl ym. 2024). Mittausarvoja voidaan käyttää myös käytännön ohjearvojen muodostamiseen. Jos ohjearvot ylittyvät toistuvasti, syyt olisi selvitettävä.

Monikaasumittareiden (tutkimuksellisessa) käytössä on huomioitava mittareiden mahdollinen rajallinen tarkkuus ja ympäristöherkkyys. Kannettavat laitteet voivat systemaattisesti ali- tai yliarvioida mittaustulosta referenssilaitteisiin verrattuna erityisesti vaihtelevissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa (D'Urso ym. 2025). Mittausten ajallinen kattavuus tulee ottaa huomioon, mittaustuloksia analysoitaessa. Kylmissä kasvattamoissa ja kuivikepohjista tehtyjä validointitutkimuksia on rajallinen määrä. Useimmat validointitutkimukset on tehty maitotiloilla tai kontrolloidussa olosuhteissa.

TeknoNauta-hankkeessa hankittiin Dräger X-am 5600 monikaasumittari (Kuva 15) tutkimuskäyttöön. Mittarin mittaamia kaasuja ovat hiilidioksidi, ammoniakki, rikkivety, metaani ja hiilimonoksidi. Hankinta sisälsi ulkoisen pumpun ja letkun, joiden avulla mittaus voidaan tehdä säiliöstä turvallisesti. Laite on akkukäyttöinen ja sopii kylmäpihatto-olosuhteisiin. Sen suojausluokka on IP 67 ja käyttölämpötila $-20\text{ °C} - +50\text{ °C}$. Laitetta voidaan käyttää lyhyen aikaa $-40\text{ °C} - -20\text{ °C}$ lämpötilassa. Laite vaatii tehdaskalibroinnin kerran vuodessa.

Monikaasumittaria käytetään Luke Ruukin tutkimuspihaton kuivikemateriaalikoikeissa kuivikepatjasta erittyvien haitallisten kaasujen pitoisuusmäärittäykseen. Mittausta varten rakennettiin tiivis kammio, josta analysoitava ilma imetään pumpun avulla kaasumittariin (Kuva 15). Kammiossa on sekoittaja, joka huolehtii, että analysoitava ilma on tasalaatuista. Laitteen tutkimuskäytössä on tärkeää huomioida mahdolliset anturien havaitsemisrajat eri kaasuille.



Kuva 15. a) Dräger X-am 5600 monikaasumittari. b) Luke Ruukin tutkimuspihatossa kuivikepohjasta erittyvien haitallisten kaasujen mittauksessa on käytetty tiivistä kammiota, josta analysoitava ilma imetään pumpulla kaasumittariin. Kuvat: Leena Tuomisto/Luke.

2.2.2. Bioaerosolien keräyslaite

Bioaerosolit vaikuttavat eläinten terveyteen, työntekijöiden altistumiseen ja ympäristön mikrobikuormitukseen. Kotieläintuotanto on merkittävä bioaerosolien lähde (Millner 2009, Dungan 2010, 2011, Douglas ym. 2018, Clauß 2020). Lihanautojen kasvatusympäristöissä on havaittu huomattavia ilmassa esiintyvien mikrobien pitoisuuksia. Wilson ym. (2002) kartoittivat feedlot-ympäristössä mikrobipitoisuuksia (bakteerit ja sieni-itiöt) kasvatustarhan sisällä ja tuulen suuntien mukaisissa ympäristöissä. Cogliati ym. (2022) mittasivat feedlot-ympäristön *Escherichia coli* -pitoisuuksia ja Guo ym. (2025) kartoittivat lihanautojen kasvatusympäristöjen bakteeripopulaatioita sekvenssimenetelmien avulla.

Bioaerosolien keräyslaitteita on eri toimintamekanismeilla. Nesteimpingereiden suorituskykyä ja rajoituksia on tutkittu laajasti (Chen & Mainelis 2009, Kesavan & Sreenivasan 2010). Näitä on käytetty nautatiloilla mikrobien ja endotoksiinien keräämiseen (Dungan 2010) ja *Escherichia coli* -pitoisuuksien arviointiin (Cogliati ym. 2022). Kiintoaine- ja kaskadi-impaktorien soveltuvuutta bioaerosolien kokoluokkakokoiseen keräykseen on käsitelty aerosoliteknikan

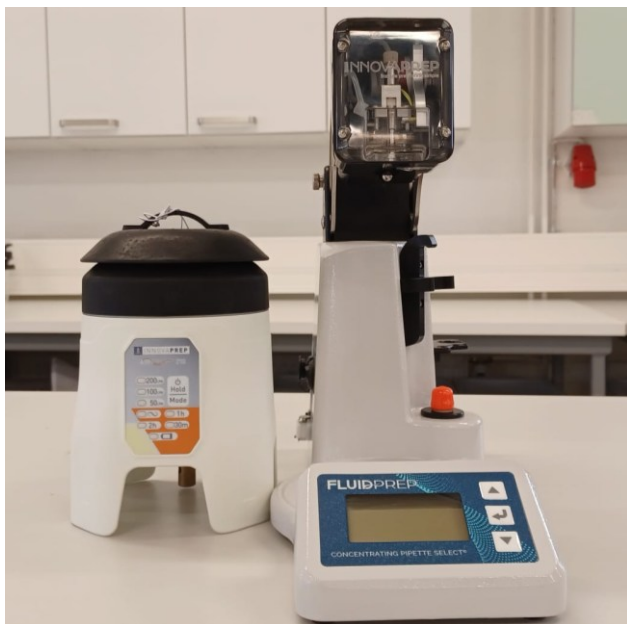
kirjallisuudessa (Mainelis 2019, Pan ym. 2019). Nautatutkimuksissa näitä menetelmiä on hyödynnetty mikrobipitoisuuksien ja ilmapirtakulkeutumisen arviointiin (Cogliati ym. 2022, Wilson ym. 2002). Suodatinpohjaiset keräimet soveltuvat karkean pölyyn ja pitkään näytteenottoon (Dungan 2010, 2011, Douglas ym. 2018, Clauß 2020). McEachran ym. (2015) osoittivat, että feedlot-ympäristössä pölyyn sitoutuu antibiootteja, resistenttejä bakteereita ja resistenssigeenejä. Syklonikeräimet toimivat tehokkaasti pölyisissä ympäristöissä ja niitä suositellaan käytettävän kotieläintuotannon tutkimuksissa (Millner 2009, Dungan 2010, Clauß 2020). Elektrostaattiset keräimet ovat energiataloudellisia ja soveltuvat bakteeri- ja virusaerosolien keräämiseen (Kettleleson ym. 2009). Niitä pidetään potentiaalisina ratkaisuina eläintilojen ilmanlaadun pitkäaikaiseen seurantaan (Dungan 2010, Mainelis 2019).

Mikrobilajit ja esiintymisen intensiteetti vaihtelevat tilan olosuhteiden ja mittauspisteiden mukaan (Guo ym. 2025). Feedlot-ympäristössä korkeita mikrobipitoisuuksia on mitattu eläinalueiden ympäristössä (Wilson ym. 2002). Mikrobien kulkeutuminen on vaihdellut sääolosuhteiden ja tuulensuunnan mukaan (Cogliati ym. 2022). Bioaerosolit voivat kulkeutua tuulen mukana laajasti ympäristöön (Dungan 2010, Douglas ym. 2018, Clauß 2020). Cogliatin ym. (2022) mallinsivat *Escherichia coli* -bakteerien kulkeutumista useiden satojen metrien päähän. Wei ym. (2023) havaitsivat ulosteperäisiä bakteereita karjatilojen ulkopuolella ja McEachran ym. (2015) osoittivat resistenssigeenien leviävän pölyhiukkasten mukana. Endotoksiini- ja bakteeripitoisuudet ovat korkeampia kotieläinrakennusten välittömässä läheisyydessä (Dungan 2011). Eläintuotannossa muodostuvan orgaanisen pölyn hengittäminen on yhdistetty hengityselinoireisiin ja altistumiseen (Suave ym. 2020, Li ym. 2024b).

Kattavan tutkimustuloksen aikaansaamiseksi eri menetelmiä suositellaan yhdistettävän ja näytteenotto-olosuhte olisi hyvä standardoida (Dungan 2010, Kumar ym. 2024). Merkittäviä haasteita ovat korkeat pölypitoisuudet (Millner 2009, Clauß 2020), suurikokoiset hiukkaset eläintiloissa (Yu ym. 2023), mikrobien elinkyvyn heikkeneminen laitekohtaisesti (Li ym. 1999, Mainelis 2019) ja tilakohtainen vaihtelu näytteenottokohteissa (Cogliati ym. 2022, Guo ym. 2025).

Bioaerosolien keräyslaitteet voivat olla keskeisiä työvälineitä tuotanto-olosuhteiden ilmanlaadun arvioinnissa. Erilaiset keräimet (impingerit, impaktorit, suodattimet, syklonit ja elektrostaattiset keräimet) vaikuttavat siihen, millaisia mikrobeja ja hiukkasia voidaan kerätä. Laitteilla voidaan tutkia mikrobipitoisuuksia, mikrobien kulkeutumista ja altistumista. Tutkimusta voidaan laajentaa mm. ilmaitse kulkeutuvien antibioottiresistenssien mikrobien leviämisen ymmärtämisessä.

TeknoNauta-hankkeessa hankittiin InnovaPrepin bioaerosolien keruulaitteisto, joka koostuu AirPrep-bioaerosolien keräyslaitteesta sekä FluidPrep-näytteenkäsittelyjärjestelmästä (Kuva 16). Keräyslaite voidaan asentaa joko jalustalle tai ripustaa kattoon keräämään bioaerosoleja eläintilan ilmasta. Näytteenkäsittelyjärjestelmä eristää kerätystä näytteestä mikro-organismeja ja hiukkasia, kuten bakteereita, loisia, homeita, sieni-itiöitä sekä kokonaisia soluja ja viruksia. FluidPrepin tuottama näyte soveltuu jatkokäsittelyyn, kuten viljelyyn, sekvensointiin tai PCR-monistukseen.



Kuva 16. InnovaPrepin laitteistolla eläntilan ilmasta voidaan kerätä bioaerosoleja ja eristää ne viljelyä, sekvensointia tai PCR-monistusta varten. Kuva: Outi Ukkola/Luke.

2.2.3. Metaani- ja hengityskaasumittarit

Naudan pötsifermentaation tuottama metaani (CH_4) muodostaa huomattavan osan kotieläintuotannon kasvihuonekaasupäästöistä. Eläimen tuottama metaanin määrä on suoraan yhteydessä syödyn rehun määrään, dieetin koostumukseen, pötsifermentaatioon ja eläimen fysiologiaan (Lakamp ym. 2022).

Lihanautojen metaanin tuotannon määrän mittaaminen edellyttää järjestelmiä, jotka pystyvät mittaamaan muodostuneita päästöjä eläinten luonnollisen syöntikäyttäytymisen aikana. Perinteiset metaboliakammiot tarjoavat korkean mittaustarkkuuden, mutta rajoittavat voimakkaasti eläinten luonnollista karsina- ja syöntikäyttäytymistä. Metaboliakammiot ovat kalliita investointeja eivätkä sovellu laajamittaiseen fenotyypin mittaamiseen (Hammond ym. 2016). Haasteen ratkaisemiseksi on kehitetty karsinaolosuhteissa käytettäviä automaattisia ruokintajärjestelmiä, jotka mittaavat yksilöllisen rehunsyönnin ja keräävät samanaikaisesti hengityskaasut eläimen jokaisella syöntikerralla. Nämä järjestelmät mahdollistavat eläinten normaalin käyttäytymisen ja rehun syönnin ryhmäkarsinaolosuhteissa, ja samalla metaanin tuotanto voidaan mitata ja yhdistää rehunsyöntimäärään. Metaanin mittaaminen karsinaolosuhteissa on olennaista erilaisten ruokintaratkaisujen arvioinnissa, päästöjen vaihtelujen ymmärtämisessä ja eläinten geneettisessä valinnassa (Lakamp ym. 2022).

Tyypillinen mittausasema sisältää rehukaukalot ja metaaninmittauslaitteiston. Mittausasema tunnistaa eläimen RFID-tunnisteella, joka on eläimen korvamerkissä. Eläimen rehunsyöntimäärät ja tuotettu metaanin määrä voidaan näin yhdistää tiettyyn eläimeen karsinaolosuhteissa. Ruokintakaukaloissa on vaakanturit, jotka mittaavat jokaisella vierailukerralla eläimen syömän rehun määrän. Ruokintakaukalon yläpuolelle on sijoitettu ilmapuhallin, joka ohjaa eläimen uloshengitysilman kohti kaasuanalysaattoria. Hengityskaasua otetaan näytteenä tiheällä aikavälillä (1–5 s). Tunnetun ilmapuhallin avulla lasketaan metaanin kokonaispäästö per ruokintatapahtuma. Korkean tarkkuuden kaasuanalysaattori mittaa metaanipitoisuuden reaaliajassa. Johdettuja muuttujia ovat esimerkiksi CH_4 /ruokintatapahtuma, CH_4 /syötykuiva-ainekilogramma, CH_4 -tuottonopeus ja CH_4 -vaihtelu ruokintajakson/kokeen aikana.

Näin saadaan aikaiseksi hyvä kompromissi mittaustarkkuuden ja eläimen luonnollisen käyttäytymisen välillä.

