



# Lämpöeristetyin verhoseinäisen lypsykarjapihaston ilmanvaihdon toimivuus

Tapani Kivinen, Kalle Mattila, Frederick Teye,  
Jorma Heikkinen ja Ismo Heimonen



MTT:n selvityksiä 119  
63 s.

# **Lämpöeristetyin verhoseinäinen lypsykarjapihaton ilmanvaihdon toimivuus**

Tapani Kivinen, Kalle Mattila, Frederick Teye, Jorma Heikkinen  
ja Ismo Heimonen

ISBN 952-487-040-1 (Painettu)  
ISBN 952-487-041-X (Verkkajulkaisu)  
ISSN 1458-509X (Painettu)  
ISSN 1458-5103 (Verkkajulkaisu)  
[www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts119.pdf](http://www.mtt.fi/mtts/pdf/mtts119.pdf)

Copyright

MTT

Tapani Kivinen, Kalle Mattila, Frederick Teye,

Jorma Heikkinen ja Ismo Heimonen

Julkaisija ja kustantaja

MTT

Jakelu ja myynti

MTT, Kotieläintuotannon tutkimus, Vakolantie 55, 03400 Vihti

Puhelin (09) 224 251, telekopio (09) 224 6210

Sähköposti: [julkaisut@mtt.fi](mailto:julkaisut@mtt.fi)

Julkaisuvuosi

2006

Kannen kuva

Tapani Kivinen

Painopaikka

Tampereen Yliopistopaino Oy – Juvenes Print

# Lämpöeristetyn verhoseinäisen lypsykarjapihatton ilmanvaihdon toimivuus

Tapani Kivinen<sup>1)</sup>, Kalle M. Mattila<sup>2)</sup>, Frederick Teye,<sup>2)</sup> Jorma Heikkinen<sup>3)</sup>, Ismo Heimonen<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>MTT (Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus) Kotieläintuotannon tutkimus, Vakolantie 55, 03400 Vihti, [tapani.kivinen@mtt.fi](mailto:tapani.kivinen@mtt.fi)

<sup>2)</sup>HY, Agroteknologian laitos, Koetilantie 3, 00014 Helsingin Yliopisto, [frederick.kwameteje@helsinki.fi](mailto:frederick.kwameteje@helsinki.fi)

<sup>3)</sup>VTT, Sisäilmasto- ja talotekniikka, Lämpömiehenkuja 2, 02150 VTT, [jorma.heikkinen@vtt.fi](mailto:jorma.heikkinen@vtt.fi), [ismo.heimonen@vtt.fi](mailto:ismo.heimonen@vtt.fi)

## Tiivistelmä

Verhoseinän avulla tapahtuva ilmanvaihdon säätö lypsykarjalle tarkoitetuissa tuotantorakennuksissa edustaa uutta tekniikka maassamme. Kiinnostus on Suomessa lisääntynyt sen vuoksi, että kanadalaisten esimerkkien myötä on saatu tuntumaa tekniikan kelpoisuudesta pohjolan ankarassa talvessa. Tästä johtuen maa- ja metsätalousministeriön rahoituksella on selvitetty, onko verhoseinäratkaisu toimiva ilmanvaihtotapa ja miten pihatto-olosuhteet käyttäytyvät eri vuodenaikoina.

Tutkimushanke jakautui kenttämittaukseen ja vuosimallinnukseen. Mittauskohteiksi valittiin ensimmäisten maahamme valmistuneiden lämpöeristettyjen verhoseinäpihatoiden joukosta kolme rakennusta. Mittaukset suoritettiin helmi-maaliskuussa 2006 tuntuvien pakkasjaksojen aikaan. Kohteissa mitattiin ulko- ja sisälämpötilaa, suhteellista kosteutta sekä hiilidioksidi- ja ammoniakkipitoisuutta. Yksi kohde instrumentoitiin lisäksi ilmavirtausmittareilla, säteily- ja lämpövuoantureilla. Kaikkiin kohteisiin asennettiin sääasema. Tiedot kerättiin automaattisiin dataloggereihin. Lisäksi viljelijät pitivät seurantapäiväkirjaa, johon merkittiin verhojen asennot, muutokset eläinmäärissä sekä merkittävät sääilmiöt pihatton sisällä ja ulkona.

Vertaamalla kerättyjä mittaustuloksia kehitettyyn tietokonemalliin voitiin todeta, että malli soveltuu verhoseinäpihatton ilmanvaihdon toiminnan arviointiin. Mallilla laskettiin ilmanvaihto, lämpötila, kosteus, hiilidioksidipitoisuus sekä ilmanvaihtoaukkojen tarvittava avaus vuoden jokaisena tuntina erilaisissa toimintaolosuhteissa. Laskennallisen tarkastelun perusteella ilmanvaihto on kaikissa tilanteissa riittävää, kesällä jopa runsasta. Kesäolosuhteissa tyynellä säällä ilma vaihtuu noin 10 kertaa tunnissa, mutta voi vaihtua tuulella jopa 100 kertaa tunnissa. Talvikauden minimi-ilmanvaihto oli lasketussa pihatossa 1 vaihtoa tunnissa. Sen ylläpito talvikauden muuttuvissa sääoloissa edellyttää tarkkaavaista ilmanvaihtoaukkojen säätelyä tai vaihtoehtoisesti automaattista ohjausta esimerkiksi sisälämpötilan perusteella. Pihatton sisälämpötila laskee hieman nollan alapuolelle 66 tuntina vuodessa, tällöinkin vasta -25 °C alapuolella. Tavoitteellisessa 5 °C lämpötilassa pihatto pysyy lähes 60 % vuoden kaikista tunneista. Kesällä sisälämpötila seuraa ulkolämpötilaa ja ylittää 5 °C rajan 40 %:ssa vuoden kaikista tunneista. Kaasupitoisuudet on mahdollista pitää MMM:n ilmanvaihdolle asettamien rajojen alapuolella. Suhteellinen kosteus on verraten korkea läpi vuoden. Talvella ulkolämpötilan laskiessa -20 °C alapuolelle esiintyy kondensioppiikkejä, jolloin pihatossa voi esiintyä sumua. Mahdollista lisälämmitystä tarvitaan -23 °C asteen alapuolella. Verhoseinän toiminta ei vaadi juuri lainkaan energiaa toisin kuin koneellisen ilmanvaihdon puhaltimet. Lisäksi verhoseinä on meluton. Tarkastelun perusteella verhoseinä näyttäisi soveltuvan suomalaiseen ilmastoon kun hyväksytään lievät lämpötilan nol-larajan alitukset 3 päivänä sekä yli 85 % suhteellinen kosteus 3 kk vuodessa.

---

*Avainsanat: verhoseinä, viileä pihatto, painovoimainen ilmanvaihto, luonnollinen ilmanvaihto*

---

# Functionality of curtainwall ventilation in insulated dairy barns in Finnish climate

Tapani Kivinen<sup>1)</sup>, Kalle M. Mattila<sup>2)</sup>, Frederick Teye<sup>2)</sup>, Jorma Heikkinen<sup>3)</sup>, Ismo Heimonen<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>MTT Agrifood Research Finland, Animal Production Research, Vakolantie 55, FI-03400 Vihti, Finland, [tapani.kivinen@mtt.fi](mailto:tapani.kivinen@mtt.fi)

<sup>2)</sup>University of Helsinki, Department of Agrotechnology, Koetilantie 3, FI-00014 University of Helsinki, Finland, [frederick.kwamete@helsinki.fi](mailto:frederick.kwamete@helsinki.fi)

<sup>3)</sup>VTT, Indoor climate and building services, Lämpömiehenkuja 2, FI-02044 VTT, Finland, [jorma.heikkinen@vtt.fi](mailto:jorma.heikkinen@vtt.fi), [ismo.heimonen@vtt.fi](mailto:ismo.heimonen@vtt.fi)

## Abstract

Curtain wall ventilation is a new technology in insulated dairy barns in Finland. The interest into this solution has emerged from Canadian examples where it has been successfully used in harsh winter circumstances. Curtain wall solution is expected to become a challenging option for dairy farmers. The ministry of agriculture and forestry has funded this research in order to get a reliable conception about this new technology and its feasibility in Finnish climate.

The research had mainly two sections. A field measurement session was carried out in three selected insulated barns which had been built recently and equipped with curtain walls. The measurements took place between February and March 2006, a period for harsh frost. Instrumentation collected data from inside and outside temperature, relative humidity, wind and air velocity. Carbon dioxide and ammonia were recorded inside the barns as well as radiation and heat flow in the floor. Data was collected into computer run dataloggers.

A field measurement data was analysed and compared with a ventilation model, which was created for the project. The model was written into a computer program to calculate energy-, humidity- and carbon dioxide balance simultaneously in a continuous mode for each hour for the entire year. As a result of the modelling the air exchange rate seemed to be acceptable in all situations during a year. In the winter months the temperature may go under 0 °C during 66 hours. The air humidity is comparatively high and it will be over 85 % for 3 months during the year. Carbon dioxide and ammonia remain under regulative limits. The minimum air exchange rate is 1 exchanges per hour in the winter and almost 10 exchanges per hour during a calm summer day. During a windy day there may be even 100 changes/h. An additional heating could be necessary under -23 °C, and it is evitable if the barn is only partly filled with lactating cows.

A curtain wall consumes very little energy in daily use compared to traditional fan ventilation. Practically the curtain makes no noise. The curtain wall system appears to be an acceptable and functional ventilation concept for insulated dairy barns in Finnish climate if few inconveniences are accepted. These are slight frost days under 0 °C (varies between -5 – 0 °C) for 3 days and high relative humidity over 3 months a year. These may result as foggy days inside the barn during the winter under – 20 °C. In return the ideal temperature + 5 °C can be maintained over 7 months in Finnish climate. Gas emissions are always in control and minimum air exchange is good and maximum exchange very good.

---

*Keywords: curtain wall ventilation, natural ventilation, cool dairy barn*

---

## Alkusanat

Ensimmäinen verhoseinä asennettiin suomalaisen lypsykarjarakennukseen kesällä 2004. Syksyllä 2004 kirjoitettiin nyt käsillä olevan tutkimushankkeen hankesuunnitelma. Tutkimusesitys sai rahoituksen Maatilatalouden kehittämisrahastosta (Makera) keväällä 2005, mihin mennessä verhoseinäpihatoita oli rakennettu jo 15 kpl. Kiinnostus verhoseinäistä ilmanvaihtotekniikkaa kohtaan on suurta, mutta investointihalukkuutta ovat pidätelleet aiheesta puuttuva tutkimustieto sekä toimivuuden epävarmuustekijät meidän ilmastossamme. Tämä raportti tulee sopivaan aikaan ja selkiyttää verhoseinään liittyviä käsityksiä.

Tutkimus on ollut yhteistyöhanke MTT:n, Helsingin yliopiston ja VTT:n kesken. Lisäksi hankkeessa on ollut kolme yhteistyökarjatilaa, joissa tehtiin kenttämittaukset. MTT on toiminut hankkeen koordinoijana sekä laatinut loppuraportin. Helsingin yliopiston Agroteknologian laitokselta hankkeeseen on osallistunut mmyo Kalle Mattila, joka teki progradu-työnsä aiheesta, laati mittaussuunnitelman ja analysoi mittaustulokset. Kalle Mattilan opinnäytetyön teksti on ollut loppuraportin lukujen 2 ja 5 pohjana. MSc. (agr) Frederic Teye suoritti kohdetilojen kaasumittaukset ja tulosten analysoinnin. VTT:ltä hankkeeseen ovat osallistuneet DI Jorma Heikkinen ja DI Ismo Heimonen. He laativat ilmanvaihtomallin sekä laskivat eri vuosimallinnukset. VTT:n osuus raportista kattaa luvut 6 - 8. Loppupäätelmät on kirjoitettu yhteistyönä osapuolten kesken. Kanadalaisten pihatoiden mittaukset toteutti Dr VM Neil G. Anderson Ontarion maatalousministeriöstä.

Hankkeen ohjausryhmän puheenjohtajana toimi DI Jorma Jantunen MMM:stä 31.8.2005 saakka, jonka jälkeen tehtävässä on toiminut Kjell Brännäs MMM:stä. Jäseninä ovat toimineet Susanna Ahlström MMM:stä ja Jarmo Lehtinen Työtehoseurasta. Ohjausryhmä on kokoontunut kaikkiaan 6 kertaa vaikuttamaan hankkeen edistymiseen.

