

Luonnonvara- ja
biotalouden
tutkimus 23/2019

Lämpökuvantaminen nautojen terveyden ja hyvinvoinnin seurannan apuvälineenä

Lilli Frondelius, Inka Nykänen, Jaakko Mononen, Salla Ruuska,
Sami Pekkarinen ja Heli Lindeberg

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 23/2019

Lämpökuvantaminen nautojen terveyden ja hyvinvoinnin seurannan apuvälineenä

Lilli Frondelius, Inka Nykänen, Jaakko Mononen, Salla Ruuska,
Sami Pekkarinen, Heli Lindeberg

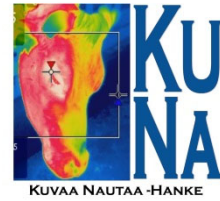
Luonnonvarakeskus, Helsinki 2019



Euroopan maaseudun
kehittämisen maatalousrahasto:
Eurooppa investoi maaseutualueisiin



SAVONIA



Viittausohje:

Frondelius, L., Nykänen, I., Mononen, J., Ruuska, S., Pekkarinen, S. & Lindeberg, H. 2019. Lämpökuvantaminen nautojen terveyden ja hyvinvoinnin seurannan apuvälineenä. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 23/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 71 s.



ISBN 978-952-326-740-4 (Painettu)

ISBN 978-952-326-741-1 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-741-1>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Lilli Frondelius, Inka Nykänen, Jaakko Mononen, Salla Ruuska, Sami Pekkarinen, Heli Lindeberg

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2019

Julkaisuvuosi: 2019

Kannen kuva: Lilli Frondelius/Luke

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.juvenesprint.fi>

Tiivistelmä

Lilli Frondelius¹, Inka Nykänen², Jaakko Mononen¹, Salla Ruuska², Sami Pekkarinen³, Heli Lindeberg¹

¹Luonnonvarakeskus, Tuotantojärjestelmät, Halolantie 31 A, 71750 Maaninka

²Savonia-ammattikorkeakoulu, Luonnonvara-ala, Haukisaarentie 2, 74130 Iisalmi

³Savonia-ammattikorkeakoulu, Rakennuslaboratorio, Opistotie 2, 70200 Kuopio

Nautojen terveysongelmien varhainen toteaminen on ensiarvoisen tärkeää tuotantoeläinten hyvinvoinnin ja tilan kannattavuuden kannalta. Kuvaa Nautaa -hankkeessa (2018 – 2020) selvitetään lämpökamerakuvantamisen tarjoamia mahdollisuuksia nautojen terveyden ja hyvinvoinnin seurannassa tuotantotiloilla. Tässä katsauksessa esitämme tieteelliseen kirjallisuuteen perustuen eläinten lämpökuvantamisen teoreettista taustaa ja miten kansainvälisissä tutkimuksissa ja käytännön tiloilla on pyritty soveltamaan lämpökuvantamista nautojen terveyden seurannassa.

Lämpökuvantaminen on eläimelle riskitön ja nopea tutkimusmenetelmä, jonka avulla on mahdollista havaita jo varhaisessa vaiheessa vammoja ja tulehduksia. Kehon alueet, joilla on aktiivinen pintaverenkierto ja kudosten aineenvaihdunta, ovat yleensä lämpimämpiä, ja nämä erot eläimen pintalämpötiloissa voidaan havaita lämpökameralla. Lämpökuvantamista on tutkittu muun muassa utareterveyden, sorkkasairauksien ja ontumisen, sekä erilaisten tulehdustautien seurannassa nautoilla.

Lämpökuvantamisen on useissa tutkimuksissa todettu soveltuvan eläinten terveydentilan arviointiin, mutta lämpökuvaukseen perustuvia käytännön sovelluksia on vielä hyvin vähän tarjolla. Kiinnostusta lämpökuvauksen käyttöön löytyy niin nautatilallisten kuin muiden asiantuntijoiden osalta, mutta käyttöä rajoittaa kuvien tulkinnan haasteellisuus ilman selkeitä ohjeita. Vaihtelevat kuvausolosuhteet eläinsuojissa lisäävät haasteita lämpökameroiden käyttöön tuotantotiloilla. Katsaus tukee kuvausmenetelmien ja -käytäntöjen kehittämistä, ja edistää siten tämän uuden menetelmän hyödyntämistä nautatiloilla.

Asiasanat: lämpökuvaukset, nauta, eläinten hyvinvointi, karjanhoito, kotieläintuotanto, navetat

Abstract

Lilli Frondelius¹, Inka Nykänen², Jaakko Mononen¹, Salla Ruuska², Sami Pekkarinen³, Heli Lindeberg¹

¹Natural Resources Institute Finland, Production systems, Halolantie 31 A, 71750 Maaninka

²Savonia University of Applied Sciences, Rural Industries, Haukisaarentie 2, 74130 Iisalmi

³Savonia University of Applied Sciences, Construction Technology Laboratory, Opistotie 2, 70200 Kuopio

Early detection of animal health issues on cattle farms is vital for animal welfare and farm productivity. Kuvaa Nautaa -project (2018 – 2020) studies the potential of infrared thermography (IRT) in on-farm cattle health and welfare monitoring. In this review, we present theoretical background of IRT and how research and commercial farms have applied IRT in animal health monitoring.

IRT is a non-invasive and quick method for examination. It can detect injuries and inflammation already in their early stages. Superficial blood flow and subcutaneous tissue metabolism affect skin temperature and these differences in surface temperature can be detected with thermal camera. Research has used IRT for example in monitoring of udder health, hoof health and lameness, and various infections in cattle.

Many studies have shown that IRT can be used to assess cattle health, but practical solutions based on thermography are still scarce. Cattle farmers and other experts show interest on IRT, but lack of practice-oriented information on interpretation of thermal images restricts the implementation of the technology. Additionally, varying environmental conditions in barn raise challenges on on-farm use of IRT. This review supports development of thermal imaging methods and practices, and thus promotes utilization of this new technology on cattle farms.

Keywords: thermography, cattle, animal welfare, cattle husbandry, animal production, cattle sheds

Sisällys

1. Johdanto	7
2. Fysiologiaa, fysiikkaa ja tekniikkaa lyhyesti	8
2.1. Lämpöfysiologia	8
2.2. Lämpösäteilyn fysiikkaa ja lämpökameroiden toimintaperiaatteet	9
2.2.1. Lämpösäteilyn luonne ja ominaisuudet	9
2.2.2. Lämpötilan ja lämpösäteilyn välinen yhteys	11
2.2.3. Reaalimaailman kappaleiden lähettämä lämpösäteily	12
2.2.4. Lämpösäteilyn mittaaminen lämpökameralla.....	13
2.2.5. Lämpökameran erotteluherkkyys, tarkkuus ja resoluutio	16
2.3. Naudan pintalämpötilan normaali jakautuminen.....	17
2.4. Apua, liian monimutkaista!.....	19
2.5. Yhteenveto: Yleiset kuvausohjeet.....	20
3. Tutkittua tietoa lämpökuvantamisesta nautojen terveyden ja hyvinvoinnin arvioinnissa	22
3.1. Naudan pintalämpötilan ja ruumiinlämpötilan yhteys	22
3.2. Utareen lämpökuvantaminen	23
3.2.1. Paras utareen pintalämpötilan mittauskohta	24
3.2.2. Vedinten ja lypsytapahtuman tutkiminen lämpökuvantamisella	24
3.2.3. Kokeellinen utaretulehdus	25
3.2.4. Piilevä utaretulehdus	26
3.2.5. Ensimmäiset tilaoloissa tehdyt utareen lämpökuvantamiseurannat.....	28
3.2.6. Yhteenveto: Lämpökuvantaminen ei ole vielä riittävän tehokas menetelmä utareterveyden seurantaan	29
3.3. Sorkkien lämpökuvantaminen	29
3.3.1. Perustutkimuksia sorkkien lämpökuvantamisesta.....	30
3.3.2. Ontumisen ja erilaisten sorkkasairauksien tunnistaminen lämpökuvantamisella	31
3.3.3. Yhteenveto: Sorkkien lämpökuvantamisessa on potentiaalia	35
3.4. Muu terveys	35
3.4.1. Tartuntataudit	35
3.4.2. Pinnalliset tulehdukset.....	37
3.4.3. Ulkoloiset	38
3.5. Silmän pintalämpötila terveyden ja hyvinvoinnin mittarina.....	38
3.5.1. Silmän pintalämpötila ja stressi	39
3.5.2. Silmän pintalämpötila sairauksien havaitsemisessa	41
3.6. Hedelmällisyys ja lisääntyminen	41
3.6.1. Lehmien ja hiehojen kiiman seuranta	41
3.6.2. Tiineyden tunnistaminen	43

3.6.3. Sonnien hedelmällisyys	43
4. Muita nautoista lämpökameralla mitattavia asioita	48
5. Tieteestä käytäntöön	50
5.1. Lämpökuvantamisen käyttö nautojen hoidon tukena Suomessa.....	50
5.2. Lämpökuvantamisen käyttö nautojen hoidon tukena ulkomailla	50
5.3. Lämpökuvantamiselle asetettuja odotuksia	52
5.4. Nautojen lämpökuvantamisen yleistymistä rajoittavat tekijät.....	53
6. Lopuksi.....	55
7. Käsitteitä.....	56

1. Johdanto

Tämä katsausartikkeli kirjoitettiin osana ”Kuvaa Nautaa – Lämpökuvaus nautojen hoidon tukena” (KuNa) -hanketta. KuNa rahoitettiin Manner-Suomen maaseudun kehittämisohjelman 2014 – 2020 Maaseudun innovaatioryhmät (EIP) toimenpideohjelmasta. Hankkeen tavoitteena oli tuoda uusi työkalu, lämpökuvantaminen eli eläinten pintalämpötilan mittaaminen lämpökameran avulla, nautakarjatiloilta eläinten hoidon tueksi.

Pintalämpötilan käytöstä eläinten tuotannon, terveyden ja hyvinvoinnin arvioinnissa on jo melko runsaasti tutkimustietoa (ks. esim. katsaukset: Stewart ym. 2005, McCafferty 2007, Church ym. 2009, Vainionpää 2014, McManus ym. 2016). Lisäksi lämpökamerateknologia kehittyy ja lämpökameroiden hinnat laskevat nopeasti. Etenkin matkapuhelimiin liitettävät tai integroidut lämpökamerat laajentavat käyttömahdollisuuksia (Sellier ym. 2014). Hevostaloudessa lämpökuvantamista on käytetty pitkään, ja aiheesta on jo myös oppikirja (Soroko & Davies Morel 2014). Nyt on siis sopiva – ellei jopa korkea – aika pohtia, voisiko lämpökuvauksesta olla hyötyä myös nautatiloilla.

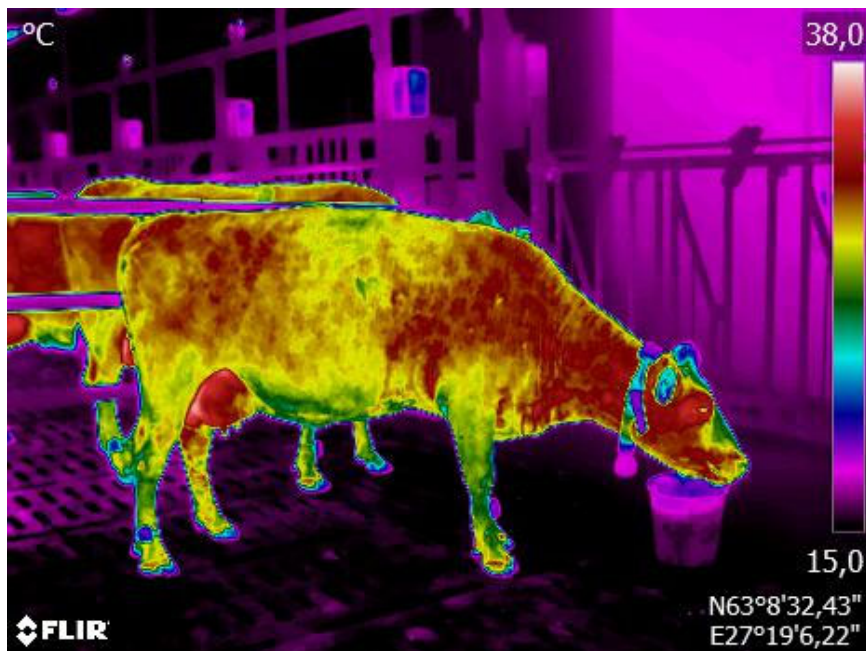
Esitämme katsauksessamme tieteelliseen kirjallisuuteen pohjautuen ensin lyhyesti eläinten lämpökuvantamisen teoreettisen taustan ja syvennymme sen jälkeen lämpökuvantamisen soveltamismahdollisuuksiin nautojen hoidossa. Katsaus luo pohjan lämpökuvantamisen soveltamiselle käytännössä tilatasolla. Kappale 2 käsittelee eläinten fysiologian ja ympäristöolosuhteiden vaikutuksia niiden pintalämpötilaan sekä lämpökuvantamisessa käytettävien laitteiden yleistä toimintaperiaatetta ja sen taustalla olevia fysiikan ilmiöitä. Seuraavassa kappaleessa käsitellään lämpökuvantamisen tuomia mahdollisuuksia nautojen utareterveyden, sorkkaterveyden ja muun terveyden seurannassa sekä hedelmällisyyden arvioinnissa. Kappaleessa 3 käsitellään lisäksi eläinten kokeman kivun ja stressin sekä tunnetilojen arvioimista lämpökuvista ja kappaleessa 4 muita eläimistä mitattavia asioita. Lopuksi kappaleessa 5 tutustutaan, miten lämpökuvantamista on jo hyödynnetty käytännössä Suomessa ja ulkomailla sekä pohditaan käytännöllisiä ja taloudellisia näkökulmia. Kappaleessa 6 tehdään yhteenveto, millä osa-alueilla lämpökuvantaminen vaikuttaa tämän katsauksen perusteella potentiaalisimmalta ja kappaleessa 7 on listattu katsauksen kannalta olennaisia termejä.

2. Fysiologiaa, fysiikkaa ja tekniikkaa lyhyesti

Lämpökuvantaminen on varsin helppo ja nopea tapa mitata eläimen pintalämpötilaa. Mittaustulokseen vaikuttavat kuitenkin monet olosuhteisiin ja eläimen toimintaan liittyvät tekijät. Nämä fysikaaliset ilmiöt on syytä tuntea edes yleisellä tasolla. Tässä kappaleessa tutustumme lämpökuvantamisen taustalla olevaan fysiikkaan sekä, miten naudän rakenne ja toiminta vaikuttaa eläimen pintalämpötilaan.

2.1. Lämpöfysiologia

Kuvassa 1 on esitetty lämpökuva seisovasta lehmästä. Eri värit kertovat eri pintalämpötiloista, jotka kuvan eläimellä vaihtelevat noin 17 °C:sta (sorkassa) noin 37 °C:seen (utareessa) (vrt. Poikalainen ym. 2012: 11 – 31 °C; Salles ym. 2016: 25 – 38 °C). Naudalla normaalina ruumiinlämpönä pidetään 36,7 – 39,3 °C ja lypsylehmillä ruumiinlämpö on yleensä korkeampi kuin lihanaudoilla (Robinson 2002). Ruumiinlämmöllä tarkoitetaan eläimen ydinlämpötilaa, joka mitataan tavallisimmin peräsuolesta. Lehmän pintalämpötila on siis yleensä alhaisempi ja vaihtelevampi kuin ydinlämpötila.

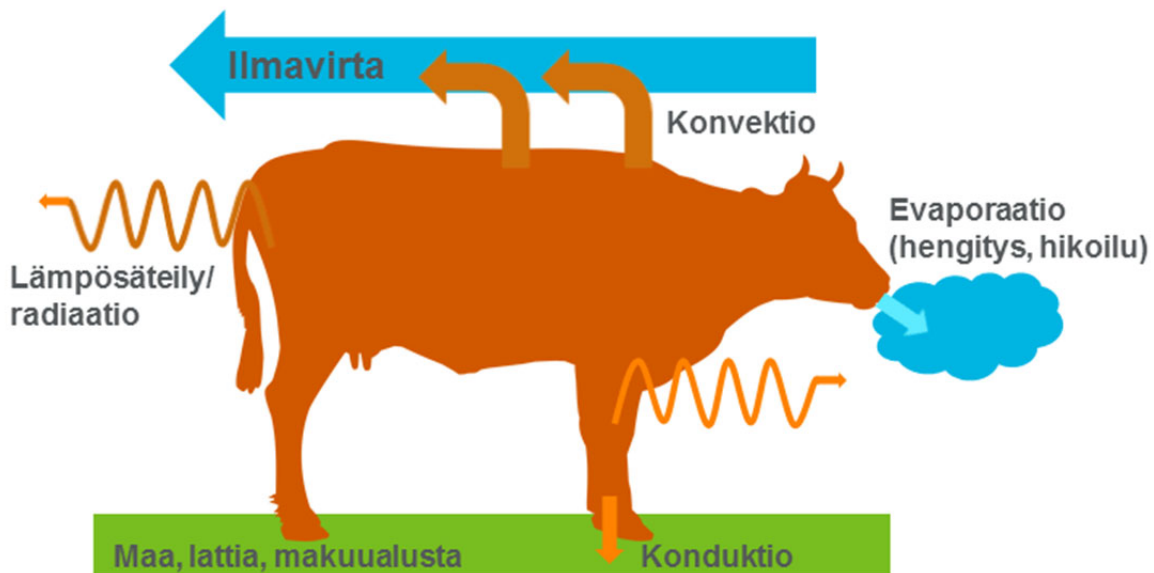


Kuva 1. Noin kolmen metrin etäisyydeltä otettu lämpökuva naudasta, joka on hoitokarsinassa. Ilman lämpötila (15 °C), -kosteus (95 %) ja heijastuva lämpö (20 °C) on otettu huomioon kameran asetuksissa. Kuvan lämpöskala on valittu niin, että kuvattava kohde erottuu taustasta selkeästi (tässä alaraja 15 °C) ja koko kohteen lämpötilavaihtelu voidaan nähdä eri väreinä (ylärajana limakalvojen lämpötila 38 °C). (Kuva: Lilli Frondelius/Luke)

Naudat kuten myös kaikki muut nisäkkäät sekä linnut ovat endotermisiä eläimiä. Endotermiällä tarkoitetaan sitä, että eläin tuottaa itse riittävästi lämpöä, jotta se pystyy pitämään ruumiinlämpötilansa ympäristön lämpötilaa korkeammalla (Sjaastad ym. 2003). Vaikka tasalämpöisyys (homeotermia) lienee monelle lukijalle tutumpi käsite puhuttaessa nisäkkäistä ja linnuista, on endotermia tieteellisesti pätevämpi termi ja käytämme sitä tässä katsauksessa. Itse asiassa monet nisäkkäät ja linnut eivät ole tasalämpöisiä, vaan niiden ruumiinlämpötila vaihtelee paljon vuorokauden- tai vuodenaikojen mukaan.

Suurimman osan levossa olevan endotermisen eläimen lämmöstä tuottavat syvällä ruumiin sisällä olevat elimet (Sjaastad 2003). Eläimen liikuessa myös luurankolihakset tuottavat runsaasti lämpöä.

Koska eläin on ympäristöään lämpimämpi, siitä siirtyy väijäämättä lämpöä ympäristöön. Jos lämpökuorma ympäristöstä eläimeen on suuri, voi lämpöä siirtyä myös ympäristöstä eläimeen päin ja tällöin eläimellä on haaste estää ruumiinlämpötilaa nousemasta. Lopullinen siirtyminen (lämmönhukka) tapahtuu eläimen pinnan kautta joko johtamalla kiinteään väliaineeseen (konduktio), liikkuvan väliaineen välityksellä (konvektio), säteilemällä (lämpösäteily eli radiaatio) tai vettä haihduttamalla (evaporaatio) (Kuva 2). Konduktio eläimen ytimestä sen pinnalle ja verenkierron avulla tapahtuva konvektio vaikuttavat lämmön siirtymiseen ja sitä kautta jakautumiseen eläimessä itsessään. Konvektio on ratkaisevassa asemassa siinä, kuinka paljon lämpöä siirtyy eläimen pintaan ja kuinka lämmin eläimen pinta on. Mitä suurempi eläimen pinnan ja ympäristön välinen lämpötilaero on, sitä enemmän lämpöä siirtyy ympäristöön. Endotermiset eläimet säätelevät tätä lämmönhukkaa verenkierron ja lämmönsäätelykäyttäytymisen muutoksilla. Verenkierron muutokset tarkoittavat pintaverenkierron vähentämistä pintaverisuonia supistamalla kylmässä ja pintaverenkierron tehostamista pintaverisuonia laajentamalla lämpimässä. Käyttäytymislämmönsäätelyn keinoja ovat esimerkiksi asennot, hakeutuminen suojaan (esim. tuulelta tai auringonpaisteelta) tai pois suojusta, hakeutuminen kiinni toisiin eläimiin tai kauemmas toisista eläimistä sekä rypeminen.



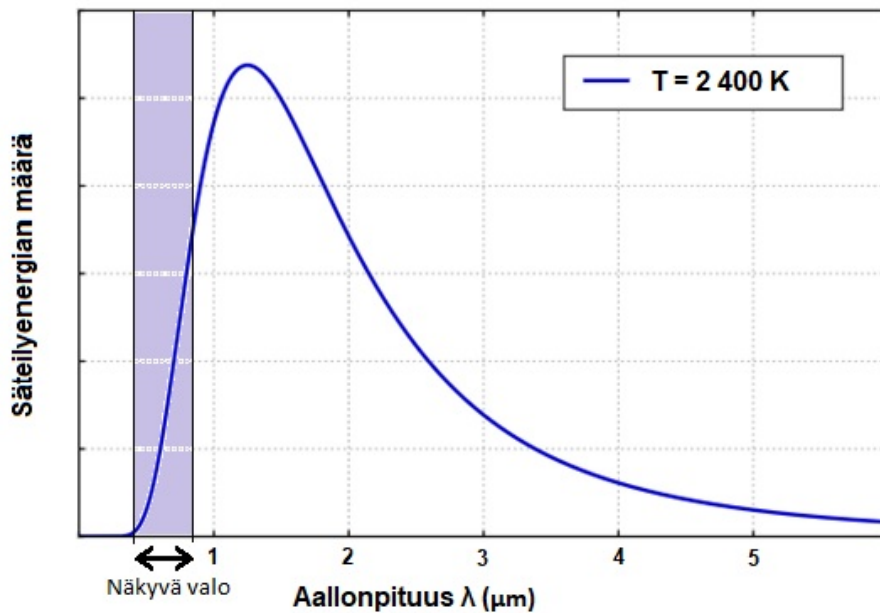
Kuva 2. Lämpösäteilyn lisäksi eläimestä siirtyy lämpöä ympäristöön konduktion, konvektion ja evaporaation välityksellä.

2.2. Lämpösäteilyn fysiikkaa ja lämpökameroiden toimintaperiaatteet

2.2.1. Lämpösäteilyn luonne ja ominaisuudet

Kaikki aine, jonka lämpötila on yli absoluuttisen nollapisteen, lähettää sähkömagneettista säteilyä ympäristöönsä (Modest 2003). Sähkömagneettisessa säteilyssä sähkö- ja magneettikentän vuorottelu saa aikaan itsestään etenevän aallon, jolla on tietty suunta, aallonpituus ja taajuus (Smith 2001). Lämpösäteilyksi luetaan sähkömagneettisen spektrin aallonpituudet $0,1 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$ (Modest 2003). Kyseiseen aallonpituusväliin $0,1 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$ sisältyy osa ultraviolettisäteilystä, näkyvän valon aallonpituudet ja suurin osa infrapunasäteilystä.

On tärkeää huomata, että lämpösäteily sisältää monia eri aallonpituuksia (Modest 2003). Tämä tarkoittaa sitä, että tietyssä lämpötilassa oleva kappaleen lähettämä lämpösäteily koostuu tietyn aallonpituusvälin useista eri aallonpituuksista. Kuvassa 3 on esitetty esimerkkinä lämpösäteilyn voimakkuus kullakin aallonpituudella kappaleelle, jonka lämpötila on 2127 °C. Kuvaajasta näkyy, että lämpösäteily ei koostu pelkästään yhden aallonpituuden säteilystä, vaan se sisältää aallonpituuksia pitkältä aallonpituusväliltä. Kuvasta poiketen alle 500 °C lämpötilassa olevien kappaleiden lämpösäteily on kokonaisuudessaan infrapuna-alueella (yli 0,7 μm). Lämpökamerat vastaanottavat tämän vuoksi nimenomaan infrapunasäteilyä.



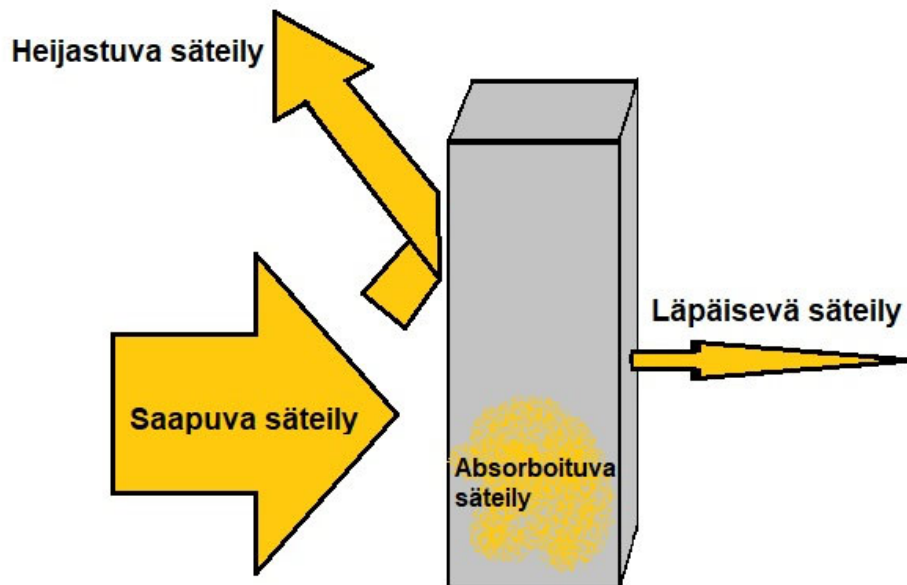
Kuva 3. 2400 K (=2126,85 °C) lämpötilassa olevan mustan kappaleen lähettämän lämpösäteilyn määrä kullakin aallonpituudella. Y-akselilla lämpösäteilyn määrä ja x-akselilla säteilyn aallonpituus, λ . Kuvaajasta näkyy, että lämpösäteily ei koostu pelkästään yhden aallonpituuden säteilystä, vaan se sisältää aallonpituuksia pitkältä aallonpituusväliltä. Piirretty Smithiä (2001) mukaillen.

Kuten kaikki sähkömagneettinen säteily, myös lämpösäteily etenee valon nopeudella ja myös tyhjiössä, sillä se ei tarvitse väliainetta edetäkseen (Modest 2003). Tämän vuoksi auringon lämpösäteily kykenee saavuttamaan Maan. Teoriassa lämpösäteily kykenee etenemään äärettömän matkan päähän, jos se ei matkallaan osu mihinkään. Käytännössä lämpösäteilyn tielle osuu kuitenkin aina esteitä. Kun lämpösäteily kohtaa aineen rajapinnan, se voi heijastua pois kokonaan tai osittain, tai se voi jatkaa matkaansa aineen sisään. Aineeseen jouduttuaan säteily tai sen osa jatkaa aineen läpi vaimentumatta (läpinäkyvä aine) tai se voi vaimentua osittain (puolihimmeä aine) tai kokonaan (läpikuultamaton aine). Sen osan lämpösäteilyä, joka imeytyy aineeseen ja siten lämmittää sitä, sanotaan imeytyvän tai absorboituvan aineeseen (Smith 2001). Kuva 4 havainnollistaa kappaleeseen osuvan lämpösäteilyn heijastumista, imeytymistä ja läpäisyä. Kappaleeseen osuvalle säteilylle pätee siis (Modest 2003):

$$\text{Kappaleeseen osuva säteily} = \text{Absorboituva säteily} (a) + \text{Heijastuva säteily} (r) + \text{Läpäisevä säteily} (t) = 1$$

Teoreettisesti voisi olla olemassa täydellisen läpinäkyviä kappaleita ($a=0$, $r=0$ ja $t=1$), jotka päästävät kaiken säteilyn lävitseen, täydellisen valkeita kappaleita ($a=0$, $r=1$ ja $t=0$), jotka heijastavat kaiken saapuvan säteilyn ja täydellisiä mustia kappaleita ($a=1$, $r=0$ ja $t=0$), jotka absorboivat kaiken saapuvan säteilyn (Modest 2003). Sellaista läpinäkymätöntä kappaletta, joka absorboi tasaisesti samassa suh-

teessa kaikkia aallonpituuksia heijastaen loput (esimerkiksi $a=0,8$ $r=0,2$ ja $t=0$ kaikilla aallonpituuksilla), kutsutaan harmaaksi kappaleeksi. Reaalimaailmassa täydellisiä kappaleita ei kuitenkaan ole.



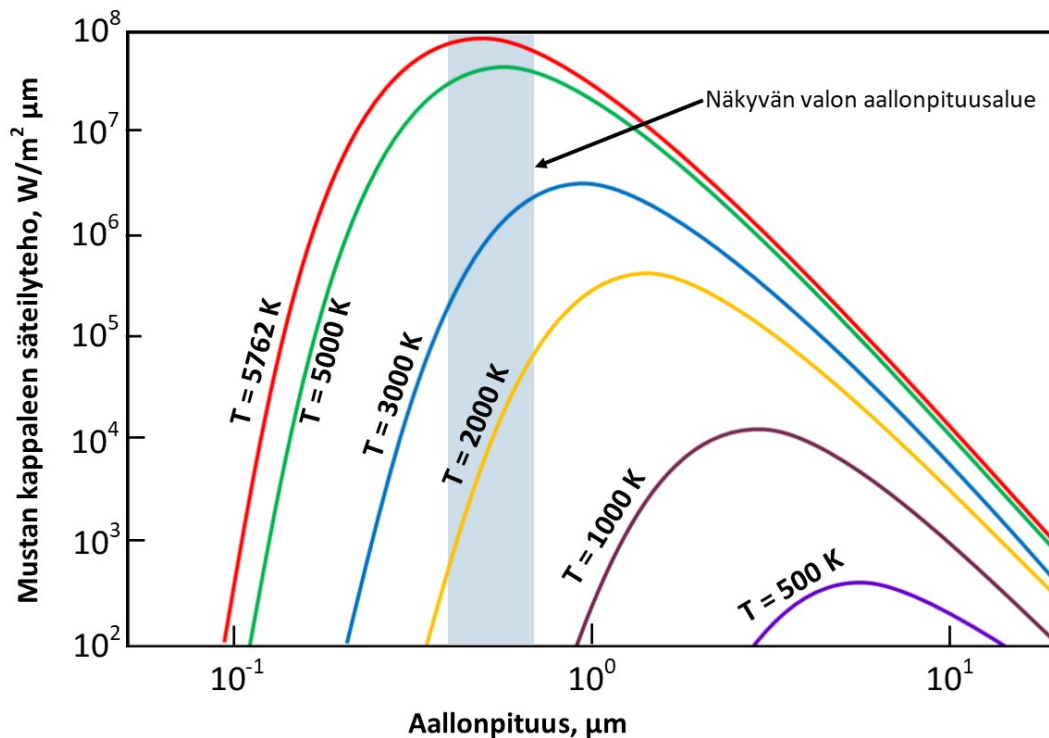
Kuva 4. Kohteeseen osuvan lämpösäteilyn absorboituminen, heijastuminen ja läpäisy. Piirretty Modestia (2003) mukailleen.

Todelliset kappaleet absorboivat, heijastavat ja läpäisevät yleensä eri aallonpituuksia eri tavalla eli niiden läpinäkyvyys tai "harmaus" riippuu sähkömagneettisen säteilyn aallonpituudesta (Smith 2001). Esimerkiksi seinä ei läpäise valoa, mutta läpäisee radioaallot. Eli seinä on valon aallonpituuksille läpinäkymätön, mutta radioaalloille läpinäkyvä, vaikka sekä valo että radioaallot ovat sähkömagneettista säteilyä. Toisena esimerkkinä valkoinen seinä heijastaa näkyvää valoa hyvin, mutta lämpösäteilyä huonosti (Modest 2003). Valkoinen seinä on siis valon aallonpituuksille varsin valkoinen, mutta lämpösäteilyn aallonpituuksille hyvin harmaa.

Koska kappaleet absorboivat eri tavalla eri aallonpituuksia, voi esimerkiksi huoneenlämmössä olevista kahdesta kappaleesta toinen absorboida hyvin ympäristön lämpösäteilyä ja toinen huonosti. Esimerkiksi musta kappale absorboi hyvin lämpösäteilyä ja kiiltävä vastaavasti huonosti. Vaikka lämpösäteilyn imeytyminen tarkoittaa kappaleen lämpenemistä, kappaleet eivät lämpene itsestään ympäristöään lämpimämmiksi, koska tiettyä aallonpituutta tehokkaasti imevä kappale myös lähettää ympäristöönsä (emittoii) samaa aallonpituutta yhtä tehokkaasti (Modest 2003). Musta kappale on siis paitsi täydellinen absorboija myös täydellinen emittoija (Modest 2003). Vastaavasti valikoivasti eri aallonpituuksia imevä kappale, myös lähettää ympäristöönsä samalla tavalla valikoituja aallonpituuksia.

2.2.2. Lämpötilan ja lämpösäteilyn välinen yhteys

Lämpösäteily noudattaa tiettyjä lainalaisuuksia, joiden ansiosta kappaleen lähettämän lämpösäteilyn perusteella voidaan saada tietoa kappaleen lämpötilasta. Ensimmäinen näistä lainalaisuuksista on Planckin laki (Modest 2003), jonka sisältö on kaavan sijaan helpointa esittää kuvan 5 kaltaisen kuvaa-
jan muodossa. Mustan kappaleen eli täydellisesti säteilyä lähettävän kappaleen lämpötilan noustessa sen lähettämän lämpösäteilyn huippu siirtyy lyhyemmän aallonpituuden kohdalle ja samalla huippukohdan säteilyteho ja kokonaissäteilyteho kasvavat. Kuumempi kappale siis lähettää enemmän ja lyhyempiaaltoista lämpösäteilyä.



Kuva 5. Planckin lain perusteella lasketut kuvaajat eri lämpötiloissa (kelvineinä) olevien mustien kappaleiden lämpösäteilyn tehon jakautumiselle. Aallonpituus x-akselilla ja säteilyteho y-akselilla. Mitä kuumemmasta kappaleesta on kyse, sitä lyhyemmän aallonpituuden kohdalle lämpösäteilyn maksimiteho asettuu. Kuumempien kappaleiden maksimisäteilyteho ja kokonaissäteilyteho ovat myös korkeampia kuin viileämpien. Piirretty Modest (2003) mukaan.

Planckin käyrän ja x-akselin rajaama alue kuvaa tietyssä lämpötilassa olevan mustan kappaleen lähettämän lämpösäteilyn kokonaismäärän eli kokonaissäteilytehon (Modest 2003). Pinta-ala voidaan laskea integroimalla Planckin kaavasta, jolloin saadaan Stefanin-Boltzmannin laki:

$$W = \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)},$$

jossa σ on vakio ($5.670367 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) ja T on lämpötila Kelvineinä.

Stefanin-Boltzmannin lain mukaan mustan kappaleen lämpösäteilyn teho pinta-alaa kohti on suoraan verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin (Modest 2003). Eli lämpötilan kaksinkertaistuessa lämpösäteilyn määrä 16-kertaistuu. Samoin on mahdollista laskea integroimalla kappaleen lähettämän tietylle aallonpituusvälille sijoittuvan säteilyn teho.

2.2.3. Reaalimaailman kappaleiden lähettämä lämpösäteily

Yllä esitellyt fysiikan lait kertovat millä tavalla kappaleen lähettämä lämpösäteily riippuu kappaleen lämpötilasta ja muodostavat siten lämpökuvauksen teoriapohjan. Ne kuvaavat kuitenkin ideaalitalanetta, jossa säteilyä lähettävä kappale on musta kappale eli täydellinen säteilyn lähettäjä. Todelliset kappaleet ovat kuitenkin joko valikoivasti eri aallonpituuksia absorboivia ja siten myös lähettäviä kappaleita eli selektiivisiä emittoijia, tai harmaita kappaleita, jotka absorboivat ja lähettävät kaikilla aallonpituuksilla saman osuuden saapuvasta säteilystä ja heijastavat lopun (Modest 2003). Kun tarkastellaan pelkästään kapeaa osa-alueella säteilystä, kuten infrapuna-alueelle kohdistuvaa lämpösäteilyä, suurimman osan kappaleista voi yleistää käyttäytyvän harmaan kappaleen lailla (Modest 2003).

Harmaiden kappaleiden kokonaissäteilyn määrä on tietty osuus mustan kappaleen säteilyn määrästä (Smith 2001). Jakamalla harmaan kappaleen säteilyn määrä (W_{obj}) vastaavan lämpöisen mustan kappaleen säteilyn määrällä (W_{bb}) saadaan suhdeluku, jota kutsutaan emissiivisyydeksi (Smith 2001):

$$\text{Emissiivisyys, } \varepsilon = W_{obj} / W_{bb}$$

Emissiivisyyden avulla mustalle kappaleelle tarkoitetut kaavat voidaan muokata sopimaan myös harmaille kappaleille (Smith 2001). Esimerkiksi Stefanin-Boltzmannin kaava harmaalle kappaleelle on muotoa:

$$W = \varepsilon \sigma T^4 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

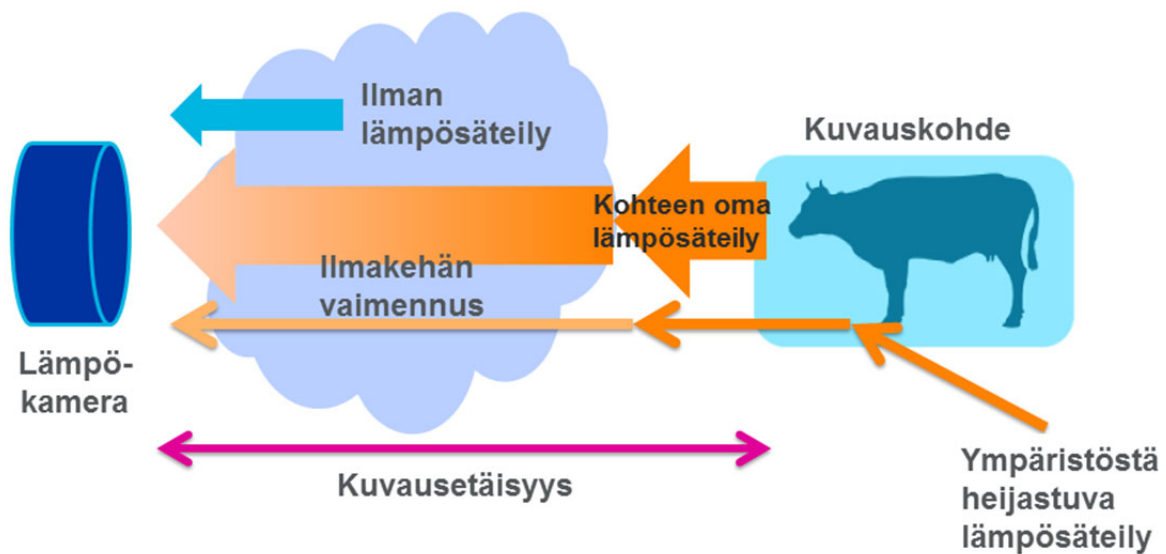
Emissiivisyys voi saada arvot väliltä nolasta yhteen. Esimerkiksi kappale, jonka emissiivisyys on 0,8, absorboi 80 % kunkin aallonpituuden säteilystä, joka kappaleeseen osuu. Loput 20 % kappale heijastaa pois. Vastaavasti sama kappale lähettää 80 % siitä säteilystä, mitä saman lämpöinen musta kappale lähittäisi, ja loppu 20 % on ympäristöstä heijastuvaa lämpösäteilyä. Edelleenkin on hyvä muistaa, että kappale lähettää saman verran ja samanlaista säteilyä kuin se absorboi (Kirchhoffin säteilylaki) (Modest 2003).