Osittaisilla kaasunkeruumenetelmillä on kuitenkin rajoituksensa. Osittainen kaasunkeruu ei mittaa eläimen koko päästöä. Tarkkuus riippuu ilmapirtauksen mallinnuksesta ja ympäristötekijöistä. Yksittäisessä syöntitapahtumassa eläimen päänasento ja liike voivat vaikuttaa näytteenottoon. Laitteiston kalibrointi ja ilmanvaihdon hallinta ovat kriittisiä luotettavien mittaustulosten muodostamisessa. Eläinten karsinahierarkia voi vaikuttaa mittaustuloksiin, jos eläin syrjäytetään toistuvasti ruokintakaukalolta.

Rajoituksista huolimatta järjestelmät voivat olla käyttökelpoisia tutkimus- ja kontrolloidussa tuotanto-olosuhteessa. Karsinapohjaiset metaanin ja rehunsyönnin mittaussjärjestelmät tarjoavat realistisen ja riittävän tarkan menetelmän metaanin tutkimiseen syöntikäyttäytymisen yhteydessä. Mittaamalla metaanipäästöt ja eläimen syömä rehunmäärä jokaisella syöntikerralla voidaan tutkia erilaisissa ruokintakokeissa eläinten tuottama metaaninmäärä ja rehun kulutus koko ruokintakokeen ajalta eläinten luonnollisessa elinympäristössä.

Luke Ruukin tutkimuspihattoon hankittiin Vytelle SENSE™ Methane Powered by Integrity™ -laitteisto, joka integroituu tutkimuspihatossa jo olemassa oleviin Vytellen ruokintakuppeihin (Kuva 17). Laitteisto on kustannustehokas ja skaalautuva nautojen metaanin mittaussjärjestelmä. Mittaustekniikka yhdistää metaanin mittaukseen yksilöllisen rehunkulutuksen. Laitteisto mittaa eläimen tuottamaa metaanimäärää jokaisella syöntikerralla, kun eläin käy Vytellen ruokintakupilla. Metaanin ja rehun syöntimäärä mittausta tapahtuu siis useita kertoja päivässä. Yksilö tunnistetaan korvamerkin RFID-tunnisteen avulla. Järjestelmä ei vaadi erillistä houkutusrehua tai työtä eläinten opettamiseksi laitteelle.



Kuva 17. Vytelle Sense Methane™ -mittaussjärjestelmä kuvattuna feedlot-kasvattamossa. Järjestelmä toimii yhdessä Vytellen rehunkulutuksen mittaussjärjestelmän kanssa. Kuva: Vytelle.

Metaanin mittausjärjestelmä seuraa eläimen uloshengityksen yhteydessä vapautuvaa metaania syöntitapahtuman yhteydessä. Tulokset yhdistetään yksilölliseen syönti-, elopaino- ja metaanin tuotantotietoihin. Näistä tiedoista muodostetaan jokaiselle eläimelle yksilöllinen fenotyyppinen metaanin tuotantotieto. Yhdistetyllä tiedolla saadaan kokonaisvaltaisempi käsitys eläimen biologisesta tehokkuudesta ja ympäristölliseen kestävyteen vaikuttavista fenotyypeistä kuin yksittäisillä, pelkillä metaanin tai hengityskaasujen mittaustiedoilla.

2.2.4. Ultraäänilaitte

Reaaliaikainen ultraäänimittaus (RTU) on ei-invasiivinen menetelmä elävien eläinten teurasominaisuuksien arviointiin. Ultraäänimittauksia käytetään erityisesti nautojen, lampaiden ja sikojen teurasominaisuuksien arviointiin ja jalostusvalintaan. Ultraäänimittauksessa mitataan pintarasvan paksuus, selkälihaksen paksuus ja -pinta-ala sekä lihaksen sisäisen rasvan osuus. Mittaustulokset tukevat jalostusvalintaa, ruokinnan suunnittelua ja teuraslaadun ennustamista (Perkins ym. 1992, Herring 2014). Toisin kuin teurasruhosta muodostettavat tulokset (EUOP rasva- ja lihakuusluokka sekä teuraspaino), ultraäänimittaus on nopea ja voidaan toistaa eläimen kasvatusaikana useamman kerran (Brethour 2000).

Lihasominaisuuksia mittaavissa ultraäänilaitteissa käytetään lineaarista anturia, jonka taajuus on 3,5–7,5 MHz. Anturin lähettämä ja vastaanottama signaalin taajuus tasapainottaa ultraäänin tunkeutumissyvyyden kudokseen ja kuvan resoluution (Houghton & Turlington 1992). Matalammat taajuudet (3,5–5,0 MHz) soveltuvat paksumpien kudokset mittaamiseen, kun taas korkeammat taajuudet (6,0–7,5 MHz) parantavat kuvan tarkkuutta nuorilla tai vähälihaksilla yksilöillä.

Teknologiset innovaatiot tulevat parantamaan ultraäänikuvantamisen käytettävyyttä. Tekoälypohjainen automaattinen kuvantulkinta nopeuttaa analyysiä ja lisää mitattujen ominaisuuksien tarkkuutta (Pena ym. 2014). Korkeampitaajuisilla antureilla olisi mahdollista parantaa analysoitavien kuvien resoluutiota ja erityisesti lihaksen sisäisen rasvan mittaamisen tarkkuutta (Pena ym. 2014). Ultraäänimittauksiin voidaan yhdistää genomitestauksen tuloksia, jolloin jalostusvalinta muodostuu tarkemmaksi.

Tyypillinen lihasultraäänimittausyksikkö/laitte sisältää:

- Lineaarisen anturin (10–18 cm)
- Silikonityynyn/väliskappaleen (stand off pad) lineaariseen anturiin
- Kannettavan ultraäänilaitteen
- Kuvankaappaus- ja analyysiohjelman

Ultraäänimittaamisen edellytyksiä ovat:

1. Käsittelyhäkki – eläin tulee olla turvallisesti käsiteltävissä.
2. Mitattavan alueen (12. ja 13. kylkiluun väli) karvojen ajelu ja puhdistus. Anturilla on oltava hyvä kontakti ihoon.
3. Riittävä väliaine eli öljyn käyttö, akustisen impedanssin vähentämiseksi.

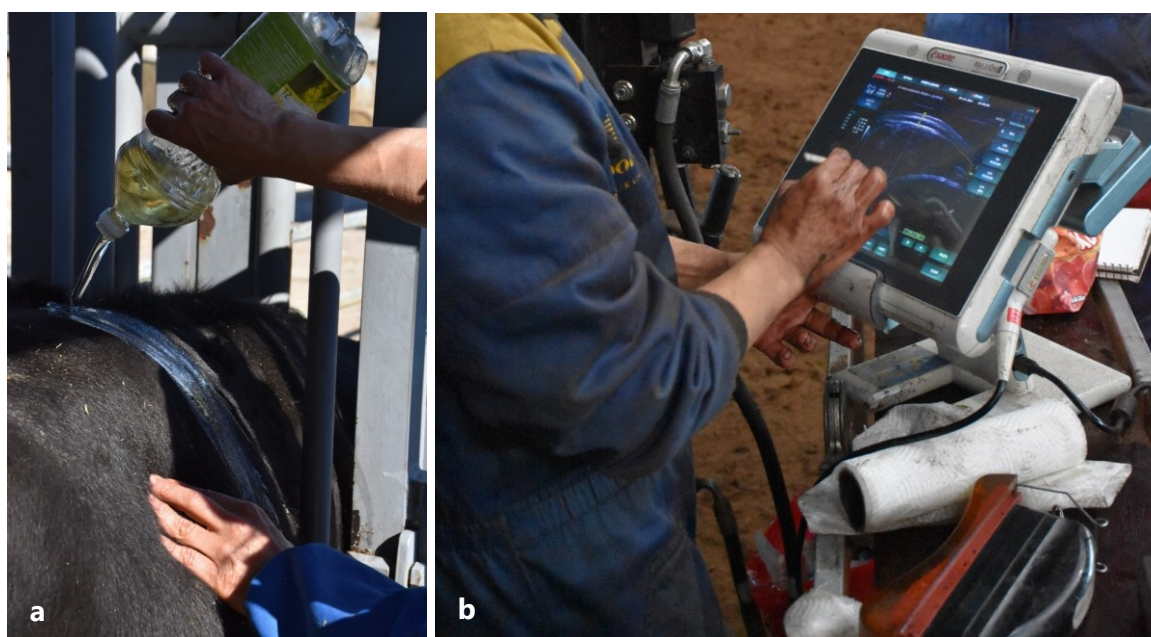
Ultraäänimittauksien tulokset validoidaan vertaamalla niitä teurasuloksiin eli ruhosta mitattaviin vastaaviin ominaisuuksiin (Taulukko 5). Pintarasvamittauksien korrelaatio teurasruhon pintarasvan välillä on 0,70–0,90 (Perkins ym. 1992, Robinson ym. 1992), lihaksen pinta-alan vastaavasti 0,60–0,80 (Herring 2014) ja lihaksen sisäisen rasvan osuuden osalta 0,45–0,70. Lihaksen sisäisen rasvanosuuden heikompi mittauksen tarkkuus johtuu kuvantamisen

haasteellisuudesta ja lihaksen sisäisen rasvan epätasaisesta kertymisestä lihakseen (Brethour 2000). Mittaustulosten tarkkuus on yhteydessä käytettyyn kuvantamisen taajuuteen sekä ultraäänitekniikan taitotasoon ja kokemukseen.

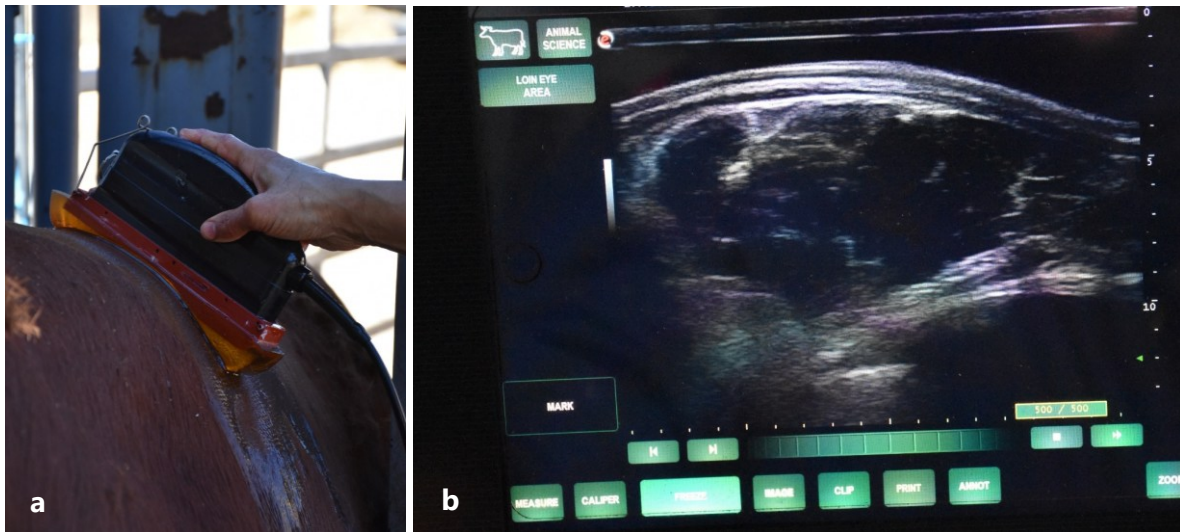
Taulukko 5. Ultraäänimittauksen edut ja rajoitukset.