Tutkimusryhmä kiittää rahoittajaa, ohjausryhmän jäseniä sekä taustaorganisaatioita, joiden avulla hanke vietiin menestyksekkäästi läpi. Lisäksi esitämme erityisen lämpimän kiitoksen niille kolmelle karjatilalle, joiden myötävaikutuksella ja yhteistyökyvyllä kenttämittaukset saatiin tehdyiksi.

Vihdissä lokakuussa 2006

Tapani Kivinen

hankkeen vastuullinen johtaja

# Sisällysluettelo

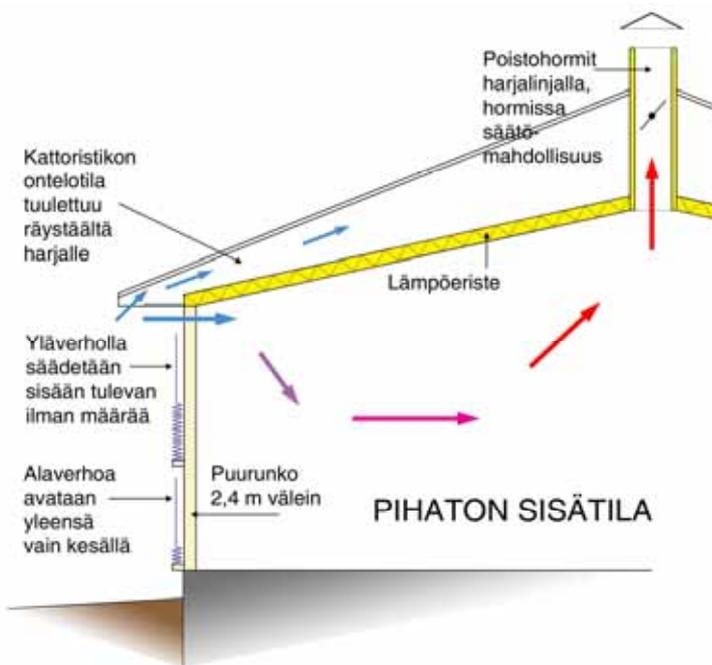
1	Johdanto .....	8
1.1	Verhoseinäpihaton määritelmä .....	8
1.2	Verhoseinät Kanadassa .....	9
1.3	Ruotsin esimerkkejä.....	10
1.4	Viron uudet pihatot .....	12
2	Vaatimukset pihaton sisäolosuhteille.....	12
2.1	Yleistä pihaton sisäilmastosta.....	12
2.2	Lämpö ja eläinten lämmöntuotanto .....	12
2.3	Kriittinen lämpötila.....	14
2.4	Kosteus.....	15
2.5	Pihatossa olevat kaasut .....	16
2.6	Ilmanvaihdon tarve .....	17
2.7	Ilmanvaihdon laskukaavat .....	18
3	Tutkimusprosessi .....	18
4	Mittaukset.....	19
4.1	Yleistä tutkimustiloista .....	19
4.2	Pihatto A .....	19
4.3	Pihatto B .....	21
4.4	Pihatto C .....	23
4.5	Ilman liike- ja kaasumittaukset C-kohteessa .....	25
4.6	Ilmanvaihdon ”koeajomittaus” C-kohteessa.....	26
4.7	Seurantapäiväkirjat .....	26
5	Mittausten tulokset.....	27
5.1	Yleistä mittaustuloksista.....	27
5.2	Mittaustulokset kohteessa A .....	27
5.3	Mittaustulokset kohteessa B .....	29
5.4	Mittaustulokset kohteessa C .....	30
5.4.1	Ilman virtausnopeuden mittaus .....	30
5.4.2	Pihatton kaasumittaukset.....	31
5.4.3	Infrapunakuvaus .....	33
5.4.4	Olosuhteiden tunnusluvut mittausjaksolta .....	34
5.4.5	Ilmanvaihdon koeajo kohteessa .....	35

5.5	Mittaukset Kanadan Ontariossa .....	37
6	Ilmanvaihdon ja sisäilmaston laskentamalli .....	37
6.1	Yleistä mallinnuksesta .....	37
6.2	Ilmanvaihtomalli .....	38
6.3	Kosteustase .....	40
6.4	Hiilidioksidin tase .....	41
6.5	Lämpötase .....	41
7	Mittausjakson laskenta .....	42
8	Koko vuoden laskenta .....	45
8.1	Perustapauksen tulokset .....	45
8.2	Vuosimallilla lasketut vaihtoehtoiset tapaukset .....	52
8.3	Johtopäätökset laskelmista .....	56
9	Johtopäätökset ilmanvaihdon toimivuudesta .....	56
9.1	Yleiset havainnot .....	56
9.2	Eläinnäkökulma .....	57
9.3	Työntekijän näkökulma .....	57
9.4	Rakennuksen näkökulma .....	57
9.5	Ilmanvaihdon näkökulma .....	58
9.6	Kylmäpihatto, lämminpihatto vai viileä pihatto? .....	59
10	Kirjallisuus .....	61

# 1 Johdanto

## 1.1 Verhoseinäpihaton määritelmä

Terminä *verhoseinäpihatto* on uudissana, jonka sisältöä ei ole maassamme vielä yleis­pätevästi määritelty. Sanatarkasti se tarkoittaa kotieläinrakennusta, jonka ilmanvaihtoon tarvittavia aukkoja suljetaan ja avataan keveiden verhomaisten rakenteiden avulla ilmanvaihdon säätämiseksi. Poistoilma kulkeutuu yleensä harjalla olevien luukkujen, läppien tai poistohormien kautta. Verhoseinä –termi ei ota kantaa siihen, onko rakennus lämpöeristetty vai ei. Keski-Euroopassa ja Amerikassa verhoseinille ei ole eritystermiä, koska verhoseinäinen toteutustapa on hyvin yleistä. Ruotsissa puhutaan *frost-fri-* pihatosta eli pakkasvapaasta rakennuksesta. Termi kuvaa kyllä verhoseinästä johtuvaa pihaton sisäolosuhdetta pohjolan talvessa, mutta sopii huonosti suomen kieleen. Verhoseinäpihaton tavoitteellinen talvilämpötila on 4 – 6 °C. Tästä syystä perinteisten kylmä- ja lämminpihattotermien väliin voisi sopia uusi termi – viileä pihatto.

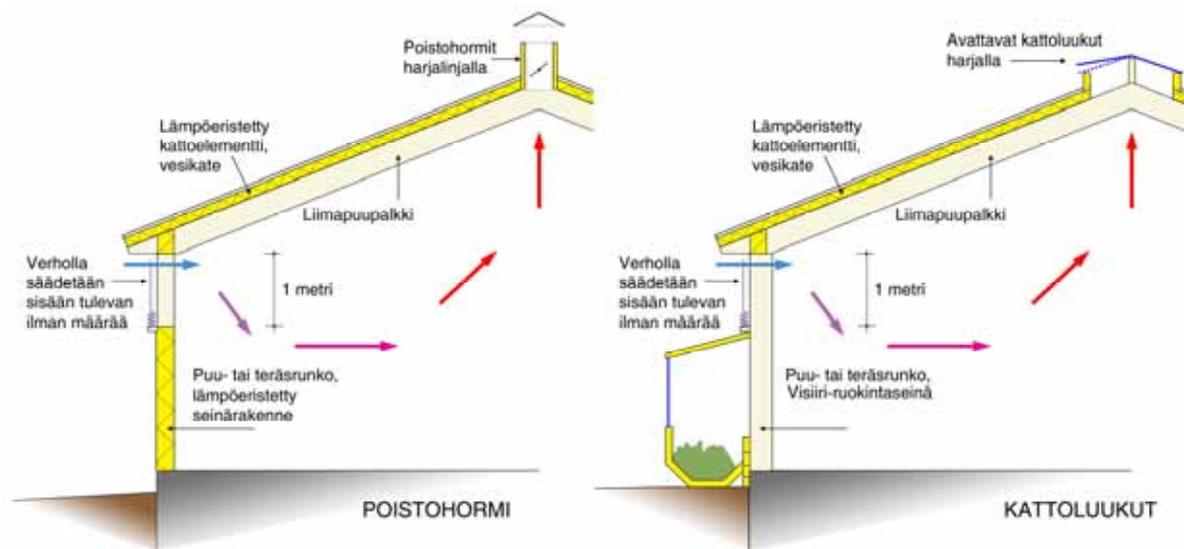


Kuva 1. Esimerkkileikkaus kanadalaisen pihaton verhoseinä- ja poistohormiratkaisusta. Verhoilla peitetään pitkät sivuseinät koko korkeudeltaan koska syntyvät seinäneliöt ovat näin toteutettuina edullisia ja kesäolosuhteissa ilman pitää kulkea mahdollisimman tehokkaasti rakennuksen läpi.

Verhoseinäisessä nautakarjarakennuksessa ilmanvaihto tapahtuu painovoimaisesti sekä pitkillä seinillä olevilla verhoilla ja harjalla olevilla luukuilla. Luukkujen ja verhojen avautumista säädetään joko käsin tai automatiikalla lämpötila-anturin ohjauksessa. Verhojen materiaali on joustavaa, usein lasikuituvahvisteista muovia, joka päästää valoa lävitseen. Verhoseinää voidaan käyttää sekä lämpöeristetyssä että lämpöeristämättömässä rakennuksessa. Lämpöeristetyssä rakennuksessa tyypillisesti katto ja päätyseinät ovat eristetyt lähes asuinrakennusten seinä- ja kattorakenteiden eristystasoon.

Verhoja ja samalla ilmanvaihtoa säädetään pihaton sisäolosuhteiden mukaan. Sääto tapahtuu manuaalisesti verhoja laskemalla tai nostamalla, jolloin ilman virtausaukon pinta-ala kasvaa tai pienenee. Sääto voi tapahtua myös automatiikalla, jolloin sääto perustuu lämpötila-anturin antamaan tietoon. Suurimman osan vuotta keväästä syksyyn verhot ovat täysin auki. Katto tarjoaa kesällä sadesuojan ja varjon eläimille. Pihaton harjalla sijaitsevat säädettävät poistoilma-aukot. Niiden toteuttamiseen on useita erilaisia tekniikoita. Kanadalainen ratkaisu perustuu polyuretaanieristettyihin hormoneihin, jotka sijaitsevat harjalinjalla

tasaisin välein. Vaihtoehtoisesti harjalle voidaan asentaa kasvihuoneista tutut harjaläpät, joita avallaan sähkömoottoreilla. Talvella sisälämpötila pyritään pitämään lämpimän puolella, eli tällöin lämpötilaero ulkoilmaan kasvaa ja paine-ero on myös suurempi. Ilman virtaamiselle harjaa kohti ei saa olla esteitä. Painovoima vetää kylmää korvausilmaa alas, jolloin lämmin ja keveämpi sisäilma nousee ylös ja harja-aukon kautta ulos. Talviolosuhteissa katon lämpöeristys estää vesihöyryn kondensoitumista katon sisäpintaan. Suurin ero verhoseinä- ja perinteisen pihaton välillä on sisälämpötilassa. Suomessa lämpimissä pihatoissa sisälämpötila pyritään pitämään n. 10°C asteessa. Verhoseinäpihatoissa lämpötilan tavoitetaso on 5°C tuntumassa, ja samalla varaudutaan lämpötilojen hetkellisiin nolларajan alituksiin.



Kuva 2. Tutkimuksen kohteena olleiden suomalaisten verhoseinäpihattojen leikkausesimerkit. Kaikille kohteille yhteistä oli 1 metrin aukkokorkeus alueella, missä verhoa avattiin ja suljettiin ilmanvaihdon säätämiseksi. Aukko oli yhtenäinen lähes koko rakennuksen pituudella, ainoastaan runkorakenteet katkaisivat nauhamaisen aukon määrävälein. Poistoilman johtamiseksi harjalla oli useampia erilaisia hormi- tai luukkuratkaisuja. Lisäksi varsinaisen verhoalueen alapuolella saattoi olla lämpöeristetty umpiseinä tai ulkopuolisesta ruokintaratkaisusta aiheutuva rakenne.