Kappaleiden emissiivisyys riippuu nimenomaan kappaleen pinnan ominaisuuksista (Modest 2003). Tämän vuoksi samaa materiaalia olevilla kappaleilla on eri emissiivisyys, jos niiden pinnat ovat erilaisia. Kappaleen pinnalla olevat epäpuhtaudet kuten lika, ruoste ja maalit, sekä pinnan epätasaisuudet muuttavat kappaleen emissiivisyyttä.

2.2.4. Lämpösäteilyn mittaaminen lämpökameralla

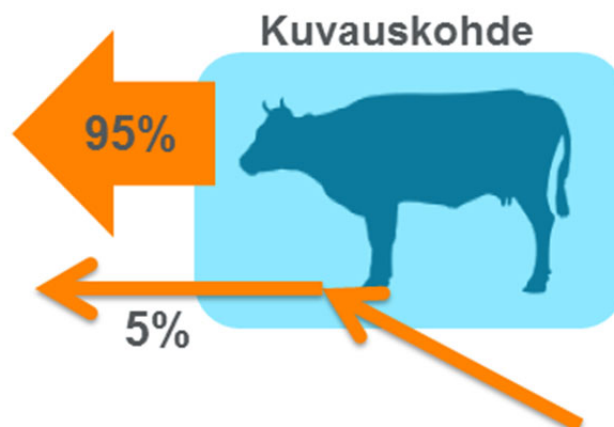
Kappaleen lähettämän lämpösäteilyn määrä riippuu kappaleen lämpötilasta (Modest 2003). Lämpökamera kykenee mittaamaan lämpösäteilyn voimakkuuden ja muuttamaan sen lämpötilatiedoksi (Paloniitty ym. 2018). Normaalikäyttöön tarkoitetut lämpökamerat mittaavat aallonpituusvälille 7,5 – 13,5 μm eli pitkäaaltoisen infrapunan alueelle osuvan säteilyn voimakkuutta. Nykyisten lämpökameroiden toiminta perustuu yleensä jäädyttämättömään matriisitekniikkaan, jossa jokaiselle kuvapisteelle on oma ilmaisimensa. Lämpösäteily aiheuttaa ilmaisimessa resistiivisen muutoksen. Lämpökuvassa jokainen kuvapiste saa oman lämpötila-arvon, jota havainnollistetaan tietyllä värillä tai värisävyllä.

Kaikki lämpökameraan saapuva lämpösäteily ei ole kuvauskohteen oman lämpötilan aikaansaamaa säteilyä (Paloniitty ym. 2018). Reaalimaailmassa esiintyvät kappaleet ovat likimain harmaita kappaleita (Modest 2003), jolloin osa kohteesta lämpökameraan tulevasta säteilystä on taustasta kohteen kautta kameraan heijastunutta lämpösäteilyä. Lisäksi osa kohteen omasta sekä kohteesta heijastuvasta säteilystä osuu ilmakehän kaasuihin ennen saapumistaan lämpökameran sensoriin (Paloniitty ym. 2018). Koska kaikki aineet kaasut mukaan lukien absorboivat lämpösäteilyä, kameran ja kohteen välissä oleva ilma vaimentaa lämpösäteilyä (Modest 2003). Toisaalta ilmakehän kaasut myös lähettävät lämpösäteilyä. Kuvassa 6 on esitettyinä kaaviomaisesti lämpökameraan saapuvan lämpösäteilyn lähteet, sekä ilmakehän vaimennus, olettaen, että kuvauskohde ei päästä lämpösäteilyä lävitseen.

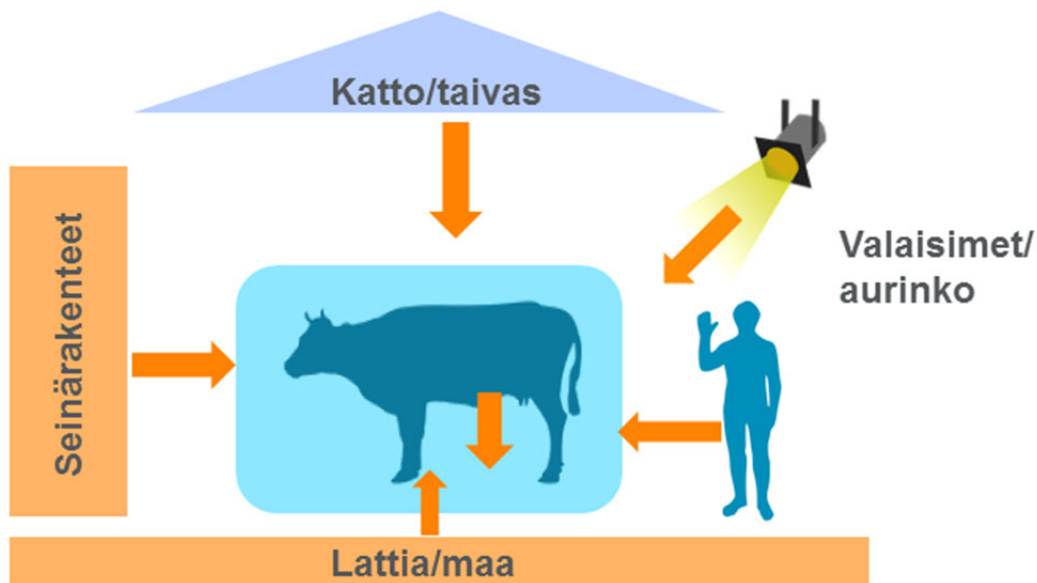


Kuva 6. Lämpökameraan saapuvan lämpösäteilyn lähteet ja ilmakehän kaasujen aiheuttama vaimennus, kun kyseessä on läpinäkymätön kappale. Piirretty Paloniitty ym. (2018) ja FLIR Systems:n (2012) mukaan.

Jotta lämpökamera kykenisi antamaan kohteen lämpötilan, kameran asetuksiin annetaan erilaisia parametrejä. Kohteen oman säteilyn erottamiseksi ympäristöstä heijastuvasta säteilystä kamera tarvitsee kohteen emissiivisyysarvon (Ks. Kappale 2.2.3.) ja ympäristön kohteiden (taustan) lämpötilan (Paloniitty ym. 2018). Eläimiä kuvatessa käytetään yleensä emissiivisyysarvoja välillä 0,90 – 0,98 (McManus ym. 2016, Tattersall 2016, Zhang ym. 2016) (Kuva 7). Ilman oman lämpösäteilyn erottamiseksi kameraan syötetään tieto ilman lämpötilasta (FLIR Systems 2012). Tausta, jonka lämpösäteily kuvauskohteesta saattaa heijastua, on navetta-ympäristössä moninainen (Kuva 8); kuvaussuunnasta riippuen on huomioitava lattian, seinien, valaisimien ja myös kuvaajan ja eläimen itsensä lähettämä lämpösäteily. Taustan kohteiden lämpötila voi erota suurestikin ilman lämpötilasta, siksi nämä molemmat parametrit tarvitaan. Esimerkiksi lämmittämättömän eläinsuojan rakenteet voivat pakkasjakson jäljiltä olla vielä hyvin kylmät, vaikka ilma olisi jo ehtinyt lämmetä. Taustan kohteet voivat myös olla keskenään hyvin eri lämpöisiä. Heijastuvan lämmön tarkassa määrittämisessä voidaan hyödyntää peilejä (emissiivisyys lähellä nollaa) (Harrap ym. 2018), mutta tilaolosuhteissa ja liikkuvaa kohdetta kuvatessa tämä saattaa olla vaikeaa.



Kuva 7. Nautoja kuvatessa käytetään tyypillisimmin emissiivisyysarvoa 0,95, jolloin yksinkertaistettuna 95 % mitatusta lämmöstä on kohteen itsensä säteilemää ja 5 % sen ympäristöstään heijastamaa lämpösäteilyä.



Kuva 8. Kuvauskohde heijastaa ympäröivän taustansa lämpösäteilyä oman emissiivisyysarvonsa mukaan. Navettaympäristössä heijastuva lämpö koostuu seinä-, lattia-, ja kattorakenteiden sekä valaisimien lämpösäteilystä. Lähietäisyydeltä kuvatessa myös kuvaajan lämpösäteily saattaa heijastua kohteesta tai esimerkiksi sorkkia kuvatessa eläimen kehon oma lämpösäteily.

Jos emissiivisyysarvo ja arvioitu heijastuva lämpötila poikkeavat suuresti todellisista arvoista, vääristää tämä mittaustulosta (Tattersall 2016). Jos käytetty emissiivisyysarvo on suurempi kuin mitattavan kohteen todellinen emissiivisyys, kameran algoritmi olettaa mittaustuloksesta todellisuutta suuremman osan kohteen säteilemäksi lämmöksi, vaikka todellisuudessa osa tästä mitatusta lämpösäteilystä onkin ympäristöstä heijastuvaa lämpöä. Tilanteessa, jossa kuvauskohde on ympäristöään lämpimämpi, mittaustulos tällöin aliarvioi kohteen pintalämpötilan. Vastaavasti myös, jos heijastuva lämpötila yliarvioidaan, niin kameran laskenta aliarvioi kuvattavan kohteen pintalämpötilan. Elävien kudosten emissiivisyys on kuitenkin niin korkea, että väärin arvioidun heijastuvan lämpötilan vaikutus mittaustulokseen on melko vähäinen.

Ilmakehän aiheuttama vaimennus johtuu erityisesti ilmassa olevasta vedestä (FLIR Systems 2012) ja on sitä suurempi mitä pidempi matka kohteen ja kameran välillä on tai mitä kosteampaa ilma on (Paloniitty ym. 2018). Tämän vuoksi lämpökamerat tarvitsevat myös tiedon kohteen ja kameran välisestä etäisyydestä, sekä ilman suhteellisesta kosteudesta.

Kaikkia edellä esitettyjä mittaussparametrejä voi muuttaa kuvan ottamisen jälkeenkin lämpökuvien käsittelyyn sopivalla tietokoneohjelmalla. Vaikka lämpökamerat on tarkoitettu lämpötilan mittaamiseen, niin on hyvä ymmärtää, että mittaustulos on matemaattinen arvio kohteesta ottaen huomioon ympäristöolosuhteet (Tattersall 2016). Kohteen pintalämpötila lasketaan lopulta ratkaisemalla Stefanin-Boltzmannin laista T (Kt. kappale 2.2.2.) ottaen huomioon yllä esitetyt mittaussparametrit seuraavasti (FLIR Systems 2012):

1. Kuvauskohde säteily: $\epsilon \cdot \tau \cdot W_{obj}$, jossa ϵ on kohteen emissiivisyys ja τ ilmakehän läpäisyysuhde.
2. Ympäristöstä heijastuvan lämmön säteily: $(1 - \epsilon) \cdot \tau \cdot W_{amb}$, jossa $(1 - \epsilon)$ on kuvauskohde heijastavuus.
3. Ilmakehän säteily: $(1 - \tau) \cdot W_{atm}$, jossa $(1 - \tau)$ on ilmakehän emissiivisyys.

Kokonaissäteilyteho, jonka kamera vastaanottaa, on siis:

$$W_{\text{tot}} = \varepsilon \cdot \tau \cdot W_{\text{obj}} + (1 - \varepsilon) \cdot \tau \cdot W_{\text{amb}} + (1 - \tau) \cdot W_{\text{atm}},$$

jossa ε on kohteen emissiivisyys, τ on ilmakehän läpäisyuhde, T_{amb} (kaavasta $W_{\text{amb}} = \sigma T_{\text{amb}}^4$ (W/m²)) on kohteen ympäristön lämpötila ja T_{atm} (kaavasta $W_{\text{atm}} = \sigma T_{\text{atm}}^4$ (W/m²)) on ilmakehän lämpötila. Kohteen lämpötila T_{obj} ratkaistaan kaavasta $W_{\text{obj}} = \sigma T_{\text{obj}}^4$ (W/m²).

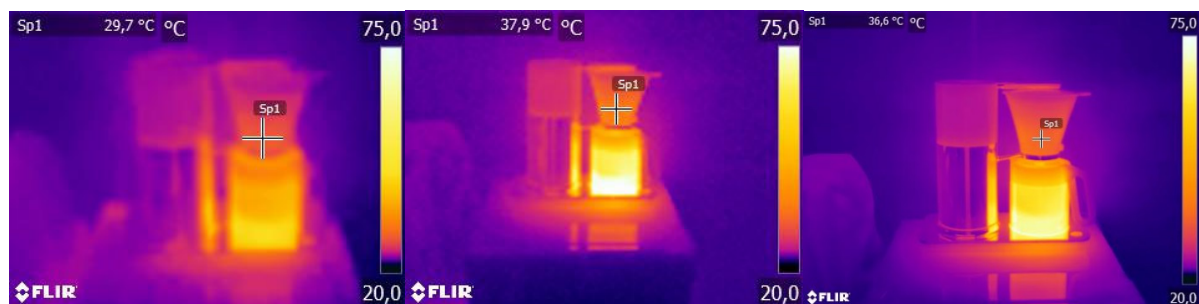
Oikeiden parametrien lisäksi lämpökuvauksessa on huomioitava myös oikea kuvaustekniikka. Kohteen kuvaaminen mahdollisimman kohtisuoraan on tärkeää, sillä lämpösäteilyllä on kulkusuunta, ja emissiivisyysarvo riippuu säteilyn lähtökulmasta (Modest 2003). Muutamissa tutkimuksissa on kuitenkin todettu, että pieni vaihtelu (20 – 45°) kuvauskulmassa ei merkittävästi vaikuta mittaustulokseen (Westermann ym. 2013, Okada ym. 2013, Rekant ym. 2016, Tattersall 2016).

2.2.5. Lämpökameran erotteluherkkyys, tarkkuus ja resoluutio

Lämpökameran ominaisuuksista tärkeimpiä ovat erotteluherkkyys ja resoluutio. Lämpökameran erotteluherkkyys tarkoittaa kameran herkkyyttä mitata lämpötilaeroja mitattavassa kohteessa (Paloniitty ym. 2018). Lämpökameran oma järjestelmä aiheuttaa aina jonkin verran hälyä (Orlove 2017). Erotteluherkkyys on se lämpötila, joka ylittää lämpökuvauslaitteen oman taustahälyn ja näkyy siten syntävässä kuvassa. Erotteluherkkyyttä pienempää lämpötilaeroa lämpökamera ei kykene havaitsemaan (Paloniitty ym. 2018). Normaalisti lämpökameran erottelukyky on välillä 0,02 – 0,15 °C.

Erotteluherkkyys ei kuitenkaan tarkoita sitä, että lämpökamera kykenisi mittaamaan kohteen absoluuttisen lämpötilan samalla tarkkuudella (Curran ym. 2015). Lämpötilamittaustuloksen tarkkuus on hyvillään kameroilla +/- 2 °C. Mittaustulosten toistettavuus samaa kameraa käyttäen sen sijaan on lähellä erotteluherkkyyden arvoa. Samoin lämpökuvan eri pikseleiden eli mittauspisteiden välisten erojen tarkkuus on lähellä lämpökameran erotteluherkkyyden arvoa. Parempi erotteluherkkyys tarkoittaa lisäksi parempilaatuisia kuvia, joista on helpompi erottaa kohteita (Orlove 2017).

Lämpökameran resoluutio tarkoittaa kameran matriisi-ilmiasimissa olevien mittauspisteiden lukumäärää (Paloniitty ym. 2018). Kukin mittauspiste mittaa kuvattavasta kohteesta tietyltä pinta-alalta saapuvan lämpösäteilyn kokonaismäärän. Resoluution parantuessa kukin mittauspiste edustaa yhä pienempää pinta-alaa kuvattavasta kohteesta. Tämän vuoksi korkean resoluution lämpökameralla pystytään havaitsemaan paremmin pienialaiset poikkeamat pintalämpötilassa. Kuvassa 9 on sama kohde kuvattuna eritasoisia lämpökameroita käyttäen. Yksityiskohtaisimman lämpökuvan muodostaa vertailun kohteena olevista kameroista FLIR T540, jonka resoluutio on moninkertainen yksinkertaisimpaan malliin verrattuna.



Kuva 9. Eri lämpökameramallien tuottamien kuvien vertailu. Kuva vasemmalla on otettu FLIR C2 kameralla (resoluutio 80 x 60, tarkkuus ±2 °C, erotteluherkkyys 0,1 °C), keskellä oleva kuva FLIR E5:lla (resoluutio 120 x 90, tarkkuus ±2 °C, erotteluherkkyys <0.1 °C) ja oikealla oleva kuva on otettu FLIR T540 kameralla (resoluutio 464 x 348, tarkkuus ±2 °C, erotteluherkkyys 0,04 °C). (Kuva: Sami Pekkarinen/Savonia)

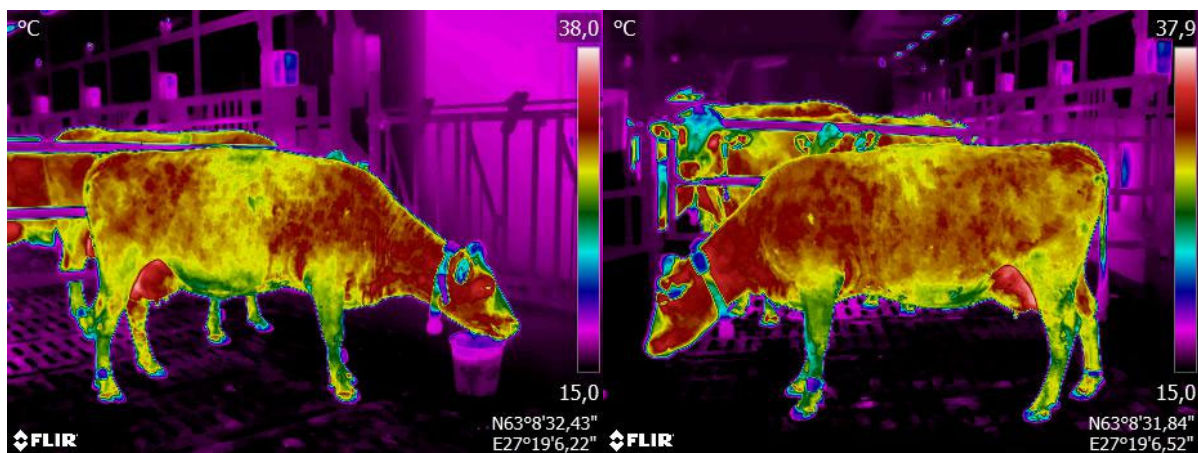
Resoluution tavoin myös etäisyys vaikuttaa kuvaustarkkuuteen. Etäisyyden kasvaessa kunkin mittauspisteen edustama pinta-ala kasvaa ja tarkkuus pienenee (Paloniitty ym. 2018). Etäisyyden kasvaessa mittauksen luotettavuus heikkenee etenkin matalan resoluution kameroilla, mutta lähietäisyydeltä kuvatessa myös heikon erottelukyvyn kameroilla voidaan päästä luotettaviin mittaustuloksiin (Montanholi ym. 2015).

Kuvausteknisesti myös kuvan tarkennus on olennaista mittaustuloksen luotettavuuden kannalta (Tattersall 2016). Huonosti tarkennetussa kuvassa taustan lämpötila ikään kuin sulautuu kohteen lämpötilaan ja vääristää mitattavaa pintalämpötilaa. Tilanteessa, jossa kohde on ympäristöönsä lämpimämpi, huonolla kuvan tarkennuksella saadaan kohteen pintalämpötilasta todellisuutta matalampi mittaustulos. Pienet virheet tarkennusetäisyydessä saattavat aiheuttaa suuria virheitä varsinaisessa mittaustuloksessa.

2.3. Naudan pintalämpötilan normaali jakautuminen

Vaikka eläimessä ei olisi mitään poikkeavaa, niin pintalämpötila ei ole tasainen, minkä lisäksi myös yksilöiden välillä on eroa pintalämpötilan normaalissa jakautumisessa eri ruumiinosiin. Pintalämpötilaan vaikuttavat muun muassa rakenne, ihonalaiset kudokset, lihakset ja karvapeite. Lämpökuvannettaessa esimerkiksi hevosia verrataan yleensä kohteen vasenta ja oikeaa puolta, koska oletuksena on, että pintalämpötilan jakauma on symmetrinen eri puolien välillä (Soroko & Davies Morel 2014). Naudalla pintalämpötilan symmetriaa kehon vasemman ja oikean puolen välillä ei ole tutkittu, mutta voidaan olettaa, että myös naudalla puolet ovat pitkälti symmetrisiä.

Naudan, kuten muidenkin eläinten, pinnanmuodot ovat sekä kuperia että koveria, mikä aiheuttaa sen, että eläimen pinnan lämpösäteilyn energia on epätasaista (Soroko & Davies Morel 2014 mukaan Cena & Clark 1973). Koverat alueet, kuten kaulan ja lavan yhtymäkohta, tai muuten suojaossa olevat kohdat, kuten kyynärpäähän takana oleva ”kainalo”, ovat paremmassa suojaossa ympäristön vaikutuksilta ja siten niiden pintalämpötila on yleensä korkeampi (Kuva 10). Kuperat alueet, kuten selkä, ovat puolestaan alttiimpia ympäristön lämpötilan vaikutuksille, minkä lisäksi lämpösäteily hajoaa kuperalta pinnalta laajemmalle, ja siten ne ovat yleensä pintalämpötilaltaan viileämpiä.

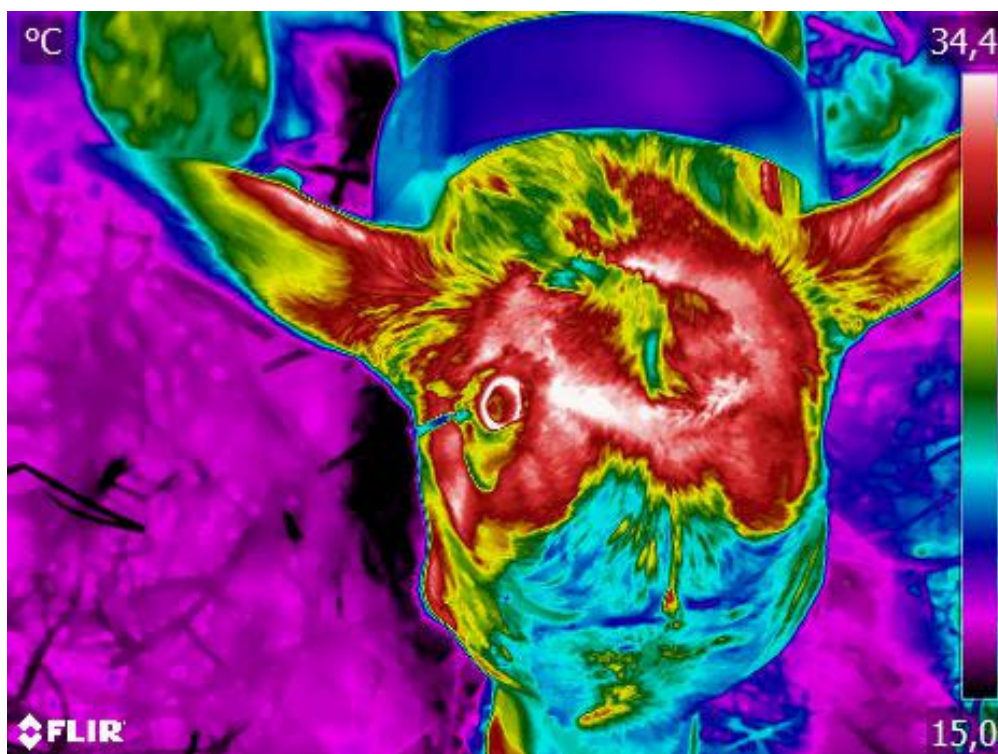


Kuva 10. Naudan pinnanmuodot, lihasten sijainti ja muut ihonalaiset kudokset vaikuttavat pintalämpötilaan. Pintalämpötila on korkeampi isojen lihasten alueella (esimerkiksi kaula), vasemmalta kyljeltä (pötsi), suojaisilta alueilta (esimerkiksi kainalo ja häntäkuoppa) ja alueilta, joilla on ohut karvapeite (esimerkiksi pää ja utare). Raajojen ääreisosat ja häntä ovat yleensä selvästi kehon muita osia viileämpiä (Kuva: Lilli Frondelius/Luke).

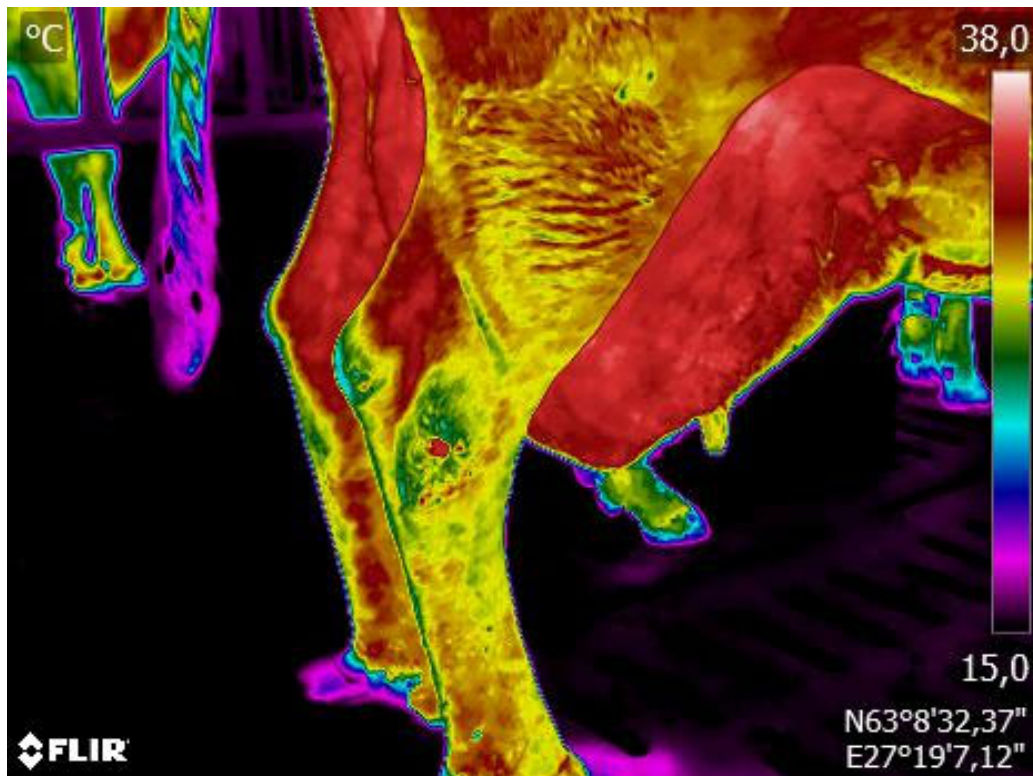
Ihonalaisista kudoksista johtuvalla lämmöllä on suuri vaikutus pinnan lämpötiloihin (Mitchell 2013). Alueet, joilla on aktiivinen pintaverenkierto ja kudosaineenvaihdunta, ovat lämpimämpiä. Esimerkiksi pötsi sijoittuu vatsaontelossa enemmän vasemmalle puolelle, minkä takia naudalla kylkien välinen

pintalämpötila ei ole symmetrinen, vaan vasen kylki saattaa olla oikeaa lämpimämpi (Salles ym. 2016). Vastaavasti rasvakudos absorboi lämpöä ja paksun rasvakerroksen kohdalla pintalämpötila on matalampi (Salamunes ym. 2017). Myös alueet, joilla on isoja lihaksia (esimerkiksi raajojen yläosa), ovat lämpimämpiä kuin vähemmän lihaksikkaat alueet, kuten raajojen ääreisosat (Soroko & Davies Morel 2014). Raajojen ääreisosat ovat myös alttiimpia ympäristön lämpötilan vaikutukselle (Poikalainen ym. 2012). Ympäristön lämpötilalla on suora vaikutus pintalämpötilaan, mutta samaan aikaan se vaikuttaa myös eläimen oman lämmönsäätelyn kautta: lämpimällä säällä lämpöä pyritään poistamaan kehosta, pintaverenkierto on aktiivista ja siten myös mitattu pintalämpötila on korkeampi (Soroko & Davies Morel 2014). Vastaavasti kylmissä olosuhteissa pintaverenkiertoa vähennetään ja pinnan lämpösäteilyn energia vähenee. Esimerkiksi navetan kylmimmissä osissa (lähellä sisäänkäyntiä) oleskelevien lehmien pintalämpötilat ovat alhaisemmat kuin navetan lämpimimmissä osissa (keskellä navettaa) oleskelevien lehmien (Gil ym. 2013). Myös fyysinen aktiivisuus lisää kehon lämmön tuottoa ja nostaa pintalämpötilaa (Montanholi ym. 2015).

Naudan karvan laatu ja pituus vaikuttavat myös pinnan lämpösäteilyyn. Paksu karvapeite absorboi lämpösäteilyä, minkä lisäksi ilma karvojen välissä toimii eristeenä (Cena & Monteith 1975, Tattersall 2016). Karvan paksuus vaihtelee myös ruumiinosien välillä ja mitattu pintalämpötila on korkeampi niillä alueilla, joissa on ohuempi karvapeite, kuten päässä ja utareessa (Kuva 10). Lämpösäteily on voimakkaampaa myös alueilta, joissa karvapeite on leikattu (Kuva 11) tai muuten ohentunut (Kuva 12) (Okada ym. 2013). Esimerkiksi utareiden lämpökuvantamisen kannalta karvojen ajelu saattaa olla luotettavan tuloksen kannalta tärkeää. Byrne ym. (2018) totesivat, että 10 – 23 % utareen pintalämpötilan vaihtelusta riippuu siitä, minä päivänä utarekarvat on edellisen kerran ajeltu, vaikkakin utareen pinnan maksimilämpötilan mittausta oli luotettava utarekarvojen pituudesta riippumatta.



Kuva 11. Karvapeite absorboi ihon lämpösäteilyä ja siten karvapeitteen paksuus vaikuttaa pintalämpötilaan. Kuvan vasikan päälleen karvapeitettä on leikattu lyhyeksi nupoutusta varten, minkä takia se näkyy muuta päätä lämpimämpänä (punainen/valkoinen alue). Tuore nupoutusjälki näkyy selvästi. (Kuva: Lilli Frondelius/Luke).



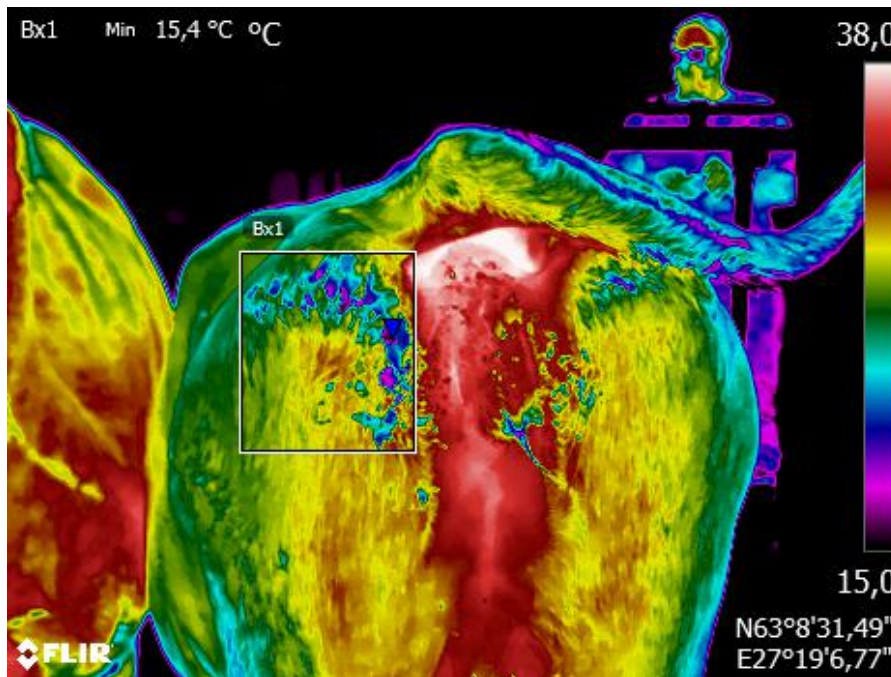
Kuva 12. Kintereen karvattomat alueet näkyvät selvinä lämpiminä (punaisina) pisteinä ympäröivään karvapeitteeseen verrattuna. (Kuva: Lilli Frondelius/Luke).

2.4. Apua, liian monimutkaista!

Lämpökuvantamiseen liittyvät eläinten lämmönsäätelyn fysiologiset eli toiminnalliset mekanismit ja fysiikka sekä lämpökuvantamisen teknologia voivat tuntua monimutkaisilta. Eläinten lämmönsäätelyyn liittyvät muut fysikaaliset mekanismit kuin lämpösäteily, eli johtuminen, konvektio ja haihtuminen, ovat lämpökuvantamista sekoittavia tekijöitä. Samoin pinnan emissiivisyyteen vaikuttavat tekijät, kuten lika (esim. Montanholi ym. 2015). Kaikki myöhemmin mainittavat mittauksia häiritsevät tekijät voidaan palauttaa näihin perusilmiöihin. Siksi niistä on hyvä olla edes pintapuolinen käsitys. Käytännön kuvantamisessa nämä tulevat huomioiduiksi yksinkertaisesti: noudata huolellisesti kuvausohjeita.

Ennen kuvausta eläimen olisi syytä olla muutama tunti kuivana ja puhtaana sisätiloissa (Thermalimage.fi 2018). Eläin pitäisi mahdollisuuksien mukaan kuvata auringolta ja tuulelta suojassa. Ilmavirta luonnollisesti laskee mitattua pintalämpötilaa (konvektio), kun taas aurinko puolestaan nostaa sitä (Church ym. 2014, Montanholi ym. 2015). Kaksivärisissä naudoissa auringon vaikutus näkyy erityisen hyvin: auringossa olleet valkoiset alueet voivat olla jopa 20°C viileämpiä kuin samalle auringon valolle altistuneet mustat alueet (Church ym. 2014). Myös juuri ennen kuvaushetkeä tapahtunut altistus auringon valolle häiritsee mittausta (Montanholi ym. 2015, Racewicz ym. 2018). Eläimen koskettamista ennen kuvausta pitäisi välttää (Thermalimage.fi 2018), koska kosketuksesta (konduktio) jää eläimen pintaan lämpöjälki.

Kosteus lisää lämmön poistumista iholta (evaporaatio) (Stewart ym. 2005). Myös likaiset alueet (Kuva 13) ja roskat karvapeitteellä, kuten kutteri, näkyvät viileämpinä kohtina (Montanholi ym. 2015). Myös kärpäset ja ulkoloiset näkyvät eläimen pintaa viileämpinä (McManus ym. 2016).



Kuva 13. Lehmän istuinluun kohdalle kuivunut sonta näkyy lämpökuvassa selvästi ympäröivää pintaa viileämpänä (Kuva: Lilli Frondelius/Luke).

Byrnen ym. (2017) tutkimusryhmässä on tutkittu lehmän sisäisen ja lehmien välisen vaihtelun merkitystä, kuvien ottajan vaikutusta ja kuvauspäivien välisen vaihtelun merkitystä lypsylehmien eri rakenteiden lämpökuvantamisessa. Tulosten mukaan lehmän sorkka oli toistettavin rakenne kuvauskohdeksi. Sorkkien osalta lehmä itsessään oli suurin vaihtelua aiheuttava tekijä kattaen 91,4 – 99,3 % kokonaisvaihtelusta mitatussa pintalämpötilassa. Silmästä ja utareesta oli parasta mitata maksimipintalämpötila, kun taas sorkasta edullisinta oli mitata sorkan alueen keskimääräinen pintalämpötila. Utareiden, sorkkien ja silmän lämpökuvantamisesta voit lukea tarkemmin kappaleista 3.1., 3.2. ja 3.4. Käytettäessä edellä mainittuja pintalämpötilan mittaustapoja ja otettaessa ainakin 3 kuvaa samasta tilanteesta, voitiin päästä korkeaan tarkkuuteen navettaolosuhteissa. Kun navettaolosuhteissa oli useita eri kuvaajia, oli kaikilla oltava samat ohjeet, joita noudatettiin tarkasti, jotta kuvaajien välinen vaihtelu pystyttiin minimoimaan.

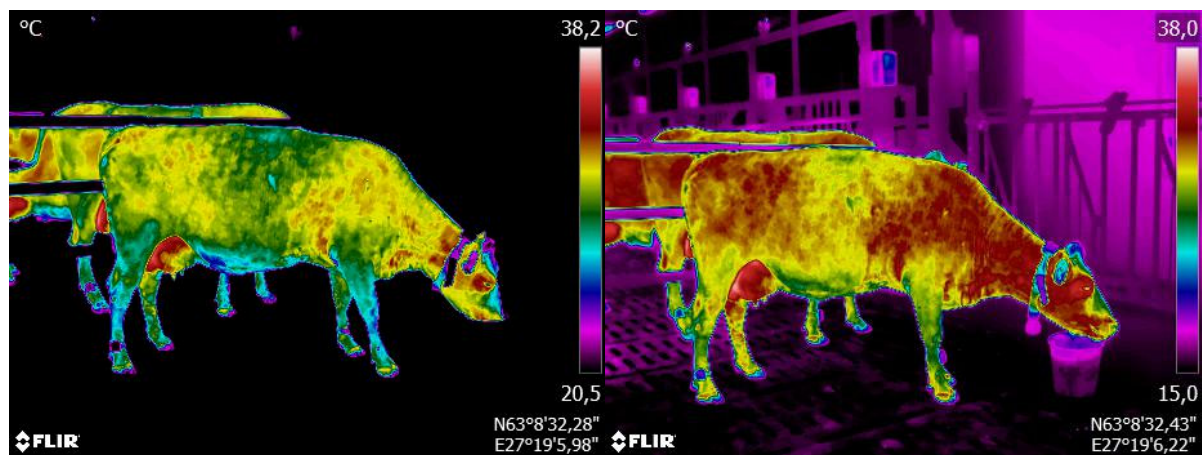
2.5. Yhteenveto: Yleiset kuvausohjeet

Edellisissä kappaleissa on esitetty lämpösäteilyn ja lämpökuvantamisen teoriaa. Miten siis nämä asiat tulisi huomioida kuvatessa? Lämpökameroiden kuvausasetuksilla pystyy ottamaan huomioon kameramallista riippuen useimpia ympäristöolosuhteiden tekijöitä. Taulukossa 1 on esitetty mittaussparametreja, jotka voidaan asettaa kameraan hyvän erottelukyvyn FLIR T540 kamerassa. Edullisemmissä kameroissa mittaussparametrien, joihin voi vaikuttaa, lukumäärä vaihtelee, mutta kaikissa kameroissa pystyy yleensä määrittämään vähintään emissiivisyyden. Kaikkien lämpökameratyyppien ottamista kuvista mittaussparametrit saa kuitenkin säädettyä jälkikäteen oikeiksi tietokoneella lämpökuvankäyttelyohjelmalla. Tätä varten kaikki taulukossa 1 mainitut mittaussparametrit kannattaa kirjata erikseen ylös. Ilman lämpötilan ja -kosteuden määrittämiseksi kannattaa olla oma erillinen mittari, joka viedään kuvaustilaan jo hetkeä ennen kuvaustapahtumaa. Ainoa mittaustulokseen suuresti vaikuttava seikka, johon ei jälkikäteen pysty vaikuttamaan, on kuvan tarkennus. On siis tärkeää aina muistaa tarkentaa kamera ennen kuvan ottoa.

Taulukko 1. Lämpökuvantamisessa käytettävät mittausparametrit, joita tarvitaan kohteen oman lämpösäteilyn erottamiseen ympäristöstä tulevasta lämpösäteilystä ja ilmakehän aiheuttaman vaimennuksen huomioimiseen (ks. Kappale 2.2.4.)