Edut	Peruste	Kirjallisuus
Ei-invasiivinen menetelmä	Elävien eläinten mittaaminen, kudosten päältä	Herring 2002
Tukee jalostusvalintaa	Mittaustuloksilla voidaan kehittää tiettyjä ruho-ominaisuuksia	Herring 2002
Mahdollista useisiin mittauksiin/yksilö	Voidaan täsmentää ruokintaa, seurata teuraskypsyyden kehittymistä.	Herring 2002
Vähentää ruhon kontaminaatoriskiä	Ruhoa ei tarvitse leikata selkälihaksen poikkileikkauksen arviointia varten. Voidaan arvioida elävästä eläimestä ja ohjata ruhot tiettyyn tarkoitukseen mittaustuloksen perusteella.	Herring 2002
Kannettavat laitteet	Lisäävät tilatason mittauksen mahdollisuuksia.	Herring 2002
Rajoitukset	Peruste	Kirjallisuus
Ultraäänitekniikan ammattitaito	Mittausta suorittavan ammattitaito vaikuttaa voimakkaasti kuvan laatuun ja toistettavuuteen.	Brethour 1992, Herring 2014
Lihaksen sisäisen rasvan osuuden mittaaminen	Mittaustulokseen vaikuttaa laite ja mitattava kohde. Mittaustulos on vähemmän tarkka kuin muut kudostulokset	Brethour 1992, 2000
Rotuerot	Asettaa kalibroinneille ja mittaajalle haasteita.	Brethour 2000
Eläinten käsittely	Hermostuneet eläimet aiheuttavat liikehäiriöitä mittaukseen.	Brethour 2000
Kalibrointi	Eri laitteiden mittaustulokset eivät välttämättä ole samanarvoisia.	Brethour 2000

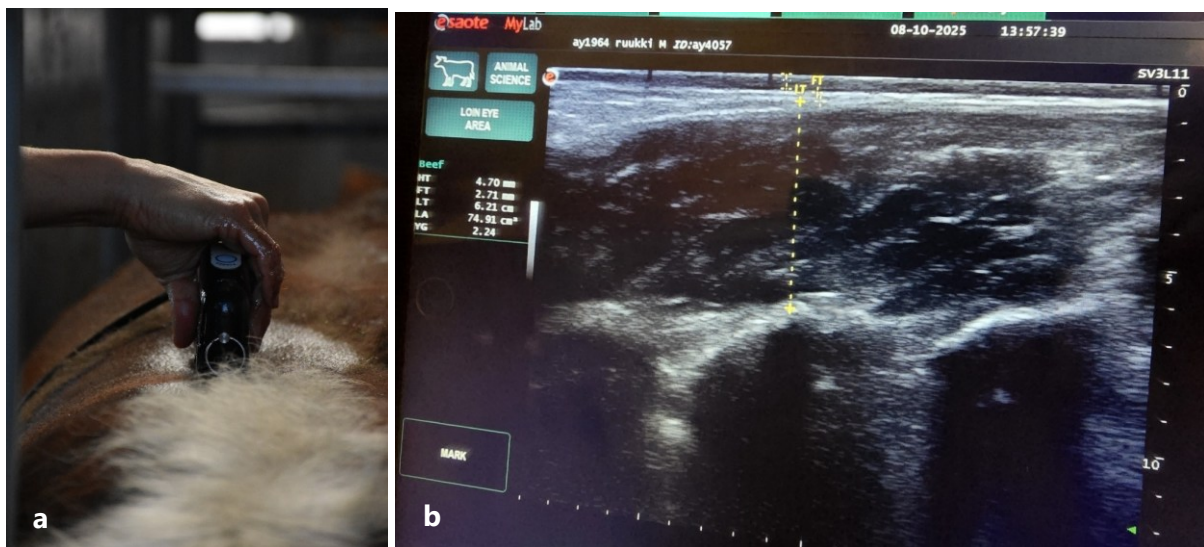
Lihasset ultraäänimittaus on nopea, luotettava ja käytännöllinen menetelmä teurasominaisuuksien arviointiin elävästä eläimestä. Oikein kalibroiduilla laitteilla ja hyvin koulutetuilla mittaajilla ultraäänimittaus tuottaa tarkkoja arvioita kudosten paksuuksista, pinta-aloista ja lihaksen sisäisistä ominaisuuksista (Kuvat 18, 19 ja 20). Kuvantamistekniikan ja automaattisten analyysien kehittyessä menetelmän hyödyntäminen jalostuksessa ja tuotannon optimoinnissa tulee todennäköisesti lisääntymään.



Kuva 18. a) Ultraäänimittauksessa tarvitaan kasviöljyä väliaineeksi. b) Ultraäänilaitte mittauskäytössä. Kuvat: Johanna Jahkola.



Kuva 19. a) Anturin sijoittaminen kylkiluiden suuntaisesti 12–13 kylkiluun väliin. b) Selkälihakseen poikki-leikkausnäkö, 12–13 kylkiluun välistä. Kuvat: (a) Johanna Jahkola ja (b) Maiju Pesonen/Luke.



Kuva 20. a) Anturin sijoittaminen selkärangan suuntaisesti selkälihakseen pitkittäisnäköä varten. b) Selkälihakseen pitkittäisleikkausnäkö. Kuvat: a) Johanna Jahkola ja b) Maiju Pesonen/Luke.

Luke Ruukin tutkimuspihaton ultraäänimittaustekniikkaa täydennettiin kahdella eri järjestelmällä. Jo olemassa olevaa ultraäänilaitteistoa täydennettiin uudella lineaarianturilla ja lisäksi hankittiin E.I. Medical Imaging ultraäänitekniikan EVO III (Kuva 21). EVO-sarjan ultraäänilaitteet ovat kannettavia diagnostiikkalaitteita, joita käytetään laajasti tuotantoeläinten tutkimisen kenttäolosuhteissa. EVO III on suunniteltu erityisesti työskentelyyn vaativissa olosuhteissa. Ne ovat kevyitä, kestäviä, pöly- ja roiskesuojattuja, helposti liikuteltavia ja desinfioitavia. EVO III laitteessa on lisäksi pitkä akunkesto. Kannettava laite on noin 2,9 kg. EVO III laitteen keskeinen vahvuus on korkea kuvanlaatu, joka perustuu korkea resoluution anturiin ja edistyneeseen kuvankäsittelyohjelmaan. Laite hyödyntää useita ultraäänikuvasmoodoja, kuten B- ja M-modea sekä Doppler-teknikkaa, jotka mahdollistavat kudusrakenteiden ja verenkiertoelimistön tarkastelun. EVO III laitteen korkea resoluutio ja kestävä lineaarinen anturi antaa mahdollisuuden selkälihaskultrauksen kudusrakenteiden tarkkaan visualisointiin ja parantaa mittausten tarkkuutta.



Kuva 21. Kannettava EVO III ultraäänilaite on suunniteltu työskentelyyn vaativissa olosuhteissa. Kuva: Leena Tuomisto /Luke.

2.2.5. Diagnostinen lämpökuvantamislaitte

Infrapunalämpökuvaus (IRT, infrared thermography) on eläimeen kajoamaton menetelmä, joka mittaa eläimen pinnasta lähtevää infrapunasäteilyä ja muuntaa sen lämpötilakartaksi eli lämpökuvaksi. Lämpökameratekniikka on herättänyt kasvavaa kiinnostusta kotieläintuotannossa, sillä sen avulla voidaan havaita sairauksia, tulehduksia, vammoja, lämpöstressiä ja hyvinvointiongelmia jo varhaisessa vaiheessa (McManus ym. 2022). Lihanaudoilla varhainen terveysongelmien tunnistus voi parantaa kasvutuloksia ja hyvinvointia sekä vähentää lääkitsemisen tarvetta. Lämpökuvatekniikan käyttö naudanlihan tuotannossa vaatii kuitenkin lisää tutkimusta. Lämpökuvatekniikan yhdistäminen tekoälyyn ja automatiikan lisääminen kuvantamisprosessiin lisäisi kuvantamisen käyttökelpoisuutta lihanautatilojen arjessa (Wang ym. 2023). Lisätutkimus olisi tarpeen erityisesti lämpöstressin, sorkkasairauksien ja hengitystietulehdusten varhaisessa havaitsemisessa aina nuorista eläimistä loppukasvatusvaiheeseen.

Tyypillinen lämpökuvantamislaitte koostuu infrapunadetektorista, optiikasta, kuvankäsittelyohjelmistosta ja näytöstä. Naudan ihon ja karvapeitteen emissiivisyys (0,98) tulee asettaa oikein, jotta lämpötilalukemat ovat tarkkoja (Wang ym. 2023). Keskeisiä mittaussparametrejä ovat kameran kalibrointi, etäisyys kohteeseen, ympäristön lämpötila ja kosteus, heijastuvan säteilyn korjaus sekä eläimen pinnan emissiivisyys (McManus ym. 2022). Näiden tekijöiden huomiotta jättäminen heikentää mittausten tarkkuutta.

Lämpökuvantamista on käytetty naudoilla mm. kehonpinnan lämpötilan seurantaan, tulehdusten (esim. sorkkaongelmat, utaretulehdus) tunnistamiseen sekä lämpöstressin arviointiin. Lämpökuvantamistekniikka on osoittautunut objektiiviseksi menetelmäksi mm. vasikoiden lämpöstressin seurantaan (Unruh ym. 2017).

Luotettavan lämpökuvan saamiseksi eläimen tulee olla rauhallinen ja seistä liikkumatta kuvauksen aikana. Ihon ja karvan tulee olla puhdas ja kuiva (McManus ym. 2022). Kuvasalue vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan. Yleisen terveyden seurantaan käytetään usein

silmänympärystä, kylkeä, lapa tai eläimen takaosaa. Tulehdusten diagnostiikassa kuvaus kohdistetaan suoraan vaurioalueelle. Kuvausjärjestys tulisi aina olla sama. Tämä helpottaa laajojen kuvausaineistojen analyysiä ja tulkintaa (Taulukko 6).

Taulukko 6. Lämpökuvantamisen edut ja haasteet.

Edut	Peruste	Kirjallisuus
Ei-invasiivinen	Kosketukseton, eläimelle stressitön	
Nopea, jos vain yksi kuvauskohde	Mahdollistaa suuren eläinmäärään seulonnan.	
Ennaltaehkäisevä	Varhainen lämpöpoikkeamien havaitseminen ennen kliinisiä oireita	
Helppo	Ei pitkää koulutusta. Soveltuu käytettäväksi erilaisissa tuotantoympäristöissä.	
Haasteet	Peruste	Kirjallisuus
Hidas	Koko eläimen läpikäyminen, vaatii eläimen paikallaan pysymistä.	
Eläin ja ympäristö vaikuttaa	Pintalämpötilaan vaikuttavat karvapeite, väri, kosteus, tuuli ja ympäristön lämpötila.	McManus ym. 2022
Ei protokollaa	Naudoille ei ole spesifisiä kuvantamisprotokollia.	McManus ym. 2022
Havaitsee vain poikkeaman	Taustasyyn selvittämiseen tarvitaan vahvistavat tutkimukset.	
Laitteen hinta	Yksittäisen tilan käyttöön kallis	

Kameran emissiivisyysarvo ja ympäristöparametrit asetetaan ennen kuvausta. Kuvia tulee ottaa vakioetäisyydeltä ja -kulmasta. Useampi peräkkäinen kuva parantaa mittauksien toistettavuutta. Aikasarja (ennen-jälkeen vertailu) antaa usein enemmän tietoa kuin yksittäinen kuva (Wang ym. 2023). Kuvien analyysissä etsitään kohonneita tai kylmiä lämpöalueita verrattuna tausta- tai vastakkaiseen kehonosaan.

Pinnallinen lämpötilan nousu viittaa usein lisääntyneeseen verenkiertoon, tulehdukseen tai lämpökuormitukseen. Kylmät alueet voivat puolestaan liittyä heikentyneeseen verenkiertoon tai esimerkiksi kudonvaurioon (McManus ym. 2022). Lihanaudoilla lämpökuvantamistekniikka voi olla hyödyllinen lämpöstressin seurannassa. Unruh ym. (2017) raportoivat selkeän pintalämpötilan nousun lämpöaltistuksen aikana.

Lämpöstressi heikentää kasvua sekä vähentää syöntiä ja hyvinvointia. Lämpökuvantaminen mahdollistaa eläimiin koskemattoman, nopean lämpökuormituksen arvioinnin (Unruh ym. 2017). Suoran riskin ennustaminen lämpökuvien perusteella on kuitenkin haastavaa (Cuthbertson ym. 2020).

Lämpökuvantamista on käytetty lypsylehmien tulehduksellisten tilojen varhaisessa havaitsemisessa. Sorkkasairauksien ja utaretulehduksien havaitseminen lämpökuvien perusteella on ollut suoraviivaista. Tutkimus on painottunut lypsylehmiin, mutta samat periaatteet pätevät myös lihanautoihin. McManus ym. (2022) totesivat, että menetelmä on lupaava tulehduksellisten sairauksien varhaisessa toteamisessa, mutta vakiintuneet protokollat puuttuvat.

Joissain tapauksissa korkeammat pintalämpötilat voivat olla yhteydessä heikompaan eläinten hyvinvointiin ja teuraslaadun heikkenemiseen (Cuthbertson ym. 2020). Menetelmä voisi

soveltua seulontatyövälineenä erikoisolosuhteissa, jolloin eläimiä voisi ääritapauksissa ohjata jatkotoimenpiteitä varten.

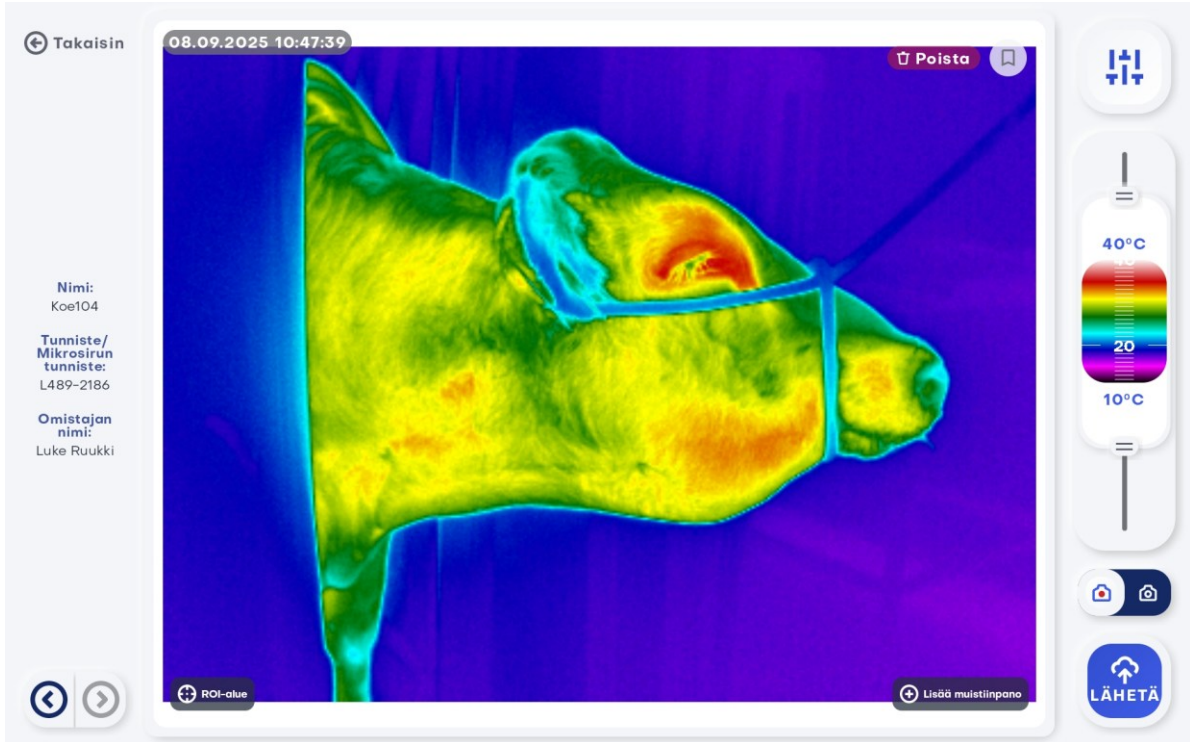
Lämpökuvantaminen voi tarjota lupaavan, eläimeen kajoamattoman työvälineen terveyden, hyvinvoinnin ja tuotannon seurantaan, mutta lisää standardointia ja validointia tarvitaan. Lämpökuvantamisen mahdollisuus havaita lämpöpoikkeamat varhaisessa vaiheessa voi tehdä siitä arvokkaan työvälineen tulevaisuuden täsmäkarjataloudessa.