## 1.2 Verhoseinät Kanadassa

Verhoseinää on käytetty amerikkalaisissa ja kanadalaisissa lypsykarjarakennuksissa menestyksekkäästi jo pitkään. Kanada on kiintoisa vertailukohde, koska sen talvi-ilma on hyvin Suomen kaltainen. Kesäolosuhteet sitä vastoin eroavat melkoisesti. Pihattorakentamisessa on menty lähes standardoituihin ratkaisuihin rakennusteknisessä mielessä. Eläinhallien kantava pystyrunko tehdään teräs- tai puupilareilla. Vesikattorakenteena on yleisesti puinen saksinaulalevyristikko, jonka yläparre on 1:3 ja alaparre 1:6 kaltevuudessa. Katon lämpöeristeenä käytetään yleisesti puhallusvillaa 20 – 30 cm paksuudelta. Myös rakennuksen päädyt eristetään hyvin ja niissä voi olla kiinteitä ikkunoita tai myös verhoja. Pitkien sivuseinien julkisivu muodostuu lähes pelkästään verhoista. Kanadan kuumassa kesässä koko seinä avataan, jotta ilma pääsee liikkumaan riittävästi. Kanadalaisesta näkökulmasta katsoen verhoseinä takana olevine pilareineen on taloudellisessa mielessä edullisin tapa rakentaa seinäneliöitä.



Kuva 3. Esimerkki kanadalaisesta verhoseinäisestä robottipihatosta, joka on rakennettu laajennukseksi yli satavuotiaaseen vanhaan navettaan.



Kuva 4. Julkisivukuva kanadalaisesta Brower Farmin pihatosta Ontariossa, jossa tehtiin vertaileva lämpötilamittaus osana tätä tutkimushanketta.

### 1.3 Ruotsin esimerkkejä

Ruotsissa pihatoiden ilmanvaihtoratkaisuksi on yleistynyt verhoseinän sukulainen, painovoimainen harjatuuletus-seinäluukku – järjestelmä. Ero verhoseinään on seinällä olevien luukkujen pinta-alassa ja aukeamismekanismeissa. Skånessa muutamia verhoseinäpihatoita on rakennettu, koska ilmastollisesti alue vertautuu Tanskan olosuhteisiin.

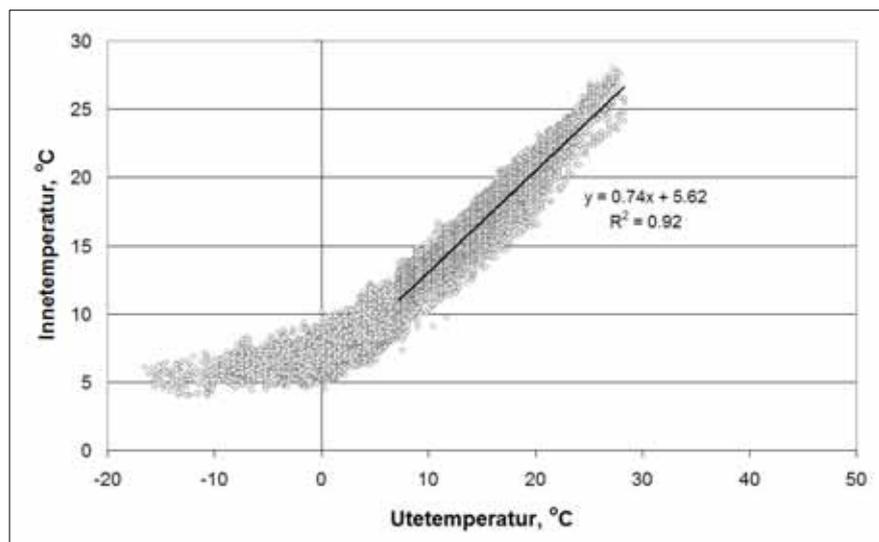
Ruotsin maatalousyliopisto (SLU, Alnarp) on tutkinut Skånen uusia pihatoita (Jeppson 2005). Tutkimuksessa oli mukana yksi kanadalaistyyppinen puolilämmin frost-free -pihatto. Pihatton seinät olivat kaksinkertaista muoviverhoa, jonka U-arvo oli n.  $0.4 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Katon eristeenä oli 170 mm mineraalivillaa. Ilmastointi oli automaattinen ja sen annettiin pudottaa lämpötila  $5 \text{ C}$  asteeseen ulkolämpötilasta riippuen. Lehmää pihatossa oli 250. Jeppsonin tutkimuksista nähdään, kuinka lämpötila pihatton sisällä on asettunut  $5^\circ\text{C}$  tuntu-

maan, vaikka ulkolämpötila on laskenut  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sisäilman kosteus pysyi melkein samana kun pihaton sisälämpötila oli välillä  $5\text{ }^{\circ}\text{C} - 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Sisäilmasto pysyi kosteana suurimman osan talvesta (kuvat 6 ja 7).

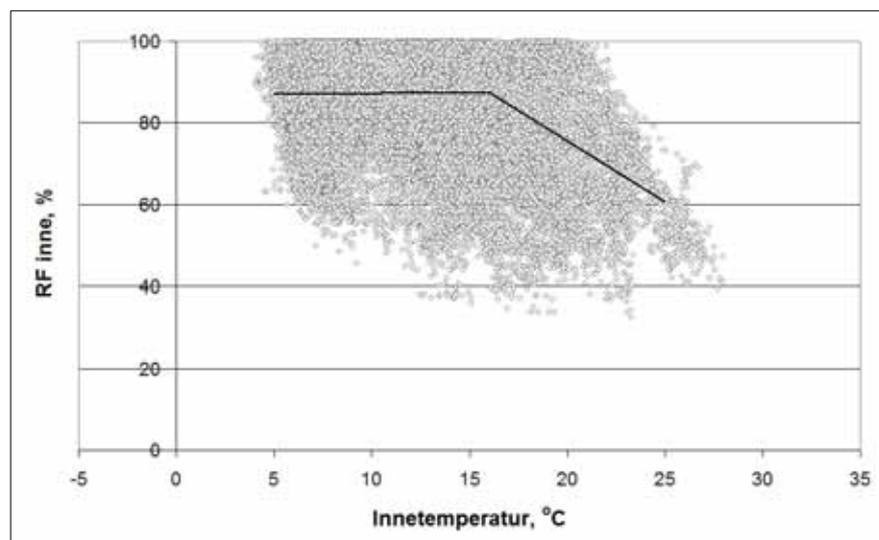


Kuva 5. Esimerkki Skånessa sijaitsevasta verhoseinäpihatosta, jossa verho on ilmatäytteinen paremman u-arvon saavuttamiseksi. Vasemmassa kuvassa verhot kiinni, oikealla verhot auki, verhojen takana lintuverkko.

Kuva 6. Puolilämpimän pihaton sisälämpötilan riippuvuus ulkolämpötilasta (Jeppsson 2005).



Kuva 7. Puolilämpimän pihaton kosteuden riippuvuus sisälämpötilasta (Jeppsson 2005).



## 1.4 Viron uudet pihatot

Viron ilmasto on hieman leudompi kuin Suomessa. Silti talven pakkaset voivat olla yhtä kireitä ja luntakin lähes saman verran kuin Suomessa. Tästä huolimatta Viron uusimmat suuret maidontuotantoyksiköt on rakennettu kylmäpihatoiksi, joiden ilmanvaihto hoidetaan verhoseinillä. Virossa 300 – 1000 lehmän yksiköitä on jo yli 60 kpl. Osassa uusista suurista pihatoista harja on rakennuksen pituussuuntainen avonainen aukko tai kanadalaistyyppinen savupiippuhormi.



Kuva 8. Estonia Oy:n kylmäpihatto Kõrtsissä. Seinien alaverhoja pidetään kuumana kesäpäivänä suljettuina, koska ne varjostavat lehmiä suoralta auringonpaisteelta. Poistoilmaa varten on tiheä hormirivistö harjalla.

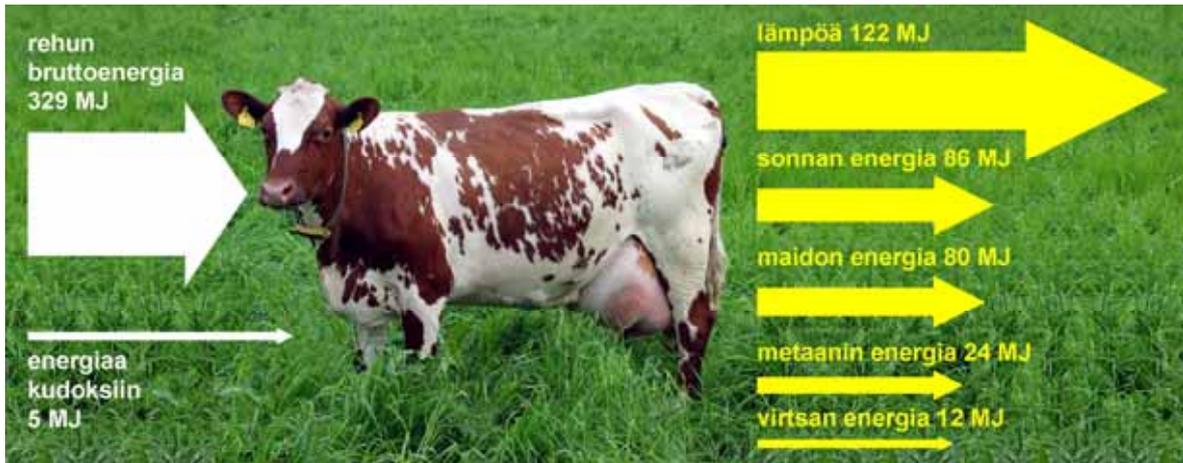
## 2 Vaatimukset pihaton sisäolosuhteille

### 2.1 Yleistä pihaton sisäilmastosta

Suomalaisten kotieläinrakennusten sisäilmasto-olosuhteiden vaatimukset on esitetty maa- ja metsätalousministeriön tuettavien investointikohteiden rakennusmääräyksissä MMM-RMO C2.2 (Maatalouden tuotantorakennusten lämpöhuolto ja huoneilmasto). Tämän tutkimuksen yhtenä lähtökohtana on ollut selvittää, miten mittauskohteet täyttävät sisäilman ja ilmanvaihdon vaatimukset C2.2 määräysten taulukoiden 2 ja 3 mukaisesti. Tutkimus ei sinänsä tuota uutta ohjeistustietoa. Silti huomioon otettava seikka uudentyypisissä verhoseinäpihatoissa on, että sisätilan tavoitelämpötila on C2.2 oletusarvoja paljon alempi. Tämä vaikuttaa muiden navettakaasujen pitoisuuksiin ja niillä on edelleen kerrannaisvaikutuksia materiaaleihin, eläimiin ja ihmisiin. Seuraavissa kappaleissa navetan sisäolosuhteisiin vaikuttavat seikat käydään kertauksen vuoksi läpi.

### 2.2 Lämpö ja eläinten lämmöntuotanto

Lehmän luovuttamasta lämmöstä osa on vapaata, tuntuvaa lämpöä ja osa kosteudentuottoon sidottua latenttia lämpöä. Vapaa lämpö poistuu eläimestä johtumalla makuualustaan ja konvektiolla sekä säteilemällä ympäristöön. Lämpöä poistuu myös maidossa ja ulosteissa. Lämmön haihtuminen riippuu siitä, kuinka eristävä eläimen karvapeite on. Mitä paksumpi karva- ja rasvakerros on, sitä vähemmän lämpöä haihtuu. Lämmönhaihtumiseen vaikuttavat myös eläimen pinta-ala ja lämpötila. Makuualustaan johtuva lämpö on hyvin pientä verrattuna muihin lämpöhäviöihin. Rehun sisältämästä kokonaisenergiasta suurin osa, runsas kolmannes muuttuu lämmöksi, ulosteisiin menee runsas neljännes.



Kuva 9. Lehmän energiatalous vuorokaudessa. Luvut kuvaavat 26 kg maitoa tuottavan ja 560 kg painavan lehmän energian kulutusta ja lämmön tuotantoa, kun lehmä lihoo 170 g päivässä (Mälkiä 1999).