Mittausparametri	Kuvaus
Kohteen etäisyys	Valitaan kuvausetäisyyden mukaan. Esimerkiksi utareita ja sorkkia kuvannettaessa etäisyys on yleensä noin metri, mutta kuvatessa koko eläintä sivusuunnasta on etäisyys pidempi, noin 2 – 3 metriä.
Ilman lämpötila	Ilman lämpötila säädetään kameraan erillisen lämpömittarin mukaan.
Suhteellinen kosteus	Ilmankosteus säädetään kameraan erillisen kosteusmittarin mukaan.
Emissiivisyys	Eläimiä kuvannettaessa käytetään yleensä emissiivisyysarvoja välillä 0,90 – 0,98 (McManus ym. 2016, Tattersall 2016, Zhang ym. 2016)
Heijastuva lämpötila	Katso lämpökameralla, mikä on ympäröivien rakenteiden/kohteiden pintalämpötila. Esimerkiksi sorkkia kuvannettaessa lämpöä heijastuu sorkkiin lattiasta ja lehmän mahan alusesta. Heijastuvan lämpötilan määrittämiseen ei ole mitään tarkkaa kaavaa, vaan se täytyy aina tilannekohtaisesti päätellä.

Kuvannettaessa oletusasetuksena on automaattinen lämpötilaskaala (väripaletti), jonka ylä- ja alaraja vaihtuvat kuvannettavan kohteen pintalämpötilojen mukaan. Automaattinen skaala kuitenkin hankaloittaa kuvien tulkintaa kameran ruudulta, joten skaala on hyvä lukita kuvantamisen ajaksi, jos mahdollista. Lämpötilaskaala tarkoittaa käytännössä sitä, että kuvissa kaikki lämpötilaskaalan ylärajan ylittävät lämpötilat näkyvät valkoisina ja alarajan alittavat lämpötilat tummina (Kuva 14). Skaala kannattaa asettaa niin, että se kuvaa mahdollisimman hyvin kuvauskohteen lämpötilavaihtelua.



Kuva 14. Lämpökamerassa kuvauskohteen lämpötilan vaihtelut esitetään erilaisilla väripaaleilla. Tässä kuvassa väripaletina on "sateenkaari". Lämpötilaskaala näkyy kuvien vasemmassa reunassa ja lämpökuvassa kaikki ylärajan ylittävät lämpötilat näkyvät valkoisena ja kaikki alarajan alittavat mustana. Samasta lehmästä otetut kuvat hieman eri lämpötilaskaaloja käyttäen näyttävät erilaisilta – kuvista huomaa, että eri skaaloilla lämpimät alueet korostuvat eri tavalla. (Kuva: Lilli Frondelius/Luke)

Kaikkia olosuhteiden vaikutuksia ei pystytä eliminoimaan kameran asetuksilla. Kuvannettaessa on siis hyvä myös:

- Välttää suoraa auringonpaistetta
- Välttää tuulisia olosuhteita
- Välttää koskemasta kuvauskohteeseen ennen kuvaamista
- Kuvata mahdollisimman puhtaita ja kuivia eläimiä

Navettaolosuhteissa tämä ei aina kuitenkaan ole mahdollista, mutta on tärkeää tiedostaa yllämainittujen tekijöiden vaikutus mitattuun pintalämpötilaan.

3. Tutkittua tietoa lämpökuvantamisesta nautojen terveyden ja hyvinvoinnin arvioinnissa

Lämpökuvantamista on eläinlääketieteessä käytetty jo 1960-luvulta lähtien, mutta vasta 2000-luvun taitteessa siihen on alettu suhtautua avoimemmin (Harper 2000). Lämpökuvantaminen on käyttökelpoinen kolmella alueella eläinlääketieteessä:

- Ennaltaehkäisy
- Taudinmääritys
- Hoito, ennusteen antaminen ja kuntoutus

Taudeilta ja muilta terveysongelmilta suojautuminen on välttämätöntä taloudellisesti järkevän eläin tuotannon ylläpitämiseksi (Hurnik ym. 1984). Tautien varhainen tunnistaminen ja hoito minimoivat eläinten tuotannon laskun, vähentävät joukkosairastumisten riskiä sekä hoito- ja lääkekustannuksia. On hyödyllistä tunnistaa ongelmat varhain, silloin ne eivät vielä ole vakavia ja hoitovaste on hyvä. Seuraavissa kappaleissa käymme läpi lämpökuvantamisesta tehtyä tutkimusta nautojen terveyden ja hyvinvoinnin seurannassa.

3.1. Naudan pintalämpötilan ja ruumiinlämpötilan yhteys

Sairauksien määrittämistä eli diagnosointia ajatellen on tehty tutkimuksia, miten hyvin nautojen pintalämpötila vastaa varsinaista ruumiin ydinlämpötilaa ja voitaisiinko lämpökuvantamiseen perustuvia mittaustekniikoita automatisoida. Eläimen ruumiinlämpötilan erilaisista mittausten menetelmistä on julkaistu yksi kirjallisuuskatsaus (Sellier ym. 2014).

Hoffmann ym. (2013) tutkimuksessa lämpökameralla videokuvaamalla seurattiin 22 terveeseen lehmän ja yhdeksän vasikan kehon eri kohdista mitattua pintalämpötilaa ja verrattiin tuloksia emättimestä ja peräsuolesta mitattuun ruumiinlämpötilaan. Ensimmäisessä osakokeessa mitattiin kahtena peräkkäisenä päivänä lehmän pintalämpötila oikealta puolelta silmästä (keskimäärin 37 °C), korvan takaa (keskimäärin 35,6 °C), lapaluun päältä (keskimäärin 34,9 °C) sekä ulkosynnyttimistä molemmista häpyhuulista ja niiden ympäristöstä (keskimäärin 37,2 °C). Emättimeen asetettavan mittaustilan antama keskimääräinen ruumiinlämpötila oli 38,5 °C ja peräsuolesta mitattu ruumiinlämpötila oli keskimäärin 38,8 °C. Seuraavaan osakokeeseen valittiin mittauskohdiksi ensimmäisen osakokeen tulosten perusteella silmä ja korvan takaosa. Lehmät lämpökuvannettiin lypsyasemalla ja vasikat juoma-automaatilla. Tilastollisiin analyysiin käytettiin 10 korkeinta mitattua pintalämpötilaa kultakin eläimeltä kummaltakin mitta-alueelta. Tulokset osoittivat lämpökameralla mitattujen terveiden eläinten pintalämpötilojen eroavan peräsuolilämpötilasta. Saman tutkimusryhmän toisessa kokeessa kuitenkin todettiin, että mitattu maksimipintalämpötila nousee peräsuolilämpötilan noustessa, ja että koko kehon alueelta mitattu maksimipintalämpötila saattaa olla riittävä likimääräiseen ruumiinlämpötilan määrittämiseen (Hoffmann ym. 2016). Jatkossa tulisi kuitenkin tutkia myös sairaita ja kuumeisia eläimiä. Yksilöllisten erojen vuoksi jokaisen eläimen olisi toimittava omana kontrollinaan eli pintalämpötilojen mittaamisessa ja tulkitsemisessa tulisi tähdätä lämpötilan pitkäaikaisseurantaan.

Lees ym. (2018) tutkimuksessa havaittiin, että härillä tilaolosuhteissa lämpökuvantamalla mitatun pintalämpötilan (pää, hartia, vartalo, peräpää) ja pötsiboluksella mitatun ruumiinlämpötilan välillä ei ollut yhteyttä. He totesivat, että lämpökuvantaminen saattaa olla hyödyllinen menetelmä ruumiinlämpötilan mittaamiseen kontrolloiduissa olosuhteissa, mutta käytännön tilaolosuhteissa menetelmä ei ole luotettava. Tuloksen tulkintaan kannattaa kuitenkin suhtautua varauksella, koska tutkimuksessa ei tuotu esiin, kontrolloitiinko rehun tai veden saantia kokeen aikana. Käytettäessä boluksia pötsin lämpötilan mittaamisessa etenkin juominen vaikuttaa voimakkaasti mitattuun lämpötilaan ja lämpö-

tilan palautuminen normaalille tasolle saattaa kestää useita tunteja (Bewley ym. 2008). Lees ym. (2018) toteuttivat lämpökamerakuvantamisen eläinten kotikarsinoissa kuuden päivän aikana aina kolmen tunnin välein.

Se, että pintalämpötila on systemaattisesti ydinlämpötilaa alhaisempi, ei ole periaatteessa ongelma, koska lisäämällä pintalämpötilaan systemaattisen eron mukainen astemäärä voitaisiin saada oikea ydinlämpötila. Korrelaatiot eri ruumiinosien pintalämpötilojen ja eläimen ydinlämpötilan välillä ovat kuitenkin monesti hyvin heikkoja. Esimerkiksi Salles ym. (2016) tutkimuksessa eri kehon osista mitattujen pintalämpötilojen ja peräsuolilämpötilan korrelaatio (r) vaihteli välillä 0,22 – 0,35. Syynä tähän on luultavimmin se, että pintalämpötila vaihtelee enemmän ja nopeammin kuin ydinlämpötila. Tämä puolestaan johtuu eläimen lämmönsäätelystä ja sen monimutkaisuudesta. Toisaalta Gloster ym. (2011) raportoivat, että silmän pintalämpötila näyttäisi heijastavan melko hyvin peräsuolilämpötilaa. Johtopäätös perustui siihen, että vaikka silmän pintalämpötila on systemaattisesti noin 2 °C alhaisempi kuin peräsuolilämpötila, ympäristön lämpötila ei vaikuta silmän pintalämpötilaan, toisin kuin esimerkiksi sorkkien pintalämpötilaan. Tulosten mukaan peräsuolilämpötilan ja silmän pintalämpötilan erot kuitenkin vaihtelivat satunnaisesti jopa useita asteita. Myös puhvelilla silmän maksimipintalämpötila antoi parhaan korrelaation (0,58) peräsuolilämpötilan kanssa (Barros ym. 2016). Kuitenkin tämänkin korrelaatio on mittaustarkkuusmielessä heikko. (Lisää silmän pintalämpötilasta kappaleessa 3.5.)

3.2. Utareen lämpökuvantaminen

Maidontuotannossa utareen terveydentilan seuranta on ensiarvoisen tärkeää. Utaretulehdus on yleisin sairaus, joka vaikuttaa utareen terveydentilaan ja tuotetun maidon määrään ja laatuun. Utaretulehduksen varhainen havaitseminen tehokkaan ja automaattisen seurantajärjestelmän avulla voisi olla keino parantaa maatilaa tehokkuutta (Hovinen ym. 2008, Zaninelli ym. 2018). Monenlaisia iltamaisia, menetelmiä ja laitteita on kehitetty tämän tavoitteen saavuttamiseksi. Osaa näistä, kuten maidon somaattisten solujen lukumäärän (*somatic cell count*, SCC) määrittämistä ja maidonäytteiden bakteriologista tutkimista laboratoriossa sekä tilatason solumittareita (esimerkiksi DeLaval Cell Counter, DCC), ei rutiininaisesti sovelleta eläinten terveydentilan seurantaan maatilalla joko kustannusten tai liiallisen ajankulun vuoksi (Pyörälä & Taponen 2009). Osaa mittauksista voidaan puolestaan soveltaa helpommin tilatasolla, kuten yleisesti tiloilla käytössä olevaa Kalifornia utaretulehdistestiä eli tutummin lettupannutestiä (*California Mastitis Test*, CMT) tai maidon sähkönjohtokyvyn mittaamista (Samara ym. 2014, Vilas Boas ym. 2017). Edellä mainitut testit mittaavat tulehdistusta kuitenkin epäsuorasti eikä testien herkkyys riitä kaikkien tapausten, erityisesti piilevien utaretulehdusten, havaitsemiseen (Hovinen ym. 2008).

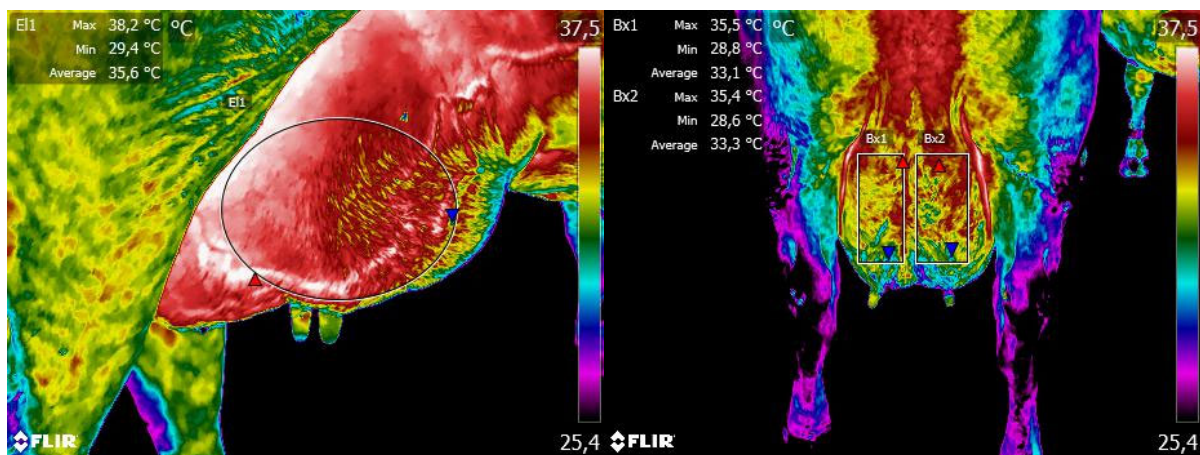
Kun eläimestä ulospäin näkyviä oireita antava eli kliininen utaretulehdus ilmenee, voidaan havaita joitakin eläimessä kokonaisvaltaisesti ilmeneviä eli systeemisiä oireita tai pelkästään utareessa havaittavia eli paikallisia oireita. Äkillinen eli akuutin tulehdusvaiheen vaste ja paikallinen tulehdusreaktio utareessa voivat aiheuttaa kuumeen nousun eläimelle (Hovinen ym. 2008) sekä verenvirtauksen muutoksia kudostasolla, joista voi olla seurauksena utareen ihon pintalämpötilan nousu (Colak ym. 2008, Polat ym. 2010, Bortolami ym. 2015). Näin siis varsinkin kuumeiset utaretulehdistyypit saattavat nostaa utareen pintalämpötilaa.

Seuraavissa kappaleissa on käyty tarkemmin läpi, mitä tutkimustuloksia utareiden lämpökuvantamisesta on saatu. Lisätietoa aiheesta voi lukea myös utareiden lämpökuvantamisesta kirjoitetuista katsausartikkeleista: Kunc ym. (2007, lypsytapahtuman tutkiminen ja arviointi lämpökuvantamisella, Tsekki), Sathiyabarathi ym. (2016a, utareen terveydentilan seuranta ja utaretulehduksen varhainen havaitseminen lämpökuvantamisella, Intia) sekä Sinha ym. (2018, utareen terveydentilan, piilevän ja näkyvän utaretulehduksen havaitseminen lämpökuvantamisella, Intia).

3.2.1. Paras utareen pintalämpötilan mittaushaara

Utareiden lämpökuvantamistutkimuksissa on käytetty hyvin erilaisia mittaustyökaluja ja kuvauskulmia (Kuva 15), mikä tekee eri tutkimustulosten vertailusta hankalaa. Schmidt ym. (2004) piirsivät suorakaiteen muotoisia alueita lämpökuviin utareen pintalämpötilaerojen mittaamiseksi. Hovinen ym. (2008) puolestaan tarkastelivat ympyröitä, joiden mitat olivat 40 x 40 pikseliä, ja jotka sijaitsivat utareen sivulla välittömästi vedinten yläpuolella, ja raportoivat, että kustakin utareesta tallennettava maksimilämpötila ei aina ollut mittausten kohteena olevan ympyrän sisäpuolella. Soroko ym. (2017) käyttivät samankaltaisia ympyröitä, joiden säde oli 50 pikseliä. Lisäksi ympyröiden yläpuolelle asetettiin vielä neliöt, joiden sivu oli 100 pikseliä. Näistä kuvioista mitattiin keskilämpötilat ennen ja jälkeen lypsyn. Porcionato ym. (2009) käyttivät utareen pintalämpötilan mittaamiseen kolmea aluetta, jotka valittiin ottamalla huomioon utareen korkeus pystysuoraan ylhäältä alas. Pezeshki ym. (2011) käyttivät kahta suorakaiteen muotoista aluetta, jotka olivat kooltaan 25 x 25 pikseliä ja sijaitsivat utareen takapuolella vedinten yläpuolella. Yang ym. (2018) tutkimuksessa utareesta otettujen lämpökuvien tarkastelua varten määritettiin maksimipintalämpötila kummankin takaneljänneksen lämpökuvasta halkaisijaltaan 40 pikselin ympyrästä vetimen tyven yläpuolelta.

Sitä vastoin vain harva tutkimus on verrannut eri mittaustapoja keskenään. Metzner ym. (2014) tutkimuksessa arvioitiin utareen pintalämpötiloja lehmille kokeellisesti aiheutetun *E. coli* -utaretulehduksen tunnistamiseksi. Lämpötilojen analysointiin käytettiin erilaisia geometrisiä analysointityökaluja, kuten monikulmio, suorakulmio ja viivat, sekä lämpötilamuuttujia minimi, maksimi ja alueen lämpötilan keskiarvo sekä keskijajonta. Merkittäviä pintalämpötilaeroja voitiin havaita käyttämällä monikulmiotyökalua sekä maksimilämpötilaa. Myös korkein kontrolli- ja *E. coli* tartutetun neljänneksen välinen pintalämpötilaero (2,1 °C) saatiin käyttämällä monikulmio- ja suorakulmiotyökaluja sekä maksimilämpötilaa. Metzner ym. (2014) ehdottivat, että kannattaa lämpökuvantaa vain utareen takaneljänneksiä, koska nämä tuottivat korkeimmat yhteneväisyydet peräsuolilämpötilan kanssa. Berry ym. (2003) sitä vastoin arvioi takaneljänneksen saattavan olla enemmän alttiina ympäristön lämpötilalle kuin etuneljänneksen.



Kuva 15. Utareita voidaan kuvantaa sivusta, takaa tai alhaalta päin. Useimmista kuvakulmista on haastavaa saada hyvää kuvaa kaikista neljänneksistä. Pintalämpötilan analysoinnissa voidaan käyttää erilaisia piirtötyökaluja maksimi-, minimi-, ja keskimääräisen lämpötilan määrittämiseksi. (Kuva: Heli Lindeberg/Luke)

3.2.2. Vedinten ja lypsytapahtuman tutkiminen lämpökuvantamisella

Berryn ym. (2003) utareen lämpökuvantamisen perustutkimuksessa seurattiin utareen pintalämpötilassa päivittäin tapahtuvia ja lehmien välisiä muutoksia. Utareen ihon pintalämpötila kohosi liikunnan seurauksena, mutta lämpötilan nousu oli kuitenkin pienempi kuin tutkimuksen toisessa osakokeessa aiheutetun tulehduksen aiheuttama pintalämpötilan nousu. Berry ym. (2003) mukaan utareen ihon

pintalämpötilalla on vuorokausirytmii, jossa eläinten välinen vaihtelu on pienintä klo 14 – 18 välisenä aikana, joten pintalämpötilamittaukset kannattaa tehdä tällä välillä. Tästä huolimatta osa lehmien utareen kuvantamistutkimuksista on tehty aamulypsyn yhteydessä (Porcionato ym. 2009, Digiovani ym. 2016, Soroko ym. 2017, Yang ym. 2018). Osa tutkimuksista ei mainitse lämpökuvantamisen vuorokaudenaikaa ollenkaan (Bortolami ym. 2015, Golzarian ym. 2017). Ja Pezeshki ym. (2011) tutkimuksessa todetaan, että lämpökuvannettiin aina samaan aikaan vuorokaudesta kertomatta tarkkaa aikaa.

Jo pelkän konelypsyn on todettu nostavan terveiden vedinten pintalämpötilaa (Eichel 1992) jopa kahden asteen verran (Hamann 1985). Paulrud ym. (2002, 2005) mukaan vedinten pintalämpötilaan vaikuttivat lypsykoneessa käytetyt nännikumit. Vedinten lypsyyen valmistelun aikana vedinten pintalämpötila aleni. Konelypsyn aikana vedinten pintalämpötila kohosi. Vegricht ym. (2007) mukaan vedinten kärjen pintalämpötila konelypsyn jälkeen oli 1,7 – 2,7 °C korkeampi kuin lämpötila ennen lypsä. Samansuuntaisia tuloksia lehmällä ovat raportoineet myös Barth (2000), Hanusová ym. (2016), Junga ym. (2016), Pampariene ym. (2016) ja Ševčík ym. (2016), sekä vuohilla Alejandro ym. (2014). Sen sijaan laktaatiossa olevien kameleiden vedinten pintalämpötila oli ummessa oleviin kameleihin verrattuna korkeampi (Samara ym. 2013) ja lehmistä poiketen laski noin asteen verran (Ayadi ym. 2012) tai noin 1,6 °C (Aljumaah ym. 2012) 0 – 1 h konelypsyn jälkeen. Uuhien utareen takaosan pintalämpötila laski noin asteen verran jo konelypsyn aikana (Stelletta ym. 2007). Kunc ym. (2018) mukaan robottilypsy nosti lehmien vedinten pintalämpötilaa vähemmän (1,6 °C) kuin perinteinen asemalypsy (1,8 °C).

Pampariene ym. (2016) tutkimuksessa vedinten pintalämpötila mitattiin vetimen sulkijan alueelta. Kylmässä ympäristössä (-1 °C) CMT-positiivisten utareneljännesten vetimen sulkijan pintalämpötila oli keskimäärin 9,6 °C korkeampi kuin CMT-negatiivisten utareneljännesten. Vastaavasti lämpimässä ympäristössä (18 °C) CMT-positiivisten utareneljännesten vetimen sulkijan pintalämpötila oli keskimäärin 4,6 °C korkeampi kuin CMT-negatiivisten utareneljännesten.

Poikalainen ym. (2012) vertasivat utareen pintalämpötiloja ennen ja jälkeen robottilypsyn eivätkä löytäneet eroja ennen ja jälkeen lypsyn, eivätkä oikean ja vasemman puolen neljännesten pintalämpötilojen välillä. Sen sijaan Soroko ym. (2017) mukaan utareen takaneljännesten pintalämpötila oli tilastollisesti merkitsevästi korkeampi ennen lypsä kuin lypsyn jälkeen. Soroko ym. (2017) tulokseen on saattanut vaikuttaa sekä likaisten utareiden pesu ennen kuvantamista että utareiden lämpökuvantaminen ennen lypsä utareiden pyyhinnän jälkeen ja lypsyn päätyttyä vedinten kaston jälkeen. Yang ym. (2018) mukaan lehmien utareen takaneljännesten pintalämpötilaan ennen ja jälkeen lypsyn vaikutti lehmän lypsämä maitomäärä: 15 – 20 kg aamulypsyllä lypsävien lehmien takaneljännesten pintalämpötila oli korkeampi kuin 0 – 10 kg lypsävien. Lämpötilaero oli tilastollisesti merkitsevä mitattaessa pintalämpötilat lypsyn jälkeen, muttei ennen lypsä, jonka vuoksi Yang ym. (2018) suosittivat, että utareen pintalämpötilat mitattaisiin aina ennen lypsä, jotta maitomäärällä ei olisi vaikutusta mitattavaan pintalämpötilaan.

3.2.3. Kokeellinen utaretulehdus

Utareen lämpökuvantaminen olisi hyödyllistä, mikäli utaretulehdus havaittaisiin jo ennen kuin lehmän sairastuminen näkyy ulospäin. Useissa tutkimuksissa lehmille on aiheutettu utaretulehdus, tarkkailtu tulehduksen kehittymistä ja arvioitu, voiko utaretta lämpökuvantamalla havaita tulehduksen ennen sen näkyviä oireita. Scott ym. (2000) totesivat, että *E. coli* -bakteerin lipopolysakkaridilla (LPS) keinotekoisesti tartutettujen utareneljännesten pintalämpötila nousi noin tunnin kuluttua tartutuksesta, mutta peräsuolilämpötila vasta kuuden tunnin kuluttua. Hovinen ym. (2008) samanlaisessa kuuden lehmän tutkimuksessa todettiin, että lämpökuvantaminen pystyi havaitsemaan 1 – 1,5° C pintalämpötilan nousun kunkin lehmän vasemmassa etuneljänneksessä, johon oli keinotekoisesti aikaansaatu kliininen utaretulehdus. Utareen pintalämpötilat nousivat 4 tunnin kuluttua LPS-

infusion jälkeen ja utareen pintalämpötila oli suoraviivaisesti yhteydessä lehmien peräsuolilämpötilaan. Lämpökameralla ei kuitenkaan havaittu tulehduksen paikallisoireita utareessa. Paikallisoireet ilmaantuivat jo kaksi tuntia aiemmin kuin kameralla näkyvä utareen pintalämpötilan nousu. Lämpökuvauksella ei siis voitu ennustaa utaretulehduksen alkamista. Tärkeää olisi nimenomaan havaita utareen paikalliset oireet ennen kuin systeemiset oireet (kuume ja syömättömyys) alkavat. Utareen ihon korkeimmat pintalämpötilat mitattiin utareen ja takajalan välisestä uurteesta, eikä kohta aina sijainnut tartutetun neljänneksen puolella utareta.

Hurnik ym. (1984) onnistuivat lämpökuvantamisella saamaan kiinni neljä kuudesta utaretulehduksesta 1 – 3 vuorokautta ennen ulospäin näkyviä oireita, mutta Hovinen ym. (2008) mukaan näkyvän utaretulehduksen tunnusmerkit olivat puutteellisesti raportoidut. Myös Scott ym. (2000), Kennedy (2004) ja Willits (2005) totesivat, että utareen pintalämpötilan nousu – jopa yli 2 °C – havaittiin usein ennen kuin muita ulospäin näkyviä tulehduksen merkkejä ilmaantui. Willits (2005) mukaan kahdella kuvatuista lehmistä oli kohonneen utareen pintalämpötilan lisäksi kohonnut maidon soluluku noin kolme viikkoa aiemmin tehdyssä somaattisten solujen laskennassa. Syitä tulehduksen merkkien eriaikaiseen ilmaantumisen Hovinen ym. (2008) ja edellä mainittujen tutkimusten välille ei voi löytää, koska jälkimmäisten tutkimusten yksityiskohtia ei ole raportoitu riittävän tarkasti. Scott ym. (2000) ja Willits (2005) ovat vertaisarvioimattomia kirjoituksia konferenssien abstraktikirjoissa ja Kennedy (2004) on ammattilehtiartikkeli.

Metznerin ym. (2015) tutkimuksessa, jossa viiden holsteinlehmän oikeanpuoleiset takaneljännekset tartutettiin kokeellisesti *E. coli* -bakteerilla, havaittiin lämpökuvantamisen oleva hyödyllinen keinotekoisesti aiheutetun utaretulehduksen havaitsemiseen, kun yhden tai molempien takaneljänneksen enimmäispintalämpötilat arvioitiin vähintään kahden tunnin välein. Lehmien peräsuolilämpötila nousi 11 tuntia tartutuksen jälkeen (huippu 13 h kohdalla) ja laski 19 tunnin kuluttua tartutuksen jälkeen. Utareen molempien takaneljänneksen pintalämpötila nousi 11 – 17 tunnin välillä tartutuksesta (huippu 13 h kohdalla). Sen sijaan utareen paikallisoireiden alkamisen ajankohtaa ei mainita. Kaikkien lehmien oikea takaneljännes turposi, maidon ulkonäkö muuttui, maidon soluluku nousi yli 400 000 soluun/ml ja maitonäytteen viljelyssä eristettiin *E. coli* -bakteeri.

Pezeshkin ym. (2011) on raportoinut lämpökuvantamisen kannalta negatiivisen tuloksen tutkimuksessaan, jossa oli yhdeksän ensikertaa poikinnutta holstein-friisiläislehmää. Tutkimuksessa todettiin, että lämpökameralla pystyttiin havaitsemaan 2 – 3 °C:n muutokset utareen pintalämpötilassa lehmien vasemmanpuoleisissa utareneljänneksissä, joihin oli kokeellisesti tartutettu *E. coli* -bakteeri. Utareneljänneksen lämpötilamuutokset näkyivät kuitenkin vasta silloin, kun utaretulehduksen ulospäin näkyvät oireet ilmaantuivat. Tämän vuoksi kirjoittajat päättelivät, ettei lämpökuvantaminen ollut hyödyllinen tekniikka mahdollisen *E. coli* -utaretulehduksen havaitsemiseen tulehduksen varhaisessa vaiheessa. Myöskään Castro-Costa ym. (2014) eivät pystyneet *E. coli* -bakteeritartutuskokeessaan erottelemaan terveitä ja piilevästi tai näkyvästi tulehtuneita neljänneksiä lämpökuvantamalla 83 uuden utareet.

3.2.4. Piilevä utaretulehdus

Suurin haaste lämpökuvantamisen käyttämiseen utareen terveydentilan arvioinnissa on kuitenkin piilevän utaretulehduksen havaitseminen. Sen havaitseminen mahdollisimman aikaisessa vaiheessa hyödyttäisi maidontuotantoa suuresti. Sairastuneet neljännekset saataisiin nopeammin hoitoon ja tuotannon menetykset olisivat pienemmät. Tutkimuksissa on raportoitu piilevän utaretulehduksen tunnistamiseen lämpökuvantamalla sekä myönteisiä että kielteisiä tai epäyhtenäisiä tuloksia. Kaikki kokeet on suoritettu hyvin erilaisilla määrillä eläimiä tai erilaisissa olosuhteissa: tutkimuksen kohteena olevat utareneljännekset, ihon pintalämpötilan arviointiin valittu kohta utareen pinnalta, valitut lämpötilaindikaattorit (enimmäislämpötila, keskilämpötila, erot utareneljänneksen välillä, erot ennen

ja jälkeen tulehduksen jne.), ympäristömuuttujat (ilman lämpötila, -kosteus jne.) ja utareen terveydentilan määrittäminen (SCC, CMT, jne.) vaihtelevat näissä tutkimuksissa. Siksi tutkimuksia on vaikea verrata toisiinsa.

Colak ym. (2008) mukaan lämpökuvantamisesta saattaisi olla apua piilevän utaretulehduksen toteuttamiseen. He havaitsivat 94 lypsylehmää käsittävissä tutkimuksissaan vahvan korrelaation ($r=0,92$) lämpökameralla mitatun utareen pintalämpötilan ja CMT-testillä arvioidun utareneljänneksen terveydentilan välillä. Kun CMT-testin tulos nousi arvosta 0 arvoon 3, utareen ihon pintalämpötila nousi 33,2 °C:sta 36,2 °C:een. Keskimääräinen utareen ihon pintalämpötila oli 34 °C ja keskimääräinen peräsuolilämpötila 38,5 °C. CMT-testin raja-arvot olivat CMT +3; 7 milj solua/ml, CMT +2; 2 milj solua/ml, CMT +1; 1 milj solua/ml ja CMT 0; 0,2 milj solua/ml. Barth ym. (2000) tutkimuksessa utareen keskimääräinen pintalämpötila oli puoli astetta korkeampi neljänneksissä, joiden somaattisten solujen lukumäärä ylitti 100 000 solua/ml verrattuna neljänneksiin, joiden SCC oli alle 100 000 solua/ml (34,1 vs. 33,6 °C). Otokoko tässä tutkimuksessa oli vain kuusi lehmää. Myös Martins ym. (2013) 37 uuen tutkimuksessa todettiin korkeamman utareen pintalämpötilan liittyvän korkeaan solulukuun.

Porcionato ym. (2009) käytti lämpökamerakuvantamista 70 toisen ja kolmannen lypsykauden Gir lehmien piilevän utaretulehduksen tunnistamiseen. Utareen saman puolen etu- ja takaneljänneksen pintalämpötila mitattiin kolmelta korkeudelta (utareneljänneksen alueelta, utareneljänneksen ja vetimen liitoskohdan alueelta ja vetimen alueelta) ja verrattiin maidon solulukuihin ja maitonäytteiden bakteerilöydöksiin. Utareneljänneksen pintalämpötila oli korkeampi kuin utareneljänneksen ja vetimen liitoskohdan tai vetimen alueelta mitattuna. Pintalämpötilan ja logaritmisien solulukujen välillä ei ollut yhteyttä eikä myöskään kolmelta eri korkeudelta mitatun pintalämpötilan ja utaretulehduksen aiheuttajamikrobin välillä. Tutkijat päättelivät, että lämpökamera mahdollisti Gir lehmien eri korkeuksilta mitattujen pintalämpötilojen vaihteluiden määrittämisen, muttei ollut tehokas piilevän utaretulehduksen tunnistamiseen.

Polat ym. (2010) tutkivat Colak ym. (2008) kaltaisessa tutkimuksessa 62 Brown Swiss lypsylehmän ryhmällä lämpökuvantamisen tarkkuutta verrattuna CMT-testiin havaita piilevä utaretulehdus, jonka rajaksi tässä kokeessa oli asetettu >400 000 solua/ml. Tulokset osoittivat utareen pintalämpötilan ja CMT-luokan välisen positiivisen korrelaation ($r=0,86$). Lisäksi SCC:n kohotessa utareen pintalämpötila-arvot kohosivat logaritmisesti ($r=0,73$). Piilevän utaretulehduksen utareneljänneksen pintalämpötilat olivat 2,4 °C korkeammat kuin terveiden neljänneksen pintalämpötilat. Utareen pintalämpötilan raja-arvon ollessa 34,7 °C, lämpökuvantaminen saavutti 95,6 %:n herkkyuden ja 93,6 %:n spesifisyyden (Ks. Kappale 7, Käsitteitä). Tämä tulos oli linjassa CMT-testin 88,9 %:n herkkyuden ja 98,9 %:n spesifisyyden kanssa.

Bortolamin ym. (2015) tutkimuksessa lämpökuvauksen diagnostinen kyky havaita piilevä utaretulehdus raportoitiin alhaiseksi. Tutkimukseen osallistuneiden 98 holstein-friisiläislehmän maitonäytteistä mitattiin somaattisten solujen lukumäärä ja tehtiin bakteriologiset viljelyt. Tulokset osoittivat, ettei utaretulehduksen aiheuttajamikrobien ja utareen pintalämpötilan välillä ollut merkitsevää yhteyttä. Kirjoittajat löysivät kuitenkin merkitsevän yhteyden somaattisten solujen luokan (somatic cell score, SCS, joka laskettiin logaritmisena muunnoksena SCC:stä), ja utareen pintalämpötilan väliltä. Tämän perusteella kirjoittajat päättelivät, että lämpökuvantaminen voi olla hyödyllinen seulontatyökalu utareen tulehduksen arvioinnissa. Eli vaikka tutkimuksessa ei voitu ennustaa, oliko utareneljänneksessä bakteeri, löydettiin kuitenkin korkeasti soluttavat lehmät, joiden utareneljänneksistä kannatti ottaa bakteriologinen näyte jatkotutkimuksiin.

Berryn ym. (2003) tutkimuksessa, johon osallistui 10 useamman kerran poikinutta holstein-friisiläislehmää, tutkittiin utareen pintalämpötilan päivien sisäistä ja välistä vaihtelua tavoitteena parantaa perustietämystä mahdollisten tulevien utaretulehduksen varhaisen havainnoinnin mene-

telmien kehittämiseksi. Lämpökuvantamista käytettiin myös utareen pintalämpötilan ja ympäristötekijöiden mahdollisten vaikutusten mittaamiseen. Tulokset osoittivat, että lehmien utareen pintalämpötila oli 3 – 5 astetta viileämpi kuin peräsuolilämpötila ja että aikaisempien päivien utareen pintalämpötilaan perustuva malli voisi ennustaa seuraavan päivän utareen pintalämpötilan. Malli selitti 75 % pintalämpötiloissa esiintyvistä vaihtelusta, minkä lisäksi selittämättömän osan vaihtelu oli alle 0,5 °C. Tämän katsottiin viittaavan siihen, että lämpökuvantamisella voisi mahdollisesti havaita utaretulehdustapaukseen liittyvän utareen pintalämpötilan nousun. Jotta kuitenkin saavutettaisiin hyvä ennustustarkkuus, mallin tulisi ottaa huomioon joitakin ympäristörajoituksia. Tämän takia tarvitaan uusia kokeita eri kenttäolosuhteissa, minkä ovat todenneet monet muutkin (esimerkiksi Hovinen ym. 2008, Colak ym. 2008, Polat ym. 2010). Myös Berry ym. (2003) ja Metzner ym. (2015) mukaan on kehitettävä tehokkaampia menetelmiä, jos lopullinen tavoite on automatisoida utareen pintalämpötilan mittaaminen lämpökuvauksella.

3.2.5. Ensimmäiset tilaoloissa tehdyt utareen lämpökuvantamiseurannat

Lämpökuvantamistutkijoiden mielenkiinto kohdistuu nykyisin tekniikan todellisten kykyjen selvittämiseen. Ensimmäinen tilaolosuhteissa tehty utaretulehduksen havaitsemiseen tähtäävä lämpökamerakoe on Zaninellin ym. (2018) tutkimus, jossa kuvannettiin kolmella eri automaattilypsytilalla Pohjois-Italiassa olevien 155 holstein-friisiläislehmän utareet. Utareet lämpökuvannettiin ennen lypsyn aloittamista utareen kummaltakin sivulta 60 cm:n etäisyydeltä päivittäin kuukauden ajan. Lehmien maidon solupitoisuuksia 200 000 solua/ml ja 400 000 solua/ml käytettiin raja-arvoina arvioitaessa utareen terveydentilaa. Raja-arvon ylittyessä lehmän katsottiin sairastavan piilevää utaretulehdusta. Kuvaukset tehtiin tammikuussa ulkolämpötilan ollessa keskimäärin 8 °C. Tarkoituksena oli tutkia mitatun maksimipintalämpötilan kykyä erottaa mahdolliset utaretulehdustapaukset terveistä utareista.

Käytettäessä SCC:n kynnyksarvona 200 000 solua/ml saadut tulokset osoittivat testin herkkyydeksi 78,6 % ja spesifisyydeksi 77,9 % (Zaninelli ym. 2018). Vastaavasti käytettäessä SCC:n kynnyksarvona 400 000 solua/ml saatiin herkkyydeksi 71,4 % ja spesifisyydeksi 71,6 %. Tutkimuksen herkkyyss- ja spesifisyystulokset ovat alhaisemmat kuin aiemmissa kontrolloiduissa olosuhteissa tehdyissä lämpökuvantamistutkimuksissa (Polat ym. 2010, Metzner ym. 2014, Sathiyabarathi ym. 2016b, Samara ym. 2014 (lypsykamelii)). Tulosta voidaan kuitenkin pitää kelvollisena tämän tekniikan ensimmäisenä tilasovelluksena ja tulokset vahvistavat saman, minkä aiemmat tutkimukset (Hovinen ym. 2008, Polat ym. 2010, Colak ym. 2008, Bortolami ym. 2015, Poikalainen ym. 2012, Metzner ym. 2015, Berry ym. 2003, Martins ym. 2013, Metzner ym. 2014, Willits 2005) eli utareen pintalämpötilan määrittämistä voidaan mahdollisesti käyttää utareen terveydentilan nopeaan ja kudoksiin tunkeutumattomaan (= ei-invasiiviseen) arviointiin. Zaninelli ym. (2018) mukaan lisätutkimuksia kuitenkin tarvitaan.

Byrne ym. (2018) tutkimuksen tarkoituksena oli määrittää lypsävien lehmien utareen pintalämpötilan ja somaattisen solujen lukumäärän välinen yhteys. Utareet lämpökuvannettiin iltalypsyllä kerran päivässä kahden kuukauden ajan. Utareet kuvattiin lypsyasemalla takaapäin utareen alapuolelta niin, että kaikki neljännekset saatiin kuvaan. Lämpökuvantamisen jälkeen otettiin maidonäytteet somaattisen soluluvun määrittämiseksi. Ympäristö- (esimerkiksi ilman lämpötila ja -kosteus, sademäärä ja aika utarekarvojen edellisestä ajelusta) ja lehmätekijät (esimerkiksi poikimakerta ja maidontuotannon vaihe) kirjattiin kokeessa päivittäin ylös. Ilman lämpötila mittauksissa vaihteli 2,6 ja 16,2 °C:n välillä.