TeknoNauta-hankkeessa hankittiin Thermidas VET -lämpökuvantamisjärjestelmä, joka koostuu Thermidas IRT-384 tablettilämpökamerasta, analysointitabletista ja pilvipalvelusta kuvien säilyttämiseen. Luke Ruukin tutkimuspihatossa lämpökuvantamista käytetään eläinten sairauksien ja vammojen diagnosoinnin tukena. Terveissä eläimissä kehon lämpötilaerot ovat symmetrisiä molemmin puolin kehoa. Vammat ja tulehdukset aiheuttavat epäsymmetriaa ja jotta se voidaan havaita, lämpökuvat otetaan symmetrisesti molemmin puolin kehoa. Lämpökuvantamisen avulla voidaan paikallistaa vamma-alueita, seurata eläinlääkärin antaman hoidon vaikutuksia ja varmistaa vamman tai tulehduksen parantuminen.

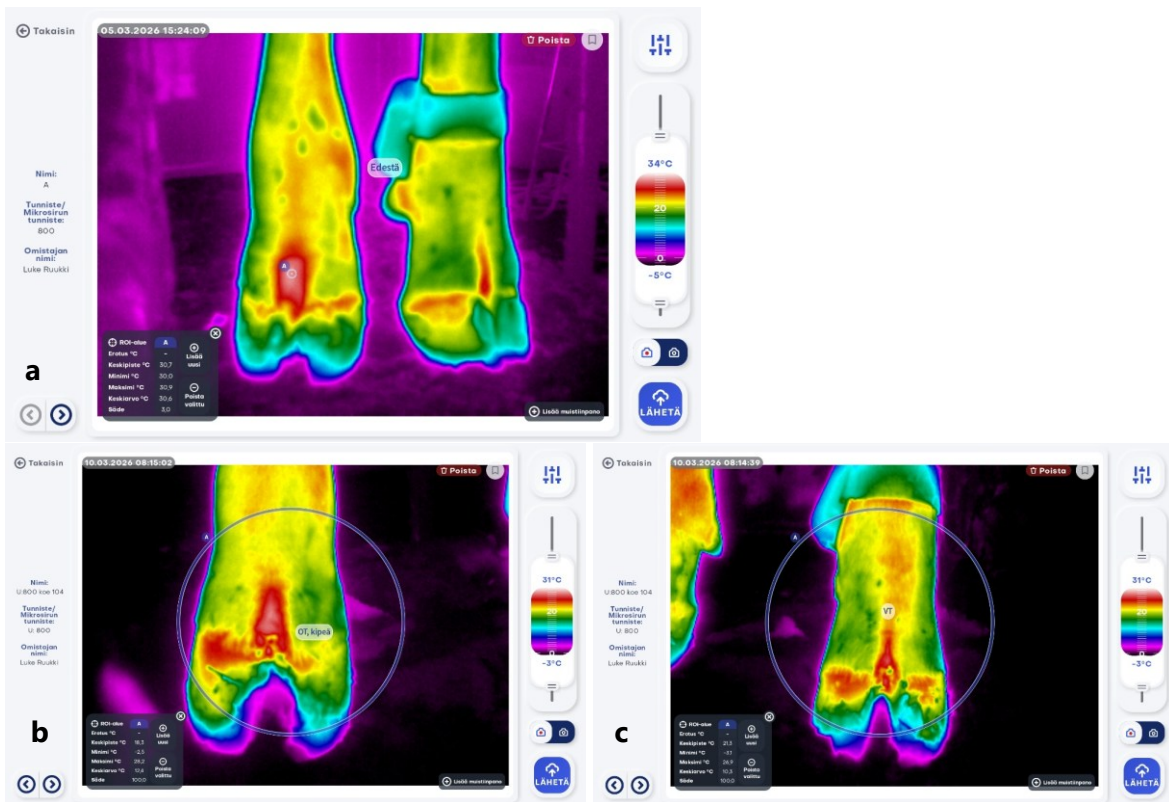
Koska loppukasvatettavia lihanautoja ei voida turvallisuussyistä kuvata karsinoissa, kuvaus tehdään tutkimuspihatossa käsittelyalueella tai käsittelyhäkissä (Kuva 20). Erityisesti käsittelyhäkissä eläin pysyy melko hyvin paikallaan. Eläin kuvataan osissa kehon alue kerrallaan, koska käsittelyhäkin rakenteet häiritsevät näkymää (Kuvat 21 ja 22).



Kuva 22. Sonnin lämpökamerakuvausta käsittelyhäkissä Thermidas IRT-384 tablettilämpökameralla. Kuva: Luke.



Kuva 23. Sonnilla on voimakasta turvotusta poskessa, minkä voi havaita lämpökamerakuvassa lämpimämpänä alueena. Kuva Outi Ukkola/Luke.



Kuva 24. Sonnin oikeassa takajalassa on sorkkien välissä märkivä tulehdus. Lämpökamerakuvassa erottuu selkeästi myös vasempaan takajalkaan kiinnitetty aktiivisuusanturi. Kuvat: Petri Varis/Luke.

2.2.6. Käyttäytymisen kiihtyvyyssanturiperusteinen seurantalaitteisto

Eläinten käyttäytymisen seuranta on keskeinen osa täsmäkarjataloutta (PLF) erityisesti rakennetussa kasvatusympäristössä. Muutokset syöntikäyttäytymisessä, märehtimisessä, makuuajoissa, aktiivisuudessa sekä hengityksen rytmivaihdokset voivat ilmetä jo ennen kliinisiä sairastumisen oireita ja kertoa varhaisista terveys- ja hyvinvointiongelmista (Rushen ym. 2012, Richeson 2018). Kiihtyvyyssanturit tunnistavat eläimen laidunnus-, syömis-, märehtimis-, lepo- ja liikkumiskäyttäytymisen. Poikkeamat normaalista rytmistä voivat viitata ontumiseen, ruoansulatushäiriöihin tai sairastumiseen. Tutkimusten mukaan automaattinen käyttäytymisanalyysi voi havaita muutokset jo 12–24 tuntia ennen näkyviä oireita. Anturijärjestelmät voivat tunnistaa nämä muutokset automaattisesti ja lähettää hälytyksen, jolloin sairastunut eläin voidaan hoitaa ajoissa. Tämä ehkäisee tautien leviämistä ja vähentää lääkintäkustannuksia.

Yksi tärkeä sovellus on kiimanseuranta, joka perustuu aktiivisuuden ja liikkumisen muutoksiin. Anturit tunnistavat lisääntyneen levottomuuden ja aktiivisuuden, jotka viittaavat kiimaan. Tietoa voidaan hyödyntää joko ajoittamalla siemennys tarkasti tai sitten takautuvasti. Takautuvan astutustiedon avulla voidaan määrittää tuleva poikimispäivä, jolloin valvontaa voidaan kohdentaa tarkasti poikima-aikana tiettyihin yksilöihin.

Uudet sensoriteknologiat ja koneoppiminen ovat tehneet mahdolliseksi jatkuvan yksilötason seurannan karsinakasvatusolosuhteissa. Kehitys hyödyntää pitkälti maidontuotannossa jo valloituja menetelmiä (Jiang ym. 2023, Besler ym. 2024).

Rakennetuissa kasvatusympäristöissä yleisimmin hyödynnettävät laitteet ovat ns. puettavia kiihtyvyyssantureihin perustuvia mittausjärjestelmiä. Kiihtyvyyssanturi on sijoitettuna joko korvamerkkiin tai kaula- tai jalkapantaan. Joissain tapauksissa kiihtyvyyssanturin lisäksi laitteeseen on lisätty mm. lämpötila-anturi. Wolfger ym. (2015) validoivat korva-anturiin kiinnitetyn kiihtyvyyssanturin toimintaa syönti- ja märehtimiskäyttäytymisen seurantaan. Antureita on käytetty myös lämpökuormituksen ja -stressin havainnoimiseen (Islam ym. 2020) sekä makuuajan, seisomisen ja liikkumisen luokitteluun (Pavlovic ym. 2021, Watanabe ym. 2024). Anturi mittaa kolmiakselista kiihtyvyyttä ja mahdollisesti kulmanopeutta. Anturin muodostama data lähetetään langattomasti tukiasemalle. Järjestelmään rakennetut algoritmit luokittelevat käyttäytymistilat: esimerkiksi syönti, märehtiminen, makaaminen, seisominen, kävely, läähätys jne. Uusimmat ratkaisut yhdistävät käyttäytymisanturien muodostaman tiedon ympäristömittauksen tietoihin (lämpötila, kosteus, ilmanlaatu). Leliveld ym. (2024) kuvasivat reaaliaikaisen järjestelmän, joka kerää tietoa karjan käyttäytymisestä ja navetan olosuhteista samaan seuranta-järjestelmään.

Järjestelmät mittaavat lukuisia ominaisuuksia, joista on hyötyä eläinten hyvinvoinnin seurannassa (Taulukko 7). Syöntikäyttäytyminen toimii tehokkaana varhaiskartoituksena esimerkiksi hengitystietulehduksissa tai ruoansulatusongelmissa. Yhdistämällä tieto videokameraperusteiseen valvontajärjestelmään voidaan tunnistaa, kuinka paljon yksittäiset eläimet viettävät aikaa ruokintapöydällä. Muutokset märehtimisessä voivat viitata asidoosiin, kipuun, kuumeeeseen, sairastumiseen tai ruokinnan muutoksista johtuviin häiriöihin. Makuuajan ja liikkumisen seuranta on hyvinvoinnin mittari. Rakennetussa ympäristössä poikkeamat normaalista päivärytmistä voivat kertoa ontumisesta, kivusta, kuumuudesta, kylmyydestä tai sairaudesta. Indikaattorit auttavat arvioimaan tilankäyttöä, ryhmittelyä ja eläinten välisiä suhteita.

Taulukko 7. Järjestelmien seuraamat käyttäytymispiirteet ja hyödyt käyttäjälle.

Käyttäytyminen	Mitattavat ominaisuudet	Hyödyt	Kirjallisuus
Syöntikäyttäytyminen	Syöntikertojen määrä ja kesto Päivittäinen syöntiaika	Nopea reagointi syönnin vähentämiseen Heikosti suoriutuvien ja arkailevien yksilöiden tunnistus	Wolfger ym. 2015, Richeson ym. 2018, Watanabe ym. 2024
Märehtiminen	Päivittäinen märehimis aika Märehtimiskertojen lukumäärä Muutokset märehimisessä (pötsin toiminnassa) ruokinnan tai stressin seurauksena	Mahdollisuus nopeaan reagointiin, jos muutoksia Mahdollisuus yhdistää märehimistieto muuhun kasvatusolosuhde- ja ruokintatietoon	Wolfger ym. 2015, Farthing ym. 2021, Watanabe ym. 2024
Aktiivisuus	Makaaminen, seisominen, liikkuminen Tilankäyttö (ruokintapöytä, vesipisteet, makuualue) Sosiaaliset kontaktit (väistäminen, kaverisuhteet, leikki)	Voidaan tunnistaa yksilöitä, jotka ovat sosiaalisesti eristäytyneitä tai yliedustettuina konflikteissa Antaa tietoa, mikä on ryhmän toiminnallinen koostumus	Robert ym. 2011, Hu ym. 2024, Seger ym. 2024, 2025, Watanabe ym. 2024
Terveys ja hyvinvointi	Algoritmi tunnistaa poikkeamat yksilön normaalista käyttäytymisprofiilista	Mahdollistaa nopean reagoinnin Matalamman kuolleisuuden Tehokkaamman ennaltaehkäisevän terveydenhuollon	Wolfger ym. 2015
Työmäärä	Vähentää silmämääräisen tarkkailun tarvetta	Vapauttaa työaikaa ongelmataposten hoitamiseen	Rushen ym. 2012
Tuotannon optimointi	Usean lähteen tiedot voidaan yhdistää	Parempi päätöksenteko Heikosti menestyvien/tuottavien eläinten tunnistus Tehokkaampi ryhmittely ja ruokinnan hallinta	McNicol ym. 2024

Keskeinen haaste automaattisten käyttäytymisjärjestelmien yleistymiseen naudanlihantuotannossa on investointikustannus. Anturit, tukiasemat ja data-alustat voivat alkuinvestointeina olla mittavat erityisesti, jos järjestelmiä hankitaan koko karjalle. Usein alkuinvestoinnin lisäksi tulee järjestelmän käytön kuukausimaksu eli lisenssimaksu ja mahdolliset huoltokustannukset (Bandara 2024).