Eläinten lämmöntuotto 20°C lämpötilassa voidaan laskea Pedersenin ja Sällvikin (2002) mukaan seuraavista kaavoista:

$\text{Lehmä: } \phi_e = 5,6m^{0,75} + 22Y_1 + 1,6 \times 10^{-5} p^3$	Kaava 1.
--	----------

$\text{Hieho: } \phi_e = 7,64m^{0,69} + Y_2 \left[ \frac{23}{M} - 1 \right] \left[ \frac{57,27 + 0,302m}{1 - 0,171Y_2} \right] + 1,6 \times 10^{-5} p^3$	Kaava 2.
--	----------

$\text{Vasikka: } \phi_e = 6,44m^{0,70} + \frac{13,3Y_2(6,28 + 0,0188m)}{1 - 0,3Y_2}$	Kaava 3.
---	----------

- $\phi_e$  = kokonaislämmöntuotto (W)
- m = eläimen paino (kg)
- p = tiineyspäivät (d)
- M = rehun energiasisältö (MJ/kg kuiva-ainetta)
- $Y_1$  = maidontuotto (kg/d)
- $Y_2$  = painonlisäys (kg/d)

Lehmän kokonaislämmöntuoton lämpötilankorjauskerroin voidaan laskea Pedersenin ja Sällvikin (2002) mukaan seuraavasta kaavasta:

$\phi_t = 4 \times 10^{-3} \times (20 - t) + 1$	Kaava 4.
---	----------

- $\phi_t$  = lämpötilakerroin
- t = lämpötila, °C

Lämpötilakorjauskerroin otetaan huomioon laskiessa lehmän tuottamaa lämpöä tietyssä lämpötilassa seuraavasti:

$\phi_{tot} = \phi_t \times \phi_e$	Kaava 5.
-------------------------------------	----------

Taulukko 1. Esimerkilaskelma (Kaava 5.) lehmän luovuttamasta lämmöstä 0 °C lämpötilassa.

Lehmän paino (m)	560	kg	Lehmän luovuttama lämpö on 1,3 kW, mikä
Maidon tuotto (Y1)	26	kg/d	vastaa keskikokoisen lämpöpatterin tuotta-
Tiineyspäivät (p)	50	d	maa lämpöä.
Lämmönlvovutus( $\Phi_{tot}$ )	1319	W	

Rakenteiden läpi johtuu lämpöä kun sisä- ja ulkoilman välillä on lämpötilaero. Lämpö siirtyy lämpimämmästä tilasta kylmempään (kaava 6). Lämmönsiirtymiseen vaikuttaa rakennuksen eristys. Tätä kuvaa rakenteille laskettu U-arvo ja sen yksikkö on W/m<sup>2</sup>°C. (Tuunanen ja Karhunen 1984).

$\phi_r = UA(t_s - t_u)$	<i>Kaava 6.</i>
--------------------------	-----------------

$\phi_r$  = lämpövirta rakenteiden läpi (W)

U = lämmöneristyskerroin (W/m<sup>2</sup>°C)

A = rakenneosan pinta-ala (m<sup>2</sup>)

t<sub>s</sub> = sisälämpötila (°C)

t<sub>u</sub> = ulkolämpötila (°C)

Eläinsuojan lämpötasapainoa kuvaa kaava 7. Eläinsuojasta poistuu lämpöä ilmanvaihdon mukana ja johtamalla rakenteiden kautta (Tuunanen ja Karhunen 1984).

$\phi_s = \phi_r + \phi_{iv}$	<i>Kaava 7.</i>
-------------------------------	-----------------

$\phi_s$  = eläinten vapaa lämmönlvovutus = (1-L)  $\phi_{tot}$  (W)

$\phi_r$  = lämpövirta rakenteiden läpi (W)

$\phi_{iv}$  = ilmanvaihdon mukana poistuva vapaa lämpö (W)

L = sidotun lämmöntuoton osuus kokonaislämmöntuotosta

## 2.3 Kriittinen lämpötila

Liian alhaisessa lämpötilassa tavallista suurempi osa eläinten syömän rehun energiasta kuluu normaalin ruumiinlämmön ylläpitämiseen, mikä pienentää rehuyksiköstä saatavaa tuotantoa. Lämpötilaa, jonka alapuolella näin tapahtuu, kutsutaan alemmaksi kriittiseksi lämpötilaksi. Liian korkea lämpötila aiheuttaa eläimelle ruokahalun laskua, koska eläimen täytyy vähentää lämmöntuotantoa vähentämällä syöntiä ja sitä kautta tulee tuotoksen laskua. Tällöin puhutaan ylemmästä kriittisestä lämpötilasta. (MMM 2005a).

Taulukko 2. Eri eläinlajien alimmat ja ylimmät kriittiset sekä optimilämpötilat (MMM-RMO C2.2).

	kriittiset lämpötilat ° C		
	alempi	ylempi	optimi
lypsylehmä	(-25)...-15	23...27	5...15
nuorkarja	(-15)...0	25...30	10...20
pikkuvasikka	(0)...10	30	15...25

Lehmän optimilämpötila MMM:n (Taulukko 2.) mukaan on 5-15 °C, mutta lehmä pystyy tuottamaan paljon alhaisemmissakin lämpötiloissa maitoa. Tällöin sen syömästä energiasta osa menee pelkästään lämmön tuottamiseen. Suosituksissa on otettu huomioon myös ihmisten tuntema lämpötila.

Ulkomaisissa lähteissä lehmän alempi kriittinen lämpötila on huomattavasti alempana kuin MMM:n suosituksissa, mikä johtuu kovemmasta päivätuotosta. Taulukko 3 osoittaa, miten paljon lehmän päivätuotos ja paino vaikuttavat kriittiseen lämpötilaan. Mitä suurempi on tuotos ja paino, sitä paremmin lehmä kestää pakkasta. Eläimet pystyvät optimaaliseen suoritukseen tietyllä yksilöllisellä lämpötila-alueella (termoneutraali alue), sillä jokainen yksilö kokee kylmän ja kuuman yksilöllisesti. Termoneutraalilla alueella eläin on lämpötasapainossa ympäristöönsä nähden. Eläimen altistuessa selvästi aikaisempaa alhaisemmille lämpötiloille seuraa ensin kylmästressi. Vähitellen eläimen käyttäytyminen sopeutuu kyseiseen lämpötilaan. Eläimen kokema ympäristön lämpötila määräytyy paljon sen mukaan, mihin lämpötilaan se on tottunut ja kuinka hyvin sen karvapeite on muuttunut kylmässä ilmassa. Ilman lämpötilaa ei koskaan saisi sellaisenaan pitää ympäristön kylmyyden mittarina, sillä siihen vaikuttavat myös ilman liike, vetoisuus ja tuulisuus, kosteus sekä aurin-gonsäteily.

Taulukko 3. Eläinten alimmat kriittiset lämpötilat (Sällvik ja Pedersen 1999).

	paino, kg	maitotuotos, kg/pv	LCT ( °C )
lypsylehmä, 240 pv tiinesy aika	500	0	-18
lypsylehmä	500	15	-30
lypsylehmä	500	35	-50
nuorkarja	250	0,55	0
hieho, 240 pv tiineysaika	500	0,5	-20
vasikka	50	0,5	10

## 2.4 Kosteus

Lehmä tuottaa kosteutta ympäristöönsä hengittäessään sekä hikoillessaan ja ulostaessaan. Lehmä tuottaa vesihöyryä 0,4 – 0,5 kg tunnissa. Kosteutta tulee eläinten lisäksi myös rehusta, juomavedestä, ulkoilman kosteudesta ja pesuvesistä.

Eläinten muodostama vesihöyry voidaan laskea kaavasta 8 ja 9 (Tuunanen ja Karhunen 1984).

$$g_s = 1,44 \times L \times \phi_e \quad \text{Kaava 8.}$$

$g_s$  = vesihöyrynmuodostus (g/h)

$L$  = sidotun lämmön suhteellinen osuus kokonaislämmönluovutuksesta

Sidotun lämmön osuus lehmän lämmöntuotosta riippuu sisälämpötilasta (CIGR 1984) mukaan seuraavasti:

$$L = 0,2 + 1,85 \times 10^{-7} (t_s + 10)^4 \quad \text{Kaava 9.}$$

$t_s$  = sisälämpötila

Tämä kaava koskee pelkästään eläimen itsensä kosteudentuottoa. Jos kosteudentuottoa tarkastellaan koko navetan kannalta pitää Tuunasen ja Karhusen (1984) mukaan kaavan (9) vakioarvon 0,2 sijaan käyttää arvoa 0,27. Tämä tarkoittaa sitä, että osa eläimen tuottamasta tuntuvasta lämmöstä kuluu navetan kosteista pinnoista haihtuvan veden höyrystämiseen. Vastaava uudempi CIGR:n kaava (Pedersen ja Sällvik 2002) sidotun lämmön osuudelle koko navetan tasolla on

$L = 0,29 + 0,408 \times 10^{-3} t_s^2 / \Phi_t$	<i>Kaava 10.</i>
--	------------------

missä  $\Phi_t$  on kaavan (4) mukainen kokonaislämmöntuoton lämpötilakorjaus. Kaavojen (9) ja (10) lämpötilakorjaus ei ilmeisestikään pidä paikkaansa alle 0 °C sisälämpötiloissa koska muuten kosteudentuoton osuus kasvaisi lämpötilan laskiessa mittaustulosten (Jeppsson 2005) vastaisesti. Siksi tässä tutkimuksessa on kosteustuoton lämpötilakorjaus jätetty huomiotta alle 0 °C lämpötiloissa.

## 2.5 Pihatossa olevat kaasut

Eläinsuojissa syntyviä kaasuja, hiilimonoksidia lukuun ottamatta voidaan kutsua lantakaasuiksi. MMM:n suosituksen mukaan vaarallisten aineiden pitoisuudet saavat ylittää hetkellisesti taulukossa 4 antamat suositukset. Ilmanlaatua mitattaessa tulee ottaa huomioon myös kuinka lantakaasut pääsevät vaikuttamaan eläinsuojassa. Eläimet eivät saa altistua yli 65 db jatkuvalla melulle.

Taulukko 4. Aineiden suurimmat hyväksytyt pitoisuudet, ppm = miljoonasosaa (cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>), (MMM-RMO C2.2)

Ilmankosteus, RH	50 % – 85 %
Hiilidioksidi, CO <sub>2</sub>	3000 ppm
Ammoniakki, NH <sub>3</sub>	10 ppm
Rikkivety, H <sub>2</sub> S	0,5 ppm
Häkä, CO	5 ppm
Orgaaninen pöly	10 mg/m <sup>3</sup>

### Hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>)

Hiilidioksidi on ilmaa raskaampi, hajuton, mauton ja veteen liukeneva kaasu. Sitä erittyy huoneilmaan pääasiassa eläinten uloshengitysilmaasta, lannasta ja virtsasta. Hiilidioksidin muodostuminen on riippuvainen lehmän lämmönluovutuksesta siten, että 1000 W kohti muodostuu hiilidioksidia 185 l/h (Pedersen ja Sällvik 2002). Ulkoilman hiilidioksidipitoisuus on noin 350 ppm (Seppänen ja Säteri 2001).

### Ammoniakki (NH<sub>3</sub>)

Ammoniakki on ilmaa kevyempi, voimakashajuinen, helposti veteen liukeneva kaasu. Sitä erittyy eläinten lannasta ja virtsasta sekä joissain määrin likaisista eläimistä ja kuivikkeista. Suuret NH<sub>3</sub>-pitoisuudet ärsyttävät limakalvoja ja vaikeuttavat hengittämistä. Kohonnut ammoniakkipitoisuus saattaa vähentää ruokahalua ja hidastaa täten eläinten kasvua. Ammoniakin korkeat pitoisuudet kotieläinrakennuksessa johtuvat osittain rehujen valkuaisainepitoisuudesta.

### Rikkivety (H<sub>2</sub>S)

Rikkivety on ilmaa raskaampi, voimakkaasti mädälle kananmunalle haiseva, veteen liukeneva kaasu. Rikkivetyä syntyy hapettomissa olosuhteissa, pääasiassa vain lietelannalla.