Jokaisesta lämpökuvasta otettiin neljänneskohtaisesti talteen suuri joukko erilaisia lämpötilaparametrejä (Byrne ym. 2018); mukana oli perinteisiä parametrejä, kuten minimi, maksimi ja keskimääräinen pintalämpötila, mutta myös monimutkaisempia pintalämpötilaan, kuvapistelukumäärään ja kuvan pinnanmuotoon perustuvia mittareita. Suoran lämpötilamuuttujien ja soluluvun välisen lineaarisen yhteyden lisäksi tutkimuksessa selvitettiin, voiko lehmää käyttää omana kontrollinaan tai voiko yksilön pintalämpötilan muutoksia verrata koko karjan viiden matalimman neljänneslämpötilan pe-

rusteella määritettyyn perustasoon. Lämpötilamuuttujista yritettiin rakentaa myös ennustava malli, jolla voitaisiin erottaa utaretulehdukseen sairastuneet eläimet (solulukku >400 000 solua/ml) terveistä. Vaikka useimmissa näistä analyyseistä soluluvun ja utareen pintalämpötilan eri muuttujien välillä havaittiin yhteys, niin korrelaatiot ja mallien selitysasteet olivat liian heikkoja, jotta yhteyttä voitaisiin hyödyntää käytännössä, ja useissa lämpötilamuuttujissa ilman lämpötila vaikutti suuresti mittausalokseen.

Byrne ym. (2018) tulosten julkaisua ennen ja myös sen jälkeen on kuitenkin julkaistu tutkimustuloksia, joissa utareen pintalämpötila on korreloinut positiivisesti maidon somaattisen soluluvun kanssa niin naudalla kuin muillakin maidontuotantoeläimillä (Barth 2000, Polat ym. 2010, Martins ym. 2013, Ayadi ym. 2013, Samara ym. 2014, Bortolami ym. 2015, Sathiyabarathi ym. 2016, Sathiyabarathi ym. 2018a, Sathiyabarathi ym. 2018b, Zaninelli ym. 2018, Juozaitiene ym. 2019). Yhtenä mahdollisena syynä erisuuntaisiin tuloksiin muissa tutkimuksissa saattavat olla tasaisemmat ja tutkittavalle eläimelle lämpöneutraalilla alueella olevat mittausolosuhteet (Byrne ym. 2018). Byrne ym. (2018) mukaan lämpökuvantamalla utareiden pintalämpötiloja käytännön olosuhteissa ei voida ennustaa maidon solulukua.

3.2.6. Yhteenveto: Lämpökuvantaminen ei ole vielä riittävän tehokas menetelmä utareterveyden seurantaan

Utareta voidaan lämpökuvantaa sivuilta ja takaa, tai utareen alta niin, että kaikki utareneljännekset näkyvät kuvassa yhtä aikaa. Tutkimukset eivät ole pystyneet selvittämään, millä kuvaustavalla saataisiin todenmukaisin tulos utareen terveydentilasta. Käytännössä usein joudutaan kuvaamaan tavalla, jonka ympäröivät rakenteet lypsyasemalla tai lypsyrobotilla sallivat. Keinotekoisesti aiheutettuja äkillisiä utaretulehduksia ei ole pystytty ennustamaan lämpökuvantamisella vaan utareen pintalämpötilan nousu on todettu vasta, kun lehmät ovat jo sairastuneet. Piilevissä utaretulehduksissa lämpökuvantamisella on havaittu vain pieniä pintalämpötilamuutoksia tai ei mitään muutoksia, joten toistaiseksi piileviä utaretulehduksia ei pystytä tehokkaasti ennustamaan lämpökuvantamisen avulla. Ensimmäisissä tilaoloissa tehdyissä seurantakokeissa utaretulehdukset pystyttiin ennustamaan huommin kuin koeolosuhteissa tehdyissä kokeissa. Automaattisten seurantajärjestelmien kehittämisessä tullaan keskittymään yksittäisen lehmän utareen pintalämpötilan päivittäiseen seurantaan, koska utaretulehdusten ennustamiseksi ilmeisen pienet pintalämpötilavaihtelut ovat ennustamisen edellytys. Varsinkin piilevän utaretulehduksen ollessa kyseessä utareen lämpökuvantaminen kerran päivässä ei riitä paljastamaan pieniä pintalämpötilaeroja.

3.3. Sorkkien lämpökuvantaminen

Karjankasvatuksessa terveet sorkat ovat ensiarvoisen tärkeitä. Nautakarjan ontuminen aiheuttaa tuotantomerenetyksiä ja huonontaa eläinten hyvinvointia maailmanlaajuisesti (Huxley 2013). Suomessa ontumisen yleisyydeksi pihattolypsynavetoissa on arvioitu yli 20 % (Sarjokari ym. 2013). Sorkkien epänormaalisuudet aiheuttavat suurimman osan nautakarjan ontumisista. Monien tutkimusten mukaan sorkkasairaudet aiheuttavat lähes 90 % kaikista ontumistapauksista ja 76 – 84 % vaurioista havaitaan takajaloissa (Murray 1996).

Perinteisesti sorkkavauriot on määritetty nostamalla jalka sorkkanhoitotelineessä normaalin sorkkahoidon yhteydessä tai kun lehmä näyttää ontuvan (Manske ym. 2002, Thomsen ym. 2008, Holzhauser ym. 2006). Ontumislukittelu on myös yleinen subjektiivinen lähestymistapa ontumisen arviointiin ilman jalkojen nostamista (Schlageter-Tello ym. 2014). Tämä tapa on kuitenkin aikaa vievä varsinkin isoissa karjoissa eikä aina ole riittävän tarkka sorkkavaurioiden havaitsemiseen (Tadich ym. 2010). Tämän lisäksi sorkkavauriot eivät aina näy ontumisena, jolloin ne huomataan vasta, kun vaurio on jo vakava (Laven & Proven 2000, Stokes ym. 2012). Sorkkavaurioiden varhainen havaitseminen on tär-

keää ontumisen negatiivisten vaikutusten vähentämiseksi, hoitojen onnistumisen lisäämiseksi ja sairalloisten muutosten eteenpäin kehittymisen estämiseksi (Groenevelt ym. 2014).

Hevospraktiikassa lämpökuvantamista on käytetty viimeisten 20 vuoden aikana täydentämään ultraäänitutkimusta ja skintigrafiaa (isotooppikuvausta gammakameralla) tulehduksen aiheuttamien ihon pinnan lämpömuutosten määrittämiseen hevosten erilaisissa sairaustiloissa, selkävivussa, Hornerin-oireyhtymässä, nivelrikossa, jännetulehduksessa, murtumissa ja kavionivelen sairauksissa (Cetinkaya & Demirutku 2012). Lämpökuvantamista käytetään melko rutiininomaisesti hevosen ontumisen havaitsemiseen joko yksin tai yhdistettynä perinteisiin ontumistutkimuksiin, joihin liittyvät alueelliset hermojen puudutukset ja jalkojen taivutuskokeet, ja lämpökuvantaminen onkin yleisesti käytössä hevosten ostotarkastuksissa ja suorituskyvyn arvioinneissa (Turner 1991, 1998, 2001). Hevosen etu- ja takajalkojen välisten lämpökuvien tuloksia verrataan ja symmetriset alueet, joissa on huomattavia pintalämpötilaeroja, ovat kiinnostavia lisätutkimuksia kuten ultraäänitutkimusta, röntgentutkimusta tai lihasbiopsiaa ajatellen.

Lehmien lämpökuvantamistutkimuksissa on mitattu sorkkien pintalämpötilaa normaalin sorkkahoidon jälkeen (Alsaod ym. 2015a), tutkittu sorkkien pintalämpötilan yhteyttä päkiäispatjan paksuuteen (Oikonomou ym. 2014) ja tarkasteltu sorkan pohjan lämpötiloja eri ontumaluokissa (Rodriquez ym. 2016), on kuvattu yksittäisiä potilastapauksia (Cockcroft ym. 2000), on yritetty tunnistaa suu- ja sorkkatautia etujalkojen maksimipintalämpötilan avulla (Rainwater-Lowett ym. 2009) sekä tunnistaa ontumista (Schmidt ym. 2003, Munsell ym. 2006, Renn ym. 2014) ja ontumista aiheuttavia sorkkasairauksia (sorkkakuume ja vertymät; Nikkhah ym. 2005, Wilhelm ym. 2014, sorkka-alueen ihotulehdus; Stokes ym. 2012, Alsaod ym. 2014, Marti ym. 2015, Orman & Endres 2016, Harris-Bridge ym. 2018, valkoviivan vauriot ja anturahaavaumat; Orman & Endres 2016, Bobić ym. 2017, Ganesella ym. 2018).

Lehmien ontumisen ja sorkkavaurioiden tunnistamisessa on käytetty myös infrapunalämpömittaria lämpökameran sijasta (Main ym. 2012, Wood ym. 2014, Lin ym. 2018). Infrapunalämpömittarit perustuvat myös lämpösäteilyn mittaamiseen, mutta lämpökameroista poiketen niissä ei ole laajaa ilmaisinmatriisia, vaan yksi ilmaisin, jolloin pintalämpötilan mittaus on pistemäinen (FLIR Systems 2015). Infrapunalämpömittarit ovat osoittautuneet hyvin kyvykkäiksi tunnistamaan sorkkien tulehdussairauksia (Wood ym. 2014). Kaikkien infrapunatunnistimien ylivoimaisesti menestyksekkäin sovellus on juuri paikallisen tulehdustaudin havaitseminen (Montanholi 2015).

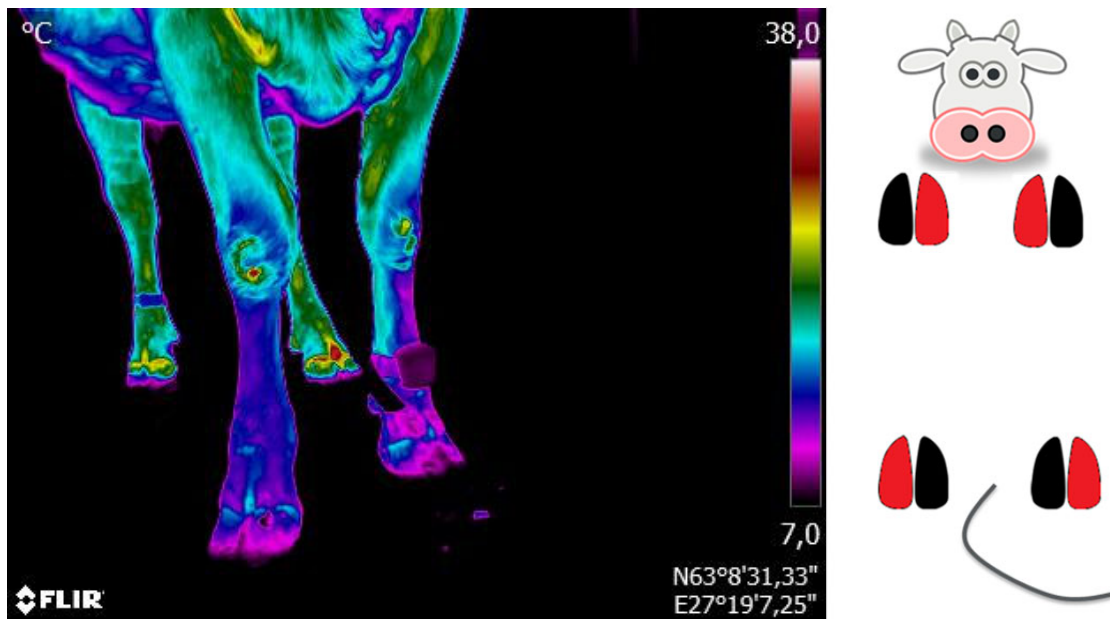
Naudan lisäksi lämpökameralla on yritetty tunnistaa tiineiden emakoiden ontumista (Amezcuca ym. 2014), lampaan sorkkavaurioita (Talukder ym. 2015a, Byrne ym. 2019) sekä kanojen (Wilcox ym. 2009) ja kalkkunoiden (Moe ym. 2018) varvaspaiseita. Katsausartikkeleita on kirjoitettu nautakarjan ontumisen havainnoinnista (Alsaod ym. 2015b, Sveitsi-Saksa) ja sorkkaterveyden määrittämisestä (LokeshBabu ym. 2018, Intia) lämpökuvantamisella.

3.3.1. Perustutkimuksia sorkkien lämpökuvantamisesta

Ympäristön lämpötila vaikuttaa sorkkien pintalämpötilaan. Alsaod & Büscher (2012) havaitsivat, että ympäristön lämpötilan noustessa 3,5 °C sorkanrajan pintalämpötila nousi vastaavasti 1,8 °C. Kun ympäristön lämpötila nousi 8,1 °C, sorkanrajan pintalämpötila nousi 3,5 °C. Samassa kokeessa havaittiin, että sorkanrajan pintalämpötila oli keskimäärin 2 °C korkeampi alkulypsykauden lehmillä kuin loppulypsykauden lehmillä. Wilhelm ym. (2014) totesivat hiehojen/ensikoiden sorkkien olevan lämpötilaltaan korkeampia (ka 19,1 ± 2,6 °C) kuin vanhempien lehmien sorkkien (ka 17,9 ± 2,9 °C).

Terveiden takasorkkien on havaittu olevan lämpimämmät kuin terveiden etusorkkien (Alsaod ym. 2014, Wilhelm ym. 2014). Myös sorkkapuolien välillä on havaittu lämpötilaeroja (Kuva 16) (Wilhelm ym. 2014, Alsaod ym. 2015). Alsaod ym. (2015) tutkimuksessa lämpökameralla kuvannettiin puolen metrin etäisyydeltä yhteensä 81 lehmän kaikkien sorkkien pintalämpötila kuudessa parsinavetassa

ennen normaalia sorkkahoitoa ja 21 vuorokautta sorkkahoidon jälkeen. Kuvista määritettiin korkein sorkanrajan ja korkein ihon pintalämpötila sekä sisä- ja ulkosorkan korkeimpien pintalämpötilojen erotus. Etu- ja takasorkat arvioitiin erikseen. Ennen sorkkahoitoa ulkosorkat olivat lämpimämmät kuin sisäsorkat takajalkojen osalta. Sen sijaan etujaloissa ulko- ja sisäsorkissa ei ollut lämpötilaeroja. Kolmen viikon kuluttua sorkkahoidosta takasorkkien puoliskojen välinen lämpötilaero oli pienentynyt vähintään 0,25 °C, kun taas etusorkkien puoliskojen välinen lämpötilaero oli kasvanut korkeintaan 0,13 °C. Tutkimuksessa todettiin sorkkahoidon merkittävästi pienentävän takasorkkien puoliskojen pintalämpötilaeroa. Säännöllisen sorkkahoidon ansiosta takasorkkien puoliskojen painojakauma taasoittuu, jonka seurauksena takasorkkien puoliskojen mitattavissa oleva lämpötilaero pienenee.



Kuva 16. Lehmän takasorkat ovat lämpimämmät kuin etusorkat. Takasorkissa ulkosorkka on yleensä sisäsorkkaa lämpimämpi ja etujaloissa päinvastoin. Lämpötilaerot johtuvat lehmän painon jakautumisesta epätasaisesti eri sorkille ja niiden puoliskoille – enemmän painoa kantavat osat ovat lämpimämpiä. (Kuva: Lilli Frondelius/Luke)

3.3.2. Ontumisen ja erilaisten sorkkasairauksien tunnistaminen lämpökuvantamisella

Lämpökuvantamisella on potentiaalia naudan ontumisen tunnistamiseen, vaikkakin kirjallisuudessa on aiheesta ristiriitaisia tuloksia. Koska ontuvan lehmän sorkan hoitaminen vaatii lehmän laittamista sorkkatelineeseen ja jalan nostamista, olisi tärkeää kehittää uusia seulontamenetelmiä tunnistamaan lehmät, jotka todennäköisimmin hyötyisivät sorkan tutkimisesta ja hoidosta (Main ym. 2012). Stokes ym. (2012) mukaan sorkkavaurioiden esiintyminen oli yhteydessä takajalan takapinnan kohonneeseen pintalämpötilaan. Whay ym. (2004) ja Munsell ym. (2006) mukaan ontuvien lehmien jalkojen pintalämpötilat olivat korkeampia kuin ei-ontuvien lehmien. Oikonomou ym. (2014) tutkimuksessa 216 lypsylehmän (4 – 10 päivää lypsyssä olleet) takasorkkien pohjat lämpökuvannettiin vähintään kolmen minuutin kuluttua sorkkahoidon jälkeen kahden metrin etäisyydeltä. Ennen sorkkahoitoa lehmät oli ontumaluokiteltu asteikolla 1 – 5 (1, terve; 5, vakava ontuminen). Sorkkahoidon jälkeen mitattiin myös päkiäispatjan – sorkkaluun ja martosorkan välissä olevan rasvakudoksen – paksuus ultraäänellä. Mitä pahemmin lehmä ontui sitä korkeampi oli myös anturan lämpötila, ja mitä paksumpi päkiäispatja oli, sitä matalampi oli anturan lämpötila.

Rodriquez ym. (2016) tutkimuksessa lypsylehmät arvosteltiin neliportaisen ontumislukittelun mukaan: 0 = ei onnu, 1 = epätasainen, 2 = ontuu lievästi, 3 = ontuu vakavasti. Kuhunkin ontumaluokkaan

valikoitui 30 lehmää 17 eri tilalta. Sorkkatelineessä ontuvan jalan sorkka pestiin ja kuivattiin, odotettiin viisi minuuttia, minkä jälkeen sorkan pohja lämpökuvannettiin, jalka laskettiin alas ja otettiin lämpökuvat sorkan edestä, takaa ja sivulta 0,4 metrin etäisyydeltä. Pintalämpötilojen määrittämiseksi sorkan pohja jaettiin kahdeksaan eri alueeseen ja sorkan sivut kolmeen eri alueeseen. Kultakin alueelta mitattiin pintalämpötila viidestä eri kohdasta ja näiden keskiarvoa käytettiin sorkan pohjan ja sorkan sivujen keskimääräisen pintalämpötilan laskemisen. Sorkan edestä, takaa, sivusta ja pohjasta mitatut pintalämpötilat vaihtelivat 16,5 – 24,7 °C:n välillä. Ontumaluokan 3 lehmillä oli korkeampi sorkan pintalämpötila kuin ontumaluokan 0 lehmillä. Sen sijaan lämpökamerakuvantamisella ei saatu esille merkittäviä lämpötilaeroja ontumaluokan 1 ja 2 lehmien välillä. Rodriguez ym. (2016) totesivat, ettei lämpökamerakuvantaminen ole käyttökelpoinen menetelmä tiloille, koska sillä ei pystytä havaitsemaan varhaista ontumista.

Wilhelm ym. (2014) tutkimuksessa lämpökuvannettiin kolmen lypsykarjatilalla 123 lehmän ja hiehon kaikkien sorkkien pohjat viikko poikimisesta ja toisen kerran kahdeksan viikkoa poikimisesta. Eläimet lämpökuvannettiin sorkanhoitotelineessä välittömästi laikalla hiomisen jälkeen sekä sitä seuraavan kymmenen minuutin aikana aina 30 sekunnin välein. Sorkanhoitotelineet olivat sisätiloissa ja lämpötila ja kosteus mitattiin sorkanhoitotelineen vierestä ja ympäristön vaikutus otettiin huomioon lisäämällä analyysiohjelmaan ilman lämpötilan ja -kosteuden arvot sekä etäisyys linsistä sorkkaan. Emissiivisyytenä käytettiin arvoa 1 läpi koko tutkimuksen. Lämpökuviin asetettiin suorakulmio kunkin sorkkapuoliskon pohjaan ja tältä alueelta mitattiin kaikkien sorkkapuoliskojen keskilämpötila. Sorkan pohjista otettujen valokuvien perusteella sorkan pohjien vertymät luokiteltiin kuuteen eri luokkaan ja kaikkien sorkkien kumpikin sorkkapuolisko sai oman luokkansa. Takasorkkien vertymäluokka kohosi tutkimuskertojen välillä enemmän kuin etusorkkien osoittaen sorkkaterveysten huononemista (= vertymien lisääntymistä) ensimmäisten kahden kuukauden aikana poikimisen jälkeen. Suoraa yhteyttä sorkan pohjien pintalämpötilajakauman ja vertymien muuttumiselle näkyviksi kahdeksan viikkoa myöhemmin ei voitu osoittaa käytetyllä tutkimusmenetelmällä. Kirjoittajat päättelivät, ettei lämpökuvantaminen mahdollisesti sovi piilevän sorkkakuumeen varhaiseen havaitsemiseen kokeessa suoritetuissa olosuhteissa.

Gianesella ym. (2018) tutkivat yleisimpien ei-tulehduksellisten sorkkavaurioiden (valkoviivan vauriot, anturahaavaumat, vertymät, sorkan seinämän vaakasuorat ja pystysuorat halkeamat) havaitsemista lämpökuvantamisella. Yhden lypsykarjatilalla 76 tutkimukseen osallistuneesta lypsylehmästä 38 oli terveitä ja 38:llä oli todettu edellä mainittuja sorkkavaurioita ennen tutkimusta tehdyssä tilan rutiinisorkkatarkastuksessa. Kokeen alussa tutkimukseen valittujen lehmien takasorkat hoidettiin ja puhdistettiin sorkkatelineessä, jonka jälkeen odotettiin viisi minuuttia ennen nostetun jalan sorkan pohjan lämpökuvantamista 0,7 metrin etäisyydeltä. Sorkan pohjan lämpökuvista valittiin neljä aluetta: suorakulmio vuohiskuopasta, pitkittäinen suorakulmio sorkkavälistä sekä monikulmiot koko sisä- ja ulkosorkan pohjan alueesta. Näistä kaikista määritettiin keskimääräinen pintalämpötila. Sairaiden lehmien sorkkien keskimääräiset pintalämpötilat kaikilla mitatuilla alueilla olivat noin 1,8 – 2,3 °C korkeammat kuin terveiden lehmien sorkkien keskimääräiset pintalämpötilat. Kirjoittajien mukaan on mahdollista, että lämpökuvantaminen voisi olla luotettava ja käytännöllinen väline lypsylehmien sorkkavaurioiden havaitsemisessa. Heidän mukaansa sorkan poikkeavuuden havaitsemiseksi olisi hyödyllistä ottaa useita lämpökamerakuvia, jotta terveitä ja sairaita rakenteita toisiinsa vertaamalla voidaan johdonmukaisesti todentaa poikkeavuuden olemassaolo.

Sorkan ja sen pohjan pintalämpötilan mittaamisen lisäksi voidaan hyödyntää sorkanrajan tai sorkan yläpuolisen ihon pintalämpötilan mittaamista. Sorkanraja hyvin verisuonitettuna ja vain osin karvojen peitossa olevana alueena heijastaa hyvin sorkan verenkiertoa, jolloin tulehdustilat näkyvät hyvin sorkanrajan pintalämpötilassa. Alsaod ym. (2014) lämpökuvansivat kahdeksalla lypsykarjatilalla 149 lypsylehmän kaikki sorkat puolen metrin etäisyydeltä juuri ennen sorkkatelineeseen menoa. Kuvissa pyrittiin saamaan sorkanraja hyvin näkyviin. Kaksi sorkka-alueen ihotulehduksen havaitsemiseen ja

sen luokitteluun koulutettua henkilöä teki lehmille sorkkahoidon ja määrittivät samalla sorkkavauriot. Lämpökuvista mitattiin maksimipintalämpötila sorkanrajan alueella ja sorkanrajan yläpuolella olevalla iholla. Analyysistä jätettiin pois 16 lehmän sorkkakuvat, koska sorkat olivat liian likaiset. Tutkimuksessa käytettiin maksimipintalämpötiloja, koska niiden on raportoitu olevan luotettavampia kuin keskiarvo- tai minimipintalämpötilat (Rainwater-Lovett ym. 2009, Stokes ym. 2012). Terveiden takasorkkien sorkanrajan ja sen yläpuolisen ihon pintalämpötilat olivat tilastollisesti merkitsevästi korkeammat kuin terveiden etusorkkien. Sen sijaan sairaiden etu- ja takasorkkien välillä ei havaittu pintalämpötilaeroa. Sorkka-alueen ihotulehduksesta kärsivien lehmien sorkkien sorkanrajan ja sen yläpuolisen ihon pintalämpötilat olivat tilastollisesti merkitsevästi korkeammat kuin terveiden lehmien sorkkien pintalämpötilat. Sorkka-alueen ihotulehdus voitiin ennustaa puhtaiden etu- ja takasorkkien 1 °C:n pintalämpötilaerolla, jolloin testin herkkyydeksi tuli 89,1 % (= tunnisti oikein sairaat) ja spesifisyydeksi 66,6 % (= tunnisti oikein terveet).

Nikkhah ym. (2005) lämpökuvantivat 16 lypsylehmän sorkat edestä 1,5 – 2 metrin etäisyydeltä kaksi eri kertaa kolmen kuukauden välein. Lehmien sorkat hoidettiin ennen kuvantamista ja kaikkien sorkkien vertymät ja kantojen sekä anturan halkeamat arvosteltiin tietyn asteikon mukaisesti. Kuvista määritettiin sorkanrajan korkein pintalämpötila soikealta alueelta, joka asetettiin kuvaan niin, ettei se ollut sorkkavälin alueella vaan kokonaan sorkan puolella. Lisäksi määritettiin korkein lämpötila sorkanrajan yläpuoliselta iholta suorakulmion muotoiselta alueelta ja tämä vähennettiin sorkanrajan korkeimmasta pintalämpötilasta, jolloin saatiin näiden kahden alueen pintalämpötilaerotus. Nikkhah ym. (2005) mukaan ulkosorkka oli usein lämpimämpi kuin sisäsorkka, koska ulkosorkkassa oli yleensä kolme kertaa pahemmat vertymämuutokset kuin sisäsorkkassa. Takajalkojen ulkosorkkissa ja etujalkojen sisäsorkkissa oli enemmän vertymiä kuin takajalkojen sisäsorkkissa ja etujalkojen ulkosorkkissa. Sorkkanraja oli tilastollisesti merkitsevästi lämpimämpi alkulypsykaudesta (25,5 °C) kuin loppulypsykaudesta (21,0 °C). Vertymät aiheuttivat alkulypsykaudesta (lypsyssä alle 200 päivää) sorkkarajassa pintalämpötilan nousua, ja lämpötilaero sorkanrajan ja sen yläpuolella olevan ihon välillä oli 2,8 °C. Tämän vuoksi Nikkhah ym. (2005) mukaan olisi hyödyllistä seurata sorkkaterveyttä juuri alkulypsykaudesta, koska sorkkarajassa kohonnut pintalämpötila näytti olevan yhteydessä anturahaavaumiin ja vertymiin alkulypsykaudesta. Lisäksi kirjoittajat suosittelivat sorkkien pintalämpötilan seuraamista pidemmän aikaa muutosten havaitsemiseksi. Lypsykauden vaiheen vaikutuksen sorkanrajan pintalämpötilaan ovat todenneet myös Alsaod ja Büscher (2012) sekä Bobić ym. (2018).

Alsaod ja Büscher (2012) tutkimuksessa 24 lehmän takasorkat lämpökuvannettiin kerran päivässä aina samaan aikaan kolmena päivänä ennen ja jälkeen sorkkatelineessä käyttämisen. Sorkat puhdistettiin lypsyasemalla painepesurilla, kuivattiin käsipyyhepaperilla, jonka jälkeen lehmät kävelytettiin odotustilaan ja sieltä uudelleen lypsyasemalle, jossa takasorkat lämpökuvannettiin takaa puolen metrin etäisyydeltä. Odotustila ja käytävät oli kuivitettu sahanpurulla, jotta sorkat pysyivät puhtaina ja kuivina. Sorkkavaurioista kärsivien lehmien sorkanrajan pintalämpötila oli tilastollisesti merkitsevästi korkeampi kuin terveiden lehmien. Ennen sorkkahoitoa 0,6 °C:n pintalämpötilaero takasorkkien välillä sorkkarajassa viittasi vaurioon lämpimämmässä sorkassa. Testin herkkyyks oli 85,7 % ja spesifisyys 55,9 %. Sorkkahoidon jälkeen 1,1 °C:n pintalämpötilaero takasorkkien välillä sorkkarajassa viittasi vaurioon lämpimämmässä sorkassa. Tässä testin herkkyyks oli 80,0 % ja spesifisyys 82,9 %.

Renn ym. (2014) tutkimuksessa 142 lypsylehmän kuivat etu- ja takajalat lämpökuvannettiin kahden metrin etäisyydeltä lypsyllä aina samaan aikaan kahdesti viikossa kolmen viikon ajan. Lisäksi lehmät ontumaluokiteltiin neliportaisen asteikon mukaan luokkiin 0 – 3 niiden lähtiessä lypsyasemalta. Ontumaluokituksessa yksikään lehmä ei saanut arvoa 3 (vakavasti heikentynyt liikkumiskyky). Ympäristön lämpötilaa ei mitattu. Viikkojen 1 – 3 aikana kaikkien ontumaluokkien jalkojen keskimääräinen pintalämpötila oli 30 °C ja viikoilla 4 – 6 29 °C. Käytettäessä sairauden merkinä jalkojen pintalämpötilaraja-arvoa 27 °C, jota Stokes ym. (2012) oli oman tutkimuksensa tulosten perusteella ehdottanut, 139 lehmää 142:sta luokiteltiin lämpökuvien perusteella ontuviksi ainakin yhdestä jalastaan. Ontu-

misluokituksen mukaan viikoilla 1 – 3 44 % lehmistä ontui ja vastaavasti viikoilla 4 – 6 ontuvia oli 40 %. Renn ym. (2014) johtopäätös oli, että ontumaluokittelu voi olla arvioijan omista käsityksistä tai tulkinnasta riippuvaista, joten sen luotettavuuteen varhaisen ontumisen tunnistamisessa liittyy riskiä. Siksi lämpökuvantaminen voisi kirjoittajien mielestä olla luotettavampi taudinmääritysokalu, jonka mahdollista käyttöä ontumisen määrittämisessä olisi harkittava. Tulosten tulkinnassa on kuitenkin tärkeää huomoida, että lehmien sorkkia ei tarkastettu kokeen aikana, joten lämpökuvien perusteella luokiteltujen ontumisten oikeellisuudesta ei voida olla varmoja. Tutkimuslehmät olisi pitänyt käyttää sorkkatelineessä ja selvittää, mitä muutoksia sorkista löytyi. Tutkimusryhmä ehdotti tulosten parantamiseksi laajempia jatkotutkimuksia useilla eri tiloilla.

Orman & Endres (2016) arvioivat lämpökuvantamalla yhdellä yksityisellä lypsykarjatilalla ja yhdellä yliopiston tutkimustilalla yhteensä 139 lypsylehmän valkoviivan sairauksia, anturahaavaumia ja sorkka-alueen ihotulehdusta ja vertasivat sorkkien pintalämpötilatuloksia ontumaluokitteluun (luokat 1 – 5: 1 = ei onnu, 5 = vakavasti ontuva). Heti takajalkojen sorkanrajan ja sorkanrajan yläpuolisen ihon lämpökuvantamisen jälkeen sorkat hoidettiin sorkkahoitajan toimesta. Ontumislukittelu tehtiin lypsyasemalta poistumisen yhteydessä. Valkoviivan sairauksille ja sorkka-alueen ihotulehdukselle ei pystytty määrittämään tilastollisesti merkitsevää pintalämpötilaraja-arvoa, mutta sorkanrajan ja sen yläpuolisen ihon antama pintalämpötilaraja-arvo oli tilastollisesti lähes merkitsevä. Anturahaavau-massa sorkanrajan pintalämpötilaraja-arvolla 33,5 °C löydettiin 77,8 % (herkkyys) oikeista anturahaavaumista ja 65,2 % (spesifisyys) oikeista terveistä sorkista. Sorkanrajan yläpuolisen ihon pintalämpötilaraja-arvolla 33,7 °C sen sijaan havaittiin 44,4 % (herkkyys) oikeista anturahaavaumista ja 92,9 % (spesifisyys) terveistä sorkista. Analyyseistä jätettiin pois sellaiset lehmät, joilla oli yhdessä jalassa useampi vaurio tai eri vauriot eri jaloissa.

Bobić ym. (2017) testasivat anturahaavauman, sorkkavälin liikakasvun, sorkkavälin ihotulehduksen ja sorkka-alueen ihotulehduksen varhaista tunnistamista lämpökuvantamisella. Usean lypsykarjatilalla yhteensä 86 lypsylehmän kaikkien sorkkien sorkanrajat lämpökuvannettiin sorkan edestä metrin etäisyydeltä lypsyn jälkeen. Ennen kuvantamista lattiat ja kaikkien lehmien jalat puhdistettiin liasta. Kokeeseen valituilla lehmillä ei ollut näkyviä ontumisen oireita. Lämpökamerakuvista määritettiin suorakaiteen muotoiselta alueelta sorkanrajasta maksimi-, minimi- ja keskimääräinen pintalämpötila. Kuvien perusteella valittiin jatkotutkimuksiin 30 lehmää, joilla oli suuria eroja pintalämpötiloissa eri jalkojen välillä. Nämä lehmät tutki tilalla työskentelevä sorkkien tarkastamiseen ja hoitamiseen harjaantunut työntekijä. Terveiksi luokiteltiin lehmät, joiden sorkissa ei ollut vaurioita ja sairaksi kaikki, joilla havaittiin vaurioita vähintään yhdessä sorkassa. Sairaksi luokitelluista 19 lehmästä anturahaavauma todettiin 14 %:lla, sorkkavälin liikakasvu 24 %:lla ja ihotulehdus (joko sorkkavälin tai sorkka-alueen) 62 %:lla lehmistä. Näiden lehmien takasorkkien keskimääräinen sorkanrajan pintalämpötila oli 3,2 – 4,0 °C korkeampi kuin etusorkkien sorkanrajan pintalämpötila. Sairaiden sorkkien sorkanrajan maksimilämpötila oli 5,9 °C, minimilämpötila 2,1 °C ja keskimääräinen pintalämpötila 4,1 °C korkeampi kuin terveiden sorkkien sorkanrajan vastaava pintalämpötila. Kirjoittajat totesivat lämpökuvantamisen olevan käyttökelpoinen menetelmä kokeessa tutkittujen sorkkasairauksien varhaiseen havaitsemiseen.

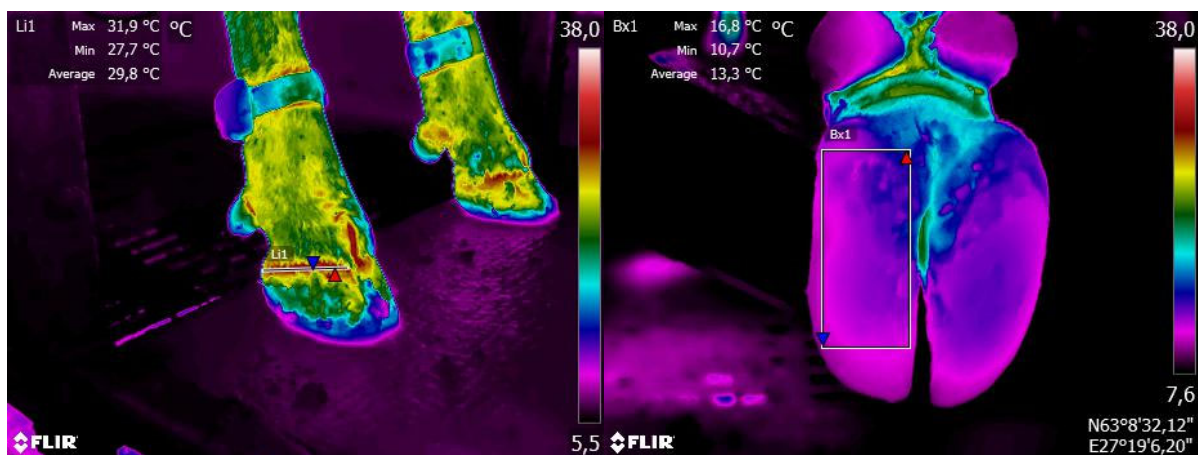
Harris-Bridge ym. (2018) selvitti tutkimuksessaan, mikä olisi paras tapa ja paikka mitata sorkasta pintalämpötila tarkoituksena määrittää sorkka-alueen ihotulehdus. Kokenut tutkimustilan henkilöstö ontumislukitteli tilan lehmät, minkä jälkeen tutkimusryhmän eläinlääkäri tutki ontuviksi ja terveiksi luokitellut lehmät sorkkatelineessä. Ennen sorkkien hoitamista lehmän seisoessa sorkkatelineessä puhdistamattomista takasorkista otettiin lämpökuvat metrin etäisyydeltä edestä sorkanrajasta ja takaa kyntösten, vuohiskuopan ja sorkan kantojen alueelta. Kokeeseen valikoitui 21 tervettä lehmää ja 17 sorkka-alueen ihotulehdusta sairastavaa lehmää. Näiden 38 lehmän lämpökuvien analyysissä käytettiin monikulmiotyökalua, jolla piirrettiin alue, josta sorkanrajan ja kyntösten alapuolella olevan sorkan kantojen alueen maksimipintalämpötila mitattiin. Analyysit tehtiin sekä lehmä- että sorkkata-

solla. Sairaiden sorkkien sorkkanrajan ja kantojen alueen pintalämpötilan keskiarvo, keskihajonta, maksimiarvo ja 95. prosenttipiste olivat korkeammat kuin terveiden sorkkien. Sairaiden lehmien terveiden sorkkien pintalämpötilat olivat myös korkeammat ja pintalämpötiloissa ilmeni enemmän vaihtelua kuin terveiden lehmien sorkkien pintalämpötiloissa. Tulosten mukaan sorkkanrajan maksimipintalämpötila oli tarkin mitta sorkkasairauksien tunnistamiseksi. Kantojen pintalämpötilan mittaaminen osoittautui testausten perusteella parhaimmaksi tavaksi erottaa ontuvat ja terveet jalat.

3.3.3. Yhteenveto: Sorkkien lämpökuvantamisessa on potentiaalia

Tutkimustulosten perusteella sorkkia kannattaa lämpökuvantaa sorkkanrajasta sorkkien sivuilta tai edestä (Kuva 17), tai kannoilta sorkkien takaa. Näistä kohdista, varsinkin kannoilta, kannattaa mitata maksimipintalämpötilaa ja sorkkanrajasta keskimääräistä pintalämpötilaa. Sorkkanrajan pintalämpötilan ja sorkkasairauksien tai ontumisen yhteys on ollut tutkimuksissa hyvin vaihteleva.

Hyvällä lämpökameralla otetuista sorkkien lämpökuvista on mahdollista ennen sorkkahoitoa seuloa lehmät, jotka kannattaa tutkia sorkkatelineessä. Lehmän sorkkien pintalämpötiloja toisiinsa vertaamalla pystytään ennustamaan sorkat, joista todennäköisesti löytyy vaurioita. Siten lämpökameran rutiininomainen käyttö saattaa nopeuttaa tilallisen sorkkanhoitotyötä ja antaa mahdollisuuden hoitaa sorkkavaurioita jo ennen kuin ne näkyvät ulospäin lehmän ontumisena.



Kuva 17. Sorkkanraja on hyvin verisuonitettu ja vain osin karvojen peitossa, joten se heijastaa hyvin sorkkanrajan verenkiertoa. Sorkkanrajan sijaan voi olla vaikeaa havaita sorkkasairauksien aiheuttamia lämpötilamuutoksia. (Kuva: Lilli Frondelius/Luke)

3.4. Muu terveys

Hurnik ym. (1984) havaitsi lehmien kiimaan liittyvässä lämpökuvantamistutkimuksessaan, että kehon pintalämpötila nousi ennen sairauksien ulospäin näkyvien oireiden ilmaantumista. Tämä viittaa siihen, että lämpökuvantamista voisi mahdollisesti hyödyntää sairauksien varhaisessa havaitsemisessa. Lämpökuvantamista on sittemmin testattu monien erilaisten naudan tautitilojen määrittämiseen.

3.4.1. Tartuntataudit

Suu- ja sorkkataudin aiheuttama kuume ja tulehduksen aiheuttama lämmön nousu voitaisiin mahdollisesti havaita lämpökuvantamalla. Rainwater-Lovett ym. (2009) ehdottivat, että lämpökuvantamalla voitaisiin etsiä tartunnan saaneita eläimiä ja valita jatkotutkimuksiin ne, joiden jalkojen pintalämpötila on kohonnut. Heidän kokeessaan suu- ja sorkkatautiin sairastuneiden sonnien jalkojen pintalämpötila kohosi. Etujalkojen pintalämpötilan raja-arvoksi määritettiin 34,4 °C, jolla suu- ja sorkkataudin

oireiden ilmaantumista ennen sekä niiden ilmaantumisen jälkeen tunnistettiin 61,1 % oikeista sairastuneista ja 87,7 % oikeista terveistä.