Investoinnin kannattavuus riippuu karjan koosta, terveyden tasosta ja mahdollisista terveydelisistä haasteista, työvoimakustannuksesta ja järjestelmän hyödyntämisen osaamisesta (tietoteknisestä osaamisesta). Järjestelmät tuottavat suuria määriä tietoa. Ilman helppokäyttöisiä käyttöliittymiä ja datan analysointia ns. hälytysähky on yleinen haaste (Jiang ym. 2023, Siegford ym. 2023). Eläintilojen pölyisyys, kosteus ja lämpötilojen suuret vaihtelut sekä eläinten käyttäytyminen voivat lyhentää anturien käyttöikää ja aiheuttaa yhteyskatkoksia. Nämä voivat edellyttää jatkuvaa huoltoa ja teknistä osaamista tai tukea. Kaikkiin teknologisten laitteiden

käytönoton yleistymiseen liittyvät samat seikat: digitaalisen osaamisen puute, epäluottamus algoritmien tarkkuuteen, huoli datan omistajuudesta ja riippuvuudesta laitteen toimittajiin (Stygard ym. 2021). Maidontuotantosektorilla tehdyt taloudelliset analyysit ovat osoittaneet, että investoinnin kannattavuus vaihtelee paljon (Steeneveld ym. 2015, Pfrombeck ym. 2025). Vastaavia analyysejä naudanlihantuotantoon ei ole saatavilla.

Käyttäytymisen seuranta rakennetussa kasvatusympäristössä mahdollistaa yksilökohtaisen eläimen hyvinvoinnin seurannan. Jatkuva tiedonsaanti kattaa eläimen syönti-, märehimis-, aktiivisuus-, makuulla olo-, läähätys- ja sosiaalisen käyttäytymisen. Käyttäytymisteknologian käytön hyötyihin liittyy terveys- ja hyvinvointiriskien varhainen tunnistaminen, jolloin sairastumis- ja lääkitsemismäärät voivat jäädä vähäisemmiksi. Ihmistyönmäärän optimointi ja eläimestä itsestään saatava tieto voivat johtaa parempiin tuotantotuloksiin. Haasteita ovat kustannukset, datan tulkinta, laitteistojen tekninen kestävyys ja käytönoton esteet. Tutkimusta tarvitaan taloudellisten analyysien muodostamiseen erityisesti lihanautatuotannon näkökulmasta.

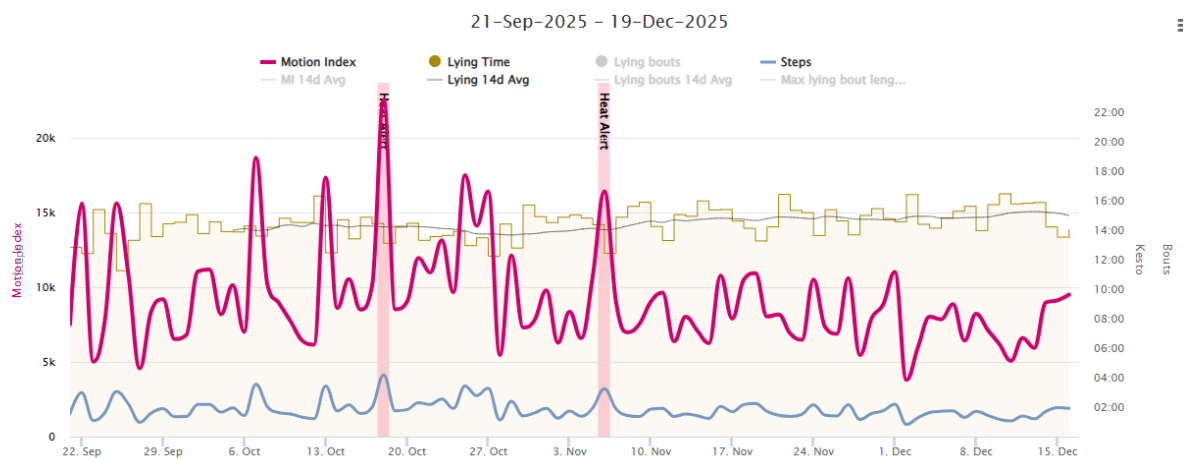
TeknoNauta-hankkeessa Luke Ruukin tutkimuspihattoon hankittiin CowAlert -eläinten käyttäytymisen seurantajärjestelmä koko karjalle. Järjestelmän toiminta perustuu eläimestä kiihtyvyyssantureilla kerättyyn tietoon ja edistyneisiin tietoa analysoiviin algoritmeihin. Järjestelmään kuuluvat eläinten takajalkoihin kiinnitettävät langattomat IDS i-QUBE-anturit (Kuvat 23 ja 24), eläinhalliin kiinnitettävä reititin sekä pilvipalvelu. Järjestelmä antaa yksilökohtaisesta tietoa eläimen aktiivisuustasosta (askelten määrä) ja makuu- ja seisomiskäyttäytymisestä (kokonaiskesto ja jaksojen lukumäärä) (Kuva 25). Automaattinen käyttäytymisen seurantajärjestelmä mahdollistaa käyttäytymisdatan käytön entistä useammassa tutkimuksessa, vähentää eläinten käyttäytymisen analysointiin tarvittavaa työaikaa ja toimii apuna eläinten terveydentilan päivittäisessä seurannassa. Aktiivisuuden lasku tai makaamisen lisääntyminen voivat olla varhaisia merkkejä hengitystie- tai ruoansulatussairauksista.



Kuva 25. IDS i-QUBE-kiihtyvyyssanturi kiinnitetään tarranauhalla eläimen jalkaan. Kuva: Leena Tuomisto/Luke.



Kuva 26. IDS i-QUBE-kihtyvyyssanturit sonnien takajaloissa. Kuva: Leena Tuomisto/Luke.



Summary Information

	16. joulukuuta 2025	7d Avg	14d Avg
Steps	1883	1375	1453
Motion Index	9496	6823	7160
Standing Time (Bouts)	09:55:51 (13)	08:51:14 (15)	09:00:00 (17)
Lying Time (Bouts)	14:04:09 (12)	15:08:46 (15)	15:00:00 (17)

Kuva 27. CowAlert-järjestelmä tuottaa eläimen käyttäytymisestä yksilökohtaista graafista dataa ja laskee päiväkohtaisia keskiarvoja.

3. Yhteenveto

TeknoNauta-hankeparin laitteista maatilakäyttöön sopivia ovat karjajarjat, lintujen karkotusjärjestelmät, UV-desinfiointilaitteet, rehuviljan mykotoksiinimittari, NIR-spektroskopia rehuarvojen määrittämiseen, eläinten paikannusjärjestelmä sekä navetan olosuhdeseuranta- ja kameravalvontajärjestelmät. Tutkimuskäyttöön soveltuvia laitteistoja ovat nautojen hengityskaasumittarit, bioaerosolien keräyslaite, kiihtyvyyssanturiperusteinen aktiivisuusmittaus, diagnostinen lämpökuvantamislaitte ja ruhon koostumusta määrittävä ultraäänilaitteisto.

TeknoNauta-hankkeessa Luke Ruukin tutkimuspihattoon hankituista laitteista kasvaville lihanauchoille suunnitellut mekaaniset EasySwing Midi -karjajarjat heilurivarrella ovat olleet kasvavien sonnien käytössä lähes vuoden ajan, eikä vikoja ole ilmennyt. Eläimet käyttävät niitä päivittäin keuhonhoitoon. Lisäksi harjat herättävät eläimissä leikkikäyttäytymistä.

Kaksi osin eri käyttöön tarkoitettua UV-laatikkoa hankittiin parantamaan tutkimuspihaton bioturvallisuutta. Laitteita käytetään erityisesti "puhdas-likainen" -rajalla estämään mikrobien siirtymistä eläinhalliin tai ulos eläinhallista. LF CAB -desinfiointikaappi seisoo omilla jaloillaan ja sopii hieman suurempien esineiden desinfektioon. Pienempi IQ-mobile-desinfiointilaatikko on siirrettävä ja sitä voi käyttää akulla tai verkkovirralla. Desinfioimislaitteita on hyödynnetty eläinhallissa mukana kulkevien, muutoin hankalasti puhdistettavien, esineiden desinfioinnissa. Laitteilla desinfioidaan esimerkiksi matkapuhelimia, kuulosuojaimia, otsalamppuja ja kyniä.

Erilaisia lintujen karkotukseen tarkoitettuja laitteita hankittiin käytettäväksi tutkimuspihaton läheisyydessä. BirdAlert 2.0 -laitteisto yhdistää eri karkotusmenetelmiä. Laitteen mikrofoni kuuntelee ympäristön ääniä ja tunnistaa lähistöllä oleskelevan lintulajin sen äänien perusteella. Laite soittaa kaiuttimien kautta kyseisen lajin hätähuutoa. Laite tunnistaa hanhet, varilinnut, lokit ja kottaraiset. Laitetta voidaan käyttää verkkovirralla tai sen virtalähteeksi voidaan yhdistää aurinkopaneeli. BirdAlert 2.0 -laitteiston lisälaitteita ovat verkkovirralla toimiva kaasutyykki ja akkukäyttöinen ilmalla täyttyvä pelotinhahmo. Ääni ja valo lisäävät pelotinhahmon tehoa. Äänikarkotus ja pelotinhahmo ovat ehtineet olla käytössä Ruukin pihatton läheisyydessä rehunvalmistusalueella usean kuukauden ajan syksyllä ja syystalvella ja käyttökokemus on ollut positiivinen: naakkojen ja varisten määrä alueella on tuntunut vähentyneen.

Tutkimuspihattoon hankittu olosuhdemittausjärjestelmä koostuu eri kemiallisia, fysikaalisia ja biologisia parametrejä mittaavista antureista. Eläinhalliin kiinnitettiin yksitoista RuuviTag Pro -anturia, jotka mittaavat jatkuvasti lämpötilaa, ilmankosteutta, ilmanpainetta ja anturin liikettä. Yksi anturi kiinnitettiin eläinhallin ulkopuolelle keräämään vertailudataa ulkoilmasta. Langattomien anturien keräämä tieto tallentuu reitittimen avulla pilvipalveluun, mutta tiedon siirto on mahdollista myös bluetooth-yhteydellä matkapuhelimeen. Ruuvi-olosuhdemittausjärjestelmä muodostaa tärkeän työkalun tutkimuspihatton olosuhteiden päivittäiseen seurantaan ja tutkimusten taustamuuttujien keräämiseen. Laitteisto ollut käytössä tutkimuspihatossa puolen vuoden ajan (elo-tammikuu) ja tänä aikana se on toiminut moitteettomasti.

Tutkimuskäyttöön hankittiin Dräger X-am 5600 monikaasumittari. Mittarin mittaamia kaasuja ovat hiilidioksidi, ammoniakki, rikkivety, metaani ja hiilimonoksidi. Monikaasumittaria käytetään tutkimuspihatton kuivikemateriaalikokeissa kuivikepatjasta erittyvien haitallisten kaasujen pitoisuusmäärittämiin. Lisäksi olosuhdemittausjärjestelmään kuuluu InnovaPrepin bioaerosolien keräyslaitteisto, jolla eläintilan ilmasta voidaan kerätä bioaerosoleja ja eristää ne viljelyä, sekvensointia tai PCR-monistusta varten. Laitteisto mahdollistaa ilman mikrobipitoisuuksien sekä

mikrobien kulkeutumisen ja altistumisen tutkimuksen. Tutkimusta voidaan laajentaa esimerkiksi ilmaitse kulkeutuvien antibioottiresistenssien mikrobien leviämisen ymmärtämiseen.

Tutkimuspihattoon hankittiin tallentava kameravalvontajärjestelmä (Milesight AI Zoom Dome 5 MP valvontakamerat). Eläinten käyttäytymisen tallentaminen on tavallinen aineistonkeruumenetelmä käyttäytymis- ja hyvinvointitutkimuksissa, minkä lisäksi hyvälaatuista kuvamateriaalia voidaan käyttää esimerkiksi konenäön kehittämisessä. Suuren tallennettavan datamäärän vuoksi järjestelmä toteutettiin suljettuna ja paikallisena vaikka myös pilveen tallentaminen olisi mahdollista. Nautailoilla kameroiden määrä ja kuvauskohteet päätetään tilakohtaisesti, eikä massiivinen kamerajärjestelmä ole tarpeen onnistuneelle toteutukselle. Tallentavaa kameravalvontaa voidaan käyttää yleisvalvonnassa tai kohdistettuna esim. poikima-alueelle. Kameroiden valinnassa on hyvä kiinnittää huomiota niiden kestävyyteen, kuvakulman laajuuteen sekä riittävän hyvään kuvan laatuun myös yöaikaan.