Rikkivedyn myrkyllisyys perustuu soluhengitystä lamauttavaan vaikutukseen. Lisäksi kaasu ärsyttää silmien ja hengityselimien limakalvoja sekä hermostoa ja aiheuttaa päänsärkyä, sekavuutta ja kiihtymistä.

### Metaani (CH<sub>4</sub>)

Metaani on ilmaa kevyempi, hajuton ja huonosti veteen liukeneva kaasu. Metaania kehittyy eniten eläinsuojassa kehittyvien kaasujen kokonaismäärästä. Sen ei ole todettu aiheuttavan sairauksia.

### Hiilimonoksidi(CO<sub>2</sub>)

Hiilimonoksidi on hiukan ilmaa kevyempi hajuton kaasu. Sitä syntyy epätäydellisen palamisen seurauksena. Se on erittäin myrkyllinen, veren punasoluissa hapen korvaava kaasu. Myrkytysoireita ovat hengenahdistus, huimaus ja päänsärky.

## 2.6 Ilmanvaihdon tarve

Verhoseinäpihatoiden ilmanvaihtotapa on painovoimainen eli luonnollinen ilmanvaihto. Se perustuu sisä- ja ulkoilman välisen lämpötilaeron ja tuulen paineen yhdessä aiheuttamaan paine-eroon sisä- ja ulkotilojen välillä. Lämmin ilma pyrkii aina ylöspäin, koska se on kylmää ilmaa kevyempää. Tämän takia painovoimaisessa ilmanvaihtojärjestelmässä ilma poistuu harjalta ja korvausilma tulee sisään rakennuksen sivuilta. Systeemi ei toimi aina teorian mukaisesti, sillä havaintojen mukaan ilma liikkuu verhoseinältä toiselle poikittais-suunnassa rakennuksen läpi. Korvausilma voi myös tulla harjan kautta sisään. Yleisesti voidaan sanoa, että verhoseinäisen rakennuksen ilmanvaihto on tuuli- ja sääolosuhteista riippuvaista. Myös maaston peitteisyys vaikuttaa ilman virtauksiin.

Ilmanvaihdon tärkeimmät tehtävät ilman laadun ylläpitämiseksi ovat ”vanhan ja likaisen” ilman korvaaminen tehokkaasti raittiilla ilmalla ja näin voimakkaita kaasupitoisuuksia saadaan laimennetuksi. Ilmanvaihto mitoitetaan lämmön-, hiilidioksidin- ja vesihöyryn poistotarpeen mukaan. Näistä kolmesta vaihtoehdosta voidaan selvittää maksimi- ja minimi-ilmanvaihto.

Ilmanvaihtoa määritettäessä tarvitaan tiedot minimi- ja maksimi-ilmanvaihdosta. Minimii ilmanvaihdon tarve ilmoittaa sen vaihdon suuruuden, jota ei saa missään olosuhteissa alittaa. Minimii ilmanvaihto määräytyy hiilidioksidin poiston mukaan. Minimii ilmanvaihto tapahtuu kylminä talvikausina. Maksimii ilmanvaihto mitoitetaan lämmönpoiston perusteella ja maksimii ilmanvaihtoa käytetään yleensä kesäaikaan.

Taulukko 5. Minimii ja maksimii ilmanvaihtomäärät maa- ja metsätalousministeriön mitoitushjeen mukaisesti. Taulukossa on esitetty myös Pedersenin ja Sällvikin 1999 esittämät maksimii ilmanvaihtomäärät. Lukujen erot johtuvat siitä, että niiden laskennassa on käytetty hieman eri eläinpainoja kuin MMM:n taulukossa.

eläin	paino, kg	MMM-RMO C 2.2 minimii ilmanvaihto, m <sup>3</sup> /h eläintä kohti	MMM-RMO C 2.2 maksimii ilmanvaihto, m <sup>3</sup> /h eläintä kohti	Pedersen ja Sällvik maksimii ilmanvaihto, m <sup>3</sup> /h eläintä kohti
vasikka	50	10	55	40
vasikka	100	20	100	70
nuorkarja	300	30	150	175
hieho	400	40	200	240
lypsylehmä, maito, 15 l/pv	400	55	310	265
lypsylehmä, maito, 15 l/pv	500	65	330	350

## 2.7 Ilmanvaihdon laskukaavat

Ilmanvaihtotarve voidaan laskea kaavojen 11, 12 ja 13 avulla, kun tunnetaan rakennuksen ulko- ja sisäpuolella vallitsevat olosuhteet sekä rakennuksessa tapahtuva lämmön-, kosteuden- ja hiilidioksidinmuodostus sekä rakenteiden läpi vuotava lämpö. (Tuunanen ja Karhunen 1984)

$$V_t = \frac{3.6\phi_{iv}}{\rho_s c_p (t_s - t_u)} \quad \text{Kaava 11.}$$

$$V_{RH} = \frac{g_s}{\rho_s (x_s - x_u)} \quad \text{Kaava 12.}$$

$$V_{CO_2} = \frac{1000K}{c - c_o} \quad \text{Kaava 13.}$$

$V_t$  = ylimääräisen lämmön poistamiseksi tarvittava ilmanvaihto, m<sup>3</sup>/h

$V_{RH}$  = vesihöyryn poistamiseksi tarvittava ilmanvaihto, m<sup>3</sup>/h

$V_{RH}$  = hiilidioksidin poistamiseksi tarvittava ilmanvaihto, m<sup>3</sup>/h

$\phi_{iv}$  = ilmanvaihdon mukana poistuva vapaa lämpö, W

$\rho_s$  = ilman tiheys, kg/m<sup>3</sup>

$c_p$  = ilman ominaislämpö (1,006 kJ/kg°C)

$t_s$  = sisäilman lämpötila, °C

$t_u$  = ulkoilman lämpötila, °C

$g_s$  = vesihöyrymuodostus eläinsuojassa, g/h

$x_s$  = sisäilman vesisisältö, g/kg

$x_u$  = ulkoilman vesisisältö, g/kg

$K$  = hiilidioksidin muodostumisnopeus, 1/h

$c$  = suurin sallittu hiilidioksidipitoisuus eläinsuojan ilmassa, ppm

$c_o$  = ulkoilman hiilidioksidipitoisuus (noin 350 ppm)

## 3 Tutkimusprosessi

Verhoseinäpihaton ilmanvaihto on luonteeltaan painovoimaisuuteen perustuva fysikaalinen ilmiö, jonka teoriataustaa tunnetaan suhteellisen hyvin. Kotieläinrakennuksissa painovoimaisuuden toimivuuteen vaikuttavat eläintilan erilaiset kaasut ja kosteus, jotka ovat eri luokkaa kuin esimerkiksi asuinrakennuksissa. Tutkimusprosessissa on hyödynnetty vanhempaa kotimaista tutkimustietoa (Vakolan tutkimuselostukset 34, 44 ja 55) sekä uudempiä sveitsiläisiä, tanskalaisia ja ruotsalaisia tuloksia kotieläinrakennusten ilmanvaihdon mitoituksista.

Tutkimusprosessi jakautui kolmeen toisiaan täydentävään osioon. Kenttämittaukset suoritettiin kolmessa verhoseinäpihatossa helmi-maaliskuussa 2006. Kenttämittauksen tuloksia verrattiin ilmanvaihdon teorioiden laskukaavojen samoilla lähtöarvoilla antamiin tuloksiin.

Teoria tavallaan kalibroitiin kenttämittauksen avulla ja todennettiin sen käyttökelpoisuus ilmanvaihdon vuosimallin laadinnassa. Vuosimallilaskuihin laadittiin tietokoneohjelma, jonka avulla ilmanvaihdon määrä ja laatu laskettiin vuoden jokaiselle tunnille. Lopuksi mallia herkisteltiin Helsingin ja Jyväskylän säätilan mallivuosiin. Herkistelyssä selvitettiin myös pihaton vajaatäytön, rakennuksen tiiviyden sekä erilaisten tuuliolosuhteiden vaikutusta ilmanvaihdon määrään ja laatuun. Lisäksi selvitettiin mahdollista lisälämmityksen tarvetta kireiden pakkasjaksojen aikana.

Tähän tutkimukseen liittyi myös vertaileva mittaus, joka toteutettiin Kanadan Ontariossa tammi – maaliskuussa 2006 kahdessa noin 130-paikkaisessa pihatossa. Mittauksessa seurattiin ulkolämpötilaa, sisälämpötilaa ja sisätilan suhteellista kosteutta. Toisessa pihatossa oli verhojen automaattiohjaus ja toisessa tavanomainen käsiasäätö. Tuloksista on nähtävissä Kanadan talven lämpötilaolosuhteet sekä automaatti- ja käsiasäädön erojen vaikutus pihatton sisälämpötilaan.

## 4 Mittaukset

### 4.1 Yleistä tutkimustiloista

Tutkimuksen alussa oli tiedossa, että maasamme oli sillä hetkellä noin 15 verhoseinäistä nautarakennusta, joista osaa vielä rakennettiin ja osa oli jo toiminnassa. Yksi kohde osoittautui lihakarjakasvattamoksi, loput olivat lypsykarjarakennuksia. Kutsu tutkimukseen osallistumisesta esitettiin kaikille, ja myöntäviä vastauksia saatiin 8 kpl. Tarkemmassa tarkastelussa näistä 3 kohdetta valikoitui tarkemman selvitystyön yhteistyötiloiksi. Kohdetila A sijaitsee Valkeakoskella, tila B Alavudella ja tila C Ähtärissä. Mittausvälineiden rajallisuudesta johtuen kohteet instrumentoitiin toisistaan poikkeavasti siten, että A- ja B-tiloilla suoritettiin lämpötila-, kosteus ja hiilidioksidimittaukset ja C-tila instrumentoitiin edellisiä selvästi runsaammin.

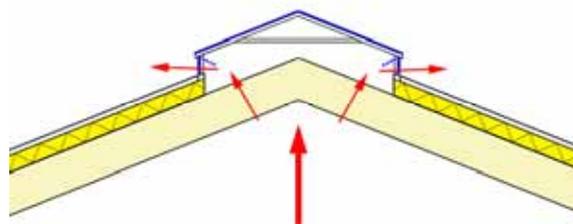


Kuva 10. Tutkimuskohteiden sijainti.

### 4.2 Pihatto A

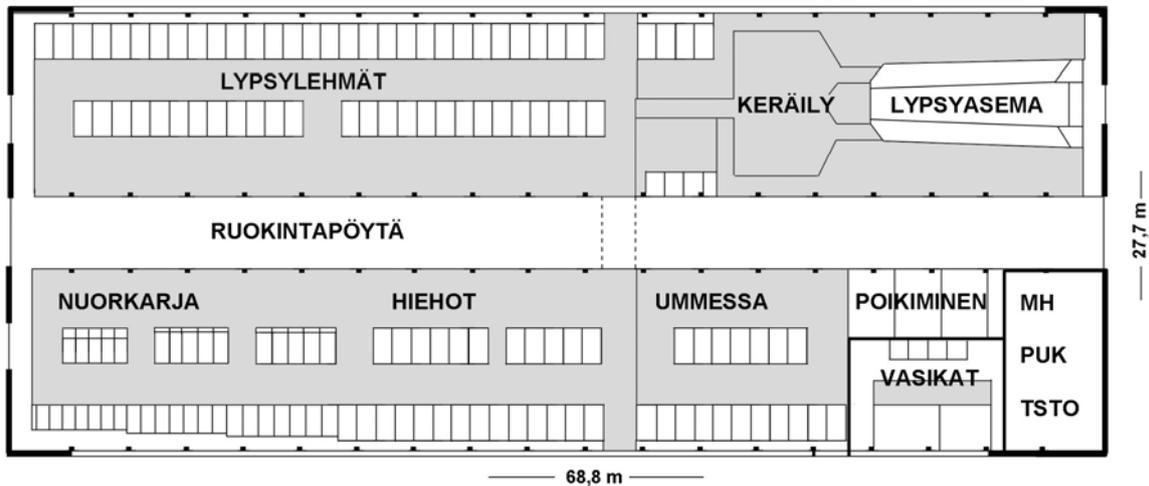
Kohde A sijaitsee Valkeakoskella ja se oli valmistunut joulukuussa 2005. Pihaton kokonaispinta-ala on 1905 m<sup>2</sup>. Päähallin eli yhtenäisen, samaa ilmatilaa olevan eläinhallin tilavuus on 9600 m<sup>3</sup> ja hyötyala 1760 m<sup>2</sup>. Parsipaikkoja on lypsylehmillä 80 kpl ja nuorkarjalle 50 kpl ja lisäksi vasikkaosasto (päähallista erillinen ilmatila).