Bashiruddin ym. (2006) tartuttivat nautoja, lampaita ja sikoja suu- ja sorkkatautiviruksella ja seurasivat oireiden kehittymistä ja pintalämpötilaa neljän vuorokauden ajan tartutuksen jälkeen. Eläinten etujalkojen sorkkanraja ja sorkkaväli lämpökuvannettiin edestä ja mitattiin jalkojen keskimääräinen ja korkein pintalämpötila, joita verrattiin ruumiinlämpötilaan. Siat olivat helpompia mitata, koska niiltä saatiin johdonmukaisesti suurimmat nousut keskimääräiseen ja korkeimpaan jalkojen pintalämpötilaan. Lampaiden ruumiinlämpötila nousi ensimmäisenä, mutta nousu ei näkynyt lämpökuvissa. Jalkojen pintalämpötilan nousun huippu oli havaittavissa eläinlajista riippuen 2 – 3 päivää tartunnasta. Naudoilla pintalämpötilan nousu havaittiin usein johdonmukaisesti vain yhdessä jalassa, minkä lisäksi kuvantaminen oli haastavampaa, koska pintalämpötila mitattiin sorkkavälistä. Nautojen lämmön nousua pystyi seuraamaan, kunhan vain ensin löysi jalan, jossa pintalämpötila kohosi.

Bashiruddin ym. (2006) päättelivät, että varsinkin sian kohdalla lämpökuvantamisen avulla voisi saada poimittua eläimet tarkempaan tarkastukseen. Muiden tutkittujen eläinlajien kohdalla menetelmän tarkkuus oli alhainen, koska jo terveillä eläimillä todettiin suurta eläimen sisäistä ja eläinten välistä raajojen pintalämpötilojen vaihtelua, mikä teki ennustamisen tietyllä raja-arvolämpötilalla varsin haastavaksi. Myös Gloster ym. (2011) totesivat, että terveiden nautojen sorkkien pintalämpötila vaihteli niin paljon erilaisissa ympäristöolosuhteissa, ettei suu- ja sorkkataudin ennustaminen lämpökuvantamisella onnistu riittävän luotettavasti. Menetelmä ei siis ole vielä riittävä käytettäväksi kehon lämpötilan mittaamiseen suurten eläinryhmien joukkotarkastuksissa. Ihmisten kohdalla ruumiin lämpötilan mittaaminen lämpökuvantamalla on jo tällaisessa käytössä esimerkiksi kansainvälisillä lentokentillä; vuodesta 2006 lähtien lentomatrustajia on joukkoseulottu kuumeen varalta lämpökuvantamalla matkustajien kasvot (Ng ym. 2004). Lintuinfluenssan ja SARSin leviäminen olivat joukkoseulontaan johtaneen tutkimuksen taustalla.

Myös villin märehitjän, muulipeuran, kokeellinen suu- ja sorkkatautitartunta on pystytty lämpökuvantamaan etu- ja takajaloista (Dunbar ym. 2009). Lampaalla lämpökuvantamista on hyödynnetty bluetongue virustaudin havaitsemiseen (Pérez de Diego ym. 2013).

Tuberkuliinipistosten avulla voidaan määrittää, onko eläin saanut tuberkuloositartunnan. Johnson & Dunbar (2008) testasivat, voiko lämpökameralla lukea naudan tuberkuliinitestin tuloksen perinteisen kaulan ihopoimun paksuuden mittauksen sijasta. Yli 90 päivää ennen tuberkuliinitestin tekoa tutkimuksen 15 naudasta osa altistettiin *Mycobacterium bovikselle*, osa *M. aviumille* ja osa toimi altistamattomana verrokkina. Tuberkuliinitestissä nautojen lavan edestä kaulan keskiosasta ajettiin karvat kahdelta pieneltä alueelta, joista toiseen annettiin pistoksena nahan alle naudan tuberkuliinia ja toiseen lintutuberkuliinia. Pistosten annon yhteydessä otettiin lämpökuvat, sekä tunnusteltiin pistoalueet sormin ja mitattiin pistoalueen ihopoimun paksuus. Sama toistettiin 24, 48 ja 72 tunnin kuluttua tuberkuliinipistoksista. Kumpikin tuberkuliinin pistoskohta näkyi lämpökuvissa ja näistä kohdista mitattiin myös korkein pintalämpötila. Jos pistoskohdan korkein mitattu lämpötila ylitti 37 °C, eläimen katsottiin reagoineen pistetylle tuberkuliinille. Mikäli korkein lämpötila jäi alle 37 °C:n kummaltakin ihoalueelta, eläin katsottiin negatiiviseksi kummallekin tuberkuliinille.

Lämpökuvista saatua luokittelutulosta verrattiin perinteisellä ihopoimun paksuuden mittauksella saatuun luokittelutulokseen ja molempia tuloksia verrattiin eläimen saamaan altistukseen (Johnson & Dunbar 2008). Lämpökuvien perusteella 86 % eläimistä luokiteltiin oikein altistuneiksi. Perinteisellä ihopoimun paksuuden mittauksella, josta lopullinen tulos saadaan vasta 72 tunnin kuluttua tuberkuliinipistoksesta, 80 % eläimistä luokiteltiin oikein altistuneiksi. Lämpökuvista kaikki kontrollit ja *M. bovikselle* herkistetyt luokiteltiin oikein jo 24 tunnin kohdalla, mutta yksi *M. aviumille* herkistetty nauta luokiteltiin väärin 24 tunnin kohdalla. Näiden tulosten mukaan lämpökuvantaminen saattaisi

olla käyttökelpoinen ja puolueeton menetelmä lukea tuberkuliinitestin tuloksia ilman, että eläimiin tarvitsisi koskea.

3.4.2. Pinnalliset tulehdukset

Shecaira ym. (2018) selvittivät, onko lämpökuvantamisella mahdollista havaita tulehduksen merkkejä iholla ja erotella terveet vasikat napatulehdusvasikoista. Tutkimusta varten lämpökuvannettiin 20 terveen vasikan ja 27 napatulehdusvasikan (tulehdus varmistettu käsin tunnustelemalla) napa-alue kummaltakin sivulta vasikan seisoessa ja vasikan maatessa selällään 0,5 – 1 metrin etäisyydeltä aamuisin aina samaan aikaan. Kunkin kuvaussuunnan lämpökuvista laskettua maksimipintalämpötilojen keskiarvoa verrattiin ryhmien välillä.

Napatulehdusvasikoiden sivulta otettujen kuvien napa-alueiden keskimääräinen maksimipintalämpötila oli tilastollisesti merkitsevästi korkeampi kuin terveiden vasikoiden (Shecaira ym. 2018). Mahan alta mitattujen pintalämpötilojen välillä ei ollut eroa, mikä kirjoittajien mukaan saattoi johtua siitä, että mahan alla karvoituksen määrä ja paksuus vaihtelivat eri vasikoilla. Terveiden vasikoiden navan maksimipintalämpötila mitattiin yleensä navan etupuolelta, kun taas napatulehdusvasikoilla korkein pintalämpötila mitattiin useimmiten navan alimmasta kohdasta. Kirjoittajat totesivat lämpökuvantamisen soveltuvan alle kuukauden ikäisen vasikan napatulehduksen toteamiseen, koska napatulehdusvasikoiden napa-alueen sivulta mitattu pintalämpötila oli noin yhden asteen korkeampi kuin terveiden vasikoiden.

Gianesella ym. (2010) tutkivat piilevän pötsiasidoosin määrittämiseksi tehtävän toimenpiteen, ruumenosenteesin (= neulalla ja ruiskulla imetty näyte pötsin sisällöstä vatsaontelon seinämän lihaskerrostien läpi) vaikutusta lehmän hyvinvointiin ja maidontuotantoon määrittämällä verenkuvassa, lypsetyn maidon määrässä sekä pötsinäytteen ottokohdan pintalämpötilassa tapahtuvia muutoksia 48 h, 96 h ja 20 vrk kuluttua pötsinäytteen otosta. Pötsinäytteen ottokohdan pintalämpötila mitattiin lisäksi tuntia ennen näytteenottoa ja heti näytteenoton jälkeen. Päivittäinen maitomäärä laski tilastollisesti merkitsevästi 48 tuntia näytteenoton jälkeen, oli alhaisin 96 tuntia näytteenoton jälkeen ja 20 vuorokauden kohdalla oli lähes 48 tunnin määrän veroinen. Keskimääräinen ja maksimipintalämpötila näytteenottoalueella nousivat noin asteen verran heti näytteenoton jälkeen, mutta palasivat ennalleen jo 24 tunnin kuluttua näytteenotosta. Kirjoittajat eivät kuitenkaan mainitse, miten tämä oli todettu, koska pintalämpötilamäärittäminen ei tehty 24 tunnin kohdalla. Verenkuvassa nähtiin tulehdusolujen (valkosolut ja neutrofiilit) prosenttisuuden nousu 20 vuorokautta näytteenoton jälkeen, mikä viittaa lievään paikalliseen tulehdukseen. Akuutin faasin tulehduksen merkkiaineiden pitoisuudet eivät kuitenkaan tilastollisesti merkitsevästi kohonneet, joten kirjoittajat päättelivät, että ruumenosenteesin haitallinen vaikutus lehmän terveyteen oli niin pieni, että pötsinäytteenottoa kannattaa käyttää piilevän pötsiasidoosin määrittämiseen. Samaa suosittelivat myös Gatto ym. (2010).

Schwartzkopf-Genswein & Stookey (1997) tutkivat eri polttomerkintätapoja. Tutkimuksessa lämpökuvannettiin 30 hiehoa polttomerkintäpäivänä ja viikon ajan sen jälkeen mahdollisten ihotulehdusten merkkien varalta. Päivää ennen merkintää oikeasta reidestä ajeltiin karvattomaksi kaksi 25 cm²:n kokoista ihoaluetta. Toinen alue sijaitsi reiden yläosassa ja toinen 5 cm tämän alapuolella. Ylempi alue oli polttomerkintää varten ja alempi jätettiin verrokiksi. Hiehoista 15 merkittiin sähköisellä polttoraudalla (kuumapoltto) ja loput 15 hiehoa merkittiin kupariraudalla, jota pidettiin nestemäisessä työssä ennen kuin se painettiin reiden yläosaan (kylmäpoltto).

Polttomerkintä- ja kontrollialueiden ihon pintalämpötiloissa ei ollut eroja ennen polttomerkintää (Schwartzkopf-Genswein & Stookey 1997). Heti merkitsemisen jälkeen kylmäpolttokohdan ihon pintalämpötila oli matalampi kuin kontrollien ja kuumapolttokohdan. Tämän jälkeen aina kuudenteen seurantavuorokauden asti kuuma- ja kylmäpolttokohtien ihon pintalämpötila oli noin 1,9 ja 1,6 °C

korkeampi kuin kontrollikohtien, mutta seitsemäntenä vuorokautena kylmäpolttokohdan ja kontrollikohdan välillä ei enää ollut eroa pinalämpötilassa. Tämän perusteella molemmat merkintätavat aiheuttavat kudostuhoa, mutta kuumapoltto aiheuttaa vakavamman ja pitkäkestoisemman palovamman polttokohtaan kuin kylmäpoltto.

Kuljetus saattaa aiheuttaa eläimillä niin silminnähtäviä kuin näkymättömiäkin vammoja. Roy ym. (2019) tutkivat, voisiko lämpökameran avulla havaita hevosilla teuraskuljetuksen aikana syntyneet mustelmat. Tutkimuksessa käytettiin jokaisella hevosella yksillöllisesti määritettyä pinalämpötilan raja-arvoa mustelmien havaitsemiseen, minkä lisäksi vasenta ja oikeaa kylkeä vertaamalla pyrittiin eliminoimaan aineistosta normaalisti korkean pinalämpötilan alueet. Varsinaiset mustelmat arvioitiin teurastuksen jälkeen. Mustelmien lämpökuvantamisen sensitiivisyys oli melko heikko, vain 42 %, mutta spesifisyys oli 79 %. Kirjoittajat epäilivät, että heikkoon tulokseen saattoi olla syynä hyvin vaihtelevat ympäristöolosuhteet sekä kuvantaminen välittömästi kuljetuksen jälkeen, jolloin kuvattavan eläimen pinalämpötila ei ehtinyt mukautua kuvausolosuhteisiin.

3.4.3. Ulkoloiset

Cortivo ym. (2016) tutkivat nautojen ja seebujen (*Bos indicus*) ulkoloisten määrää lämpökuvantamisella. Menetelmä perustuu eläimen ja loisten väliseen pinalämpötilaeroon. Hyönteisten lämpötila vaihtelee ympäristön lämpötilan mukaan, joten niiden lämpötilan vaihtelu voi olla suurta. Nisäkkäiden iholla elävien hyönteisten lämpötilaolot ovat kuitenkin melko tasaiset ja siksi ulkoloisten lämpötila on yleensä 33-34 astetta. Endotermisen eläimen pinalämpötila on yleensä puolestaan yli 34 °C. Ulkoloiset näkyvät siis lämpökuvissa kylmempinä kuin eläimen keho.

Hyönteiset oleskelevat mieluiten eläimen auringonpuoleisella sivulla (Hillerton & Bramley 1986) ja niitä on eniten mahassa ja selässä. Cortivo ym. (2016) havaitsivat, että punkeista tiineet naaraat näkyivät lämpökuvissa helposti. Sen sijaan pienet punkit usein eivät näkyneet eläimen karvan alta, mutta vähäkarvaisilla alueilla kuten päässä punkit näkyivät hyvin. Verta imevät kärpäset näkyivät lämpökuvissa täydellisesti lentäessään eläimen karvapeitteen yläpuolella ja istuessaan karvapeitteellä. Tutkimus osoitti, että hyönteisten ja punkkien osalta lämpökameramenetelmä yhdistettynä automaattiseen laskentaohjelmaan oli herkkä, se pystyi erottamaan oikein loisten läsnä- ja poissaolon ja oli tarkempaa kuin loisten silmämääräinen laskeminen. Lämpökamerassa tuli kuitenkin olla riittävän hyvä erottelukyky ja Barbedo ym. (2017) totesivatkin, että matalan resoluution lämpökameralla voitiin tehdä vain karkeita arvioita ulkoloisten määrästä.

Villeillä märehitijöillä lämpökuvantamalla on määritetty syyhypunkin aiheuttamia ihovaurioita pyreneidenvuorikauriilla (Arenas ym. 2002).

3.5. Silmän pinalämpötila terveyden ja hyvinvoinnin mittarina

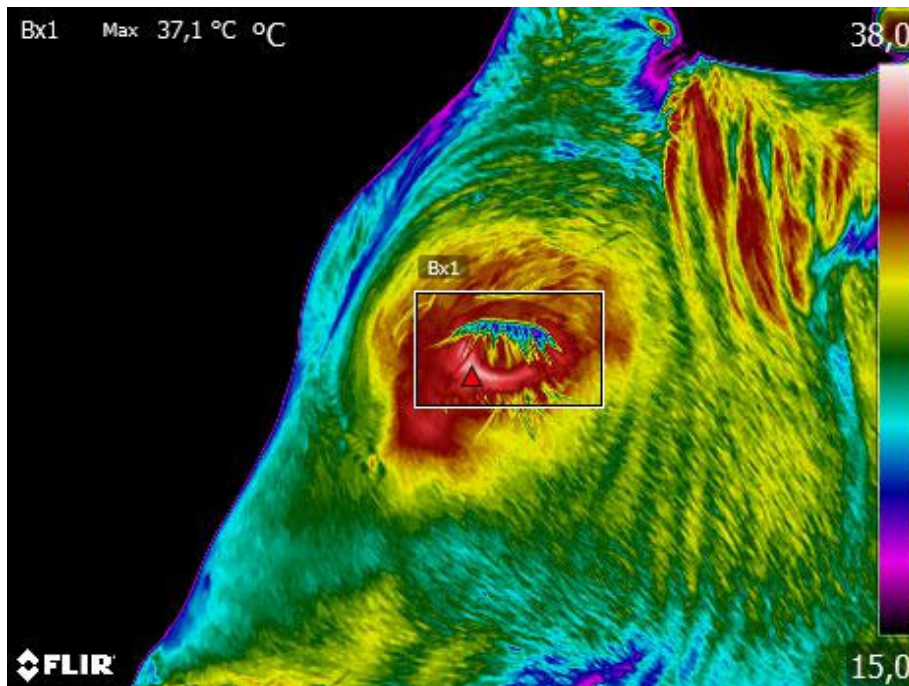
Muutoksia silmän pinalämpötilassa on tutkittu naudoilla akuutin stressin ja erilaisten sairauksien yhteydessä. Silmästä hyvän lämpökuvantamiskohteen tekee se, että sen pinalämpö on lähimpänä ruumiin lämpöä (Salles ym. 2016), lämpötilassa on muihin ruumiin osiin nähden vähiten ympäristön aiheuttamaa vaihtelua (Schaefer ym. 2004, Salles ym. 2016) eikä silmässä ole lämpötilamittausta häiritsevää karvoitusta (Stewart ym. 2008b). Silmän pinalämpötila on myös hyvin herkkä mittari ja jo hyvin pienet muutokset lämpötilassa voivat olla merkitseviä esimerkiksi sairauksien yhteydessä (Schaefer ym. 2004). Vaikka silmän pinta on märkä, niin kyynelnesteen vaikutus lämpötilaan on vain vähäinen, arviolta alle 0,1 °C (Stewart 2008).

Yleensä naudalla kuvannettava alue on silmä ja sen ympäryys noin yhden senttimetrin alueelta (Stewart ym. 2007, 2008b). Tutkimuksissa kuvauskulma on yleensä standardoitu 90 asteeseen ja etäisyys

0,5 – 1 metriin, mikä vaatii eläimen paikallaan pitämistä (Stewart ym. 2007, 2008b), mutta kuvantaminen myös pään liikkumista rajoittamatta on mahdollista esimerkiksi juoma-automaatilla (Stewart 2008, Schaefer ym. 2012) tai vasikoiden juottoautomaatilla (Stewart ym. 2015). Voidaan olettaa, että automaattisella mittauksella eläintä kiinni ottamatta, mittaustulos edustaa paremmin eläimen normaalia tilaa (Schaefer ym. 2012). Cook ym. (2016) kokeessa kuitenkin suuresta määrästä silmästä automaattisesti otettuja lämpökuvia vain alle puolet oli käyttökelpoisia pintalämpötilan määrittämiseksi. Tämän lisäksi naudat käyttävät vuorokaudessa juomiseen hyvin vähän aikaa, joten juoma-automaatilla saatujen kuvien lukumäärä vaihteli eläinten ja päivien välillä suuresti.

3.5.1. Silmän pintalämpötila ja stressi

Akuutin stressin yhteydessä pintaverenkierto heikkenee ja verenkiertoa ohjataan suuriin lihaksiin ja muihin pakenemisen tai taistelemisen kannalta hyödyllisiin elimiin (Vianna & Carrive 2005). Tätä niin sanottua kutaanista vasokonstriktiota ohjaa pääasiassa sympaattinen hermosto (Blessing 2003) ja sen aiheuttama lämpötilan lasku iholla voidaan havaita lämpökameran avulla (esimerkiksi Vianna & Carrive 2005, Herborn ym. 2015). Verisuonten supistumisen aiheuttamat lämpötilan muutokset näkyvät parhaiten kehon alueilla, jotka osallistuvat lämmön säätelyyn (Herborn ym. 2015). Tämän takia akuutin stressin aiheuttamat pintaverenkierron muutokset näkyvät voimakkaimmin eri ruumiinosissa eri eläinlajeilla, esimerkiksi ihmisellä ja muilla ihmisapinoilla kasvoissa (Pavlidis ym. 2002, Nakayama ym. 2005), rotalla hännässä (Vianna & Carrive 2005), kanilla korvissa (Blessing 2003) ja kanalla heltas- sa (Herborn ym. 2015). Eläimillä, joilla on koko ruumiin kattava karvapeite, tällaisia alueita ei välttämättä ole tarjolla, jolloin silmän pintalämpötilan mittaaminen voi tulla kysymykseen (Herborn ym. 2015). Etenkin kyynelkanavan ympäristössä (Kuva 18) on tiheä hiussuoniverkosto, jota hermottaa sympaattinen hermosto (Stewart ym. 2007), ja silmän pintalämpötilan muutoksia onkin tutkittu stressin yhteydessä muun muassa hevosilla (Cook ym. 2001, Fenner ym. 2016), vapiteilla ja poroilla (Cook ym. 2005), naudoilla (Stewart 2008), lampailla (Stubsjøen ym. 2009, Cannas ym. 2018) sekä porsailla (Yáñez-Pizaña ym. 2019).



Kuva 18. Silmän pintalämpötilan muutoksia stressin yhteydessä mitataan yleensä silmän etualakulmasta kyynelkanavan ympäristöstä, jossa on tiheä hiussuoniverkosto ja silmän korkein lämpötila. (Kuva: Lilli Frondelius/Luke)

Naudalla silmän pintalämpötilan muutoksia on tutkittu pääasiassa kivulioiden toimenpiteiden, kuten nupoutuksen (Stewart ym. 2008b ja 2009) ja kastraation (Stewart ym. 2010a), yhteydessä. Ilman puudutusta ja kipulääkitystä nupoutettaessa silmän pintalämpötila laskee nopeasti toimenpiteen jälkeen, mitä puolestaan seuraa pitkittynyt pintalämpötilan nousu (Stewart ym. 2008b). Myös paikallispuudutusta käytettäessä silmän pintalämpötila laskee, kun puudutuksen vaikutus lakkaa (Stewart ym. 2009). Tulehduskipulääkityksellä kivun aiheuttamat muutokset pystytään ehkäisemään. Stewartin ym. (2010a) kokeessa myös kastraation yhteydessä tapahtui selvä, mutta ei tilastollisesti merkitsevä, silmän pintalämpötilan lasku, jota seurasi pitkittynyt pintalämpötilan nousu.

Nisäkkäillä stressiin ja sen aiheuttamiin negatiivisiin tunnetiloihin liittyviä toiminnallisia reaktioita havaitaan myös psykososiaalisten uhkien yhteydessä, vaikka niihin ei liittyisi suora loukkaantumisen riskiä (Blessing 2003). Etenkin kädellisillä tästä on tehty tutkimusta (esimerkiksi Nakayama ym. 2005). Naudoilla muun muassa sosiaalinen eristäminen aiheuttaa silmän pintalämpötilan laskun (Stewart ym. 2007). Erikseen emotionaalista stressiä on tutkittu muun muassa erilaisissa eläinten käsittelytilanteissa (Stewart ym. 2008a). Tutkimuksessa käytetyt käsittelyt olivat kevyt lyöminen muoviputkella, säikäyttäminen ja sähköpiiskan käyttö. Silmän pintalämpötila laskee kaikkien negatiivisten käsittelyiden yhteydessä. Mielenkiintoista oli se, että pintalämpötila palautui hitaammin sähköpiiskan käytön jälkeen verrattuna muihin käsittelyihin. Lampailla puolestaan havaittiin, että aloillaan pitäminen nosti silmän pintalämpötilaa (Cannas ym. 2018). Kanoilla on havaittu, että eri kiinni pitotavat aiheuttavat heltan pintalämpötilassa erisuuruisen muutoksen ja siten myös stressin intensiteettiä voidaan arvioida pintalämpötilan muutoksen suuruudesta (Herborn ym. 2015). Toisaalta naudoilla on havaittu, että vastaavat pintalämpötilan muutokset saattavat olla yhteydessä myös positiivisiin tunnetiloihin (Proctor & Carder 2015).

Silmän pintalämpötilan laskua stressin yhteydessä naudalla on yritetty selittää sympaattis-adrenomedullaarisen järjestelmän (SAM) ja hypothalamus-aivolisäke-lisämunuaiskuori-akselin (HPA-akseli) aktivoitumisella. Keinotekoisesti HPA-akselia aktivoivalla adrenokortikotropiinitestillä (ACTH-testi) ei kuitenkaan ollut vaikutusta silmän pintalämpötilaan, joten pintalämpötilan lasku ei ole ainaakaan suoraan yhteydessä pelkästään HPA-akselin toimintaan (Stewart ym. 2007, 2008b). Sen sijaan adrenaliini-infusiolla saatiin aikaan silmän pintalämpötila lasku, mikä tukee oletusta, että muutos johtuu sympaattisen hermoston ohjaamasta verisuonten supistumisesta (Stewart ym. 2010b). Pintalämpötilan laskua seuraavan nousun taustalla olevien elinten toiminta on kuitenkin vielä epäselvää. Muilla eläimillä on todettu, että akuutin stressin aiheuttaman pintaverenkierron vähenemisen yhteydessä ruumiin sisälämpötila nousee (Vianna & Carrive 2005, Herborn ym. 2015). Akuutin tilanteen jälkeen verisuonten supistumisesta siirrytään verisuonten laajentumiseen ja stressin aikana noussut sisälämpötila puretaan, jolloin ihon pintalämpötila nousee, kunnes ruumiinlämpö on palannut normaaliksi (Vianna & Carrive 2005). Pintalämpötilan nousu on mahdollisesti yhteydessä parasympaattisen hermoston aktivoitumiseen (Stewart ym. 2010a).

Silmän pintalämpötilan lasku akuutin stressin yhteydessä on monesti hyvin nopea ja saattaa kestää vain 1 – 5 minuuttia stressin aiheuttajasta riippuen (Stewart ym. 2007, 2008 ja 2010). Tämän takia mittaus on hyvä aloittaa mahdollisimman pian stressaavan tilanteen jälkeen ja mittausvälien on oltava riittävän tiheät, jotta pienet muutokset saadaan kiinni (Stewart ym. 2008, Herborn ym. 2015). Esimerkiksi Gomez ym. (2018) eivät havainneet silmän pintalämpötilassa muutoksia sorkkahoidon yhteydessä, vaikka syljen kortisolipitoisuuden ja sykevälivaihtelun perusteella voitiin olettaa, että lehmä koki stressiä käsittelyn aikana. Tähän mahdollisena syynä epäiltiin muun muassa juuri liian myöhäistä mittaussajankohtaa käsittelyn alkamiseen nähden.

3.5.2. Silmän pintalämpötila sairauksien havaitsemisessa

Vaikka silmän pintalämpötila on ruumiinlämpöä matalampi, niin silmän pintalämpötilan vaihtelut seuraavat samaa profiilia kuin esimerkiksi peräsuolilämpötilan muutokset (George ym. 2014). Tästä johtuen silmän pintalämpötilan mittausta voidaan käyttää ei-invasiivisena tapana mitata naudan sekä pienten märehitijöiden (Godfrey ym. 2007) ruumiinlämpöä. Schaefer ym. (2004 – 2012) ovatkin tutkineet silmän pintalämpötilan mittausta naudan virusripulin (*bovine viral diarrhoea virus*, BVD) ja hengitystieinfektioiden yhteydessä. Molemmat sairaudet aiheuttavat etenkin Pohjois-Amerikan suurissa nautakasvattamoissa isoja taloudellisia tappioita, ja suuresta eläinmäärästä sairastumisten havaitseminen ajoissa on vaikeaa, joten helppo ja varhainen taudinmääritysväline olisi toivottava.

Virusripulin osalta havaittiin, että infektio aiheutti vasikassa pintalämpötilan nousun (Schaefer ym. 2004). Kaikista mitatuista alueista kuitenkin silmä osoittautui herkimmäksi mittariksi: pintalämpötilan nousu oli havaittavissa silmästä jo yhden vuorokauden kuluttua tartunnasta. Myös hengitystieinfektiot aiheuttavat silmän pintalämpötilan nousun (Schaefer ym. 2006 – 2012), ja tämä pintalämpötilan muutos on havaittavissa jo 4 – 6 päivää ennen sairauden kliinisiä oireita (Schaefer ym. 2006 ja 2007). Varsinaiseen sairauden puhkeamiseen mennessä silmän pintalämpötila on noussut jo yhden asteen verran (Schaefer ym. 2012). Vastaavasti terveiden eläinten silmän pintalämpötilassa ei juurikaan ole vaihtelua mittauspäivien välillä.

Silmän pintalämpötilan nousun avulla sairaat eläimet havaitaan yleensä varhaisemmassa vaiheessa kuin perinteisillä menetelmillä tai biologisia markkereita mittaamalla (Schaefer ym. 2004 ja 2012). Tutkimuksissa tällaisia markkereita ovat olleet esimerkiksi kortisoli (Schaefer ym. 2004 ja 2012), immunoglobuliini A ja haptoglobiinit (Schaefer ym. 2004), sekä valkosolut (Schaefer ym. 2012). Silmän maksimipintalämpötilan avulla on pystytty tutkimuksissa kehittämään ennustavia malleja sairaiden eläinten tunnistamiseksi (Schaefer ym. 2007 ja 2012), mutta tulokset mallien toimivuudesta ovat vaihtelevia eikä julkaisuissa ole aina selitetty, miten mallit on testattu. Lämpökuvantamisen yhdistäminen perinteisiin taudinmääritysmenetelmiin voisi parantaa mallien toimivuutta ja sairaiden eläinten varhaista tunnistamista.

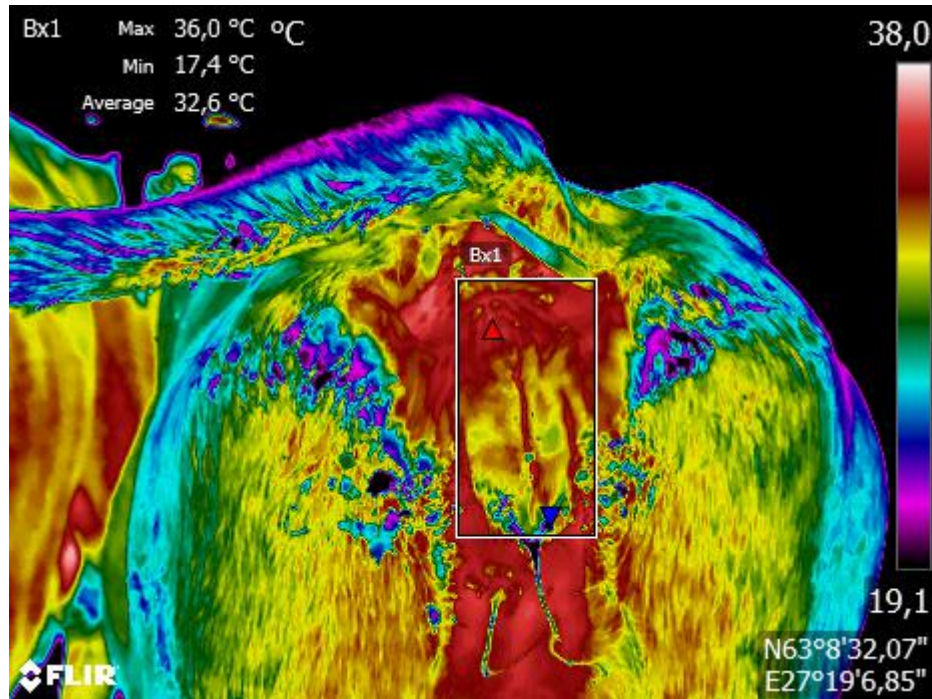
3.6. Hedelmällisyys ja lisääntyminen

3.6.1. Lehmien ja hiehojen kiiman seuranta

Kiiman alussa lehmän ruumiinlämpötila ensin nousee ja sitten laskee ovulaation tienoilla noustakseen taas ovulaation jälkeen (ks. katsaus artikkelissa Talukder ym. 2015b). Jos vastaavat muutokset ovat nähtävissä eläimen pintalämpötiloissa, voitaisiin lämpökuvia hyödyntää kiimojen tunnistamisessa. Lupaavia kokeiluja lämpökameroiden hyödyntämisestä kiiman tunnistamisessa tehtiin jo 1980-luvulla (Hurnik ym. 1985). Dray ym. (2007) totesivat ummessa olevien Holstein ja Holstein x Gir -lehmien silmän lämpökuvista, etteivät silmän maksimipintalämpötila tai peräsuolilämpötila vaihdelleet kiimakierron eri vaiheissa, mutta emättimen lämpötila oli korkeampi keltarauhasvaiheessa kuin follikkelivaiheessa.

Hävyn pintalämpötilan (Kuva 19) on havaittu vaihtelevan kiimakierron eri vaiheissa. Hellebrand ym. (2003) lämpökuvantivat kuuden kiimakerroiltaan yhdenaikaistetun lypsylehmän hävyn pintalämpötilaa kahden viikon ajan ja totesivat lämpökuvantamisen pystyvän näyttämään kiiman huippuajankohdan aikaisen hävyn pintalämpötilamaksimin. Jones ym. (2005a) mittasivat 20 Holstein-lypsylehmän hävyn pintalämpötilamaksimin päivittäin 30 päivän ajan kahden kiiman ja kahden kiimojen välisen vaiheen aikana. Kun ympäristön lämpötila oli 21 °C, ero kiiman ja kiimojen välisen vaiheen aikana hävyn pintalämpötilassa oli 0,3 °C. Kun ympäristön lämpötila oli 12 °C, pintalämpötilaeroa hävyssä kiimakierron eri vaiheiden välillä ei havaittu. Jones ym. (2005a) mielestä oli epäselvää, onko 0,3 °C:n

suuruinen ero fysiologisesti riittävän merkityksellinen kiiman havaitsemiseksi. Olğaç ym. (2017) päätyivät samaan lopputulokseen yrittäessään ennustaa narttukoiron kiimaa peräaukon ja hävyn välisen pintalämpötilaeron avulla. Pelkällä pintalämpötilan mittauksella narttukoiron kiimaa ei pystytty tunnistamaan.



Kuva 19. Tutkimuksissa on havaittu, että hävyn pintalämpötila muuttuu kiimakierron vaiheen mukaan. Muutokset ovat kuitenkin pieniä ja toistaiseksi käytännön lämpökamerasovellusta kiiman havaitsemiseen ei ole pystytty kehittämään. (Kuva: Lilli Frondelius/Luke)

Radigonda ym. (2017) sen sijaan osoittivat lämpökuvantamisen avulla, että kiimojen yhdenaikaistamisohjelman seurauksena ovuloivien Braford-lihalehmien hävyn pintalämpötila oli keinosiemennyspäivänä 1,2 °C alhaisempi kuin lehmien, jotka eivät näyttäneet kiiman merkkejä eli todennäköisesti eivät olleet ovulaatiovaiheessa ohjelman keinosiemennyspäivänä. Myös Stelletta ym. (2013) totesivat 32 italialaisella Välimeren puhvelilla selkeän hävyn pintalämpötilan laskun keinosiemennyksen yhteydessä niillä puhveilla, jotka todettiin kantaviksi 42 päivää siemennyksen jälkeen. Siemennykset tehtiin 18 – 21 tuntia kiiman yhdenaikaistamisohjelman toisen gonadotropiineja vapauttavan hormonin (GnRH) -pistoksen jälkeen, jolloin kirjoittajien mukaan hävyn pintalämpötilan lasku saattoi olla yhteydessä verenkierrossa tapahtuvaan estradiolipitoisuuden vähenemiseen, joka nähdään välittömästi ennen ovulaatiota, ja jolla luodaan siittiöille suotuisat olosuhteet varastoitua munanjohtimeen ja hedelmöittää munasolut. Talukder ym. (2014) osoittivat paitsi hävyn myös turvan pintalämpötilan laskevan ovulaatioajankohdan lähestyessä. He kehittivät alustavia pintalämpötiloihin perustuvia algoritmeja kiiman tunnistamiseksi. Vaikka nämä alustavat tulokset olivat lupaavia, myöhemmässä tutkimuksessa he totesivat, että hävyn, turvan, korvan ja silmän lämpökuvain perustuvat kiimantunnistusalgoritmit toimivat huonosti (Talukder ym. 2015b). Suurin ongelma näytti olevan väärät positiiviset kiimahavainnot: kiimaiset eläimet kyllä löydettiin, mutta paikkansapitämättömiä kiimahälytyksiä tuli liikaa.

Perez (2017) lämpökuvanti tiineitä ja ei-tiineitä lemiä kiiman yhdenaikaistamisohjelman jälkeen. Lehmien silmä, turpa, posket, niska, etujalat, rinnan ympäryys, taka-osa, hävyn ympäristö, hännän pää ja säkä lämpökuvannettiin. Ei tiineiden lehmien hävyn ympäristön ja turvan pintalämpötila oli tilastollisesti merkittävästi korkeampi kuin tiineiden lehmien, ja niiden hännän pään ja rinnan ympäryksen pintalämpötila laski ovulaation ajankohdan lähestyessä.

Lämpökuvantamisen hyödyntämistä kiimojen havaitsemisessa on tutkittu myös muilla eläimillä. Kuten lehmällä, myös emakolla (Scolari ym. 2011, Luño ym. 2013) ja tammalla (Stelletta ym. 2012) hävyn pinalämpötila laskee ovulaation lähestyessä. Pinalämpötilan muutosten havaitsemiseen näyttää kuitenkin vaikuttavan suuresti, missä ilman lämpötilassa mittaukset tehdään (Sykes ym. 2012, Simões ym. 2014). Uuhilla sen sijaan hävyn pinalämpötilassa ei todettu muutoksia ennen ovulaatiota, mutta turvan ja korvan keskimääräinen pinalämpötila laski 0,6 °C ennen ovulaatiota osoittaen jonkinlaista kykyä ovulaation ennustamiseen (Barros de Freitas 2018). Kuttujen kohdalla Stelletta ym. (2017) suosittelivat käyttämään kiimojen yhdenaikastamisohjelman jälkeiseen kiimaan siemennettäessä keinosiemennysajankohtana määritettyä hävyn ja hävyn ympäristön pinalämpötilojen erotusta ennustamaan mahdollista tiinehtymistä. Tiinehtyneiden kuttujen pinalämpötilojen välinen erotus oli keskimäärin 3,1 °C ja tiinehtymättömien 1,6 °C.

3.6.2. Tiineyden tunnistaminen

Radigonda ym. (2017) yrittivät tunnistaa lehmien tiineyttä mittaamalla lämpökuvantamalla hävyn pinalämpötilaa, mutta eivät löytäneet eroja tiineiden ja ei tiineiden lehmien välillä. Useilla lajeilla tiineys voidaan todeta jo hyvin alkuvaiheessa kylkien lämpötilaeroista: lämpötila on korkeampi sen kohdun sarven puolella, jossa sikiö alkaa kehittyä (ks. katsaus: Rekant ym. 2016). Lehmillä tällaista eroa ei kuitenkaan ole onnistuttu havaitsemaan. Tämä voi johtua siitä, että pötsin toiminta vaikuttaa voimakkaasti vasemman kyljen pinalämpötiloihin ja haittaa kohdun toiminnan aktivoitumisen aiheuttamien pinalämpötilan muutosten näkymistä kylkien välisenä lämpötilaerona. Hellebrand ym. (2003) totesivat, ettei lämpökameralla voinut määrittää pihatossa pidettävien eri vaiheissa tiineiden hiehojen tiineyttä. Toisaalta Montanholi ym. (2015) havaitsivat, että lopputiineyden aikana sikiön korkeamman aineenvaihduntatason aiheuttamat pinalämpötilan muutokset voivat olla havaittavissa oikean kyljen puolella. Myös Jones ym. (2005b) totesivat Holstein hiehojen oikean kyljen lämpökuvantamisen ennustavan tiineyttä paremmin kuin vasemman kyljen. Tästä huolimatta lämpökuvantamisen kyky erottaa tiineet hiehot ei tiineistä oli kyseenalainen ja hyvin riippuvainen ympäristön lämpötilasta.