TeknoNauta-hankkeen kahdella kumppanuustilalla testattiin kesällä 2025 laidunkauden ajan Laidunna.fi -paikannusjärjestelmää. Järjestelmä koostuu kevyistä eläimen kaulapantaan kiinnitettävistä GPS-paikannuslaitteista ja pilvipalvelusta. Paikannustiedot tallentuvat pilvipalveluun, josta eläinten sijaintia voi tarkastella ilmakehältä tai peruskarttapohjalta puhelimesta, tabletilla tai tietokoneen selaimella. Tietokoneen selaimella voi karttapohjalle piirtää ja tallentaa laidunalueiden rajoja ja kytkeä tekstiviestihälytyksen, mikäli paikanninta kantava eläin poistuu valitulta alueelta. Laidunna.fi toimii Digitan koko maan kattavassa LoraWAN radioverkossa. Puhelinliittymäsopimuksia ja niiden SIM-kortteja ei tarvita. Paikantimissa on vaihdettavat sormiparistot, jotka kestävät koko laidunkauden.

Viljan mykotoksiinimäärytyksiin liittyen hankittiin RIDA Smart Box -mittauslaitteisto. Itse mittauslaitteiston lisäksi toksiinimittauksissa tarvitaan laboratoriotarvikkeita kuten mittaliuskoja, reagenssia, pipettejä, pipettien kärkiä, putkiravistelijaa, minisentrifugi, lasisia koeputkia ja muovisia eppendorfnäyteputkia, tarkkuusvaaka, putkiteline, ajastinkello ja suodatinpaperia. Laitteistoon on saatavana DON ja T-2/HT-2-toksiinien lisäksi myös aflatoksiini, zearalenoni ja fumonisiini-testit. Testiliuskojen avulla viljan hometoksiinien pitoisuudet saadaan määritettyä omatoimisesti alle puolessa tunnissa. Rehujen analysointia varten hankittiin käsikäyttöinen X-NIR laite, jolla voidaan analysoida rehuista (säilörehu, kuiva heinä, vilja, seosrehu) kuiva-aine, tärkkelys, valkuainen, kuitu ja rasva.

Nautojen hengityskaasujen mittauksia varten tutkimuspihattoon hankittiin Vytelle SENSETM Methane Powered by IntegrityTM laitteisto, joka integroituu jo olemassa oleviin Vytellen ruokintakuppeihin. Laitteisto on kustannustehokas ja skaalautuva nautojen metaanin mittausjärjestelmä. Mittaustekniikka yhdistää metaanin mittaukseen yksilöllisen rehunkulutuksen. Laitteisto mittaa eläimen tuottamaa metaanimäärää jokaisella syöntikerralla, kun eläin käy Vytellen ruokintakupilla. Metaanin ja rehun syöntimäärä mittaus tapahtuu siis useita kertoja päivässä. Yksilön tunnistetaan korvamerkin RFID tunnisteen avulla. Järjestelmä ei vaadi erillistä houkutusrehua tai työtä eläinten opettamiseksi laitteelle.

Hankittua lämpökuvantamisjärjestelmää, joka koostuu Thermidas IRT-384 tabletilämpökamerasta, analysointitabletista ja pilvipalvelusta kuvien säilyttämiseen, käytetään eläinten sairauksien ja vammojen diagnosoinnin tukena. Terveissä eläimissä kehon lämpötilaerot ovat symmetrisiä molemmin puolin kehoa. Vammat ja tulehdukset aiheuttavat epäsymmetriaa ja jotta se voidaan havaita, lämpökuvat otetaan symmetrisesti molemmin puolin kehoa.

Lämpökuvantamisen avulla voidaan paikallistaa vamma-alueita, seurata eläinlääkärin antaman hoidon vaikutuksia ja varmistaa vamman tai tulehduksen parantuminen.

Tutkimuspihattoon hankitun CowAlert -eläinten käyttäytymisen seurantajärjestelmän toiminta perustuu eläimistä kiihtyvyyssantureilla kerättyyn tietoon ja edistyneisiin tietoa analysoiviin algoritmeihin. Järjestelmään kuuluvat eläinten takajalkoihin kiinnitettävät langattomat IDS i-QUBE-anturit, eläinhalliin kiinnitettävä reititin sekä pilvipalvelu. Järjestelmä antaa yksilökohtaisesta tietoa eläimen aktiivisuustasosta (askelten määrä) ja makuu- ja seisomiskäyttäytymisestä (kokonaiskesto ja jaksojen lukumäärä). Automaattinen käyttäytymisen seurantajärjestelmä mahdollistaa käyttäytymisdatan käytön entistä useammassa tutkimuksessa, vähentää eläinten käyttäytymisen analysointiin tarvittavaa työaikaa ja toimii apuna eläinten terveydentilan päivittäisessä seurannassa. Aktiivisuuden lasku tai makaamisen lisääntyminen voivat olla varhaisia merkkejä hengitystie- tai ruoansulatussairauksista.

Viitteet

- Aernouts, B., Perneel, M., Adriaens, I. & Verwaeren, J. 2024. Behaviour and welfare monitoring of cattle using computer vision and machine learning. EAAP 2024, posterisitys. <https://docs.eaap.org/2024/m221/S45P20.pdf>
- Andrade, R.R., Wendorff, M. & Leso, L. 2024. Understanding compost-bedded pack barn system in Europe: Management and environmental implications. *Animals* 14: 1179.
- Anfossi, L., Baggiani, Giovannoli, C., D'Arco, C. & Giraudi, G. 2012. Lateral-flow immunoassays for mycotoxins and phycotoxins: a review. *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 405: 467–480.
- Antognoli, V., Presutti, L., Bovo, M., Torreggiani, D. & Tassinari, P. 2025. Computer vision in dairy farming management: A literature review of current applications and future perspectives. *Animals* 15: 2508.
- Ayadi, F.Y., Cortus, E.L., Spiehs, M.J., Miller, D.N. & Djira, G.D. 2015. Ammonia and greenhouse gas concentrations at surfaces of simulated beef cattle bedded manure packs. *American Society of Agricultural and Biological Engineers in Transactions of the ASABE* 58: 783–795.
- Augustine, D.J. & Derner, J.D. 2013. Assessing herbivore behavior with GPS collars in semiarid grassland. *Sensors* 13: 3711–3723.
- Bandara, A.M.S.M.R.S.G. 2024. Farmer adoption of precision livestock farming in USA: Current and Future. *Journal of Agriculture, Food, Environment and Animal Sciences* 5: 204–220.
- Bandyk, C.A. 2024. Review: Mycotoxins in ruminant livestock production: An underestimated and overlooked risk and opportunity? *Applied Animal Science* 40: 802–817.
- Barrasa, M., Lamosa, S., Fernandez, M.D. & Fernandes, E. 2012. Occupational exposure to carbon dioxide, ammonia and hydrogen sulphide on livestock farms in north-west Spain. *Annals of Agricultural and Environmental Medicine* 19: 17–24.
- Bailey, D.W., Trotter, M.G., Knight, C.W. & Thomas, M.G. 2018. Use of GPS tracking collars accelerometers for rangeland livestock production research. *Translational Animal Science* 2: 81–88.
- Besler, B.C., Mojabi, P., Lasemiimani, Z., Murphy, J.E., Wang, Z., baker, R., Pearson, J.M. & Fear, E.C. 2024. Scoping review of precision technologies for cattle monitoring. *Smart Agricultural Technology* 9: 100596.
- Bordignon, F., Provolo, G., Riva, E., Caria, M., Todde, G., Sara, G., Cesarini, F., Grossi, G., Vitali, A., Lacetera, N. & Pezzuolo, A. 2025. Smart technologies to improve the management and resilience to climate change of livestock housing: A systematic and critical review. *Italian Journal of Animal Science* 24: 376–392.
- Brandt, A.W., Sanderson, M.W., DeGroot, B.D., Thomson, D.U. & Hollis, L.C. 2008. Biocontainment, biosecurity, and security practices in beef feedyards. *Journal of American Veterinary Medical Association* 15: 262–269.

- Brethour, J.R. 1992. The repeatability and accuracy of ultrasound in measuring intramuscular fat. *Journal of Animal Science* 70: 1039–1044.
- Brethour, J.R. 2000. Using serial ultrasound measurements to generate models of marbling and backfat thickness changes in feedlot cattle. *Journal of Animal Science* 78: 2055–2061.
- Bortoluzzi, E.M., Schmidt, P.H., Brown, R.E., Jensen, M., Mancks, M., Larson, R.L., Lancaster, P.A. & White, B.J. 2023. Image classification and automated machine learning to classify lung pathologies in deceased feedlot cattle. *Veterinary Science* 10: 113.
- Chen, P.S. & Mainelis, G. 2009. Collection efficiency of impingers for submicron particles. *Aerosol Science and Technology* 43: 1277–1286.
- Chen, C., Zhu, W. & Norton, T. 2021. Behaviour recognition of pig and cattle: Journey from computer vision to deep learning. *Computers and Electronics in Agriculture* 187: 106255.
- Cherney, J.H., Digman, M.F. & Cherney, D.J.R. 2021. Handheld near-infrared spectroscopy for forage evaluation. *Computers and Electronics in Agriculture* 190: 1064669.
- Clauß, M. 2020. Emission of bioaerosols from livestock facilities - Methods and results from available bioaerosol investigations in and around agricultural livestock farming. Thünen working paper 138a. Braunschweig Germany. 123 s.
- Cogliati, M., Heber, A., Gonzalez, O., Passucci, J., Kuttel, J., Costagliola, M., Larumbe, G. & Nitschj, V. 2022. Airborne *E.coli* and total bacteria inside and around a beef feedlot. *Environmental Research* 205: 112466.
- Custodio, L., Prados, L.F., Yiannikouris, A., Holder, V., Pettigrew, J., Kuritza, L., Dutra de Resende, F. & Siqueira, G.R. 2019. Mycotoxin contamination of diets for beef cattle finishing in feedlot. *Revista Brasileira de Zootecnia* 48: e20190079.
- Cuthbertson, H., Tarr, G., Loudon, K., Lomax, S., White, P., McGreevy, Polkinghorne, R. & Gonzalez, L.A. 2020. Using infrared thermography on farm of origin to predict meat quality and physiological response in cattle (*Bos Taurus*) exposed to transport and marketing. *Meat Science* 169: 108173.
- DeVries, T.J., Vankova, M., Veira, D.M., & Von Keyserlingk, M.A.G. 2007. Usage of mechanical brushes by lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 90: 2241–2245.
- Do, J.P., Defensor, E.B., Ichim, C.V., Lim, M.A., Mechanic, J.A., Rabe, M.D. & Schaevitz, L.R. 2020. Automated and continuous monitoring animal welfare through digital alerting. *Comparative Medicine* 70: 313–327.
- Douglas, P., Robertson, S., Gay, R., Hansell, A.L. & Gant, T.W. 2018. A systematic review of public health risks of bioaerosols from intensive farming. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 221: 134–173.
- Dräger. 2016. Handbook: An introduction to Gas-Detection Technology. 1st Edition. Dräger Safety AG & Co. KGeA. Lubeck. 114 s.

- Dungan, R.S. 2010. Fate and transport of bioaerosols associated with livestock operations and manures. *Journal of Animal Science* 88: 3693–3706.
- Dungan, R.S. 2011. Estimation of culturable and total bacteria from dairy lagoons and barns using remote aerosol sampling. *Journal of Environmental Quality* 40: 176–183.
- Dunston-Clarke, E.J., Stockman, C., Sinclair, J. & Collins, T. 2024. Brush use in lot-fed cattle shows continued use and positive behaviour. *Animals* 15: 44.
- D’Urso, P.R., Arcidiacono, C. & Cascone, G. 2025. Gas concentration monitoring techniques by using an infrared photo-acoustic multi-gas analyser and low-cost devices in an open dairy barn. *Journal of Animal Science and Technology* 67: 651–665.
- Eberl, D.T., Smith, M.J., Megram, O.J., Mayhew, M.M., Willoughby, D., White, S.J. & Wilson, P.B. 2024. Innovative bedding materials for compost bedded pack barns: enhancing dairy cow welfare and sustainable dairy farming. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-05244-7>
- EFSA AHAW Panel, Nielsen, S.S., Alvarez, J., Boklund, A., Dippel, S., Dorea, F., Figuerola, J., Herskin, M.S., Michel, V., Miranda Chueca, M.A., Nannoni, E., Nonno, R., Riber, A.B., Stahl, L., Stegeman, J.A., Thulke, H.-H., Tuytens, F., Cozzi, G., Knierim, U., Martí, S., Mullan, S., Ashe, S., Cecchinato, G., Lima, E., Mosbach-Schulz, O., Vitali, M., Zannam M.B. & Winckler, C. 2025. Welfare of beef cattle. *EFSA Journal* 23: e9518. 195 s.
- Farthing, T.S., Dawson, D.E., Sanderson, M.W., Seger, H. & Lanzas, C. 2021. Combining epidemiological and ecological methods to quantify social effects on *Escherichia coli* transmission. *Royal Society of Open Science* 8: 210328.
- Fuentes, A., Han, S., Nasit, M.F., Park, J., Yoon, S. & Park, D.S. 2023a. Multiview monitoring of individual cattle behaviour on action recognition in closed barns using deep learning. *Animals* 13: 2020.
- Fuentes, A., Yoon, J., Park, J. & Park, D.S. 2023b. Multiview monitoring of individual cattle behavior. *Sensors* 23: 5057.
- Fountain, J., Manyweathers, J., Brookes, V.J. & Hernandez-Jover, M. 2023. Understanding biosecurity behaviors of Australian beef farmers. *Frontiers in Veterinary Science* 10: 1072929.
- Gadzama, I.U., Asadi, H., Hina, Q. & Ray, S. 2025. Influence of virtual fencing technology in cattle management and animal welfare. *Ruminants* 5: 21.
- Gallo, A., Giuberti, G., Frisvad, J., Bertuzzi, T. & Nielsen, K. 2015. Review on Mycotoxin issues in Ruminants. Occurrence in forages, effects of Mycotoxin ingestion on health status and animal performance and practical strategies to counteract their negative effects. *Toxins* 7: 3057–3111.
- Giltsdorf, J.M., Hygnstrom, S.E. & VerCauteren, K.C. 2003. Use of frightening devices in wildlife damage management. *Integrated Pest Management Reviews* 7: 29–45.