Rakennuksen läpi johtaa 4 m leveä ruokinta-pöytä. Kantavana pystyrakenteena ovat teräs-



Kuva 11. A-kohteen kattoluukun toimintaperiaate. Varsinainen kate on kiinteä kasvihuonekenno. Avattavat läpät sijaitsevat kattolyhdyn juuriosassa molemmin puolin. Ilma vaihtuu avattavien läppien kautta, ja niiden säätö tapahtuu sähkömoottorilla käsiohjauksessa.

pilarit ja kattokannattajina liimapuupalkit. Vesikattorakenteena on 150 mm Thermisol-kattoelementti ja erillinen vesikattopelti. Verhoseinien aukkokorkeus on 1 metri ja pituus ulottuu melkein rakennuksen päästä päähän. Vasikkaosastolla ja lypsyaseman kohdalla verhot on korvattu kasvihuonekennoisilla liukupaneeleilla, koska näin saavutetaan hieman parempi u-arvo. Harja on varustettu kiinteillä alumiinikehyksisillä kasvihuonekennolevyillä. Säädettävät kennolevyt sijaitsevat kattoikkunarakenteen pystysuuntaisessa juuriosassa.



Kuva 12. A-kohteen pohjaratkaisu.



Kuva 13. A-kohteen sisänäkömä pihatosta.

Valkeakosken pihattoon asennettiin Tinytag datakeräimet, joilla mitattiin lämpötilaa ja suhteellista kosteutta 30 minuutin välein. Antureista kaksi oli kummallakin ulkoseinällä verhojen läheisyydessä, yksi oli keskialueella lehmien syöntikorkeudella ja yksi keskialueella noin 4 m korkeudessa. Hiilidioksidianturi oli sijoitettu ruokintapöydälle syöntikor-

keudelle eläinkontaktilta suojattuna. Hiilidioksidihavaintoja kerättiin 30 minuutin välein. Pihatton viereiselle avonaiselle pellolle sijoitettiin A-lab OY:n sääasema, josta saatiin lämpötila, kosteus ja tuulitiedot 30 minuutin välein. Valkeakosken mittausjakso alkoi 17.1.2006 ja päättyi 15.3.2006. Mittausajankohtana lehmiä oli pihatossa n. 35 kpl ja nuorta karjaa saman verran. Rakennus oli siten koko mittausjakson ajan vajaatäyttöinen, mikä johtui paljolti siitä, että rakennus oli vasta valmistunut eikä lehmämäärää oltu saatu kasvatetuksi parsipaikkojen mahdollistamalle tasolle. Lehmiä oli 44 %:ssa ja nuorkarjaa 70 %:ssa parsipaikoista.

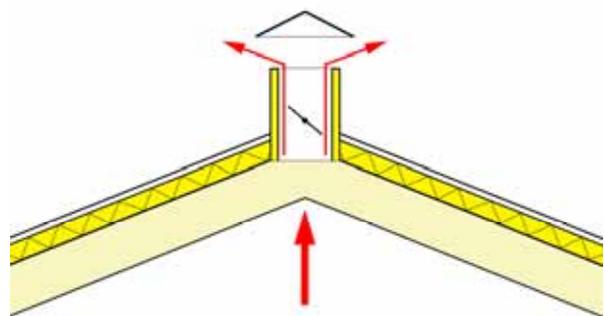
A-kohteessa tehtiin myös savukoe, jossa ”teatterisavua” syötettiin rakennuksen ulkopuolelta, savun annettiin kulkeutua verhoaukoista sisään ja tulos videoitiin. Rakennuksen ulkoseinää ja kattoluukkualuetta kuvattiin infrapunakameralla sisältäpäin pintalämpötilojen havainnoimiseksi.



Kuva 14. A-kohteen verhoseinää, alaosaa on puurunkoista ja –rakenteista lämpöeristettyä seinää.

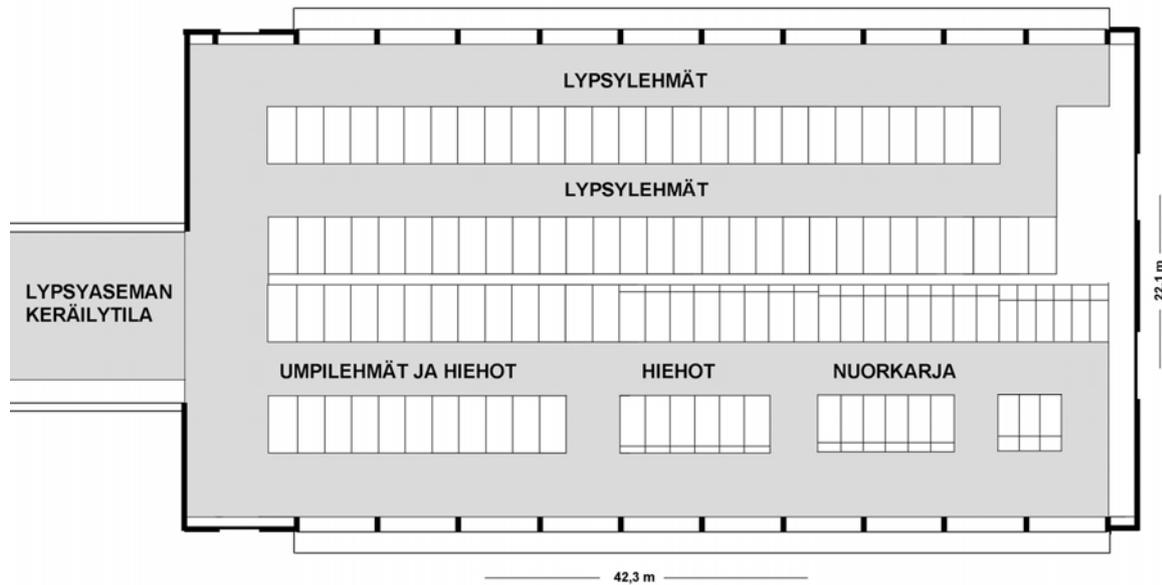
### 4.3 Pihatto B

Kohde B sijaitsee Alavudella, ja se oli valmistunut eläinhallin osalta joulukuussa 2005, mutta oli lypsytaseman osalta vielä rakenteilla. Pihatton kokonaispinta-ala on 957 m<sup>2</sup>. Päähallin eli yhtenäisen, samaa ilmatilaa olevan eläinhallin tilavuus on 4960 m<sup>3</sup>. Parsipaikkoja on lypsylehmille 63 kpl ja nuorkarjalle 74 kpl. Jos pihatto muutettaisiin pelkästään lypsylehmille parsipaikkoja olisi tällöin 126 kpl. Pihatton ruokintaratkaisu perustuu molemmilla ulkoseinillä oleviin ns. visiiriseiniin.



Kuva 15. B-kohteen ilmanpoisto tapahtuu eristetyllä hormilla, jossa on säätömahdollisuus.

Kantavana pystyrakenteena ovat alaosastaan kaareutuvat liimapuiset kolminivelkehät. Vesikattorakenteena on 150 mm paksuinen termisol-elementti ja erillinen vesikate. Verhoseinien aukkokorkeus on 1 metri ja pituus ulottuu melkein rakennuksen päästä päähän. Verhoseinärakenteen yläpuolella on seinä- ja vesikatteen liitoksessa kiinteä 4 cm rako, josta ilma pääsee vapaasti virtaamaan halliin. Harjalla sijaitsevat kiinteät kennolevyrakenteiset kattoikkunat antamassa valoa eläinhalliin. Ilmanvaihtoa varten hallin harjalla on 6 kpl sa-vupiippumallisia ilmanpoistohormeja.



Kuva 16. B-kohteen pohjaratkaisu

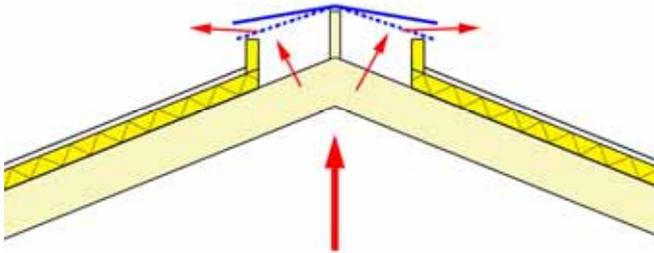


Kuva 17. B-kohteen sisänäkymä

B-kohteeseen asennettiin Tinytag datakeräimet, joilla mitattiin lämpötilaa ja suhteellista kosteutta 30 minuutin välein. Antureista yksi oli lehmäosaston puoleisella ulkoseinällä verhojen läheisyydessä ja yksi keskialueella noin 3 m korkeudessa. Hiilidioksidianturi oli sijoitettu eläinhallin päätyyn eläinkontaktilta suojattuna. Hiilidioksidihavaintoja kerättiin 30 minuutin välein. Pihaton viereen aavalle paikalle sijoitettiin A-lab OY:n sääasema, josta saatiin lämpötila, kosteus ja tuulitiedot 30 minuutin välein. Alavuden mittausjakso alkoi 8.2.2006 ja päättyi 15.3.2006. Rakennus oli koko mittausjakson ajan jossain määrin vajaa-täyttöinen, mikä johtui paljolti siitä, että rakennus oli vasta valmistunut eikä lehmämäärää oltu saatu kasvatetuksi parsipaikkojen mahdollistamalle tasolle.

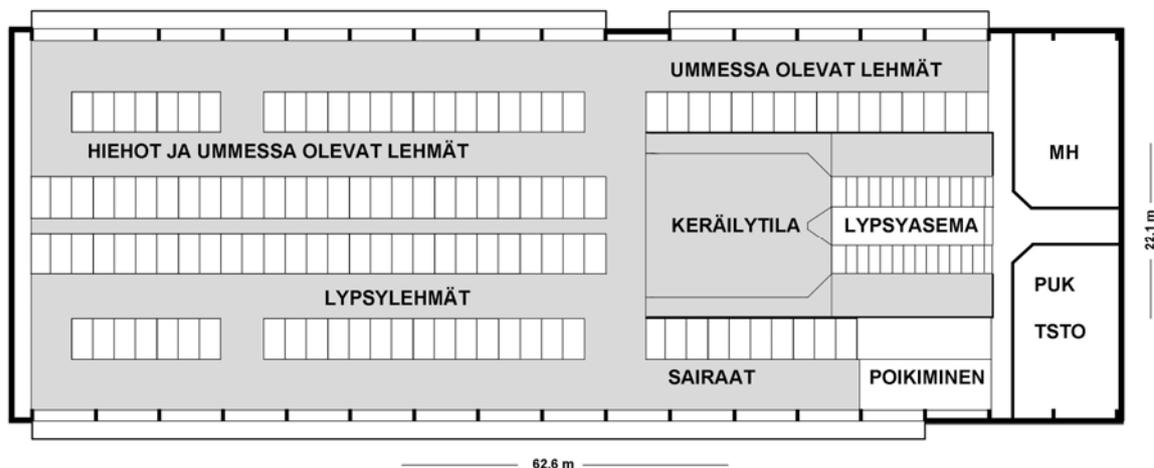
#### 4.4 Pihatto C

Kohde C sijaitsi Ähtärissä, ja se oli valmistunut heinäkuussa 2005. Kaikki eläinpaikat olivat käytössä ja toiminallisesti rakennus oli ”sisäänajettu”. Pihaton kokonaispinta-ala on 1383 m<sup>2</sup>. Päähallin eli yhtenäisen, samaa ilmatilaa olevan eläinhallin tilavuus on 6350 m<sup>3</sup> ja hyötyala 1245 m<sup>2</sup>. Parsipaikkoja on kaikkiaan 124 kpl.



Kuva 18. C-kohteen kattoluukun toimintaperiaate. Varsinainen kate on harjalta saranoitu kasvihuonekenno. Molempia puoliskoja voidaan avata sähkömoottorilla käsiohjauksella yksilöllisesti tuulensuunnan mukaan.