Lämpökuvantamista on käytetty myös muiden eläinlajien tiineyden tunnistamiseen. Bowers ym. (2009) tutkimuksessa tiineyden viimeisellä kolmanneksella kantavina olleiden 10 tamman kylkien pinalämpötila oli keskimäärin 2,4 °C korkeampi kuin ei kantavien tai varsonneiden tammojen. Pinalämpötilaero oli suurempi, kun ympäristön lämpötila oli alle 19 °C ja pienempi, kun ympäristön lämpötila oli yli 20 °C. Durrant ym. (2006) käyttivät lämpökuvantamista yhdeksän labradorinnoutaja- ja yhden pointterinartun sekä kahden jättiläispandan tiineyden tunnistamiseen. Pandoista toisella todettiin lämpökuvissa kaksi erillistä kohonnutta pinalämpötila-aluetta päivästä 69 eteenpäin ja päivästä 97 eteenpäin alueet olivat selvästi havaittavissa. Tämä panda synnytti yhden elävän pennun päivänä 150. Toisen pandan vatsan pinalämpötila pysyi samana koko tutkimusajan eikä se synnyttänyt. Narttukoirien vatsojen lämpökuvista sen sijaan ei voitu selkeästi tunnistaa tiineenä olevia yksilöitä.

3.6.3. Sonnien hedelmällisyys

Kivesten kohonnut lämpötila saattaa heikentää siittiöiden muodostumista ja hedelmällisyyttä, ja lämpökameroiden hyödyntämistä kivesten lämpötilan seurannassa on kokeiltu naudoilla jo 1990-luvulla (Kastelic ym. 1995, 1996; mittausmenetelmän kehittämistä). Aihe on tärkeä maissa, joissa eläimet elävät hyvin lämpimissä oloissa, ja jopa kivesten eristäminen voi olla tarpeellista (Menegassi ym. 2018). Kivespussien eristämisen vaikutusta kivesten verenkiertoon on tutkittu lämpökuvantamalla kivespussin pinalämpötilaa erimittaisten eristysjaksojen jälkeen. Eristyksen poistamisen jälkeen Braford-sonnien kivespussien pinalämpötila normalisoitui tunnissa (Barca ym. 2016). Vähemmän

äärimmäisissä oloissa kivesten lämpötila säilyy normaalilla alueella niiden oman erityisen lämmönsäätelyjärjestelmän avulla (Montanholi ym. 2009).

Ympäristöolosuhteet ja eläinten käyttäytyminen saattavat vaikuttaa kivesten pintalämpötilaan. Kastelic ym. (1996) tutkivat lihasonnien kivespussien pintalämpötilan päivittäistä vaihtelua sekä, miten pitkä makuu-aika, kivespussien kosteus, ruokinnasta kulunut aika ja ympäristön lämpötila vaikuttivat kivespussin pintalämpötilaan. Sonnit pidettiin neljän sonnin ryhmissä kontrolloiduissa olosuhteissa ympäristön lämpötilan, päivän pituuden ja syönnin suhteen. Kivespussien pintalämpötila mitattiin metrin etäisyydeltä sonnin takaa. Analyysiohjelmalla määritettiin 1,5 cm kivespussin ylä- ja alaosa kivespussin alueen yli ulottuvalta vaakaviivalta kymmenen pikselin keskilämpötila. Lisäksi määritettiin ylä- ja alaosan välinen pintalämpötilaero. Kiveksen alueen keskimääräisen pintalämpötilan saamiseksi hahmoteltiin kiveksen ääriviivat kivespussin alueelle ja määritettiin hahmotellun alueen kaikkien pikselien keskimääräinen pintalämpötila ja keskihajonta. Pintalämpötilojen vaihtelua vuorokauden sisällä ei havaittu, joten kirjoittajien mukaan kivespussin pintalämpötilan voi mitata mihin aikaan päivästä tahansa. Puoli tuntia syömisen aloittamisen jälkeen keskimääräinen kivespussin pintalämpötila kohosi ja sen jälkeen laski. Tunnin makuulla olleiden sonnien kivespussien pintalämpötilassa ei ollut merkittäviä muutoksia ylös nousun jälkeen, jos ilman lämpötila oli 5 tai 15 °C, mutta 25 °C:een lämpötilassa kivesten pintalämpötila nousi ylösnousun jälkeen. Kivespussin ylä- ja alaosan pintalämpötilan ero oli suurin 5 °C:ssa ja pienin 25 °C:ssa. Kosteus laski kivespussin pintalämpötilaa, joka palautui kuivaamisen jälkeen normaaliksi puolessa tunnissa. Ohjeiksi annettiin kuivan kivespussin pintalämpötilan mittaaminen aikaisintaan useita tunteja syömisen ja aikaisintaan tunti makuulta nousun jälkeen.

Menegassi ym. (2016) tutkivat lämpötila-kosteusindeksillä määriteltyä vuodenajan vaikutusta 20 Brangus-rotuisen lihasonnin siemennesteen laatuun eteläbrasilialaisella karjatilalla. Sonnit terveystarkastettiin, lisääntymiselimet tutkittiin ja siemenneste arvosteltiin. Sonnien kivespussit ja silmä lämpökuvannettiin metrin etäisyydeltä. Kivespussien lämpökuvista määritettiin kivespussien yläosan ja alaosan pintalämpötilat yhden pikselin korkuiselta viivalta, joka kulki kivespussin laidasta laitaan sekä näiden viivojen väliseltä yhden pikselin korkuiselta viivalta määritettiin lämpögradientin vaihtelu. Tulosten mukaan kivespussin ylä- ja alaosan pintalämpötilaero oli kesällä pientä (2,1 °C) verrattuna syksyyn (6,6 °C), kevääseen (3,6 °C) ja talveen (4,4 °C). Menegassi ym. (2015, 2016) totesivat, että kivespussin pintalämpötilan nousujen ja laskujen seuraaminen on hyvä epäsuora tapa olosuhdevaikutusten arvioimismenetelmäksi. Kiveksen pintalämpötilagradienttia ei kuitenkaan voi yksin käyttää arvioimaan lämpöstressin vaikutusta siemennesteen laatuun, vaan aiheesta tarvitaan vielä lisää tutkimusta (Menegassi ym. 2018).

Myös muiden märehitijöiden kivesten pintalämpötilaa on mitattu lämpökuvantamisella. Kolmen intialaisen keinosiemennysaseman puhvelisonnien (yhteensä 109 eläintä) kivespussit ja silmät lämpökuvattiin kesän, talven ja sadekauden aikana (Ahirwar ym. 2017). Lämpötilaolosuhteiden katsottiin olevan korkeat silloin, kun laskennallinen lämpötila-kosteusindeksi oli yli 80,9, keskimääräiset indeksin ollessa välillä 70,1 – 80,9 ja alhaiset, kun indeksi oli <70,1. Kivekset kuvattiin metrin etäisyydeltä takajalkojen välistä. Kahden aseman sonnit olivat ryhmässä ja yhden aseman sonnit yksilökarsinoissa. Lämpökuvista mitattiin analyysiohjelmalla kivespussin yläosan, keskiosan ja alaosan sekä silmän pintalämpötilat. Lisäksi laskettiin kivespussin ylä- ja alaosan pintalämpötilan erotus.

Tulosten mukaan kivespussin ja silmän pintalämpötilat vaihtelivat tilastollisesti merkitsevästi eri keinosiemennysasemilla (Ahirwar ym. 2017). Kivespussin kaikista kolmesta kohdasta mitattu pintalämpötila oli tilastollisesti merkitsevästi korkeampi sadekaudella kuin kesällä ja talvella. Korkeissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa kivespussin ja silmän pintalämpötilat olivat tilastollisesti merkitsevästi korkeammat kuin keskimääräisissä tai matalissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa. Ryhmissä pidettävien puhvelisonnien kolmesta eri kohdasta mitatut kivespussien pintalämpötilat olivat tilastollisesti

merkitsevästi korkeammat kuin yksilökarsinoissa pidettävien sonnien. Kuvauspäivän aikana kivespussin ja silmän pintalämpötilat olivat joka kuvauskerralla korkeammat kuin edellisellä kerralla, joten kirjoittajat päättelivät, että keinosiemennysasemilla kannattaa pitää sonnit yksilökarsinoissa ja siemennesteen laadun varmistamiseksi kerätä siemenneste mahdollisimman aikaisin aamulla, jolloin kivespussien pintalämpötila ja kivesten lämpötila on alhaisimmillaan.

Silva ym. (2017) tutkimuksessa 11 brasilialaisen Murrah-rotuisen puhvelisonnin kivespussi ja silmä lämpökuvannettiin 70 cm:n (kivespussi) ja metrin (silmä) etäisyydeltä kuukausittain aamulla ja iltapäivällä kahdeksan kuukauden ajan. Samalla sonneilta mitattiin peräsuolilämpötila ja laskettiin sydän- ja hengitysfrekvenssi. Siemennestettä kerättiin joka toinen viikko. Ilman lämpötila ja kosteusarvoista laskettiin lämpötila-kosteusindeksi tutkimuspäivän aamulle ja iltapäivälle erikseen. Lämpökuvista määritettiin siemennuoran alueen, kiveksen yläosan, kiveksen alaosan, lisäkiveksen hännän pintalämpötilat sekä kivespussin maksimi, keskimääräinen ja minimipintalämpötila piirtämällä kuviin halutulle alueelle suorakulmio. Tulosten mukaan aamuisin kivespussien keskimääräinen pintalämpötila oli 33 °C ja iltapäivisin 34 °C. Kivespussin yläosan pintalämpötila oli korkeampi kuin alaosan pintalämpötila. Yläosan pintalämpötila oli myös korkeampi kuin sonneilla yleensä ja vaihteli 28,5 – 30,4 °C välillä. Puhvelisonnit eivät näyttäneet kärsivän kuumuudesta ja siemennesteen laatu säilyi hyvänä kokeen aikana. Kivesten ja kivespussin lämmönsäätelyn poistaessa tehokkaasti ylimääräisen kuumuuden pysyvät siemennestearvot normaaleina. Kirjoittajien mukaan kivespussin pintalämpötilan mittaamisesta saattaa olla apua kuumuutta paremmin kestävien puhvelisonnien valinnassa.

Pässillä tehdyissä ensimmäisissä lämpökuvantamistutkimuksissa todettiin, ettei kivesten pintalämpötilan perusteella voida tehdä suoria johtopäätöksiä kivesten sisälämpötilasta (Coulter ym. 1988). Samaan johtopäätökseen päätyivät myös Kastelic ym. (1995), jotka mittasivat 16 kaksivuotiaan selkäydinpuudutetun lihasonnin kiveksen pintalämpötilaa lämpökameralla sekä kivespussin ihonalaista ja kiveksen sisäistä lämpötilaa kolmesta kohdasta ihon alle ja kiveskudokseen työnnetyillä neulälämpömittareilla. Ylin mittauskohta oli 3 cm kivespussin yläosan alapuolella ja alin mittauskohta 3 cm kivespussin alimman kohdan yläpuolella ja kolmas mittauskohta oli kivespussin keskiosassa. Ylä- ja alaosan välinen lämpötilaero oli suurin kivespussin pintalämpötilassa (1,6 °C), seuraavaksi suurin kivespussin ihonalaisessa lämpötilassa (0,4 °C), mutta kiveksen alaosan sisäinen lämpötila oli päinvastoin korkeampi (0,2 °C) kuin yläosan sisäinen lämpötila. Tulosten mukaan kivespussin pintalämpötilan ja kiveksen sisäisen lämpötilan välinen vastaavuus oli matala. Lämpökuvien luotettavuuteen vaikuttavat suuresti kuvauskulma ja mistä suunnasta kuvat otetaan; Wallage ym. (2017) tutkimuksessa jopa 64,2 % kiveksistä otetuista lämpökuvista oli käyttökelvottomia huonon kuvakulman vuoksi.

Lämpökuvantamisen hyödyntämistä sonnien hedelmällisyyden arvioinnissa pidetään kuitenkin mahdollisena. Ruediger ym. (2016) tutkimuksessa brasilialaisen karjatilan kuuden laiduntavan Nelore sonnien kivespussit lämpökuvannettiin metrin etäisyydeltä kymmenen päivän välein kuusi kertaa lokajoulukuun välisenä aikana. Kummankin kiveksen kivespussin pinnalta määritettiin pintalämpötilat viidestä kohdasta: kivespussin kaulalta, kivespussin ylä-, keski- ja alaosa sekä lisäkiveksen hännän alueelta (kivespussin alin kohta). Sonneilta kerättiin myös siemennestettä sähköstimulaatiolla sekä verinäytteet testosteronipitoisuusmäärittystä varten. Kirjoittajien mukaan kivespussin pintalämpötilan noustessa siittiöiden liikkuvuus parani ja kerätyn siemennesteen siittiöitiheys oli korkeampi. Lämpökuvantamista ehdotettiin sonnien hedelmällisyysarviointien lisätyökaluksi.

Myös Gábor ym. (1998) totesivat, että kivespussin pintalämpötilan mittaaminen yhdistettynä kivesten GnRH-stimulaatioon ja testosteronipitoisuusmittaukseen voisi olla lupaava lisä kiveksen siittiötuoannon arviointiin. Heidän kokeessaan 20 unkarilaista Holstein-friisiläistä sonnia saivat kolme kertaa kuukauden välein GnRH-pistoksen. Kivekset lämpökuvannettiin jokaisella kerralla ennen pistosta ja 45 minuuttia sen jälkeen. Lämpökuvista määritettiin pintalämpötila yhden pikselin korkuiselta koko kivespussin leveydelle ulottuvalta viivalta kivespussin ylä- ja alaosa sekä näiden pintalämpötilojen

välinen erotus. Siementä kerättiin ennen hormonipistosta ja kolme kertaa pistosta seuranneen kahden viikon aikana. Tulosten mukaan hormonipistoksen jälkeen kivespussin yläosan ja alaosan keskimääräinen pintalämpötila kohosivat tilastollisesti merkitsevästi. Pintalämpötilojen välinen erotus vaihteli välillä 2,9–3,9 °C. Merkitseviä korrelaatioita löytyi vähän, jonka syyksi epäiltiin erilaisia ympäristöolosuhteita eri kuvantamiskerroilla. Ympäristön lämpötila vaikutti enemmän kivespussin pintalämpötiloihin ennen GnRH-hormonipistosta kuin pistoksen jälkeen. Tämän vuoksi kirjoittajat suosittelevat kivespussien lämpökuvantamisen yhdistämistä GnRH-hormonistimulaatioon, jotta ympäristön lämpötilan vaikutus saataisiin mahdollisimman vähäiseksi.

Vencato ym. (2014) samankaltaisessa GnRH-stimulaatiokokeessa 120 italialaisen yksivuotiaan Holstein-sonnin kivespussit lämpökuvannettiin juuri ennen hormonipistosta ja neljä kertaa 15 minuutin välein pistoksen jälkeen. Sonnit, joiden kivespussien pintalämpötila oli laskenut tunnin kohdalla lähtöarvoa matalammaksi, tuottivat laadullisesti parempaa siemennestettä kuin sonnit, joiden kivespussien pintalämpötila oli tunnin kohdalla edelleen lähtöarvoa korkeampi.

Lunstra ja Coulter (1993) tutkivat 73 reilun vuoden ikäisen lihasonnin siemennesteen laatua ja lämpökuvantivat sonnien kivespussit kohtisuorasti takaapäin 91 cm:n (kolmen jalan) etäisyydeltä. Kuvista määritettiin koko kivespussien alueen keskimääräinen pintalämpötila, kivespussin ylä- ja alaosan pintalämpötila sekä ylä- ja alaosan pintalämpötilojen erotus. Sonnit jaettiin lämpötilan mukaan luokkiin normaali, epäilyttävä ja epänormaali. Jako perustui jokaisen sonnien lämpötilagradientin tasaisuuteen ja kivespussin pintalämpötilakuvion arviointiin (menetelmästä tarkemmin Lunstra & Coulter 1997). Kahden päivän kuluttua lämpökuvantamisesta sonnien kivespussien ympärysmitta ja pituus mitattiin, kivekset tunnusteltiin käsin epänormaalisuuksien löytämiseksi sekä siemennestettä kerättiin kahtena peräkkäisenä päivänä sähköstimulaatiolla. Tulosten perusteella 30 sonnia valittiin astumaan 45 päivän ajaksi laiturille noin 18 hiehon ryhmää sonnia kohti. Hiehot tiineystarkastettiin 80 päivää laiturilla oloajan loppumisen jälkeen.

Epänormaalien lämpöluokan sonnien kivespussien keskimääräinen pintalämpötila sekä alaosan lämpötila olivat korkeammat ja ylä- ja alaosan pintalämpötilojen erotus oli pienempi kuin normaalin ja epäilyttävän lämpöluokan sonnien (Lunstra & Coulter 1993). Sonnien kivespussien ympärysmittalla kuten myöskään siemennesteen arvosteluparametreilla ei ollut suoraa yhteyttä pintalämpötilaan. Sen sijaan sonnien lämpöluokilla (normaali, epäilyttävä, epänormaali) oli tilastollisesti merkitsevä yhteys useisiin siittiöparametreihin. Tämä tarkoitti sitä, että lämpöluokaltaan epänormaalit vuoden vanhat lihasonnit tuottivat enemmän epänormaalipäisiä, akrosomivikaisia ja proksimaalipisaraisia siittiöitä kuin normaalin ja epäilyttävän lämpöluokan sonnit. Kirjoittajat saivat tästä vahvistusta aiemmalle käsitykselleen, jonka mukaan alentunut siemennesteen laatu on yhteydessä sonnien kiveksen huonomaan lämmönsäätelyyn (Coulter 1988). Laitumelle astumaan valittujen 30 sonnien tiineyttämisen prosentti (tiinehtyneet hiehot/kaikki sonnien kanssa laiturilla olleet hiehot) oli voimakkaasti yhteydessä sonnien lämpöluokkaan. Epänormaalien lämpöluokan sonnien tiineyttämisen prosentti oli 15 – 17 % huonompi kuin normaalin ja epäilyttävän lämpöluokan sonnien. Epänormaalien lämpöluokan sonnien kivekset olivat sormin tunnusteltaessa hieman suuremmat kuin normaalin ja epäilyttävän luokan sonnien kivekset. Kiveksistä ei tunnusteltaessa kuitenkaan löytynyt mitään epänormaaluuksia.

Lunstra ja Coulter (1993) arvelivat, että pieni kiveskoon suureneminen saattoi olla yhteydessä epänormaalien kiveksen lämmönsäätelyyn, joka tuli ilmi vain lämpökuvantamisessa. Epänormaalien lämpöluokan sonnit eivät pystyneet ylläpitämään tehokasta lämpögradienttia kivespussin yläosasta alaosaan, mutta tuottivat silti siemennestettä, joka täytti siemennesteen käytölle asetetut vaatimukset. Astutukseen valittujen sonnien valintakriteerit olivat riittävän hyvälaatuinen siemenneste, riittävän suuret kivekset tai riittävä astumiskyky (Lunstra & Coulter 1997). Astutuksiin valitut 30 sonnia edustivat kaikkia kolmea lämpöluokkaa, mutta olivat edeltävässä hedelmällisyysarvostelussa kaikki saaneet arvosanan riittävä/tydyttävä. Käytettäessä sonneja astutukseen ero paremman lämpöluokan son-

neihin tuli kuitenkin lopulta esille epänormaalin lämpöluokan sonnien huonompana tiineyttämisprosenttina (Lunstra & Coulter 1993). Kirjoittajien mukaan lämpökuvantamisella saatiin lisää tietoa, jonka avulla voitiin ennustaa nykyisin käytössä olevan hedelmällisyysarvioinnin perusteella siitoskäyttöön valikoiduiksi tulleiden sonnien hedelmällisyyttä.

Lämpökuvantamisen käytöstä nautojen lisääntymistutkimuksissa on kirjoitettu lisää katsausartikkeleissa (Knížková ym. 2007, Rekan ym. 2016) ja lämpökuvantamista käsittelevien kirjojen erillisissä kappaleissa (Stelletta ym. 2012, Stelletta ym. 2013).

4. Muita naudoista lämpökameralla mitattavia asioita

Lämpökuvia voidaan hyödyntää eläintuotannossa myös muihin tarkoituksiin kuin terveysongelmien havaitsemiseen tai hedelmällisyyden parantamiseen (Rekant ym. 2016). Edellä näistä käsiteltiin jo sellaisia stressitiloja, jotka eivät liity suoraan sairauksiin (kappale 3.5.1. Silmän pintalämpötila ja stressi). Muita hyödyntämiskohteita, joista on tehty tutkimusta, ovat muun muassa lämpömukavuus, lämmönsäätely ja rehuhyötysuhde. Yleisellä tasolla voidaan sanoa, että lämpökuvat ovat kiinnostava työkalu näitä asioita tutkittaessa, mutta käytännön sovelluksia ei ole vielä näköpiirissä. Toisaalta alla esitellyt tutkimukset valottavat myös sitä, millaisia tekijöitä on hyvä huomioida mahdollisina mittauksia häiritsevinä tekijöinä, kun lämpökuvantamista käytetään vaikkapa terveysongelmien havaitsemisessa.

Ihon pintalämpötila summaa hyvin ympäristön lämpötilan ja ilman liikkeen vaikutukset lehmien lämmönsäätelyyn ja auttaa siten eläinten lämpömukavuuden arvioinnissa (Knížková ym. 2002). Eläinten lämpökuvantaminen saattaa kertoa niiden lämpömukavuudesta paremmin kuin eläinten käyttäytymisen ja ympäristön lämpötilojen seuranta. Daltro ym. (2017) mukaan lehmän lämpöstressiä ja lämpömukavuutta voitiin parhaiten määrittää lämpökuvantamalla utareen sivuja. Peng ym. (2019) puolestaan suosittelivat otsan pintalämpötilan mittaamista lämpöstressin määrittämiseksi. On myös esitetty, että hengitysnopeus voidaan määrittää lämpökameralla kuvatuista videoista (Stewart ym. 2017). Hengitysnopeus liittyy paitsi terveyteen, myös lämmönsäätelyyn: lehmät hengittävät hitaammin kylmässä ja nopeammin lämpimässä. Myös seebulla (*Bos indicus*) on havaittu, että hyvin lämpimissä oloissa (lämpöstressi) eläimen pintalämpötila ja hengitystiheys korreloivat positiivisesti (Martello ym. 2016). Eläimen elimistö ponnistelee estääkseen ruumiinlämpötilan nousua. Lämpökuvantamisen avulla on tutkittu myös nautarotujen eroja sopeutumisessa lämpimiin olosuhteisiin (Cardoso ym. 2016).

Eläimen syötyä sen elimistö alkaa käsitellä ravintoa ja ravintoaineita, mikä kuluttaa energiaa ja tuottaa lämpöä (Sjaastad ym. 2003). Hiehoilla on havaittu, että syöminen johtaa pintalämpötilan nousuun (Salles ym. 2017), mikä on hyvin loogista, koska ylimääräisestä lämmöstä on päästävä eroon. Nousu oli suurempi karkea- ja väkirehua suhteessa 50/50 saaneilla verrattuna eläimiin, joilla tämä suhde oli 70/30. Vastaavasti härillä tehdyssä kokeessa rehun saantia rajoittamalla aiheutettu syömättömyys näkyi matalampana pintalämpötilana silmän ja pään alueella (Cook ym. 2016).

Hyvä rehuhyötysuhde (energiatehokkuus) on tärkeä edellytys kannattavalle ja kestäväälle maidon- (DiGiacomo 2014) ja naudanlihantuotannolle (Gomes ym. 2016). Residuaalinen syönti eli RFI (engl. *residual feed intake*) on tällä hetkellä parhaaksi havaittu tapa määrittää rehuhyötysuhdetta (Montanholi ym. 2009). RFI:n käyttöön lihakarjalla on kiinnostusta myös Suomessa. RFI:n määrittäminen vaatii viikkojen ruokintakokeen, ja siksi sille olisi tarve löytää vähemmän työläitä ja halvempia korvikemuuttujia (engl. *proxy*) (Thompson ym. 2018). Eläimen pintalämpötila voisi olla tällainen korvikemuuttuja, koska rehuhyötysuhteeltaan huono eläin hukkaa enemmän energiaa perusaineenvaihduntaansa ja tuottaa enemmän lämpöä kuin energiatehokkaampi eläin. Suurempi lämmöntuotto tarkoittaa myös korkeampaa pintalämpötilaa (Gomes ym. 2016). Lukuisat tutkimukset ovat osoittaneet, että lämpökuvien avulla saadut pintalämpötilat (etenkin raajat ja pää) korreloivat RFI:n kanssa: mitä matalampi RFI (parempi energiatehokkuus), sitä alhaisemmat ovat myös pintalämpötilat (Montanholi ym. 2008, 2009, 2010, DiGiacomo ym 2014, Martello ym. 2016). Korrelaatiot ovat kuitenkin monesti heikkoja (Thompson 2018).

Lämpökuvia on mahdollista hyödyntää myös muihin käyttötarkoituksiin kuin varsinaiseen lämpötilan mittaamiseen. Automaattisella kuvankäsittelyllä on joissakin tapauksissa vaikeaa erottaa eläintä riittävän tarkkarajaisesti taustasta normaalissa värivalokuvassa, etenkin, jos kuvauskohde on kirjava (Stajanko ym. 2008). Lämpökuvassa selvästi ympäristöään lämpimämpi kuvauskohde näkyy taas selke-

ästi. Stajnko ym. (2008) testasikin onnituneesti sonnien säkä- ja takakorkeuden automaattista määrittämistä lämpökuvista ja eläinten elopainon arvioimista näin kerättyjen mittojen avulla. Vastaavasti Halachmi ym. (2013) hyödynsivät ylhäältäpäin otettuja lämpökuvia lypsylehmien automaattisessa kuntoluokituksessa.

5. Tieteestä käytäntöön

Tässä osiossa esitetään aiempien ja Kuvaa Nautaa -hankkeen omien selvitysten sekä aihetta käsittelevien tutkimusten pohjalta lämpökuvantamisen tämän hetkistä käyttöä eläintiloilla Suomessa ja kansainvälisesti, sekä lämpökuvantamiselle asetettuja odotuksia ja sen käyttöä rajoittavia tekijöitä.

5.1. Lämpökuvantamisen käyttö nautojen hoidon tukena Suomessa

Lämpökuvantamisen käyttö nautojen hoidon apuvälineenä on Suomessa vähäistä. Vain pieni osa tuottajista, eläinlääkäreistä ja nautojen hoidon asiantuntijoista on kokeillut lämpökuvantamista itse ja vielä pienempi osa on käyttänyt kuvantamista varsinaisesti työssään nautojen parissa (Kortelainen ja Koskela 2018, Kuvaa Nautaa EIP-ryhmän nautatilalliset, suullinen tiedonanto). Suurimmalla osalla vastanneista eläinlääkäreistä ja asiantuntijoista on kuitenkin vähintään kokemusta toisten kuvaamien lämpökamerakuvien tarkastelusta. Lisäksi kyselytutkimuksen avoimien vastausten perusteella voi päätellä, että eläinlääkäreillä ja asiantuntijoilla on varsin hyvä käsitys siitä, miten lämpökuvantamista voisi teoriassa käyttää nautojen hoidon tukena (Kortelaisen ja Koskelan kokoama julkaisematon aineisto). Tuottajien kokemukset lämpökamerakuvauksesta sen sijaan rajoittuvat hyvin pitkälle rakennusteknisiin kuvauksiin ja myös tietämys lämpökuvantamisen tarjoamista mahdollisuuksista nautojen hoidossa on vähäisempää kuin esimerkiksi eläinlääkäreillä (Kuvaa Nautaa EIP-ryhmän nautatilalliset, suullinen tiedonanto).

Suomessa eläinten lämpökuvantamista käytetään yleisimmin hevosten hoidon tukena ja vähäisemmässä määrin pieneläinten hoidossa. Hevosten ja pieneläinten lämpökuvantamista harjoitetaan useammalla klinikalla. Alalla toimii myös ainakin yksi hevosia lämpökuvantava yrittäjä, jolla on eläinlääkärin koulutuksen sijaan ulkomailta hankittu koulutus nimenomaan hevosten lämpökuvantamiseen (Thermalimage.fi 2018). Lämpökuvantamista käytetään hevosten vammojen ja tulehdusten sekä lihasten ja kengityksen epätasapainon tutkimiseen. Paitsi ammattilaisten toimesta, hevosia kuvannetaan Suomessa jossain määrin myös itsenäisesti talleilla. Siinä missä hevosten ammattimaisessa lämpökuvantamisessa kuvantamiseen ja kuvien tarkasteluun käytetään paljon aikaa ja saadut tulokset ovat hyvin yksityiskohtaisia, talleilla itsenäisesti tapahtuvaa lämpökuvantamista käytetään ennemminkin terveyden yleistarkkailuun. Lämpökuvantamisen avulla hevosten jalkoja on voitu hoitaa ennaltaehkäisevästi ja tarvittaessa kutsua myös eläinlääkäri ajoissa tarkistamaan jalat.

Pitkälti hevosten ja pieneläinten lämpökuvantamisesta saatujen kokemusten myötä lämpökuvantamista on päädytty kokeilemaan myös naudoille. Esimerkiksi hevosia ja pieneläimiä pääasiassa lämpökuvantava Perniön eläinklinikka Hauku ja Hirnun eläinlääkäri Noora Saaristo käyttää lämpökuvantamista myös nautojen ontumistutkimuksissa apuvälineenä ja näkee käyttökokemuksensa perusteella lämpökuvantamisen erittäin käyttökelpoisena tutkimusvälineenä paikallistettaessa ontumisen syytä naudoilla (Noora Saaristo, suullinen tiedonanto 30.5.2018). Perniön eläinklinikalla lämpökuvantamista käytettiin aluksi pelkästään hevosille ja pieneläimille. Kuvaa Nautaa -hankkeessa mukana oleva nautatilallinen oli myös tutustunut lämpökuvantamisen tarjoamiin mahdollisuuksiin hevosharastuksensa kautta ja kokeillut sitten onnistuneesti eläinlääkärin kanssa lämpökuvantamista lehmänsä tulehduksen paikantamiseen. Lämpökuvantamisen käyttökokemuksia nautojen hoidossa tilatasolla Suomessa löytyy kuitenkin joka tapauksessa hyvin vähän.

5.2. Lämpökuvantamisen käyttö nautojen hoidon tukena ulkomailta

Ulkomailla lämpökuvantamista käytetään nautojen hoidon tukena jonkin verran ennen kaikkea suurilla nautatiloilla. Ruotsalainen Agricom AB on kehittänyt maitotiloille lämpökamerajärjestelmän, johon kuuluu lypsyasemille tai lypsyrobotin yhteyteen kiinteästi asennetut lämpökamerat ja ohjel-

misto aineiston hyödyntämistä varten (Agricam AB, 2018). Agricamin järjestelmä on käytössä ainakin muutamalla suurella tilalla Ruotsissa. Lisäksi ainakin Iso-Britanniassa lämpökuvantamista käytetään muutamilla emolehmätiloilla eläinten terveyden tarkkailuun (Parrott 2018). Kuitenkin myös ulkomailta käytännön käyttökokemuksia lämpökamerakuvantamisesta nautojen hoidossa on varsin vähän.

Eniten tilatason lämpökuvantamiskokemusta löytyy utaretulehduksen varhaisesta havaitsemisesta Agricamin järjestelmää käyttäen. Agricamin lämpökamerajärjestelmää käyttävien tilojen kokemukset ovat pääsääntöisesti hyviä (Växa Sverige 2017, Herlin 2017). Lämpökuvantamisen avulla tiloilla on kyetty hoitamaan alkavia tulehduksia ilman antibiootteja, jolloin antibioottihoitoa vaativien utaretulehdusten lukumäärä on saatu vähenemään (Berglund 2014, Herlin 2017). Agricamin eläinlääkäri Johan Waldner neuvoo reagoimaan utareen kohonneeseen pintalämpötilaan hieromalla utareta linimentillä (kirjoituksessa ei täsmennetty, mitä linimentillä tarkoitettiin) ja tarkkailemaan tilanteen kehittymistä (Herlin 2017). Myös lypsyrobotin suihkuttamasta linimentistä on hänen mukaansa apua. Waldnerin mukaan antibiootein hoidettavien utaretulehdusten lukumäärä tyypillisesti puolittuu Agricamia käyttävillä tiloilla. Kuitenkin esimerkiksi Agricamia käyttävistä tiloista suurimman Vadsbo Mjölkin työnjohtaja Henrik Larsson kertoo lehdessä, että tilalla oli lämpökameroiden käyttöönoton lisäksi tehty parannuksia myös muihin työruutiineihin tulehdusten vähentämiseksi (Växa Sverige 2017). Hänkin kuitenkin korostaa lämpökameroiden hyödyllisyyttä utaretulehdusten varhaisessa havaitsemisessa ja kertoo, että suuri osa tilalla ilmenevistä utaretulehduksista hoidetaan ilman antibiootteja linimentin avulla (Berglund 2014). Larssonin mukaan utareen pintalämpötila voi olla kohonnut myös muusta syystä kuin alkavan tulehduksen seurauksena ja sen vuoksi Vadsbo Mjölkillä reagoidaan vasta kolmanteen perättäiseen pintalämpötilahälytykseen.

Agricamin järjestelmään kriittisesti suhtautuva Öjeby Gårdin maitotilallinen kyseenalaisti järjestelmän tarjoaman hyödyn palvelusta kuukausittain maksettavaan hintaan nähden (Facebook-keskustelu Öjeby Gård). Edellinen omistaja oli asennuttanut lämpökamerajärjestelmän, mutta se oli poistettu käytöstä korkeiden käyttökustannusten ja vähäisten hyötyjen takia. Agricamin kaltaisen järjestelmän käyttö onkin todennäköisesti taloudellisesti järkevää vasta suurilla tiloilla. Nämä käyttökokemukset kuitenkin osoittavat lämpökuvantamisella olevan potentiaalia utaretulehdusten varhaisessa havaitsemisessa nautatiloilla myös käytännössä.

Saksalainen VIONA (A veterinary infrared orientated online analysis system) (Dias Infrared Systems GmbH) on tutkimus- ja kehitysprojekti, jossa on pyritty kehittämään karusellilypsyasemaan asennettava automaattinen infrapunakuvantamista hyödyntävä lehmien terveydenseurantajärjestelmä (Wirthgen ym. 2011, Franze ym. 2012). Yrityksen nettisivujen tutkimus- ja kehitysosiossa VIONA:an liittyviä tekstejä on päivitetty viimeksi vuonna 2013, joten projektin tämän hetkinen tila on epäselvä.

Lämpökuvantamista on kokeiltu menestyksekkäästi lypsylehmillä myös CowAlert-järjestelmän rinnalla ontuvien lehmien havainnointiin (Lloyd 2018). CowAlert antaa lehmistä ontumishälytyksiä, joiden perusteella karjanhoitaja voi tarkastaa tilanteen (IceRobotics Ltd 2018). Iso-Britanniassa järjestetyssä työpajassa ontumishälytyksen saaneet lehmät tarkastettiin ensin silmämääräisesti karjanhoitajan toimesta, ja sen jälkeen lämpökameraa apuna käyttäen (Lloyd 2018). Seitsemästä hälytyksen saaneesta eläimestä viisi ei näyttänyt ontuvan silmämääräisen tarkastelun perusteella, mutta lämpökameran avulla havaittiin neljällä näistä sorkkaongelmia. Lämpökuvantaminen näyttäisikin olevan potentiaalinen apuväline CowAlert:n tyyppisen automaattisen järjestelmän rinnalle ontuvien nautojen havainnointiin.

Emolehmillä lämpökuvantamista käytetään ontuvien yksilöiden ongelmakohtien paikantamiseen ainakin muutamilla tiloilla Iso-Britanniassa (Parrott 2018). Karjanhoitaja George Coles käyttää lämpökuvantamista säännöllisesti emolehmiensä ontumisten selvittämisessä. Hänen kokemuksensa mukaan ontuminen johtuu emolehmillä usein ylempänä kuin sorkassa olevasta vaivasta ja hän hoitaa

tällaiset tapaukset pelkillä tulehduskipulääkkeillä. Hän pitää lämpökuvantamista hyödyllisenä apuvälineenä, jonka ansiosta hän on kyennyt vähentämään huomattavasti antibioottien käyttöä eläimillä; tilalla käytetään antibiootteja vasta, kun lämpökuvien perusteella ontumisen aiheuttaja on todella tulehdus sorkan alueella. Ontuvien lehmien tutkimisen lisäksi Coles käyttää lämpökuvantamista myös lehmän poikimisajankohdan arviointiin. Hänen kokemuksensa mukaan seuraavan kolmen tunnin sisään poikivalla lehmällä näkyy rugby-pallon muotoinen selkeästi kuumempi alue hännästä utareeseen ulottuvalla alueella. Hän käy lämpökuvantamassa emolehmiä myös muilla tiloilla.

5.3. Lämpökuvantamiselle asetettuja odotuksia

Suomessa sekä nautatiloilla että eläinlääkäreiden ja muiden asiantuntijoiden keskuudessa ollaan kiinnostuneita lämpökuvantamisen tarjoamista mahdollisuuksista ja lämpökuvantaminen nähdään potentiaalisena työvälineenä tulevaisuudessa (Kortelainen ja Koskela 2018, Kuva Nautaa EIP-ryhmän nautatilalliset, suullinen tiedonanto). Eläinlääkärit ja muut nautojen hoidon asiantuntijat näyttävät Kortelaisen ja Koskelan (2018) kyselytutkimuksen perusteella suhtautuvan lämpökamerakuvantamiseen oman työnsä potentiaalisena apuvälineenä hyvin myönteisesti. Suurin osa vastaajista (74 %) ajattelee, että lämpökuvantamisesta voisi olla omassa työssä hyötyä ja kolmasosa vastaajista olisi myös valmis hankkimaan lämpökameran itselleen. Itse kuvatun lämpökameramateriaalin lisäksi oltaisiin valmiita käyttämään toisten kuvaamaa lämpökamerakuvaa oman työn tukena. Lämpökamerakuvantamisen toivotaan helpottavan sairaiden yksilöiden löytymistä ryhmästä, tulehduskohdan paikantamista sairaalta naudalta ja karjasuojan olosuhteiden sekä rehunlaadun tarkkailua.

Sekä tuottajat, että asiantuntijat ja eläinlääkärit toivovat, että lämpökamerakuvantaminen voisi toimia käytännöllisenä keinona löytää sairait yksilöt eläinryhmästä. Karjakoon kasvaessa eläinten yksilöllinen tarkkailu on vaikeampaa ja pihatoissa myös eläimen ottaminen kiinni tutkimista varten on työlästä (Kortelainen ja Koskela 2018, Kuva Nautaa EIP-ryhmän nautatilalliset, suullinen tiedonanto). Etenkin suurilla tiloilla on tarvetta tutkimusmenetelmälle, jolla nautojen terveyttä voi tarkkailla eläimeen koskematta ja kiinniottamatta, jolloin eläimelle aiheutuu vähemmän stressiä (Hoffmann ym. 2016). Nautoja lämpökuvantaneiden eläinlääkäreiden kokemusten perusteella lämpökuvantaminen on menetelmä, jota nautatilalliset itse voisivat käyttää sairaiden yksilöiden erottamiseksi etenkin selkeästi pinalämpötilaan vaikuttavien tulehdusten tapauksessa (Kortelainen ja Koskela 2018, eläinlääkärit Noora Saaristo ja Mirja Moilanen, suullinen tiedonanto 30.5.2018). Esimerkiksi utaretulehdukset nostavat selkeästi utareen pinalämpötilaa (eläinlääkärit Noora Saaristo ja Mirja Moilanen, suullinen tiedonanto 30.5.2018). Lämpökuvantaminen nähtiin myös potentiaalisena keinona löytää joukosta sairait yksilöt aikaisemmin ja mahdollisesti jo ennen näkyviä oireita, jolloin sairaiden nautojen hoito voisi alkaa varhaisemmassa vaiheessa (Kortelainen ja Koskela 2018). Ajoissa aloitettu hoito voi laskea hoidosta aiheutuvia kuluja, nopeuttaa paranemista ja pienentää sairaudesta johtuvaa tuotoksen alenemista. Tuottajien haastattelujen perusteella tarvetta voisi olla paitsi manuaalisesti tarvittaessa käytetylle lämpökameralle myös kiinteälle, automaattisesti kuvaavalle lämpökameralle (Kuva Nautaa EIP-ryhmän nautatilalliset, suullinen tiedonanto). Manuaalisella lämpökameralla voisi kuvantaa laajasti monenlaisia kohteita eri puolilla tilaa, mutta toisaalta lämpökamerakuvantaminen saattaa jäädä tekemättä. Kiinteä lämpökamera voi kuvantaa esimerkiksi lypsyasemalle saapuvien lehmien utareita jatkuvasti ja löytää mahdolliset utaretulehdustapaukset, mutta tällöin kuvantaminen rajoittuu vain yhteen asiaan, jolloin muut kohteet jäävät kuvantamatta.