- Goncu, S., Yesli, M.I., & Yilmaz, N. 2019. The cattle grooming behavior and some problems with technological grooming instruments for cow welfare. *Journal of Environmental Science and Engineering B* 8: 190–196.
- Guardino-Lopez, P., Pi, Y., Tao, J., Mendes, E.D.M. & Tedeschi, L.O. 2024. Computer vision algorithms to help decision-making in cattle production. *Animal Frontiers* 14: 11–22.
- Gullifa, G., Barone, L., Papa, E., Giuffrida, A., Materrazzi, S. & Risoluti, R. 2023. Portable NIR spectroscopy: The route to green analytical chemistry. *Frontiers in Chemistry* 11: 1214825.
- Guo, Z., Zhang, H., Liu, Y., Chen, R. & Ma, Z. 2025. Airborne bacterial communities in cattle barns revealed by high-throughput sequencing. *Environmental Science and Pollution Research* 32: 6782–6794.
- Hammond, K.J., Crompton, L.A., Bannink, A., Dijkstra, J., Yanez-Ruiz, D.R., O’Kiely, P.O., Ke-breab, E., Eugene, M.A., Yu, Z., Shingfield, K.J., Schwarm, A., Hristov, A.N. & Reynolds, C.K. 2016. Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emissions from ruminants. *Animal Feed Science and Technology* 219: 13–30.
- Herring, W.O. 2002. Ultrasound applications in beef cattle selection. *Journal of Animal Science*: 80: E93–E98.
- Herring, A.D. 2014. Beef cattle production systems. CAB International. Oxfordshire, UK. 323 s.
- Hornain, I.M. & Rosely, N.F.N. 2025. Efficacy of several types of pest bird deterrents and general trend of pest birds at an industrial factory. *Tropical Life Science Research* 30: 111–126.
- Horvath, K.C., Toaff-Rosenstein, R.L., Tucker, C.B. & Miller-Cushon, E.K. 2020. Measuring behavior patterns and evaluating time-sampling methodology to characterize brush use in weaned beef cattle. *Journal of Dairy Science* 103: 8360–8368.
- Houghton, P.L. & Turlington, L.M. 1992. Application of ultrasound for feeding and finishing cattle. *Journal of Animal Science* 70: 900–906.
- Hu, S., Reverter, A., Arablouei, R., McNally, J., Alvarenga, F. & Ingham, A. 2024. Analyzing cattle activity patterns with ear tag accelerometer data. *Animals* 14: 301.
- Huang, D. & Huiqing, G. 2018. Diurnal and seasonal variations of greenhouse gas emissions from a naturally ventilated dairy barn in a cold region. *Atmospheric Environment* 172: 74–82.
- Idris, M., Gay, C.C., Woods, I.G., Sullivan, M., Gaughan, J.B. & Phillips, C.J.C. 2023. Automated quantification of the behaviour of beef cattle exposed to heat load conditions. *Animals* 13: 1125.
- Islam, M.A., Lomax, S., Doughty, A.K., Islam, M.R. & Clark, C.E.F. 2020. Automated monitoring of panting for feedlot cattle. *Animals* 10: 1518.

- Jaderborg, J.P., Spiehs, M.J., Woodbury, B.L., DiConstanzo, A. & Parker, D.B. 2021. Use of bedding materials in beef bedded manure packs in hot and cold ambient temperatures: Effects on ammonia, hydrogen sulfide, and greenhouse gas emissions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers. Transactions of the ASABE* 64: 1197–1209.
- Jiang, B., Tang, W., Cul, L. & Dang, X. 2023. Precision livestock farming research: A global scientometric review. *Animals* 13: 2096.
- Kesavan, J. & Sreenivansan, P. 2010. Performance of liquid impingers for microbial aerosol sampling. *Aerosol Science and Technology* 44: 107–118.
- Kettleson, E.M., Ramaswami, B., Hogan, C.J., Lee, M.H., Zhu, S., Woo, M.H. & Biswas, P. 2009. Collection of airborne viruses using electrostatic precipitation. *Aerosol Science and Technology* 43: 790–798.
- Klug, P.E., Shiels, A.B., Kluever, B.M., Anderson, J., Hess, S.C., Ruell, E.W., Bukoski, W.P. & Siers, S.R. 2023. A review of nonlethal and lethal control tools for managing the damage of invasive birds to human assets and economic activities. *Management of Biological Invasions* 14: 1–44.
- Kumar, P., Morawska, L., Johnson, G.R., Yu, S., Cao, J. & Hargreaves, M. 2024. Methodological considerations for bioaerosol sampling in agricultural settings. *Environmental Science: Processes & Impacts* 26: 145–160.
- Lakamp, A.D., Weaber, R.L. Bormann, J.M. & Rolf, M.M. 2022. Relationships between enteric methane production and economically important traits in beef cattle. *Livestock Science* 265: 105102.
- Lee, M., Auvermann, B.W., Tedeschi, L.O., Koziel, J.A., Brandani, C.B., Gouvea, V.N., Smith, J.K. & Casey, K.D. 2025. Ammonia emissions from beef cattle feedyards: A review. *Frontiers in Animal Science* 6: 1608387.
- Leliveld, L.M.C., Brandolese, C., Grotto, M., Marinucci, A., Fossati, N., Lavarelli, D., Riva, E. & Provolo, G. 2024. Real-time automatic integrated monitoring of barn environment and dairy cattle behaviour: Technical implementation and evaluation on three commercial farms. *Computers and Electronics in Agriculture* 216: 108499.
- Li, F., Zhang, H., Wang, Y., Zhou, L. & Chen, S. 2024a. Inhalable dust and endotoxin exposure in livestock environments: A systemic review. *Science of the Total Environment* 902: 166106.
- Li, K., Fan, D, Wu, H. & Zhao, A. 2024b. A new dataset for videobased cow behavior recognition. *Scientific Reports* 12: 18702.
- Li, R., Wen, Y., Wang, F. & He, P. 2021. Recent advances in immunoassays and biosensors for mycotoxins detection in feedstuffs and foods. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 12: 108.
- Limede, A.C., Marques, R.S., Cidrini, F.A.A., Souza, G.A.P., Santos, F.E., Wu, X., De Souza, I.S., Qualharello, T., Cooke, R.F. & Chen, C.P.J. 2025. Using audio-visual monitoring to evaluate immune and behavioral indicators to lipopolysaccharide challenge in beef cattle. *Journal of Animal Science*, Accepted manuscript. <https://doi.org/10.1093/jas/skaf345>

- Losacco, C., Pugliese, G., Manfrini, M. & Guarino, M. 2025. Farm management: An up-to-date overview on precision livestock farming. *Agriculture* 15: 1383.
- Mainelis, G. 2019. Bioaerosol sampling: Classical approaches and challenges. *Aerosol Science and Technology* 53: 496–519.
- Manni, M., Rämö, S., Franco, M., Rinne, M. & Huuskonen, A. 2022. Occurrence of mycotoxins in grass and whole-crop silages – A farm survey. *Agriculture* 12: 398.
- Markus, S.B., Vandenberg, C. & Nowosan, J. 2025. Remote tracking location and activity of beef cattle on pasture utilizing GPS-enabled technology. *Animal Science Cases* asc20250004.
- McConnachie, E., Smid, A.M.C., Thompson, A.J., Weary, D.M., Gaworski, M.A. & von Keyserlingk, M.A.G. 2018. Cows are highly motivated to access a grooming substrate. *Biology Letters* 14: 20180303.
- McEachran, A.D., Blackwell, B.R., Hanson, J.D., Wooten, K.J., Mayer, G.D., Cox, S.B. & Smith, P.N. 2015. Antibiotics, bacteria and resistance genes in airborne particulate matter from cattle feed yards. *Environmental Science & Technology* 49: 11685–11694.
- McManus, R., Boden, L.A., Weir, W., Viora, L., Barker, R., Kim, Y., McBride, P. & Yang, S. 2022. Thermography for disease detection in livestock: A scoping review. *Frontiers in Veterinary Science* 9: 965622.
- McNicol, L.C., Bowen, J.M., Ferguson, H.J., Bell, J., Dewhurst, R.J. & Duthie, C.-A. 2024. Adoption of precision livestock technologies has the potential to mitigate greenhouse gas emissions from beef production. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 8: 1414858.
- Medhanie, G.A., Pearl, D.L., McEven, S.A., Guerin, M.T., Jardine, C.M., Schrock, J. & LeJeune, J.T. 2014. A longitudinal study of feed contamination by European starling excreta in Ohio dairy farms (2007–2008). *Journal of Dairy Science* 97: 5230–5238.
- Mehmedi, B., Iatrou, A.M., Yildiz, R., Lamont, K., Rodrigues da Costa, M., De Nardi, M., Allepuz, A., Niine, T. Niemi, J.K. & Saegerman, C. 2025. Economic perspectives on farm biosecurity: Stakeholder challenges and livestock species considerations. *Agriculture* 15: 2288.
- Mendes Peter, C., Palm, W.P., Maggioli, M.F., Ebling, R.C., Gilsson, K., Donovan, T. & Bauermann, F.V. 2022. Evaluation of ultraviolet Type C radiation in inactivating relevant veterinary viruses on experimentally contaminated surfaces. *Pathogens* 11: 686.
- Millner, P.D. 2009. Bioaerosols associated with animal production operations. *Bioresource Technology* 100: 5379–5385.
- Monteiro, A., Santos, S. & Goncalves, P. 2021. Precision agriculture for crop and livestock farming – Brief review. *Animals* 11: 2345.
- Moser, J., Kohler, S., Gygax, L. & Hillmann, E. 2024. Assessment of ammonia concentrations and climatic conditions in calf housing using stationary and mobile sensors. *Animals* 14: 2001.

- Moshayedi, A.J., Khan, A.S., Hu, J., Nawaz, A. & Zhu, J. 2023. E-nose-driven advancements in ammonia gas detection: A comprehensive review from traditional to cutting-edge systems in indoor to outdoor agriculture. *Sustainability* 15: 11601.
- Musinska, J., Skalickova, S., Nevrkla, P., Kopec, T. & Harky, P. 2025. Unlocking potential, facing challenges: A review evaluating virtual fencing for sustainable cattle management. *Livestock Science* 295: 105693.
- Nasir, M.F., Fuentes, A., Han, S., Liu, J., Jeong, Y., Yoon, S. & Park, D.S. 2025. Multi-camera fusion and bird-eye view location mapping for deep learning-based cattle behavior monitoring. *Artificial Intelligence in Agriculture* 15: 724–743.
- Neethirajan, S. & Kemp, B. 2021. Digital twins in livestock farming. *Animals* 11: 1008.
- Ninomiya, S. 2019. Grooming device effects on behaviour and welfare of Japanese Black fattening cattle. *Animals* 9: 186.
- Niwenshuti, J. 2023. Characterizing feedlot feed using in depth cameras and imaging technology. University of Nebraska. Thesis. 103 s.
- Obermeyer, K., Kayser, M. & Isselstein, J. 2025. Observing grazing patterns with collar-mounted accelerometers in cattle. *Frontiers in Animal Science* 6: 1517570.
- Ogunade, L.M., Martinez-Tupia, C., Queiraz, O.C.M., Jiang, Y., Drouin, P., Wu, F., Vyas, D., & Adesogan, A.T. 2018. Silage review: Mycotoxins in silage: Occurrence, effects, prevention, and mitigation. *Journal of Dairy Science* 101: 4034–4059.
- Ozger, Z.B. & Cihan, P. 2024. A systematic review of IoT technology and applications in livestock sector. *Kafkas Universitesi Veteriner Fakultesi Dergisi* 30: 123–138.
- Osborne, B.G., Fearn, T. & Hindle, P.H. 1993. *Practical Near Infrared Spectroscopy in Food Analysis*. Longman, Harlow. ss. 49–78.
- Pan, M., Lednicky, J.A. & Wu, C.Y. 2019. Evaluation of bioaerosol samplers. *Aerosol and Air Quality Research* 19: 226–241.
- Park, R.M., Schubach, K.M., Cooke, R.F., Herring, A.D., Jennings, J.S. & Daigle, C.L. 2020. Impact of a cattle brush on feedlot steer behavior, productivity and stress physiology. *Applied Animal Behaviour Science* 228: 104995.
- Pavlovic, D., Davison, C., Hamilton, A., Marko, O., Atkinson, R., Michie, G., Crnojevic, V., Andonovic, I., Bellekens, X. & Tachtatzis, C. 2021. Classification of cattle behaviours using neck-mounted accelerometer-equipped collars and convolutional neural networks. *Sensors* 21: 4050.
- Pena, F., Santos, R., Juarez, Aviles, C., Domenech, V., Gonzales, A., Martinez, A. & Molina, A. 2014. The use of ultrasound scanning at different times of the finishing period in lean cattle. *Livestock Science* 167: 381–391.
- Perkins, T.L., Green, R.D. & Hamlin, K.E. 1992. Evaluation of ultrasonic measurements of fat thickness and longissimus muscle area in cattle. *Journal of Animal Science* 70: 1002–1010.