Pihaton ruokintaratkaisu perustuu molemmilla ulkoseinillä oleviin ns. visiiriseiniin. Kantavana pystyrakenteena ovat alaosastaan kaareutuvat liimapuupalkit. Vesikattorakenteena on 150 mm paksu termisol-elementti ja erillinen vesikate. Verhoseiniä aukkokorkeus on 1 metri ja pituus ulottuu melkein rakennuksen päästä päähän. Harjalla on keskeltä saranoidut kennolevyrakenteiset kattoikkunat, joita avaamalla ilmanvaihtoa säädetään.



Kuva 19. C-kohteen pohjaratkaisu



Kuva 20 ja 21. Yleiskuva C-kohteesta lypsyn aikana. Oikealla lypsylehmien parsiosasto, keskellä hallin takaosassa keräilytila ja lypsyasema. Vasemmalla nuorkarjan parsiosasto. Sivuseinien alaosassa ruokintakaukalo (visiiriseinä) ja yläosassa verhoalue. Keskellä harjalla säädettävä kasvi-huonekatto. Alakuvassa näkymä lypsyasemalta halliin päin.

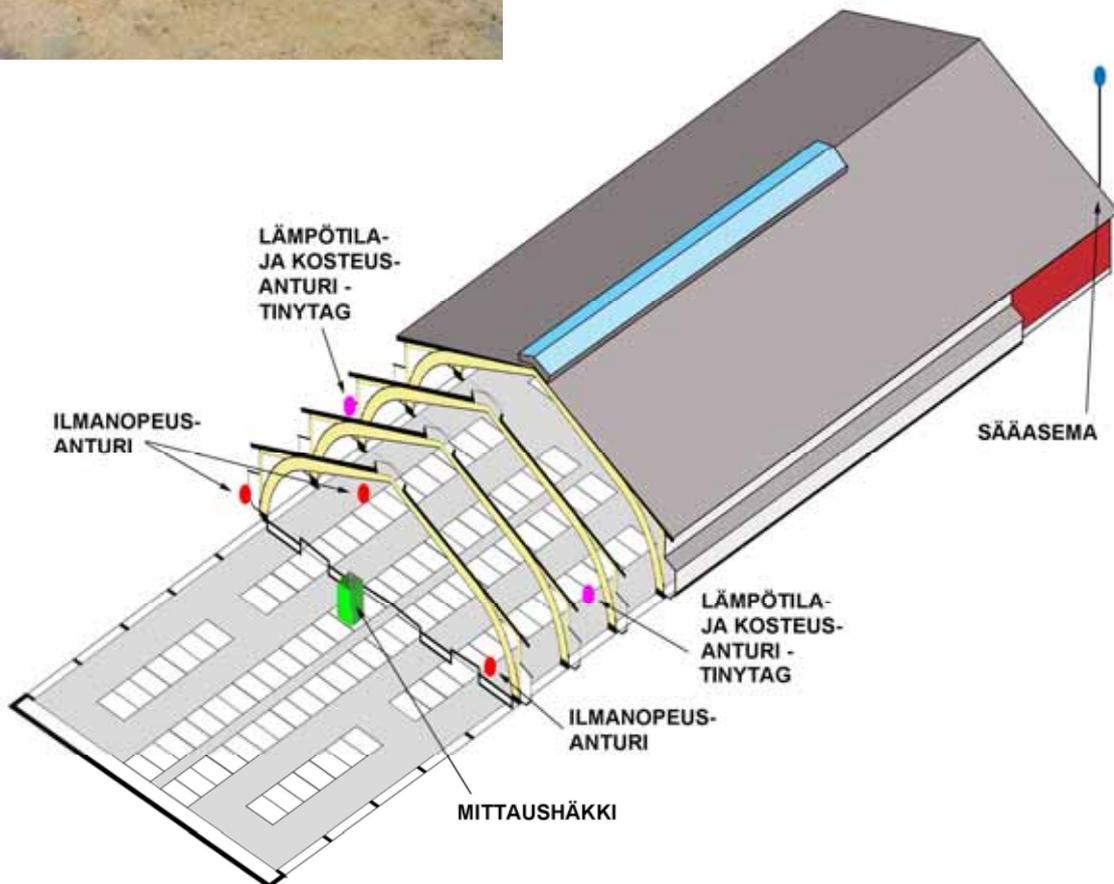


C-kohde instrumentoitiin toisiaan varmistavilla mittausvälineillä. Keskeisin laitteisto oli erikoisvalmisteinen mittaustorni, joka sijoitettiin lehmien jokapäiväiselle oleskeluvyöhykkeelle



Kuva 22. Mittaustorni asennettuna parteen.

Mittaustorni mittasi kohteesta ilmanvirtausta, kosteutta, lämpötilaa ja hiilidioksidia eri korkeuksilta. Pihaton harjalle sekä molemmille sivuseinille verhoseinän tuloaukkoon asennettiin ilmanvirtausanturit, joiden lähettämä tieto kerättiin Waisalan valmistamalle tiedonkeräimelle QLC50. Pihaton ulkopuolelle asennettiin Waisalan sääasema mikä oli kytketty kannettavaan tietokoneeseen. C-kohteen mittausjakso alkoi 8.2.2006 ja päättyi 15.3.2006. Kohteen kaikki eläinpaikat olivat lähes kaikki käytössä. Nuorkarjaosastossa oli muutama vapaa parsi, johon mitaustorni oli mahdollista sijoittaa.



Kuva 23. Aksonometriaesitys C-kohteen instrumentoinnista ja anturien sijoittelusta.

#### 4.5 Ilman liike- ja kaasumittaukset C-kohteessa

Jatkuvan mittauksen lisäksi kohteessa tehtiin 8.2.2006 ilmaliikkeen ja navettakaasujen mitaus. Ilmaliikettä mitattiin kolmiulotteisesti mittaavalla anemometrillä (YOUNG 3-D ultrasonic anemometer), jolla saatiin ilman nopeus, suunta ja lämpötila. Navettakaasuja mitattiin erittäin tarkalla kaasukromatografilla (Gasmeter Ftir kaasuanalysaattori).



Pihatto jaettiin 12 lohkoon, joissa kussakin suoritettiin mittaus 10cm, 1 metrin ja 2,5 korkeuksilta. Mittaus kesti kussakin pisteessä 2 minuuttia: Kaasukonsentraation tulos on mittausjakson jatkuva keskiarvo. 3D-anemometri otti 32 näytettä sekunnissa ja tulos on ajanjakson keskiarvo.

C-kohteessa tehtiin ulkoseinän ja kattoluukkualueen infrapunakuvaus sisältäpäin pintalämpötilojen havainnoimiseksi.

Kuva 24. 3D-anemometri, johon on yhdistetty kaasumittauksen imuletku.

#### 4.6 Ilmanvaihdon ”koeajomittaus” C-kohteessa

C-kohteessa tehtiin simuloitu ilmanvaihtokoe 15.3.2006, jossa kokeiltiin ilmanvaihtoa verhon eri asennoilla. Testiajo alkoi sulkemalla kaikki luukut pihatossa klo. 16.30 jonka jälkeen tilanteen annettiin vakiintua eli pitoisuuksien nousta. Kaasumittaukset aloitettiin klo 17.10 Gasmet laitteistolla, joka sijaitsi rakennuksen keskellä lähellä sitä paikkaa, missä pitkäaikaisen mittauksen häkki sijaitsi. Ilmanvaihto oli kokonaan suljettuna noin tunnin ajan, jonka jälkeen ensin avattiin harjaluukku kello 17.20 ja sen jälkeen 20 minuutin välein kummankin puolen seinäverhot. Mittauksessa tietoa kerättiin mittaustornilla, sääasemalla ja tinytag-keräimillä 2 minuutin välein.

#### 4.7 Seurantapäiväkirjat

Tutkimuksen yhteistyötiloja pyydettiin pitämään päiväkirjaa pihatton eläinmääristä, ruokinasta ja maitotuotoksesta koejakson aikana: Lisäksi päiväkirjaan merkittiin seinäverhojen ja harjaluukkujen avaukset puolen päivän tarkkuudella sekä pihatton sisäilmastossa tapahtuneet ilmiöt, sumuhavainnot jne.

Taulukko 6. Esimerkki seuranta päiväkirjasta.

VERHOSEINÄTUTKIMUS		KOETILA - C		VIIKKOSEURANTALOMAKE		Helmi, VKO 6
				vasen ja oikea kastottuna lypsyasemasta kohti eläinhallia		
pvm	eläinmäärä pihatossa	"säättilä" pihatossa	vasen verho	harja	oikea verho	
esimerkki	60 lyle, 45 nk	onko sumua, jäätyvätkö pinnat, muuta	aamu 5 cm, ip 10 cm	koko ajan 8 cm	koko ajan 4 cm	
6.helmi						
7.helmi						

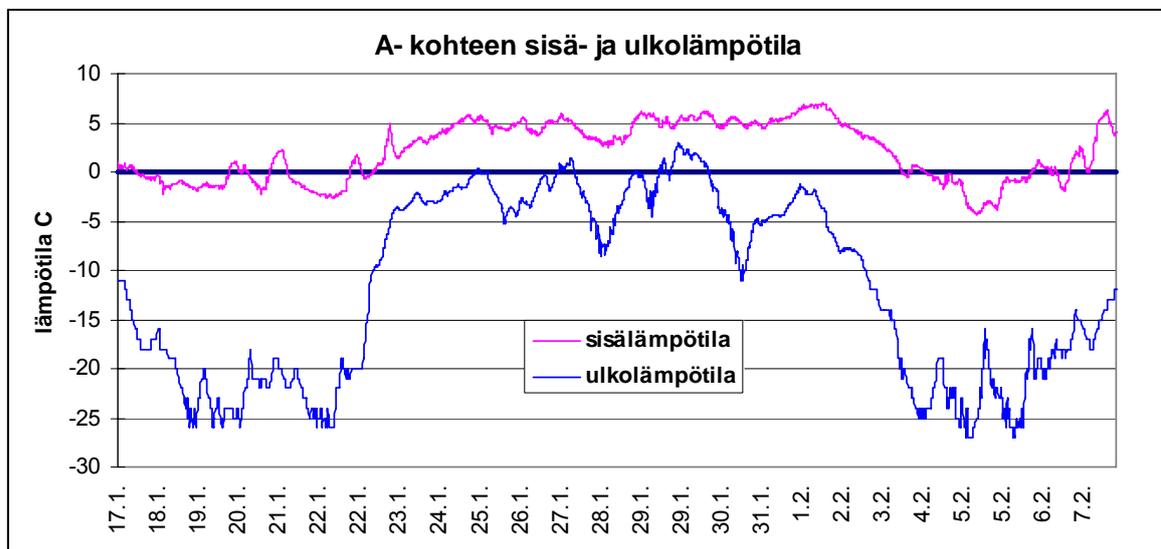
## 5 Mittausten tulokset

### 5.1 Yleistä mittaustuloksista

Mittaustuloksia on syytä tarkastella kriittisesti useasta syystä. Instrumentoinnissa oli eri kohteiden välillä eroja ja mittausajanjaksot poikkesivat toisistaan. Hiilidioksidiantureiden mittauskapasiteetti loppui kesken kohteissa A ja B. Lisäksi kylmyys osittain häiritsi tiedonkeruulaitteiden elektroniikan toimintaa. Laadullisesti parhaat mittaustulokset saatiin C-kohteesta kahden ensimmäisen viikon aikana. Tämän jälkeen sääaseman tietoja on jouduttu paikkaamaan Ilmatieteen laitoksen Ähtärin säädätällä. Kaikkien mittauskohteiden dataa on jouduttu puhdistamaan satunnaisista mittausvirheistä. Päiväkirjamerkinnöin seurattujen verhojen ja kattoaukkojen avautuneisuudet perustuivat silmämääräiseen arvioon eikä tarkkoihin mittauksiin. Tästä syystä rakennuksen tiivyyttä eli hallitsemattomia ilmavuotoja ja sen merkitystä ilmanvaihtoon on jäljempänä tarkasteltu tarkemmin. Kokonaisuutena data antaa riittävän tarkan kuvan siitä, mitä kohdepihatoissa tapahtui. C-kohteen tieto edustaa täydessä eläinkapasiteetissa olevan pihaton ilmanvaihtotilannetta, ja A ja B –kohteet antavat arvokasta tietoa vajaatäyttöisyyden vaikutuksista sisäilmastoon.