Sidosryhmien vastausten perusteella lämpökamerasta toivotaan olevan hyötyä erityisesti erilaisten vaikeasti paikannettavien tulehdusten paikantamisessa, sekä sorkka- ja nivelvaivojen syiden selvittämisessä (Kortelainen ja Koskela 2018, Kuva Nautaa EIP-ryhmän nautatilalliset, suullinen tiedonanto). Nautoja lämpökuvantaneiden eläinlääkäreiden kokemukset lämpökuvantamisen käytöstä ainakin ontumisen syiden selvittämisessä ovat rohkaisevia (eläinlääkärit Noora Saaristo ja Mirja Moilanen, suul-

linen tiedonanto 30.5.2018). Haastatellut eläinlääkärit kuitenkin korostavat, ettei lämpökuvantaminen voi korvata yksin muita tutkimusmenetelmiä, vaan se toimii taudinmäärittystä tukevana apuvälineenä. Nautoja lämpökuvantaneiden eläinlääkäreiden kokemuksen perusteella lämpökuvantamista voisivat käyttää tietyllä varauksella myös tuottajat itse sairaan yksilön tulehduksen paikantamiseen. Esimerkiksi niin, että alkavaa utaretulehdusta voisi hoitaa ennaltaehkäisevästi tai tulehduksen parantumisen etenemistä tarkkailla. Vastauksissa korostuu kuitenkin, että varsinaisen taudinmäärittelyn eli diagnoosin voi tehdä vain eläinlääkäri ja asianmukainen hoidon aloittaminen ei lämpökuvantamisen ja itse tehtyjen diagnoosien vuoksi saa viivästyä (Kortelainen ja Koskela 2018, eläinlääkärit Noora Saaristo ja Mirja Moilanen, suullinen tiedonanto 30.5.2018). Nautoja lämpökuvantaneet eläinlääkärit myös painottavat, että tietyt kuvantamiskohteet vaativat toisia enemmän tietoa aiheesta ja eläimen rakenteesta eli anatomiasta (eläinlääkärit Noora Saaristo ja Mirja Moilanen, suullinen tiedonanto 30.5.2018). Esimerkiksi ontumisen syiden selvittäminen vaatii perehtymistä aiheeseen ja jalan anatomiaan, kun taas utaretulehdus on lämpökameralla selkeämmin tulkittavissa.

Tuottajien haastatteluissa ilmeni toive hyödyntää lämpökuvantamista paitsi nautojen terveyden tarkkailussa, myös muissa nautojen hoitoon ja hyvinvointiin liittyvissä kohteissa. Lämpökamerakuvauksella tuottaja voisi tarkastella navetan olosuhteita ja etsiä lämpövuotoja. Tuottaja voisi tarkkailla lämpökameran avulla myös rehun laatua, sillä pilaantuminen näkyy nopeasti rehun lämpötilan kohoamisena. Lämpökuvantamisesta koetaan voivan olla hyötyä myös neuvontatyössä (Kortelainen ja Koskela 2018). Lämpökamerakuvauksella neuvoja voisi konkretisoida asiakkaalle rehun lämpenemistä tai demonstroida olosuhteiden vaikutusta eläimen hyvinvointiin. Esimerkiksi kuivituksen merkityksen tai vasikan luovuttaman lämmön voisi konkreettisesti näyttää lämpökameran avulla (Kortelaisen ja Koskelan julkaisematon aineisto).

5.4. Nautojen lämpökuvantamisen yleistymistä rajoittavat tekijät

Vaikka lämpökuvantaminen selkeästi kiinnostaakin sekä tuottajia että eläinlääkäreitä ja muita asiantuntijoita, sen yleistymiselle näyttää kuitenkin olevan esteitä. Näitä selvityksessä esille tulleita esteitä ovat tutkimus- ja kokemustiedon puute tai olemassa oleva tieto ei ole tavoittanut kohderyhmiä, käytännön ohjeiden ja koulutuksen puute, tekniikan taso sekä laitteiden hintataso ja kustannustehokkuus.

Eläinlääkärit kaipaavat erityisesti lisää tutkimus- ja kokemustietoa lämpökuvantamisen soveltuvuudesta diagnoosin tekemistä helpottavaksi apuvälineeksi (eläinlääkärit Noora Saaristo ja Mirja Moilanen, suullinen tiedonanto 30.5.2018). Kuvaa Nautaa -hankkeen selvityksessä tuli myös ilmi, että eläinlääkäreiden keskuudessa epäillään lämpökameratekniikan olevan vielä liian kehittymätöntä, jotta lämpökameroilla saisi riittävän spesifistä ja sensitiivistä tietoa diagnoosia varten (Kortelainen ja Koskela julkaisematon aineisto). Tuottajat toivovat lisää tutkimus- ja kokemustietoa siitä, millä eri tavoin lämpökameraa voi käytännössä käyttää nautojen hoidon apuvälineenä. Koska kyseessä on varsin uusi menetelmä, on ymmärrettävää, ettei kokemustietoa lämpökuvantamisen käytöstä nautojen hoidossa ole juurikaan saatavilla. Tutkimustieto aiheesta voi myös olla vaikeasti saavutettavissa tai sitä ei ole riittävästi.

Sekä tuottajat että eläinlääkärit ja muut asiantuntijat olisivatkin kiinnostuneita nautojen lämpökamerakuvantamiskoulutuksesta (Kortelainen ja Koskela 2018, Kuvaa Nautaa EIP-ryhmän nautatilalliset, suullinen tiedonanto). Nautatilalliset kaipaavat erityisesti käytännön koulutusta ja ohjeita lämpökuvantamiseen, lämpökameran valintaan ja kuvien tulkintaan. Eläinlääkäreistä ja muista asiantuntijoista 78 % oli kiinnostunut osallistumaan lämpökameroiden käyttökoulutukseen. Mielenkiintoisiksi aiheiksi koettiin kuvaustekniikan lisäksi kuvien tulkinta. Eläinlääkäreitä ja muita asiantuntijoita kiinnostavat erityisesti kontaktiopetus, jossa yhdistetään teoria- ja käytännönopetusta, sekä webinaarit.

Lämpökuvantamisen tulee myös olla kustannustehokasta, jotta menetelmän käyttö olisi järkevää. Toisin sanoen lämpökuvantamisen tulee antaa riittävästi hyötyä käyttäjälleen laitteista tai niiden vuokraamisesta maksettuun hintaan nähden. Yksi kyselyssä selvinnyt syy, miksi lämpökuvantamista ei oltu kokeiltu, oli epäily lämpökuvantamisesta saatavien hyötyjen jäävän varsin pieniksi verrattuna laitteiden hintaan (Kortelainen ja Koskela julkaisematon aineisto). Erityisesti eläinlääkärit epäilivät, että diagnoosin tekemisessä kamerasta ei ole riittävästi hyötyä, jotta sen käyttäminen tai hankkiminen olisi järkevää. Nautojen lämpökuvantamisen yleistyminen edellyttääkin paitsi menetelmän kustannustehokkuutta, myös sitä, että tieto kustannustehokkuudesta saavuttaa kohderyhmänsä. Varsin kallis laite jää muuten hankkimatta.

Kortelaisen ja Koskelan (2018) tulokset ja tuottajien ja eläinlääkäreiden haastattelut tukevat käsitystämme siitä, että kiinnostusta eläinlääkäreiden ja neuvojien taholta lämpökuvantamisen hyödyntämiseen löytyy, mutta menetelmän käytön yleistyminen vaatii lisää tietoa tutkimus- ja käytännön tason kokemuksista. Esimerkiksi eläinlääkäreiden taholta ilmi tullut epäily tekniikan kehittymättömyydestä voi perustua vanhoihin kokemuksiin lämpökameroista, joiden erotuskyky nykyisiin kameroihin verrattuna on ollut heikko. Onkin tärkeää selvittää, mitä tietoa lämpökuvantamisesta on saatavilla, levittää tietoa lämpökuvantamisen mahdollisuuksista mahdollisimman tehokkaasti ja tuottaa tarvittavaa käytännön tason tietoa lämpökuvantamisen mahdollisuuksista.

6. Lopuksi

Savonia-ammattikorkeakoulussa tehty opinnäytetyö osoittaa, että eläintuottajat, eläinlääkärit ja muut eläinalan asiantuntijat ovat kiinnostuneita lämpökuvantamisesta uutena työkaluna nautatiloilla, mutta tietoa aiheesta kaivataan lisää. Ensimmäisiä lämpökuvantamiseen perustuvia järjestelmiä on jo myös markkinoilla. Tässä mielessä Kuvaa Nautaa -hanke on oikein ajoitettu. Tämä katsaus tehtiin tukemaan lämpökuvantamisen käyttöön ottoa suomalaisilla nautatiloilla. Perimmäisenä tavoitteena oli selvittää lämpökuvantamisen tarjoamia mahdollisuuksia ja sen käyttöön liittyviä haasteita tieteellisen tiedon valossa. Katsaus auttaa myös tuottajille ja eläinlääkäreille suunnattujen kuvantamisohjeiden laadinnassa. Se sopii myös lämpökuvantamiskoulutusten syventäväksi taustamateriaaliksi.

Tieteellistä tutkimusta lämpökuvantamisesta nautojen tai muiden eläinten terveyden ja tuotannon seurannan apuvälineenä on yllättävän paljon, mutta tutkimusten ja niiden raportoinnin tieteellinen taso on melko vaihteleva. Jotkin puutteet ovat yleisempiä kuin toiset. Esimerkiksi vaikka emissiivisyydellä ja heijastuvalla lämpötilalla on suurin merkitys mittaustuloksen luotettavuuteen, tuoreen katsausartikkelin mukaan tuotantoeläimillä tehdyistä tutkimuksista vain 54 % raportoi julkaisussaan emissiivisyysarvon ja vain 33 % raportoi huomioineensa heijastuvan lämmön (Harrap ym. 2018).

Vaikka monen yksittäisen tutkimuksen kohdalla mittausten luotettavuutta ei pysty arvioimaan, kokonaiskuva lämpökuvantamisen potentiaalista käytännön työkaluna on oman katsauksemme, so. tämän hetkisen tieteellisen tiedon valossa, melko selkeä. Lämpökuvantaminen näyttäisi olevan lupaava menetelmä sorkkassairauksien löytämisessä. Utaretulehdusten kohdalla tulokset eivät ole kovin luotettavia. Erialaisten pintalämpötilaan vaikuttavien vammojen löytäminen lämpökuvauksen avulla lie-nee helppoa. Ydinlämpötilan ja sen nousun eli kuumeen mittaamiseen menetelmä soveltuu heikok-
min, mutta silmän pintalämpötila saattaisi sopia kuumeen mittaamiseen. Kuitenkin myös stressireak-
tiot vaikuttavat silmän pintalämpötilaan ja voivat siten haitata kuumetulkintoja. Lehmien ja hiehojen
kiimojen, tiineyden ja poikimisen tarkkailussa lämpökuvantamisella voisi olla potentiaalia, mutta
tieteellisiä julkaisuja näistä osa-alueista on toistaiseksi vähän ja hajanaisesti. Sonni-
en kivesten lämpö-
tilatutkimuksia on tehty runsaasti Suomea lämpimämmässä maissa, ja niiden tulokset eivät ole vält-
tämättä kovin relevantteja meidän oloissamme. Lisäksi tieteellinen kirjallisuus toi esille joitain tekijöi-
tä, jotka tulisi huomioida lämpökuvantamisessa mahdollisina virhelähteinä. Tällaisia ovat esimerkiksi
eläinten väliset erot aineenvaihdunnan nopeudessa (ja rehuhyötysuhteessa) sekä niiden ravitsemuk-
sellinen tila.

7. Käsitteitä

Absorptio Sähkömagneettisen säteilyn, mukaan lukien lämpösäteilyn, pidättyminen/vaimeneminen aineeseen.

Adrenokortikotropiinitesti (ACTH-testi) Koe, jossa testataan lisämunuaisen kykyä reagoida stressiin.

Endotermia Endoterminen eläin säätelee ruumiinlämpötilaansa itse tuottamansa lämmön avulla. Ektotermisillä eläimillä lämpö on peräisin ympäristöstä, ja niiden lämpötila seuraa ympäristön lämpötilaa. Nisäkkäät ja linnut ovat endotermisiä, ja muut eläimet ektotermisiä, mutta tämä jako ei ole aivan tarkkarajainen. Huomaa, että sekä endotermiset että ektotermiset eläimet voivat olla eläintieteen termein tasalämpöisiä (homeotermisiä: eläimen lämpötila melko vakio ympäristöstä riippumatta) tai vaihtolämpöisiä (poikilotermisiä: eläimen lämpötila vaihtelee ympäristön lämpötilan mukaan). Esimerkiksi lehmät ja ihmiset ovat (melko) homeotermisiä endotermejä. Sen sijaan esimerkiksi monet pikkulinnut ovat ennemminkin poikilotermisiä endotermejä, koska niiden ruumiinlämpötila voi vaihdella paljon vuorokaudenaikojen mukaan (etenkin kylmissä oloissa). Arkikielessä linnuista puhutaan "tasalämpöisinä", mutta tämä viittaa siis ennemminkin endotermiaan kuin siihen, että ruumiinlämpötila olisi melko vakio. Toisaalta myös ektoterminen eläin voi olla homeoterminen, jos sen elinympäristön lämpötila ei vaihtelee: esim. kalat merissä alueilla, joilla veden lämpötila ei juurikaan vaihtelee.

Emissiivisyys Kappaleen lähettämän säteilyn määrä verrattuna mustan kappaleen säteilyyn. Emissiivisyysarvosta käy ilmi myös, kuinka iso osa mitattua lämpösäteilyä on kappaleen itsensä säteilemää, ja kuinka iso osa ympäristöstä heijastunutta.

Evaporaatio Haihtuminen, lämpösäteilyn yhteydessä lämmön siirtyminen esimerkiksi hikoilun ja heijityksen mukana.

Follikkelivaihe Naudan kiimakierron vaiheet (esikiima ja kiima), jolloin munasarjoissa on kehittyvä follikkeli (yleensä yksi, joskus kaksi), jonka sisältä munasolu irtoaa (ovulaatio) jälkikiiman aikana.

Gonadotropiinin vapauttajahormoni (GnRH) Hypotalamuksesta vapautuva hormoni, joka vapauttaa gonadotropiineja eli follikkelia stimuloivaa hormonia ja luteinisoivaa hormonia aivolisäkkeestä.

Herkkyys (engl. Sensitivity) Tunnistettujen oikeiden positiivisten tapauksen osuus. Esimerkiksi sairauksien tapauksessa herkkyys kertoo, kuinka ison osan sairastuneista testi tunnisti oikein.

Hypotalamus-aivolisäke-lisämunuaiskuori-akseli (HPA-akseli) Stressireaktioita säätelevä neuroendokrinologinen järjestelmä. Neuroendokrinologinen tarkoittaa, että järjestelmään kuuluu hermostoa (hypotalamus) ja umpirauhasia (aivolisäke ja lisämunuaiskuori). Järjestelmän eri osista erittyvien hormonien määrää voidaan käyttää stressin mittarina. Yleisimmin stressin mittarina on käytetty lisämunuaiskuoren tuottamia hormoneja, etenkin kortisolia.

Kalifornia utaretulehdustesti (engl. California mastitis test, CMT) Yksinkertainen maidon solutesti, jossa maidossa olevien solujen DNA reagoi testireagenssin kanssa muodostaen geeliä. Mitä enemmän geeliä muodostuu, sitä korkeampi maidon solulukumäärä on.

Konduktio Lämmön siirtyminen aineen sisällä tai johtuminen toiseen kiinteään aineeseen, esimerkiksi eläimestä makuualustaan.

Konvektio Lämmön siirtyminen kaasussa tai nesteessä, perustuu lämpötiloista johtuviin tiheyseroihin aineessa; lämmin harvempi aine kohoaa ylös ja tiheämpi viileä aine laskeutuu alas.

Korrelaatio Kahden suureen välinen riippuvuus.

Kortisoli Lisämunuaisen kuorikerroksen hormoni, joka erittyy erityisesti stressitilanteissa.

Lämpösäteily Sähkömagneettista säteilyä, jonka saa aikaan aineessa olevien hiukkasten lämpöliike, aallonpituus 0,1 μm – 100 μm

Parasympaattinen hermosto Osa autonomista hermostoa, aktiivisuus suurimmillaan eläimen ollessa lepotilassa.

Pikseli Kuvan pienin yksittäinen osa. Lämpökameroiden yhteydessä pikselillä tarkoitetaan matriisi-ilmaisimessa olevaa yksittäistä mittauspistettä.

Radiaatio (kt. Lämpösäteily)

Residuaalinen syönti (engl. Residual feed intake, RFI) Rehuhyötysuhteen mittari, jossa verrataan eläimen päivittäistä kuiva-ainesyöntiä laskennallisesti arvioituun syöntimäärään. Hyvän rehuhyötysuhteen eläimillä residuaalinen syönti on negatiivinen, jolloin ne käyttävät saavuttamaansa kasvuun vähemmän rehua kuin laskennallisesti oli odotettavissa.

Resoluutio Erottelukyky, kertoo pikseleiden lukumäärän kuvassa ja lämpökameroiden tapauksessa mittauspisteiden lukumäärän matriisi-ilmaisimessa.

Somaattisten solujen lukumäärä (engl. Somatic cell count, SCC) Utareterveyden mittari. Terveen lehmän maidon solulukumäärä on alle 200 000 solua/ml, utaretulehdus nostaa maidon solulukua.

Spesifisyys (engl. Specificity) Tunnistettujen oikeiden negatiivisten tapausten osuus. Esimerkiksi sairauksien tapauksessa spesifisyys kertoo, kuinka ison osan terveistä testi tunnisti oikein.

Sympaattinen hermosto Autonomisen hermoston osa, aktiivisuus suurimmillaan eläimen ollessa aktiivinen ja etenkin "taistele tai pakene" tilanteessa parantaen eläimen selviytymistä.

Vasokonstriktio Verisuonten supistuminen

Viitteet

- Ahirwar, M.K., Kataktalware, M.A., Ramesha, K.P., Pushpadass, H.A., Jeyakumar, S., Revanasiddu, D., Kour, R.J., Nath, S., Nagaleekar, A.K. & Nazar, S. 2017. Influence of season, age and management on scrotal thermal profile in Murrah bulls using scrotal infrared digital thermography. *International Journal of Biometeorology* 61: 2119–2125.
- Agricam AB. 2018. Viitattu: 20.2.2019. Saatavissa internetistä: <https://www.agricam.se/>.
- Alejandro, M., Romero, G., Sabater, J.M. & Diaz, J.R. 2014. Infrared thermography as a tool to determine teat tissue changes caused by machine milking in Murciano-Granadina goats. *Livestock Science* 160: 178–185.
- Aljumaah, R.S., Samara, E.M. & Ayadi, M. 2012. Influence of introducing machine milking on biothermal parameters of lactating camels (*Camelus dromedarius*). *Italian Journal of Animal Science* 11: e73.
- Alsaad, M. & Büscher, W. 2012. Detection of hoof lesions using digital infrared thermography in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 95: 735–742.
- Alsaad, M., Syring, C., Dietrich, J., Doherr, M.G., Gujan, T. & Steiner, A. 2014. A field trial of infrared thermography as a non-invasive diagnostic tool for early detection of digital dermatitis in dairy cows. *The Veterinary Journal* 199: 281–285.
- Alsaad, M., Schaefer, A.L., Büscher, W. & Steiner, A. 2015a. The role of infrared thermography as a non-invasive tool for the detection of lameness in cattle. *Sensors* 15: 14513–14525.
- Alsaad, M., Syring, C., Luternauer, M., Diherr, M.G. & Steiner, A. 2015b. Effect of routine claw trimming on claw temperature in dairy cows measured by infrared thermography. *Journal of Dairy Science* 98: 2381–2388.
- Amezcuca, R., Walsh, S., Luimes, P.H. & Friendship, R.M. 2014. Infrared thermography to evaluate lameness in pregnant sows. *Canadian Veterinary Journal* 55: 268–272.
- Arenas, A.J., Gómez, F., Salas, R., Carrasco, P., Borge, C., Maldonado, A., O'Brien, D.J. & Martínez-Moreno, F.J. 2002. An evaluation of the application of infrared thermal imaging to the tele-diagnosis of sarcoptic mange in Spanish ibex (*Capra pyrenaica*). *Veterinary Parasitology* 109: 111–117.
- Ayadi, M., Samara, E.M., Al-Haidary, A., Aljumaah, R.S., Alshaikh, M.A. & Caja, G. 2012. Thermographic study of dairy camel (*Camelus dromedaries* L.) mammary gland before and after machine milking. Teoksessa. Proceedings of the 3rd Conference of the International Society of Camelid Research and Development, Muscat, Sultanate of Oman, 29 Tammikuu – 1 Helmikuu 2012.s. 234–235.
- Ayadi, M., Aljumaah, R.S., Samara, E.M., Alshaikh, M.A. & Caja, G. 2013. Use of infrared thermography for mastitis detection in lactating dairy camels (*Camelus dromedaries*). Teoksessa: Gahlot, T.K. (toim.). Proceedings of the International Camel Conference, Al-Hasa, Saudi Arabia, 17 – 20 Helmikuu 2013. s. 55–60.
- Barbedo, J.G.A., Gomes, C.C.G., Cardoso, F.F., Domingues, R., Ramos, J.V. & McManus, C.M. 2017. The use of infrared images to detect ticks in cattle and proposal of an algorithm for quantifying the infestation. *Veterinary Parasitology* 235: 106–112.
- Barca, F.A. Jr., Koetz, C. Jr., Pereira, G.R., Menegassi, S.R., Morotti, F., Barcellos, J.O., Claus, L.A. & Seneda, M.M. 2016. The use of Doppler ultrasound and infrared thermography to evaluate scrotal insulation in Bradford bulls. *Journal of Animal Science* 94 (Suppl. 5): 498.
- Barros de Freitas, A.C., Ortiz Vega, W.H., Quirino, C.R., Bartholazzi, A. Jr., Gomes David, C.M., Torres Geraldo, A., Silva Rua, M.A., Cipagauta Rojas, L.F., de Almeida Filho, J.E. & Burla Dias, A.J. 2018. Surface temperature of ewes during estrous cycle measured by infrared thermography. *Theriogenology* 119: 245–251.
- Barros, D.V., Silva, L.K.X., Kahwage, P.R., Lourenço, Júnior J.B., Sousa, J.S., Silva, A.G.M., Franco, I.M., Martorano, L.G. & Garcia, A.R. 2016. Assessment of surface temperatures of buffalo bulls

- (*Bubalus bubalis*) raised under tropical conditions using infrared thermography. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia* 68: 422–430.
- Barth, K. 2000. Basic investigations to evaluate a highly sensitive infrared-thermograph-technique to detect udder inflammation in cows. *Milchwissenschaft - Milk Science International* 55: 607–609.
- Bashiruddin, J.B., Mann, J., Finch, R., Zhang, Z. & Paton, D. 2006. Preliminary study of the use of thermal imaging to assess surface temperatures during foot-and-mouth disease virus infection in cattle, sheep and pigs. Teoksessa: The European Commission for the control of Foot-and-Mouth disease (EuFMD) conference proceedings, Paphos, Kypros, 17 – 20 lokakuu 2006. s. 304–308.
- Berglund G. 2014. Värmekamera upptäcker mastit i förväg. *Land Lantbruk*. Päivitetty: 11.1.2014. Viitattu: 20.2.2019. Saatavissa internetistä: <http://www.landlantbruk.se/lantbruk/varmekamera-upptacker-mastit-i-forvag/>.
- Berry, R.J., Kennedy, A.D., Scott, S.L., Kyle, B.L. & Schaefer, A.L. 2003. Daily variation in the udder surface temperature of dairy cows measured by infrared thermography: potential for mastitis detection. *Canadian Journal of Animal Science* 83: 687–693.
- Bewley, J.M., Grott, M.W., Einstein, M.E. & Schutz, M.M. 2008. Impact of intake water temperatures on reticular temperatures of lactating dairy cows. *Journal of Dairy Science* 91: 3880–3887.
- Blessing, W.W. 2003. Lower brainstem pathways regulating sympathetically mediated changes in cutaneous blood flow. *Cellular and Molecular Neurobiology* 23: 527–537.
- Bobić, T., Mijić, P., Gregić, M., Bagarić, A. & Gantner, V. 2017. Early detection of the hoof diseases in Holstein cows using thermovision camera. *Agriculturae Conspectus Scientificus* 82: 197–200.
- Bobić, T., Mijić, P., Gantner, V., Glavaš, H. & Gregić, M. 2018. The effects of parity and stage of lactation on hoof temperature of dairy cows using a thermovision camera. *Journal of Central European Agriculture* 19: 777–783.
- Bortolami, A., Fiore, E., Gianesella, M., Corrà, M., Catania, S. & Morgante, M. 2015. Evaluation of the udder health status in subclinical mastitis affected dairy cows through bacteriological culture, somatic cell count and thermographic imaging. *Polish Journal of Veterinary Science* 18: 799–805.
- Bowers, S., Gandy, S., Anderson, B., Ryan, P. & Willard, S. 2009. Assessment of pregnancy in the late-gestation mare using digital infrared thermography. *Theriogenology* 72: 372–377.
- Byrne, D.T., Berry, D.P., Esmonde, H. & McHugh, N. 2017. Temporal, spatial, inter-, and intra-cow repeatability of thermal imaging. *Journal of Animal Science* 95: 970–979.
- Byrne, D.T., Berry, D.P., Esmonde, H. & McHugh, N. 2018. Investigation of the relationship between udder quarter somatic cell count and udder skin surface temperature of dairy cows measured by infrared thermography. *Journal of Animal Science* 96: 4458–4470.
- Byrne, D.T., Berry, D.P., Esmonde, H., McGovern, F., Creighton, P. & McHugh, N. 2019. Infrared thermography as a tool to detect hoof lesions in sheep. *Translational Animal Science* 3: 577–588.
- Cannas, S., Palestrini, C., Canali, E., Cozzi, B., Ferri, N., Heinzl, E., Minero, M., Chincarini, M., Vignola, G. & Dalla Costa, E. 2018. Thermography as a non-invasive measure of stress and fear of humans in sheep. *Animals* 8: 146.
- Cardoso, C.C., Lima, F.G., Fioravanti, M.C.S., Egitto, A.A., Silva, F.C.P., Tanure, C.B., Peripolli, V. & McManus C. 2016. Heat tolerance in curraleiro pe-duro, pantaneiro and nelore cattle using thermographic images. *Animals* 2016: 9.
- Castro-Costa, A., Caja, G., Salama, A.A.K., Rovai, M., Flores, C. & Aguiló, J. 2014. Thermographic variation of the udder of dairy ewes in early lactation and following an *Escherichia coli* endotoxin intramammary challenge in late lactation. *Journal of Dairy Science* 97: 1377–1387.
- Cena, K. & Monteith, J.L. 1975. Transfer processes in animal coats II. Conduction and convection. *Proceedings of the Royal Society of London* 188: 395–411.
- Çetinkaya, M.A. & Demirutku, A. 2012. Thermography in the assessment of equine lameness. *Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences* 36: 43–48.
- Church, J.S., Cook, N.J. & Schaefer, A.L. 2009. Recent applications of infrared thermography for animal welfare and veterinary research: everything from chicks to elephants. *InfraMation 2009 Proceedings*.

- Church, J.S., Hegadoren, P.R., Paetkau, M.J., Miller, C.C., Regev-Shoshani, G., Schaefer, A.L. & Schwartzkopf-Genswein, K.S. 2014. Influence of environmental factors on infrared eye temperature measurements in cattle. *Research in Veterinary Science* 96: 220–226.
- Cockcroft, P.D., Henson, F.D. & Parker, C. 2000. Thermography of a septic metatarsophalangeal joint in a heifer. *The Veterinary Record* 146: 258–260.
- Colak, A., Polat, B., Okumus, Z., Kaya, M., Yanmaz, L.E. & Hayirli, A. 2008. Short communication: early detection of mastitis using infrared thermography in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 91: 4244–4228.
- Cook, N.J., Schaefer, A.L., Warren, L., Burwash, L., Anderson, M. & Baron, V. 2001. Adrenocortical and metabolic responses to ACTH injection in horses: An assessment by salivary cortisol and infrared thermography of the eye. *Canadian Journal of Animal Science* 81: 621.
- Cook, N.J., Church, J.S., Schaefer, A.L., Webster, J.R., Matthews, L.R. & Suttie, J.M. 2005. Stress and pain assessment of velvet antler removal from elk (*Cervus elaphus canadensis*) and reindeer (*Rangifer tarandus*). *Online Journal of Veterinary Research* 9: 24–36.
- Cook, N., Timsit, E., Colyn, J., Chabot, B., Liu, T., Wolfger, B. & Scafer, A. 2016. Assessing consistency in radiated thermal output of beef steers by infrared thermography. *Journal of Imaging* 2: 21.
- Cortivo, P.D., Dias, E., Barcellos, J.O.J., Peripolli, V., Costa, J.B.G. Jr., Dallago, B.S.L. & McManus, C.M. 2016. Use of thermographic images to detect external parasite load in cattle. *Computers and Electronics in Agriculture* 127: 413–417.
- Coulter, G. H. 1988. Thermography of bull testes. Teoksessa: Proceedings of the 12th Technical Conference on Artificial Insemination & Reproduction, National Association of Animal Breeders, Columbia. s. 58–63.
- Coulter, G.H., Senger, P.L. & Bailey, D.C. 1988. Relationship of scrotal surface temperature measured by infrared thermography of subcutaneous testicular temperature in the ram. *Journal of Reproduction and Fertility* 84: 417–423.
- Curran, A., Klein, M., Hepokoski, M., & Packard, C. 2015. Improving the accuracy of infrared measurements of skin temperature. *Extreme Physiology & Medicine*, 4 (Suppl 1): A140.
- Daltro, D. S., Fischer, V., Alfonzo, E. P. M., Dalcin, V. C., Stumpf, M. T., Kolling, G. J., Silva, M. V. G. B. & McManus, C. 2017. Infrared thermography as a method for evaluating the heat tolerance in dairy cows. *Revista Brasileira de Zootecnia* 46: 374–383.
- DiGiacomo, K., Marett, L.C., Wales, W.J., Hayes, B.J., Dunshea, F.R. & Leury, B.J. 2014. Thermoregulatory differences in lactating dairy cattle classed as efficient or inefficient based on residual feed intake. *Animal Production Science* 54: 1877–1881.
- Digiovani, D.B., Borges, M.H.F., Galdioli, V.H.G., Matias, B.F., Bernardo, G.M., da Rocha Silva, T., Cruz Fávoro, P., Barca F.A. Jr., Lopes, F.G., Koetz, C. Jr. & de Azambuja Ribeiro, E.L. 2016. Infrared thermography as diagnostic tool for bovine subclinical mastitis detection. *Brazilian Journal of Hygiene and Animal Sanity* 10: 685–692.
- Dray, S., Harris, A., Farrar, R., Grissett, G., Laird, S. & Willard, S. 2007. A comparison of body temperature measures between Holstein and Gir x Holstein cows in relation to environment and stage of the estrous cycle. ASAS/ADSA National Meeting, San Antonio, 2007. *Journal of Animal Science* 85 (Suppl 1): 331.
- Dunbar, M.R., Johnson, S. R., Rhyan, J. C. & McCollum M. 2009. Use of infrared thermography to detect thermographic changes in mule deer (*Odocoileus hemionus*) experimentally infected with foot-and-mouth disease. *Journal of Zoo and Wildlife Medicine* 40: 296–301.
- Durrant, B.S., Ravida, N., Spady, T. & Cheng, A. 2006. New technologies for the study of carnivore reproduction. *Theriogenology* 66: 1729–1736.
- Eichel, H. 1992. Temperature of teat skin in dairy cows milked in piped milking parlor. *Monatshefte fuer Veterinaermedizin* 47: 193–195.
- Fenner, K., Yoon, S., White, P., Starling, M. & McGreevy, P. 2016. The effect of noseband tightening on horses' behavior, eye temperature and cardiac responses. *PLoS ONE* 11: e0154179.
- FLIR Systems. 2012. The ultimate infrared handbook for R&D professionals. USA: FLIR Systems, Inc. 31 s.

- FLIR Systems. 2015. Temperature guns versus thermal imaging technology. Päivitetty 5.11.2015. Viitattu 29.3.2019. Saatavissa internetistä: <https://www.flir.com/discover/rd-science/temperature-guns-versus-thermal-imaging-technology/>
- Franze, U., Geidel, S., Heyde, U., Schroth, A., Wirthgen, T. & Zipser, S. 2012. Investigation of infrared thermography for automatic health monitoring in dairy cows. *Zuchtungskunde* 84: 158–170.
- Gábor, G., Sasser, R.G., Kastelic, J.P., Coulter, G.H., Falkay, G., Mézes, M., Bozó, S., Völgyi-Csík, J., Bárány, I. & Szász, F. Jr. 1998. Morphologic, endocrine and thermographic measurements of testicles in comparison with semen characteristics in mature Holstein-Friesian breeding bulls. *Animal Reproduction Science* 51: 215–224.
- Gatto, M., Giancesella, M. & Morgante, M. 2010. Application of infrared thermography as tools to diagnosis subacute ruminal acidosis of dairy cows. *Large Animal Review* 16: 7–12. (Italiaksi).
- George, W.D., Godfrey, R.W., Ketring, R.C., Vinson, M.C. & Willard, S.T. 2014. Relationship among eye and muzzle temperatures measured using digital infrared thermal imaging and vaginal and rectal temperatures in hair sheep and cattle. *Journal of Animal Science* 92: 4949–4955.
- Giancesella, M., Morgante, M., Stelletta, C., Ravarotto, L., Giudice, E. & Van Saun, R.J. 2010. Evaluating the effects of rumenocentesis on health and performance in dairy cows. *Acta Veterinaria Brno* 79: 459–468.
- Giancesella, M., Arfuso, F., Fiore, E., Giambelluca, S., Giudice, E., Armato, L. & Piccione, G. 2018. Infrared thermography as a rapid and non-invasive diagnostic tool to detect inflammatory foot diseases in dairy cows. *Polish Journal of Veterinary Sciences* 21: 299–305.
- Gil, Z., Adamczyk, K., Zapletal, P., Frellich, J., Šlachta, M. & Andreasik, A. 2013. Impact of the location of the dairy cows in the barn on their body surface temperature. *Journal of Central European Agriculture* 14: 1081–1090.
- Gloster, J., Ebert, K., Gubbins, S., Bashiruddin, J. & Paton, D.J. 2011. Normal variation in thermal radiated temperature in cattle: implications for foot-and-mouth disease detection. *BMC Veterinary Research* 7: 73.
- Godfrey, R.W., Ketring, R.C. & Willard, S.T. 2007. Use of infrared thermal imaging to measure changes in body temperature following lipopolysaccharide (LPS) administration in hair sheep ewes. *ASAS/ADSA National Meeting, San Antonio, 2007. Journal of Animal Science* 85 (Suppl 1): 676–677.
- Golzarian, M.R., Soltanali, H., Doosti Irani, O. & Ebrahimi, S.H. 2017. Possibility of early detection of bovine mastitis in dairy cows using thermal images processing. *Iranian Journal of Applied Science* 7: 549–557.
- Gomes, R.A., Busato, K.C., Ladeira, M.M., Johnson, K.A., Galvão, M.C., Rodrigues, A.C., Lourençoni, D. & Chizzotti, M.L. 2016. Technical note: Relationship between infrared thermography and heat production in young bulls. *Journal of Animal Science* 94: 1105–1109.
- Gomez, Y., Bieler, R., Hankele, A.K., Zähler, M., Savary, P. & Hillmann, E. 2018. Evaluation of visible eye white and maximum eye temperature as non-invasive indicators of stress in dairy cows. *Applied Animal Behaviour Science* 198: 1–8.
- Groenevelt, M., Main, D.C.J., Tisdall, D., Knowles, T.G. & Bell, N.J. 2014. Measuring the response to therapeutic foot trimming in dairy cows with fortnightly lameness scoring. *The Veterinary Journal* 201: 283–288.
- Halachmi, I., Klopčič, M., Polak, P., Roberts, D.J. & Bewley, J.M. 2013. Automatic assessment of dairy cattle body condition score using thermal imaging. *Computers and Electronics in Agriculture* 99: 35–40.
- Hamann, J. 1985. Infection rate as affected by teat tissue reactions due to conventional and non-conventional milking systems. *Kieler Milchwirtschaftlich Forschungsberichte* 37: 426–430.
- Hanusová, J., Gálik, R., Boďo, Š., Kunc, P., Knižková, I. & Staroňová, L. 2016. Analysis of quality milking process by thermographic method. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis* 64: 1149–1153.
- Harper, D.L. 2000. The value of infrared thermography in the diagnosis and prognosis of injuries in animals. *InfraMation 2000 Proceedings*.

- Harrap, M.J.M., Hempel de Ibarra, N., Whitney, H.M. & Rands, S.A., 2018. Reporting of thermography parameters in biology: a systematic review of thermal imaging literature. *Royal Society Open Science* 5: 181281.
- Harris-Bridge, G., Young, L., Handel, I., Farish, M., Mason, C., Mitchell, M.A. & Haskell, M.J. 2018. The use of infrared thermography for detecting digital dermatitis in dairy cattle: What is the best measure of temperature and foot location to use? *The Veterinary Journal* 237: 26–33.
- Hellebrand, H.J., Brehme, U., Beuche, H., Stollberg, U. & Jacobs, H. 2003. Application of thermal imaging for cattle management. Teoksessa: Cox, S. (toim.). *Precision Livestock Farming, 1st European Conference on Precision Livestock Farming, Berliini, Saksa*. p. 761–763.
- Herborn, K.A., Graves, J.L., Evans, P.J.N.P., Nager, R., McCaffery, D.J. & McKeegan, D.E.F. 2015. Skin temperature reveals the intensity of acute stress. *Physiology & Behavior* 152: 225–230
- Herlin, A. 2017. Early discovery of mastitis with military technology. *Data Driven Dairy Decision for Farmers*. Päivitetty: 17.10.2017. Viitattu: 20.2.2019. Saatavissa internetistä: <https://4d4f.eu/content/early-discovery-mastitis-military-technology>.
- Hillerton, J.E. & Bramley, A.J. 1986. Variability between muscidae populations of dairy heifers on two different types of pasture in Southern England. *British Veterinary Journal* 142: 155–162.
- Hoffmann, G., Schmidt, M., Ammon, C., Rose-Meierhöfer, S., Burfeind, O., Heuwieser, W. & Berg, W. 2013. Monitoring the body temperature of cows and calves using video recordings from an infrared thermography camera. *Veterinary Research Communications* 37: 91–99.
- Hoffmann, G., Schmidt, M. & Ammon, C. 2016. First investigations to refine video-based IR thermography as a non-invasive tool to monitor the body temperature of calves. *Animal* 10: 1542–1546.
- Holzauer, M., Hardenberg, C., Bartels, J.M. & Frankena, K. 2006. Herd- and cow-level prevalence of digital dermatitis in the Netherlands and associated risk factors. *Journal of Dairy Science* 89: 580–588.
- Hovinen, M., Siivonen, J., Taponen, S., Hänninen, L., Pastell, M., Aisla, A.M. & Pyörälä, S. 2008. Detection of clinical mastitis with the help of a thermal camera. *Journal of Dairy Science* 91: 4592–4598.
- Hurnik, J.F., De Boer, S. & Webster, A.B. 1984. Detection of health disorders in dairy cattle utilizing a thermal infrared scanning technique. *Canadian Journal of Animal Science* 64: 1071–1073.
- Hurnik, J.F., Webster, A.B. & DeBoer, S. 1985. An investigation of skin temperature differentials in relation to estrus in dairy cattle using a thermal infrared scanning technique. *Journal of Animal Science* 61: 1095–1102.
- Huxley, J.N. 2013. Impact of lameness and claw lesions in cows on health and production. *Livestock Science* 156: 64–70.
- IceRobotics Ltd. 2018. CowAlert. Viitattu: 20.2.2019. Saatavissa internetistä: <https://the.cowalert.com/>
- Johnson, S.R. & Dunbar, M.R. 2008. Use of infrared thermography as an alternative method to evaluate the comparative cervical test (CCT) in cattle sensitized to *Mycobacterium bovis* or *M. avium*. Teoksessa: Richey, M. (toim.). *Proceedings of the 112th Annual Meeting of the United States Animal Health Association, 26 – 29 Lokakuu 2008, Greensboro, North Carolina*. Kansas City, USA: Richardson Printing. s. 101–102.
- Jones, M., Denson, A., Williams, E., Dos Santos, A., Graves, K., Kouba, A. & Willard, S. 2005a. Assessing pregnancy status using digital infrared thermal imaging in Holstein dairy heifers. ASAS/ADSA National Meeting, Cincinnati, Ohio, 2005. *Journal of Animal Science* 83 (Suppl 1): 40.
- Jones, M., Denson, A., Bowers, S., Moulton, K., Williams, E., Graves, K., Dos Santos, A., Kouba, A. & Willard, S. 2005b. Thermography of the vulva in Holstein dairy cows: a comparison of estrus vs. diestrus. ASAS/ADSA National Meeting, Cincinnati, Ohio, 2005. *Journal of Animal Science* 83 (Suppl 1): 41.
- Junga, P., Travnicek, P. & Ruzbarsky, J. 2016. Monitoring of the machine milking process with application of infrared thermography. *MM Science Journal* 9: 985–988.