- Pfrombeck, J., Gandorfer, M., Zeiler, E. & Ettema, J. 2025. An economic evaluation of sensor-assisted health monitoring in dairy farming using example of rumen bolus. *Journal of Dairy Science* 108: 2573–2594.
- Pires, R.A'D., Silva, T.A., Borowsky, A.M., Cortinhas, C.S., Carvalho, V.V. & Corassin, C.H. 2025. Evaluation of the occurrence of multi-mycotoxins in the diet of beef cattle feedlots in Brazil. 5: 12.
- Prosser, H.M, Bortoluzzi, E.M., Valeris-Chacin, R.J., Baker, E.C. & Scott, M.A. 2025. Application of artificial intelligence and machine learning in bovine respiratory disease prevention, diagnosis, and classification. *American Journal of Veterinary Research* 86: 51.
- Provolo, G., Brandolese, C., Fossati, N., Lovarelli, D., Riva, E. & Bordignon, F. 2025. An Internet of Things framework for monitoring environmental conditions in livestock housing to improve animal welfare and assess environmental impact. *Animals* 15: 644.
- Qiao, Y., Kong, H., Clark, C., Lomax, S., Su, D., Eiffert, S. & Sukkarieh, S. 2021. Intelligent perception-based cattle lameness detection and behaviour recognition: A review. *Animals* 11: 3033.
- Reyes, F.S., Gimenez, A.R., Anderson, K.M., Niller-Cushon, E.K., Dorea, J.R. & Van Os, J.M.C. 2022. Impact of stationary brush quantity on brush use in group-housed dairy heifers. *Animals* 12: 972.
- Richeson, J.T., Lawrence, T.E. & White, B.J. 2018. Using advanced technologies to quantify beef cattle behavior. *Translational Animal Science* 2: 223–229.
- Robert, B.D., White, B.J., Renter, D.G. & Larson, R.L. 2011. Determination of lying behavior patterns in healthy beef cattle by use of wireless accelerometers. *American Journal of Veterinary Research* 72: 467–473.
- Robinson, D.L., McDonald, C.A., Hammond, K. & Turner, J.W. 1992. Live animal measurements of carcass fat and muscle depth using ultrasound. *Journal of Animal Science* 70: 1661–1672.
- Rushen, J., Chapinal, N. & de Passille, A.M. 2012. Automated monitoring of behavioural-based animal welfare indicators. *Animal Welfare* 21: 339–350.
- Ruston, C., Zhang, J., Scott, J., Zhang, M., Graham, K., Linhares, D., Breuer, M., Karriker, L. & Holtkamp, D. 2021. Efficacy of ultraviolet C exposure for inactivating Senecavirus A on experimentally contaminated surfaces commonly found in swine farms. *Veterinary Microbiology* 256: 109040.
- Schaefer, A.L., Cook, N.J., Bench, C., Chabot, J.B., Colyn, J., Liu, T., Okine, E.K., Steward, M. & Webster, J.R. 2012. The non-invasive and automated detection of bovine respiratory disease onset in receiver calves using infrared thermography. *Research in Veterinary Science* 93: 928–935.
- Seger, H.L., Sanderson, M.W., White, B.J. & Lanzas, C. 2024. Analysis of within-pen and between-pen fence-line temporary contact networks in confined feedlot cattle. *Preventive Veterinary Medicine* 227: 106210.

- Seger, H.L., Sanderson, M.W., White, B.J. & Lanzas, C. 2025. The effect of temporal resolution and contact duration on Real-Time Location System-based contact networks for confined feedlot cattle. *Preventive Veterinary Medicine* 235: 106409.
- Shi, Z., Parker, D.B., Cole, N.A., Auvermann, B.W. & Mehlhorn, J.E. 2023. Measurement of ammonia and hydrogen sulfide emissions from winter dairy barns. *Animals* 13: 2301.
- Shwiff, S.A., Carlson, J.C., Glass, J.H., Suckow, J., Lowney, M.S., Moxcey, K.M., Larson, B. & Linz, G.M. 2012. Producer survey of bird-livestock interactions in commercial dairies. *Journal of Dairy Science* 95: 6820–6829.
- Siegford, J.M., Steibel, J.P., Han, J., Benjamin, M., Brown-Brandl, T., Dorea, J.R., Morris, D., Norton, T., Psata, E. & Rosa, G.J.M. 2023. The quest to develop automated system for monitoring animal behavior. *Applied Animal Behaviour Science* 265: 106000.
- Simpson, K. 2023. Cameras give 'bird's eye view' of bovine respiratory disease. <https://wcvmtoday.usask.ca/articles/2023/10/cameras-give-birds-eye-view-of-bovine-respiratory-disease.php>
- Singh, J. & Mehta, A. 2020. Rapid and sensitive detection of mycotoxins by advanced and emerging analytical methods: A review. *Food Science & Nutrition* 8: 2183–2204.
- Sohan, M.F., Albuzy, R., Alzoubi, H., Albalawi, E. & Hafez, A.H.A. 2026. Direct video-based spatiotemporal deep learning for cattle lameness detection, *Scientific Reports* 16: 142.
- Spiehs, M.J., Woodbury, B.L., Doran, B.E., Eigenberg, R.A., Kohl, Varel, V.H., Berry, E.D. & Wells, J.E. 2011. Environmental conditions in beef deep-bedded mono-slope facilities: A descriptive study. *American Society of Agricultural and Biological Engineers. Transactions of the ASABE* 54: 663–673.
- Spiehs, M.J., Woodbury, B.L. & Parker, D.B. 2019. Ammonia, Hydrogen Sulfide, and greenhouse gas emissions from lab-scaled manure bedpacks with and without aluminium sulfate additions. *Environments* 6: 108.
- Strappini, A.C., Monti, G., Sepulveda-Varas, P., de Freslon, I. & Peralta, J.M. 2021. Measuring Calves' Usage of multiple environmental enrichment objects provided simultaneously. *Frontiers in Veterinary Science* 8: 698681.
- Steenefeld, W., Hogeveen, H. & Oude Lansink, A.G.J.M. 2015. Economic consequences in investing in sensor systems in dairy farms. *Computers and Electronics in Agriculture* 119: 33–39.
- Stygar, A.H., Gomez, Y., Berteselli, G.V., Dalla Costa, E., Canali, E., Niemi, J.K., Llonch, P. & Pastell, M. 2021. A systematic review on commercially available and validated sensor technologies for welfare assessment of dairy cattle. *Frontiers in Veterinary Science* 8: 634338.
- Suave, J., Martel, B., Duchaine, C. & Cormier, Y. 2020. Organic dust exposure in animal agriculture and respiratory risk. *Occupational and Environmental Medicine* 77: 489–497.
- Turner, L.W., Udal, M.C., Larson, B.T. & Shearer, S.A. 2000. Monitoring cattle behavior and pasture use with GPS and GIS. *Canadian Journal of Animal Science* 80: 405–413.

- Tzanidakis, C., Tzamaloukas, O., Simitzis, P. & Panagakis, P. 2022. Precision livestock farming applications (PLF) for grazing animals. *Agriculture* 13: 288.
- Unruh, E.M., Theurer, M.E., White, B.J., Larson, R.L., Drouillard, J.S. & Schrag, N. 2017. Evaluation of infrared thermography as a diagnostic tool predict heat stress events in feedlot cattle. *American Journal of Veterinary Research* 78: 771–777.
- Unsal, G., Johnson, K.F., Stergiadis, S., Bennett, R., & Barker, Z.E. 2025. A systematic review and meta-analysis of physical environmental enrichment to improve animal welfare-related outcomes in indoor cattle. *Animal Welfare* 34: 1–15.
- USDA 2006. Environmental assessment bird damage management in the state of Minnesota. United States Department of Agriculture. Animal and Plant Health Inspection Service Wildlife Service. 87 s.
- Vandermark, L.R., Brennan, J.R., Ehlert, K.A. & Menendez 3rd, H.M. 2025. Estimating net energy for activity for grazing beef cattle by integrating GPS tracing data, in-pasture weighing technology, and animal nutrition models. *Frontiers in Veterinary Science* 12: 1620584.
- Versluijs, E., Niccolai, L.J., Spedener, M. & Zimmermann, B. 2023. Classification of behaviors of free-ranging cattle using accelerometry signatures collected by virtual fence collars. *Frontiers in Animal Science* 4: 1083272.
- Versluijs, E., Tofastrud, M., Hessle, A., Serrouya, R., Scasta, D., Wabakken, P. & Zimmermann, B. 2024. Virtual fencing in remote boreal forests: performance of commercially available GPS collars for free ranging cattle. *Animal Biotelemetry* 12: 33.
- Waldrip, H.M., Todd, R.W., Li, C., Cole, N.A. & Salas, W.H. 2013. Estimation of ammonia emissions from beef cattle feedyards using the process-based model Manure-DNDC. *Transactions of the ASABE* 56: 1103–1114.
- Wang, Y., Li, Q., Chu, M., Kang, X. & Liu, G. 2023. Application of Infrared Thermography and machine learning techniques in cattle health assessments: A Review. *Biosystems Engineering* 230: 361–387.
- Wang, Y., Wang, X., Wang, S., Fotina, H. & Wang, Z. 2022. A novel flow immunochromatographic assay for rapid and simultaneous detection of Alfatoxin B1 and Zearalenone in food and feed samples based on highly sensitive and specific monoclonal antibodies. *Toxins* 14: 615.
- Watanabe, R.N., Romanzini, E.P., Bernardes, P.A., Rodrigues, J.L., Alves do Vol, G., Mello Silva, M., Machado da Rocha Fernandes, M.H., Caetano, S.L., Ramos, S.B., Reis, R.A. & Munari, D.P. 2024. Accelerometers-based position and time interval comparisons for predicting the behaviors of young bulls housed in a feedlot system. *Smart Agricultural Technology* 9: 100542.
- Wei, K., Yan, Z., Shao, M., Wang, X. & Zhao, M. 2023. Occurrence of airborne *Escherichia coli* around cattle feedlots. *Environmental Science and Pollution Research* 30: 14532–14541.

- Wilson, S.C., Morrow-Tesch, J., Straus, D.C. & Cooley, J.D. 2002. Airborne microbial contaminants in a cattle feedlot. *Journal of Animal Science* 80: 3203–3209.
- Wolfger, B., Mang, A.-V., Cook, N., Orsel, K. & Timsit, E. 2015. Technical note: Evaluation of a system monitoring individual feeding behavior and activity in beef cattle. *Journal of Animal Science* 93: 4110–4114.
- Wottlin, L.R., Carstens, G.E., Kayser, W.C., Pinchak, W.E., Pinedo, P.J. & Richeson, J.T. 2021. Efficacy of statistical process control procedures to monitor deviations in physical behavior for preclinical detection of bovine respiratory disease in feedlot cattle. *Livestock Science* 248: 104488.
- Wu, C., Zhang, G., Wang, K., Chen, S., Sun, H. & Ni, J.-Q. 2020. Determination of ammonia and hydrogen sulfide emissions from a commercial dairy farm. *Atmosphere* 11: 951.
- Wurtz, K., Camerlink, I., D'Earth, R.B., Fernandez, A.P., Norton, T., Steibel, J. & Siegford, J. 2019. Recording behaviour of indoor-housed farm animals automatically using machine vision technology: A systematic review. *PLOS One* 14: e0226669.
- Xu, R., Kiarie, E.G., Yiannikouris, A., Sun, L. & Karrow, N.A. 2022. Nutritional impact of mycotoxins in food animal production and strategies for mitigation. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 13: 69.
- Yamada, W., Cherney, J., Cherney, D., Runge, T. & Digman, M. 2024. Handheld Near-Infrared Spectroscopy for undried forage quality estimation. *Sensors* 24: 5136.
- Yu, X., Sun, H., Zhang, W., Chen, Y. & Ren, G. 2023. Size distribution and microbial composition of airborne particles in cattle operations. *Environmental Research* 216: 114671.
- Zhang, Y., Li, P., Wang, K., Li, H. & Ji, Y. 2016. Environment parameters control based on wireless sensors network in livestock buildings. *International Journal of Distributed Sensor Networks* 2016: 9079748.
- Zheng, M.Z., Richard, J.L. & Binder, J. 2006. A review of rapid methods for analysis of mycotoxins. *Mycopathologia* 161: 261–273.
- Zhu, F., Zhang, B. & Zhu, L. 2021. An up-converting phosphor technology-based lateral flow assay for rapid detection of major mycotoxins in feed: Comparison with enzyme-linked immunosorbent assay and high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry. *PLoS ONE* 16: e0250250.
- Zurnawita, Z., Elfitri, I., Kurnia, R. & Prabowo, C. 2025. Monitoring beef cattle welfare through behavioral analysis and environmental conditions using IoT technology. *TEM Journal* 14: 1958–1971.



Löydät meidät verkosta

luke.fi



Luonnonvarakeskus (Luke) Latokartanonkaari 9, 00790 Helsinki