- Juozaityene, V., Juozaitis, A., Zymantiene, J., Oberauskas, V., Aniulienė, A., Kajokienė, L., Yilmaz, A. & Simokaitienė, A. 2019. The effect of different levels of teat-end hyperkeratosis on mammary infrared thermograph and mastitis in dairy cows. *Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi* 66: 21–26.
- Kastelic, J.P., Coulter, G.H. & Cook, R.B. 1995. Scrotal surface, subcutaneous, intratesticular and intraepididymal temperatures in bulls. *Theriogenology* 44: 147–152.
- Kastelic, J.P., Cook, R., Coulter, G.H., Wallins, G.L. & Entz, T. 1996. Environmental factors affecting measurement of bovine scrotal surface temperature with infrared thermography. *Animal Reproduction Science* 41: 153–159.
- Kennedy, A. 2004. Mastitis detection using infrared thermography. *Western Dairy Digest* 5: 15.
- Knížková, I., Kunc, P., Koubková, M., Flusser, J. & Doležal, O. 2002. Evaluation of naturally ventilated dairy barn management by a thermographic method. *Livestock Production Science* 77: 349–353.
- Knížková, I., Kunc, P. & Gürd 2007. Applications of infrared thermography in animal production. *Journal of the Faculty of Agriculture, Ondokuz Mayıs Üniversitesi (OMU)* 22: 329–336.
- Kortelainen, M. & Koskela, E. 2018. Nautojen lämpökamerakuvaus – Kirjallisuuskatsaus lämpökamerakuvausten mahdollisuuksista ja kyselytutkimus sidosryhmille. 51 s. Opinnäytetyö, Savonia ammattikorkeakoulu.
- Kunc, P., Knížková, I., Přikryl, M. & Maloun, J. 2007. Infrared thermography as a tool to study the milking process: a review. *Agricultura Tropica et Subtropica* 40: 29–32.
- Kunc, P., Knížková, I. & Hanusová, J. 2018. Teat traumatization in conventional and automatic milking system. *Proceedings of 14th Quantitative InfraRed Thermography Conference, Berliini, Saksa, 25 – 29 Kesäkuu 2018.* s.13–16.
- Laven, R.A. & Proven, M.J. 2000. Use of an antibiotic footbath in the treatment of bovine digital dermatitis. *The Veterinary Record* 147: 503–506.
- Lees, A.M., Lees, J.C., Seijan, V., Wallage, A.L. & Gaughan, J.B. 2018. Short communication: using infrared thermography as an in situ measure of core body temperature in lot-fed Angus steers. *International Journal of Biometeorology* 62: 3–8.
- Lin, Y.-C., Mullan, S. & Main, D.C.J. 2018. Optimising lameness detection in dairy cattle by using handheld infrared thermometers. *Veterinary Medicine and Science* 4: 218–226.
- Lloyd, R. 2018. Thermal imaging validates lameness alerts. Päivitetty: 8.5.2018. Viitattu: 15.2.2019. Saatavissa internetistä: <https://4d4f.eu/content/thermal-imaging-validates-lameness-alerts>.
- LokeshBabu, D.S., Jeyakumar, S., Vasant, P.J., Sathiyabarathi, M., Manimaran, A., Kumaresan, A., Pushpadass, H.A., Sivaram, M., Ramesha, K.P., Katakataware, M.A. & Siddaramanna. 2018. Monitoring foot surface temperature using infrared thermal imaging for assessment of hoof health status in cattle: a review. *Journal of Thermal Biology* 78: 10–21.
- Luño, V., Gil, L., Jerez, R.A., Malo, C., González, N., Grandia, J. & de Blas, I. 2013. Determination of ovulation time in sows based on skin temperature and genital electrical resistance changes. *Veterinary Record* 172: 579.
- Lunstra, D.D. & Coulter, G.H. 1993. Scrotal thermography as a tool for predicting semen quality and natural-mating fertility in young beef bulls. *Beef Research Program Progress Report* 4: 86–89.
- Lunstra, D.D. & Coulter, G.H. 1997. Relationship between scrotal infrared temperature patterns and natural-mating fertility in beef bulls. *Journal of Animal Science* 75: 767–774.
- Main, D.C.J., Stokes, J.E., Reader, J.D. & Whay, H.R. 2012. Detecting hoof lesions in dairy cattle using a hand-held thermometer. *The Veterinary Record* 171: 504.
- Manske, T., Hultgren, J. & Bergsten, C. 2002. Topical treatment of digital dermatitis associated with severe heel-horn erosion in a Swedish dairy herd. *Preventive Veterinary Medicine* 53: 215–231.
- Martello, L.S., Silva, S.L., Gomes, R.C., Corte, R.R.S. & Leme, P.R. 2016. Infrared thermography as a tool to evaluate body surface temperature and its relationship with feed efficiency in *Bos indicus* cattle in tropical conditions. *International Journal of Biometeorology* 60: 173–181.
- Marti, S., Wilde, R.E., Moya, D., Janzen, E.D., Jelinski, M.J., Dorin, C.L., Orsel, K., Pajor, E., Shearer, J., Millman, S.T., Coetzee, J.F., Thomson, D. & Schwartzkopf-Genswein K.S. 2015. Infrared

- thermography as a tool to diagnose foot rot and digital dermatitis in feedlot cattle. ASAS/ADSA National Meeting, Orlando, 2015. *Journal of Animal Science* 93 (Suppl s3): 622–623.
- Martins, R.F.S., Paim, T.P., Cardoso, C.A., Dallago, B.S.L., Melo, C.B., Louvandini, H. & McManus, C. 2013. Mastitis detection in sheep by infrared thermography. *Research in Veterinary Science* 94: 722–724.
- McCafferty, D.J. 2007. The value of infrared thermography for research on mammals: previous applications and future directions. *Mammal Review* 37: 207–223.
- McManus, C., Tanure, C.B., Peripolli, V., Seixas, L., Fischer, V., Gabbi, A.M., Menegassi, S.R.O., Stumpf, M.T., Kolling, G.J., Dias, E. & Costa, J.B.G. Jr. 2016. Infrared thermography in animal production: an overview. *Computers and Electronics in Agriculture* 123: 10–16.
- Menegassi, S.R.O., Barcellos, J.O.J., Dias, E.A., Koetz, C. Jr., Pereira, G.R., Peripolli, V., McManus, C., Canozzi, M.E.A. & Lopes, F.G. 2015. Scrotal infrared digital thermography as a predictor of seasonal effects on sperm traits in Braford bulls. *International Journal of Biometeorology* 59: 357–364.
- Menegassi, S.R.O., Pereira, G.R., Dias, E.A., Koetz, C. Jr., Lopes, F.G., Bremm, C., Pimentel, C., Lopes, R.B., Rocha, M.K., Carvalho, H.R. & Barcellos, J.O.J. 2016. The uses of infrared thermography to evaluate the effects of climatic variables in bull's reproduction. *International Journal of Biometeorology* 60: 151–157.
- Menegassi, S.R.O., Pereira, G.R., Dias, E.A., Rocha, M.K., Carvalho, H.R., Koetz, C. Jr., Oberst, E.R. & Barcellos, J.O.J. 2018. Infrared thermography as a noninvasive method to assess scrotal insulation on sperm production beef bulls. *Andrologia* 50: e12904.
- Metzner, M., Sauter-Louis, C., Seemueller, A., Petzl, W. & Klee, W. 2014. Infrared thermography of the udder surface of dairy cattle: Characteristics, methods, and correlation with rectal temperature. *Veterinary Journal* 199: 57–62.
- Metzner, M., Sauter-Louis, C., Seemueller, A., Petzl, W. & Zerbe, H. 2015. Infrared thermography of the udder after experimentally induced *Escherichia coli* mastitis in cows. *Veterinary Journal* 204: 360–362.
- Mitchell, M.A. 2013. Thermal imaging in physiology: Theoretical and practical considerations. Teoksessa: Luzi, F., Mitchell, M., Nanni Costa, L. & Redaelli, V. (toim.). *Thermography: Current status and advances in livestock animals and in veterinary medicine*. Editio a cura fondazione iniziativa zooprofilattiche e zootecniche 92. Brescia, Italia: Fondazione Iniziative Zooprofilattiche e Zootecniche. S. 47–65. ISBN 978-88-97562-06-1.
- Modest, M.F. 2003. Radiative Heat Transfer. Amsterdam, Alankomaat: eBook Academic Press. Toinen painos. 721 s. ISBN 978-00-80515-63-2.
- Moe, R.O., Bohlin, J., Flø, A., Vasdal, G., Erlandsen, H., Guneriusen, E., Sjøkvist, E.C. & Stubstjøen, S.M. 2018. Effects of subclinical footbad dermatitis and emotional arousal on surface foot temperature recorded with infrared thermography in turkey toms (*Meleagris gallopavo*). *Poultry Science* 97: 2249–2257.
- Montanholi, Y.R., Odongo, N.E., Swanson, K.C., Schenkel, F.S., McBride, B.W. & Miller, S.P. 2008. Application of infrared thermography as an indicator of heat and methane production and its use in the study of skin temperature in response to physiological events in dairy cattle (*Bos taurus*). *Journal of Thermal Biology* 33: 468–475.
- Montanholi, Y.R., Swanson, K.C., Schenkel, F.S., McBride, B.W., Caldwell, T.R. & Miller, S.P. 2009. On the determination of residual feed intake and associations of infrared thermography with efficiency and ultrasound traits in beef bulls. *Livestock Science* 125: 22–30.
- Montanholi, Y.R., Swanson, K.C., Palme, R., Schenkel, F.S., McBride, B.W., Lu, D. & Miller, S.P. 2010. Assessing feed efficiency in beef steers through feeding behavior, infrared thermography and glucocorticoids. *Animal* 4: 692–701.
- Montanholi, Y.R., Lim, M., Macdonald, A., Smith, B.A., Goldhawk, C., Schwartzkopf-Gensewein, K. & Miller, S.P. 2015. Technological, environmental and biological factors: referent variance values for infrared imaging of the bovine. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 6: 27.

- Montanholi, Y.R. 2015. Using infrared radiation to detect local inflammation in cattle. *Veterinary record* 176: 306–307.
- Munsell, B.A., Beede, D.K., Domecq, J.J., Epperson, W.B., Ragavendran, A., Wright, N.T. & Zanella, A.J. 2006. Use of infrared thermography to non-invasively identify lesions in dairy cows. ASAS/ADSA National Meeting, Minnesota, 2006. *Journal of Animal Science* 84 (Suppl 1): 143.
- Murray, R.D., Downham, D.Y., Clarkson, M.J., Faull, W.B., Manson, F.J., Merritt, J.B., Russell, W.B., Suthers, J.E. & Ward, W.R. 1996. Epidemiology of lameness in dairy cattle: description and analysis of foot lesions. *The Veterinary Record* 138: 586–591.
- Nakayama, K., Goto, S., Kuraoka, K. & Nakamura, K. 2005. Decrease in nasal temperature of rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) in negative emotional state. *Physiology & Behavior* 84: 783–790.
- Nikkhah, A., Plaizier, J.C., Einarson, M.S., Berry, R.J., Scott, S.L., & Kennedy, A.D. 2005. Infrared thermography and visual examination of hooves of dairy cows in two stages of lactation. *Journal of Dairy Science* 88: 2749–2753.
- Ng, E.Y.K., Kaw, G.J.L. & Chang, W.M. 2004. Analysis of IR thermal imager for mass blind fever screening. *Microvascular Research* 68: 104–109.
- Oikonomou, G., Trojancanec, P., Ganda, E.K., Bicalho, M.L.S. & Bicalho, R.C. 2014. Association of digital cushion thickness with sole temperature measured with the use of infrared thermography. *Journal of Dairy Science* 97: 4208–4215.
- Okada, K., Takemura, K. & Sato, S. 2013. Investigation of various essential factors for optimum infrared thermography. *Journal of Veterinary Medical Science* 75: 1349–1353.
- Olğac, K.T., Akçay, E., Çil, B., Uçar, B.M. & Daşkin, A. 2017. The use of infrared thermography to detect the stages of estrus cycle and ovulation time in anatolian shepherd dogs. *Journal of Animal Science and Technology* 59: 21.
- Orlove, G. 2017. What does sensitivity (NETD) mean when applied to a thermal imager? Päivitetty: 18.8.2017: Viitattu: 20.12.2018. Saatavissa internetistä: <http://irinformir.blogspot.com/2017/08/what-does-sensitivity-netd-mean-when.html>.
- Orman, A. & Endres, M.I. 2016. Use of thermal imaging for identification of foot lesions in dairy cattle. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A – Animal Science* 66: 1–7.
- Paloniitty, S., Paloniitty, J. & Haimilahti, J. 2018. Lämpökuvauksen rakentamisessa. 2. painos. Vaasa: Rakennustieto, Waasa Graphics. 140 s. ISBN 978-952-267-107-3.
- Pampariene, I., Veikutis, V., Oberauskas, V., Zymantiene, J., Zelvyte, R., Stankevicius, A., Marciulionyte, D. & Palevicius, P. 2016. Thermography based inflammation monitoring of udder state in dairy cows: Sensitivity and diagnostic priorities comparing with routine California mastitis test. *Journal of Vibroengineering* 18: 511–521.
- Parrott, H. 2018. Thermal imaging cuts antibiotics use on Northants beef farm. *Farmers Weekly*. Päivitetty: 1.3.2018. Viitattu: 20.2.2019. Saatavissa internetistä: <http://www.fwi.co.uk/livestock/thermal-imaging-slashes-antibiotic-use-northants-beef-farm.htm>.
- Paulrud, C.O., Clausen, S., Andersen, P.E., Bjerring, M. & Rasmussen, M.D. 2002. Infrared thermography to evaluate milking induced alterations in teat tissue fluid circulation. *Journal of Dairy Science* 85 (Suppl. 1): 84.
- Paulrud, C.O., Clausen, S., Andersen, P.E. & Rasmussen, M.D. 2005. Infrared thermography and ultrasonography to indirectly monitor the influence of liner type and overmilking on teat tissue recovery. *Acta Veterinaria Scandinavica* 46: 137–147.
- Pavlidis, I., Eberhardt, N.L. & Levine, J.A. 2002. Human behaviour: Seeing through the face of deception. *Nature* 415: 35.
- Peng, D., Chen, S., Li, G., Chen, J., Wang, J. & Gu, X. 2019. Infrared thermography measured body surface temperature and its relationship with rectal temperature in dairy cows under different temperature-humidity indexes. *International Journal of Biometeorology* 63: 327–336.
- Perez, H. 2017. Standardizing infrared thermography (IRT) and micro-behavioral biometrics for estrus detection in dairy cows. *Journal of Animal Science* 95 (Suppl. 4): 120–121.

- Pérez de Diego, A.C., Sánchez-Cordón, P.J., Pedrera, M., Martínez-López, B., Gómez-Villamandos, J.C. & Sánchez-Vizcaíno, J.M. 2013. The use of infrared thermography as a non-invasive method for fever detection in sheep infected with bluetongue virus. *The Veterinary Journal* 198: 182–186.
- Pezeshki, A., Stordeur, P., Wallemacq, H., Schynts, F., Stevens, M., Boutet, P., Peelman, L.J., De Spiegeleer, B., Duchateau, L., Bureau, F. & Burvenich, C. 2011. Variation of inflammatory dynamics and mediators in primiparous cows after intramammary challenge with *Escherichia coli*. *Veterinary Research* 42: 15.
- Poikalainen, V., Praks, J., Veermäe, I. & Kokin, E. 2012. Infrared temperature patterns of cow's body as an indicator for health control at precision cattle farming. *Biosystem Engineering Special Issue* 1: 187–194.
- Polat, B., Colak, A., Cengiz, M., Yanmaz, L.E., Ora, I. H., Bastan, A., Kaya, S. & Hayirli, A. 2010. Sensitivity and specificity of infrared thermography in detection of subclinical mastitis in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 93: 3525–3532.
- Porcionato, M.A.F., Canata, T.F., De Oliveira, C.E.L. & Dos Santos, M.V. 2009. Udder thermography of Gyr cows for subclinical mastitis detection. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering* 3: 251–257.
- Proctor, H.S. & Carder, G. 2015. Nasal temperatures in dairy cows are influenced by positive emotional state. *Physiology & Behaviour* 138: 340–344.
- Pyörälä, S. & Taponen, S. 2009. Coagulase-negative staphylococci-emerging mastitis pathogens. *Veterinary Microbiology* 134: 3–8.
- Racewicz, P., Sobek, J., Majewski, M. & Różańska-Zawieja, J. 2018. The use of thermal imaging measurements in dairy cow herds. *Scientific Annals of Polish Society of Animal Production* 14: 55–69.
- Radigonda, V.L., Periera, G.R., da Cruz Favaro, P., Barca, F.A. Jr., Borges, M.H.F., Galdioli, V.H.G. & Koetz, C. Jr. 2017. Infrared thermography relationship between the temperature of the vulvar skin, ovarian activity, and pregnancy rates in Bradford cows. *Tropical Animal Health and Production* 49: 1787–1791.
- Rainwater-Lovett, K., Pacheco, J.M., Packer, C. & Rodriguez, L.L. 2009. Detection of foot-and-mouth disease virus infected cattle using infrared thermography. *The Veterinary Journal* 180: 317–324.
- Rekant, S.I., Lyons, M.A., Pacheco, J.M., Arzt, J. & Rodriguez, L.L. 2016. Veterinary applications of infrared thermography. *American Journal for Veterinary Research* 77: 98–106.
- Renn, N., Onyango, J. & McCormick, W. 2014. Digital infrared thermal imaging and manual lameness scoring as a means for lameness detection in cattle. *Veterinary Clinical Science* 2: 16–23.
- Robinson, N.E. 2002. Homeostasis. Teoksessa: Cunningham J.G. (toim.) *Textbook of Veterinary Physiology*. 3. painos. Philadelphia, USA: W.B. Saunders Company. s. 515–544.
- Rodríguez, A.R., Olivares, F.J., Descouvieres, P.T., Werner, M.P., Tadich, N.A. & Bustamante, H.A. 2016. Thermographic assessment of hoof temperature in dairy cows with different mobility scores. *Livestock Science* 184: 92–96.
- Roy, R.C., Riley, C.B., Stryhn, H., Dohoo, I. & Cockram, M.S. 2019. Infrared thermography for the ante mortem detection of bruising in horses following transport to a slaughter plant. *Frontiers in Veterinary Science* 5: 344.
- Ruediger, F.R., Chacur, M.G.M., Alves, F.C.P.E., Oba, E. & Ramos, A.A. 2016. Digital infrared thermography of the scrotum, semen quality, serum testosterone levels in Nelore bulls (*Bos taurus indicus*) and their correlation with climatic factors. *Semina: Ciências Agrárias* 37: 221–232.
- Salamunes, A.C.C., Stadnik, A.M.W. & Neves, E.B. 2017. The effect of body fat percentage and body fat distribution on skin surface temperature with infrared thermography. *Journal of Thermal Biology* 66: 1–9.
- Salles, M.S.V., da Silva, S.C., Salles, F.A., Roma, L.C. Jr., El Faro, L., Mac Lean, P.A.B., de Oliveira, C.E.L. & Martello, L.S. 2016. Mapping the body surface temperature of cattle by infrared thermography. *Journal of Thermal Biology* 62: 63–69.

- Salles, M.S.V., Silva, S.C., Roma, L.C. Jr., El Faro, L., Bittar, M., Oliveira, C.E.L. & Salles, F.A. 2017. Detection for heat produced during roughage digestion in ruminants by using infrared thermography. *Animal Production Science* 58: 2032–2041.
- Samara, E.M., Ayadi, M., Al-Haidary, A.A. & Aljumaah, R.S. 2013. Thermophysiological study in lactating and dry camels (*Camelus dromedarius*) under summer conditions. *Emirates Journal of Food and Agriculture* 25: 308–313.
- Samara, E.M., Ayadi, M. & Aljumaah, R.S. 2014. Feasibility of utilising an infrared-thermographic technique for early detection of subclinical mastitis in dairy camels (*Camelus dromedarius*). *Journal of Dairy Research* 81: 38–45.
- Sarjokari, K., Kaustell, K.O., Hurme, T., Kivinen, T., Peltoniemi, O.A.T., Saloniemi, H. & Rajala-Schultz, P.J. 2013. Prevalence and risk factors for lameness in insulated free stall barns in Finland. *Livestock Science* 156: 44–52.
- Sathiyabarathi, M., Jeyakumar, S., Manimaran, A., Jayaprakash, G., Pushpadass, H.A., Sivaram, M., Ramesha, K.P., Das, D.N., D.N., Kataktalware, Prakash, M.A., & Kumar, R.D. 2016a. Infrared thermography: a potential noninvasive tool to monitor udder health status in dairy cows. *Veterinary World* 9: 1075–1081.
- Sathiyabarathi, M., Jeyakumar, S., Manimaran, A., Pushpadass, H.A., Sivaram, M., Ramesha, K.P., Das, D.N., Kataktalware, M.A., Jayaprakash, G. & Patbandha, T.K. 2016b. Investigation of body and udder skin surface temperature differentials as an early indicator of mastitis in Holstein Friesian crossbred cows using digital infrared thermography technique. *Veterinary World* 9: 1386–1391.
- Sathiyabarathi, M., Jeyakumar, S., Manimaran, A., Pushpadass, H.A., Kumaresan, A., Lathwal, S.S., Sivaram, M., Das, D.N., Ramesha, K.P. & Jayaprakash, G. 2018a. Infrared thermography to monitor body and udder skin surface temperature differences in relation to subclinical and clinical mastitis condition in Karan Fries (*Bos Taurus* x *Bos indicus*) crossbred cows. *Indian Journal of Animal Sciences* 88: 694–699.
- Sathiyabarathi, M., Jeyakumar, S., Manimaran, A., Pushpadass, H.A., Sivaram, M., Ramesha, K.P., Das, D.N. & Kataktalware, M.A. 2018b. Infrared thermal imaging of udder skin surface temperature variations to monitor udder health status in *Bos indicus* (Deoni) cows. *Infrared Physics & Technology* 88: 239–244.
- Schaefer, A.L., Cook, N., Tessaro, S.V., Dereg, D., Desroches, G., Dubeski, P.L., Tong, A.K.W. & Godson, D.L. 2004. Early detection and prediction of infection using infrared thermography. *Canadian Journal of Animal Science* 84: 73–80
- Schaefer, A.L., Perry, B.J., Cook, N.J., Miller, C., Church, J., Tong, A.K.W. & Stenzler, A. 2006. Infrared detection and nitric oxide treatment of bovine respiratory disease. *Online Journal of Veterinary Research* 10: 7–16
- Schaefer, A.L., Cook, N.J., Church, J.S., Basarab, J., Perry, B, Miller, C. & Tong A.K.W. 2007. The use of infrared thermography as an early indicator of bovine respiratory disease complex in calves. *Research in Veterinary Science* 83: 376–384
- Schaefer, A.L., Cook, N.J., Bench, C., Chabot, J.B., Colyn, J., Liu, T., Okine, E.K., Stewart, 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
- Schlageter-Tello, A., Bokkers, E.A.M., Groot Koerkamp, P.W.G., Van Hertem, T., Viazzi, S., Romanini, C.E.B., Halachmi, I., Bahr, C., Berckmans, D. & Lokhorst, K. 2014. Manual and automated locomotion scoring system in dairy cows: A review. *Preventive Veterinary Medicine* 116: 12–25.
- Schmidt, S., Bowers, S., Graves, K., Carroll, R., White, J. & Willard, S. 2003. Use of infrared thermography to assess thermal temperature gradients and pathologies of the bovine claw. ASAS/ADSA National Meeting, Phoenix, 2003. *Journal of Animal Science* 81 (Suppl 1): 323.
- Schmidt, S., Bowers, S., Dickerson, T., Graves, K. & Willard S. 2004. Assessments of udder temperature gradients pre- and post-milking relative to milk production in Holstein cows as determined by digital infrared thermography. ASAS/ADSA National Meeting, St. Louis, 2004. *Journal of Animal Science* 82 (Suppl 1): 460.

- Schwartzkopf-Genswein, K.S. & Stookey, J.M. 1997. The use of infrared thermography to assess inflammation associated with hot-iron and freeze branding in cattle. *Canadian Journal of Animal Science* 77: 577–583.
- Scolari, S.C., Clark, S.G. & Knox, R.V. 2011. Vulvar skin temperature changes significantly during estrus in swine as determined by digital infrared thermography. *Journal of Swine Health and Production* 19: 151–155.
- Scott, S.L., Schaefer, A.L., Tong, A.K. & Lacasse, P. 2000. Use of infrared thermography for early detection of mastitis in dairy cows. *Canadian Journal of Animal Science* 80: 764–765.
- Sellier, N., Guettier, E. & Staub, C. 2014. A review of methods to measure animal body temperature in precision farming. *American Journal of Agricultural Science and Technology* 2: 74–99.
- Ševčík, J., Falta, D., Somerlíková, K. & Fryč, J. 2016. Comparison of conventional and automatic milking systems at extreme conditions by thermographic method. *Acta Technologica Agriculturae* 4: 96–100.
- Shecaira, C.L., Seino, C.H., Bombardelli, J.A., Reis, G.A., Fusada, E.J., Azedo, M.R. & Benesi, F.J. 2018. Using thermography as a diagnostic tool for omphalitis on newborn calves. *Journal of Thermal Biology* 71: 209–211.
- Silva, L.K.X., Sousa, J.S., Silva, A.O.A., Lourenço J.B. Jr., Faturi, C., Martorano, L.G., Franco, I.M., Pantoja, M.H.A., Barros, D.V. & Garcia, A.R. 2018. Testicular thermoregulation, scrotal surface temperature patterns and semen quality of water buffalo bulls reared in a tropical climate. *Andrologia* 50: e12836.
- Simões, V.G., Lyazrhi, F., Picard-Hagen, N., Gayraud, V., Martineau, G.P. & Waret-Szkuta, A. 2014. Variations in the vulvar temperature of sows during proestrus and estrus as determined by infrared thermography and its relation to ovulation. *Theriogenology* 82: 1080–1085.
- Sinha, R., Bhakat, M., Mohanty, T.K. Ranjan, A., Kumar, R., Lone S.A., Rahim, A., Paray, A.R., Khosla, K. & Danish, Z. 2018. Infrared thermography as non-invasive technique for early detection of mastitis in dairy animals – a review. *Asian Journal of Dairy and Food Research* 37: 1–6.
- Sjaastad, Ø.V., Hove, K. & Sand, O. 2003. *Physiology of domestic animals. 1. painos, 2004 jalkipainos.* Oslo, Norja: Scandianavian Veterinary Press. 735 s. ISBN 82-91743-11-8.
- Smith, C. 2001. *Environmental Physics.* Lontoo, Iso-Britannia: Routledge. 304 s. ISBN 0-203-00543-0.
- Soroko, M. & Davies Morel, M.C.G. 2013. *Equine Thermography in Practice.* Oxfordshire, Iso-Britannia: CAB International. 99 s. ISBN 978-1-78064-787-6.
- Soroko, M., Zaborski, D., Grzesiak, W., Parafiniuk, M. & Modrzejewski A. 2017. Changes in udder skin surface temperature of dairy cows caused by machine milking. *Folia Pomeranae Universitatis Technologiae Stetinensis, Agricultura, Alimentaria, Piscaria et Zootechnica* 334 2: 163–174.
- Stajanko, D., Brus, M. & Hočevár, M. 2008. Estimation of bull live weight through thermographically measured body dimensions. *Computers and Electronics in Agriculture* 61: 233–240.
- Stelletta, C., Murgia, L., Caria, M., Giansella, M., Pazzona, A. & Morgante, M. 2007. Thermographic study of the ovine mammary gland during different working vacuum levels. *Italian Journal of Animal Science* 6 (Suppl. 1): 600.
- Stelletta, C., Giansella, M., Vencato, J., Fiore, E. & Morgante, M. 2012. Thermographic applications in veterinary medicine. Teoksessa: Prakash, R.V. (toim.). *Infrared thermography.* Rijeka: InTech. s.117–140.
- Stelletta, C., Vencato, J., Fiore, E. & Giansella, M. 2013. Infrared thermography in reproduction. Teoksessa: Luzi, F, Mitchell M, Costa LN, Redaelli V (toim.). *Thermography: current status and advances in livestock animals and in veterinary medicine.* Editio a cura fondazione iniziative zooprofilattiche e zootecniche 92. Brescia, Italia: Fondazione Iniziative Zooprofilattiche e Zootecniche. s. 113–125.
- Stelletta, C., Tekin, K., Tirpan, M.B., Alemdar, H., Cil, B., Stelletta, F.O., Olgac, K.T., Inanc, M.E. & Daskin, A. 2017. Vulvar thermal pattern following synchronization of estrus is linked to fertility after timed artificial insemination in goat. *Theriogenology* 103: 137–142.
- Stewart, M., Webster, J.R., Schaefer, A.L., Cook, N.J. & Scott, S.L. 2005. Infrared thermography as a non-invasive tool to study animal welfare. *Animal Welfare* 14: 319–325.

- Stewart, M., Webster, J.R., Verkerk, G.A., Schaefer, A.L., Colyn, J.J. & Stafford, K.J. 2007. Non-invasive measurement of stress in dairy cows using infrared thermography. *Physiology & Behavior* 92: 520–525
- Stewart, M. 2008. Non-invasive measurement of stress and pain in cattle using infrared thermography. 165 s. Väitöskirja. Massey University.
- Stewart, M., Schaefer, A.L., Haley, D.B., Colyn, J., Cook, N.J., Stafford, K.J. & Webster, J.R. 2008a. Infrared thermography as a non-invasive method for detecting fear-related responses of cattle to handling procedures. 2008a. *Animal Welfare* 17: 387–393
- Stewart, M., Stafford, K.J., Dowling, S.K., Schaefer, A.L. & Webster, J.R. 2008b. Eye temperature and heart rate variability of calves disbudded with or without local anaesthetic. *Physiology & Behavior* 93: 789–797
- Stewart, M., Stookey, J.M., Stafford, K.J., Tucker, C.B., Rogers, A.R., Dowling, S.K., Verkerk, G.A., Schaefer, A.L. & Webster, J.R. 2009. Effects of local anesthetic and a nonsteroidal anti-inflammatory drug on pain responses of dairy calves to hot-iron dehorning. *Journal of Dairy Science* 92: 1512–1519
- Stewart, M., Verkerk, G.A., Stafford, K.J., Schaefer, A.L. & Webster, J.R. 2010a. Noninvasive assessment of autonomic activity for evaluation of pain in calves using surgical castration as a model. *Journal of Dairy Science* 93: 3602–3609
- Stewart, M., Webster, J.R., Stafford, K.J., Schaefer, A.L. & Verkerk, G.A. 2010b. Effects of an epinephrine infusion on eye temperature and heart rate variability in bull calves. *Journal of Dairy Science* 93: 5252 – 5257
- Stewart, M., Schaefer, A.L., Sutherland, M.A. & Wilson, M.T. 2015. Automated applications of infrared thermography for disease detection in cattle. Teoksessa: Guarine, H. & Berckmans, D. (toim.). *Precision Livestock Farming '15, 7th European Conference on Precision Livestock Farming, Milano, Italia, 15–18 Syyskuu 2015*. s. 711–717.
- Stewart, M., Wilson, M.T., Schaefer, A.L., Huddart, F. & Sutherland, M.A. 2017. The use of infrared thermography and accelerometers for remote monitoring of dairy cow health and welfare. *Journal of Dairy Science* 100: 3893–3901.
- Stokes, J.E., Leach, K.A., Main, D.C.J. & Whay, H.R. 2012. An investigation into the use of infrared thermography (IRT) as a rapid diagnostic tool for foot lesions in dairy cattle. *Veterinary Journal* 193: 674–678.
- Stubsjøen, S.M., Flø, A.S., Moe, R.M., Janczak, A.M., Skjerve, E., Valle, P.S. & Zenella, A.J. 2009. Exploring non-invasive methods to assess pain in sheep. *Physiology & Behavior* 98: 640–648.
- Sykes, D.J., Couvillion, J.S., Cromiak, A., Bowers, S., Schenck, E., Crenshaw, M. & Ryan, P.L. 2012. The use of digital infrared thermal imaging to detect estrus in gilts. *Theriogenology* 78: 147–152.
- Tadich, N., Flor, E. & Green, L. 2010. Associations between hoof lesions and locomotion score in 1098 unsound dairy cows. *The Veterinary Journal* 184: 60–65.
- Talukder, S., Kerrisk, K.L., Ingenhoff, L., Thomson, P.C., Garcia, S.C. & Celi, P. 2014. Infrared technology for estrus detection and as a predictor of time of ovulation in dairy cows in a pasture-based system. *Theriogenology* 81: 925–935.
- Talukder, S., Gabai, G. & Celi, P. 2015a. The use of digital infrared thermography and measurement of oxidative stress biomarkers as tools to diagnose foot lesions in sheep. *Small Ruminant Research* 127: 80–85.
- Talukder, S., Thomson, P.C., Kerrisk, K.L., Clark, C.E.F. & Celi, P. 2015b. Evaluation of infrared thermography body temperature and collar-mounted accelerometer and acoustic technology for predicting time of ovulation on cows in pasture-based system. *Theriogenology* 83: 739–748.
- Tattersall, G.J. 2016. Infrared thermography: A non-invasive window into thermal physiology. *Comparative Biochemistry and Physiology, Part A* 202: 76–98.
- Thermalimage.fi. 2018. Infrapunakuvaus tapahtumana. Viitattu: 29.11.2018. Saatavissa Internetistä: <https://thermalimage.fi/infrapunakuvaus-tapahtumana>.
- Thomsen, P.T., Munksgaard, L. & Tøgersen, F.A. 2008. Evaluation of a lameness scoring system for dairy cows. *Journal of Dairy Science* 91: 119–126.

- Thompson, S., Schaefer, A.L., Crow, G.H., Basarab, J., Colyn, J. & Ominski, K. 2018. Relationship between residual feed intake and radiated heat loss using infrared thermography in young beef bulls. *Journal of Thermal Biology* 78: 304–311.
- Turner, T.A. 1991. Thermography as an aid to the clinical lameness evaluation. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 7: 311–338.
- Turner, T.A. 1998. Use of thermography in lameness evaluation. *Proceedings of the Annual Convention of the American Association of Equine Practitioners* 44: 224–226.
- Turner, T.A. 2001. Diagnostic thermography. *Veterinary Clinics of North America: Equine Practice* 17: 95–113.
- Vainionpää, M. 2014. Thermographic imaging in cats and dogs. Usability as a clinical method. 56 s. Väitöskirja. Helsingin yliopisto. ISBN 978-952-10-9942-7.
- Vegricht, J., Machalek, A., Ambroz, P., Brehme, U. & Rose, S. 2007. Milking related changes of teat temperature caused by various milking machines. *Journal of Agricultural Engineering Research* 53: 121–125.
- Vencato, J., Cestaro, L., Vazzana, I., Carrer, G., Carlo, E., Dara, S. & Stelletta, C. 2014. Integrated evaluation of scrotal temperature and testosteroneemia after GnRH administration in young bulls with low semen production. *Reproduction in Domestic Animals* 49: 481–486.
- Vianna, D.M.L. & Carrive P. 2005. Changes in cutaneous and body temperature during and after conditioned fear to context in the rat. *European Journal of Neuroscience* 21: 2505–2512.
- Vilas Boas, D.F., Vercesi Filho, A.E., Pereira, M.A., Roma, L.C. Jr. & El Faro, L. 2017. Association between electrical conductivity and milk production traits in dairy Gyr cows. *Journal of Applied Animal Research* 45: 227–233.
- Växa Sverige 2017. 1100 kor och inga mastiter. Hudsjur. Päivitetty: 12.4.2017. Viitattu: 20.2.2019: <https://www.vxa.se/husdjur/nyheter/1100-kor-och-inga-mastiter/>.
- Wallage, A.L., Gaughan, J.D., Lisle, A.T., Beard, L., Collins, C.W. & Johnston, S.D. 2017. Measurement of bovine and scrotal temperature using implanted temperature sensitive transmitters, data loggers and infrared thermography. *International Journal of Biometeorology* 61: 1309–1321.
- Westermann, S., Buchner, H.H.F., Schramel, J.P., Tichy, A. & Stanek, C. 2013. Effects of infrared camera angle and distance on measurement and reproducibility of thermographically determined temperatures of the distolateral aspects of the forelimbs in horses. *Journal of the American Veterinary Medical Association* 242: 388–395.
- Whay, H.R., Bell, M.J. & Main, D.C.J. 2004. Validation of lame limb identification through thermal imaging. Teoksessa: Zemljič, B. (toim.). *Proceedings of the 13th International Symposium and 5th Conference on Lameness in Ruminants. Maribor, Slovenia, 11 – 15 Helmikuu 2004.* s. 237–238.
- Wilcox, C.S., Patterson, J. & Cheng, H.W. 2009. Use of thermography to screen for subclinical bumblefoot in poultry. *Poultry Science* 88: 1176–1180.
- Wilhelm, K., Wilhelm, J. & Füll, M. 2014. Use of thermography to monitor sole haemorrhages and temperature distribution over the claws of dairy cattle. *The Veterinary Record* 176: 146–152.
- Willits, S. 2005. Infrared thermography for screening and early detection of mastitis infections in working dairy herds. *InfraMation 2005 Proceedings*.
- Wirthgen, T., Zipser, S., Franze, U., Geidel, S. & Zimmerhackl, M. 2011. Automated infrared based health monitoring system for veterinary application. *Procedia Engineering* 25: 1405–1408.
- Wood, S., Lin, Y., Knowles, T.G. & Main, D.C.J. 2014. Infrared thermometry for lesion monitoring in cattle lameness. *The Veterinary Record* 176: 308–311.
- Yang, C., Li, G., Zhang, X. & Gu, X. 2018. Udder skin surface temperature variation pre- and post-milking in dairy cows as determined by infrared thermography. *Journal of Dairy Research* 85: 201–203.
- Yañez-Pizaña, A., Mota-Rojas, D., Ramírez-Necochea, R., Castillo-Rivera, M., Roldán-Santiago, P., Mora-Medina, P. & González-Lozano, M. 2019. Application of infrared thermography to assess the effect of different types of environmental enrichment on the ocular, auricular pavilion and nose area temperatures of weaned piglets. *Computers and Electronics in Agriculture* 156: 33–42.

- Zaninelli, M., Redaelli, V., Luzi, F., Bronzo, V., Mitchell, M., Dell'Orto, V., Bontempo, V., Cattaneo, D. & Savoini, G. 2018. First evaluation of infrared thermography as a tool for monitoring of udder health status in farms of dairy cows. *Sensors* 18: 862.
- Zhang, K., Jiao, L., Zhao, X. & Dong, D. 2016. An instantaneous approach for determining the infrared emissivity of swine surface and the influencing factors. *Journal of Thermal Biology* 57: 78–83.



luke.fi

Luonnonvarakeskus
Latokartanonkaari 9
00790 Helsinki
puh. 029 532 6000