### 5.2 Mittaustulokset kohteessa A

Pihaton yhtenäistä ilmatilaa olevan eläintilan tilavuus on  $9600 \text{ m}^3$  ja hyötypinta-ala  $1760 \text{ m}^2$ . Parsipaikkoja on 130 kpl. Ilmatilavuus parsipaikkaa kohden on  $73,8 \text{ m}^3$ . Eläintila oli mittausjaksolla vajaatäyttöinen, lypsylehmiä oli 35 kpl ja nuorkarjaa 35 kpl. Eläinten tuottama energia oli noin 74 kW. Energiatuotto oli laskennallisesti 7,7 W ilmakeuutiometriä kohden. Kuva 24 osoittaa sisälämpötilan riippuvuuden ulkolämpötilasta. Sisälämpötila menee tässä kohteessa sen hetkellä energiatuotolla nollan alapuolelle silloin, kun ulkolämpötila laskee alle  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  asteen.



Kuva 25. sisä- ja ulkolämpötilojen välinen käyttäytyminen A-kohteessa mittausjaksolla 17.1. – 8.2.2006.

Kuva 25 osoittaa lämpötilojen käyttäytymisen sisällä tarkemmin rakennuksen eri osissa. Ulkoseinien läheisyydessä (5 cm verhon sisäpuolella) lämpötila on keskimäärin 2 astetta kylmempi kuin rakennuksen keskiosissa. Lämmennyt ilma nousi ylös, mikä on havaittavissa hallin yläosan käyrästä.

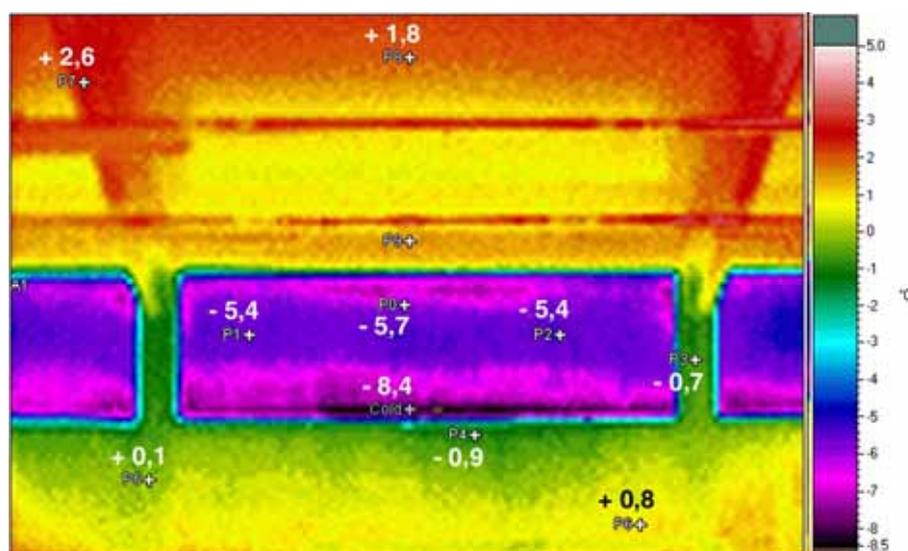


Kuva 26. sisälämpötilat A-kohteessa mittausjaksolla 17.1. – 8.2.2006

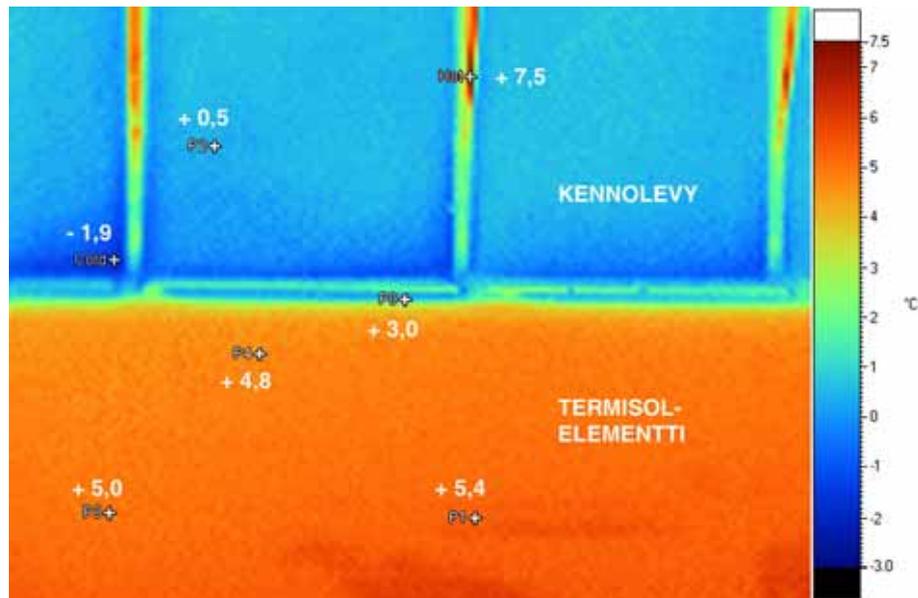
Mittausjakson alussa 20. – 22.1.2006 ulkolämpötila laski  $-25$  asteen tuntumaan. Tänä aikana pihattoon annettiin lisälämpöä 60 kW öljypolttimella, ja sen vaikutus on selvästi havaittavissa kuvassa 25. Öljypolttimen pakokaasut purkautuivat halliin. Osin tästä ja osin kylmyyden aiheuttamasta elektroniikan hyytymisestä johtuen hiilidioksidimittaus ei antanut luotettavaa kuvaa eläinten tuottaman hiilidioksidin määrästä kohteessa.

Nollarajan alitukset olivat lyhytaikaisia, eivätkä ne vaikuttaneet lantakäytävien, juomakuppien tai lannanpoistokoneistojen toimintaan millään lailla. Lypsyasemassa esiintyi pintojen jäätymistä siellä, missä lattiaa tai ritilää pestiin säännöllisesti lypsyjen yhteydessä.

Kohteessa tehtiin infrapunakuvaus mittausjakson alussa 17.1. Ulkolämpötila oli noin  $-10$  °C ja sisälämpötila keskellä rakennusta noin  $+3$  °C. Infrapunakuvat otettiin ulkoseinän verhoalueesta sekä kattoluukusta. Lämpötilat ovat tarkkoja niillä pinnoilla, jotka ovat koh-tisuorassa infrapunakameraan nähden. Kameraan nähden vinoilla pinnoilla lukeman luotettavuus pienenee. Seinän alueella pintalämpötilat ovat lähellä nollaa. Lämpö nousee katto-rakenteisiin ja nostaa pintalämpötilat selkeästi korkeammalle tasolle.



Kuva 27. Infrapunakuva verhoseinäalueesta. Ulkolämpötila on  $-10$  °C. Verhon kylmin piste on alakulmassa  $-8,4$  °C ja itse verhon keskialue on noin  $-5$  °C tuntumassa. Teräspilarin pinta verhojen välissä on lievästi pakkasella, mutta liimapuupalkki katossa jo  $+2,6$  °C lämpötilassa. Kattoelementin pinta on  $+1,8$  °C. Lämpöeristetyin seinän alaosaan pintalämpötila on alle  $+1$  °C asteen.

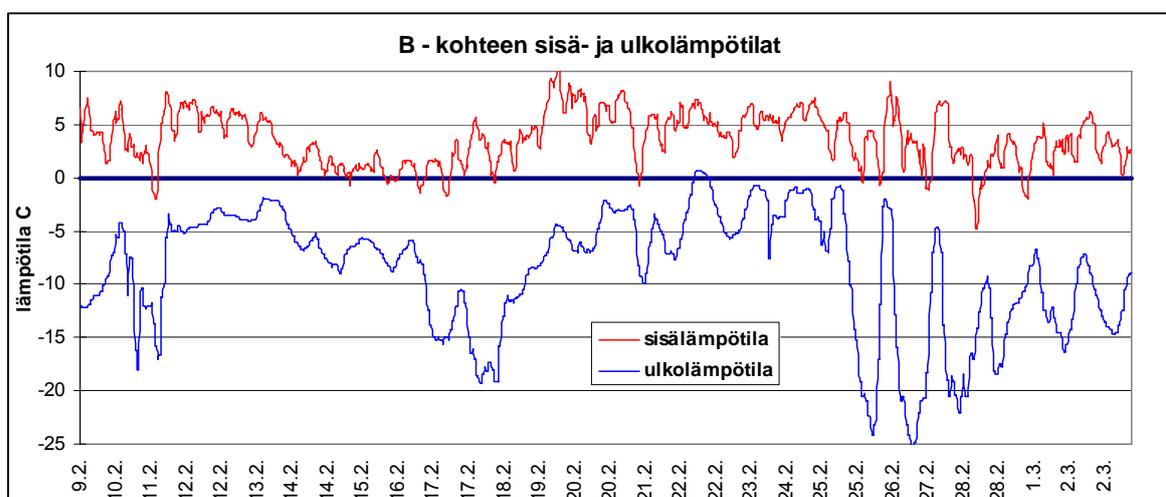


Kuva 28. Infrapunakuva kattoikkunan ja kattoelementin liitoskohdasta. Ulkolämpötila on  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kattoikkunan kulmassa on kylmin piste  $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja itse ikkunan keskialue on  $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  tuntumassa. Ikkunan alumiininen rakenneprofiili on  $+7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kattoelementin sisäpinta on keskimäärin  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  asteen tuntumassa.

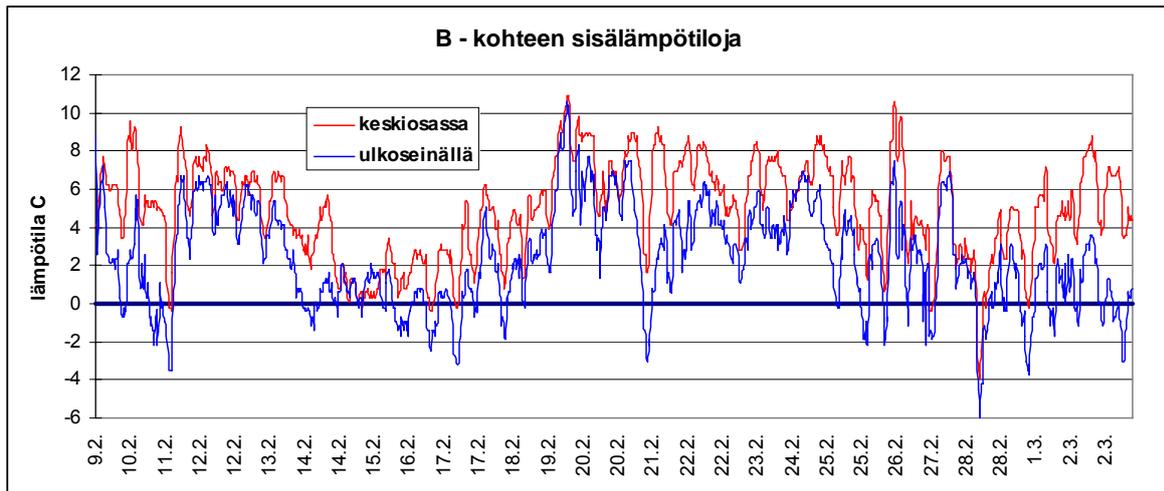
### 5.3 Mittaustulokset kohteessa B

Pihaton yhtenäistä ilmatilaa olevan eläntilan tilavuus on  $4960\text{ m}^3$  ja hyötypinta-ala  $957\text{ m}^2$ . Parsipaikkoja on 137 kpl. Ilmatilavuus parsipaikkaa kohden on  $36,2\text{ m}^2$ . Eläntila oli mittausjaksolla lievästi vajaatäyttöinen, lypsylehmiä oli 52 kpl ja nuorkarjaa 38 kpl. Eläinten tuottama energia oli noin 85 kW. Energiatuotto oli laskennallisesti  $17,1\text{ W}$  ilmakuutiometriä kohden. Kuva 29 esittää lämpötilojen käyttäytymistä sisällä rakennuksen eri osissa mittausjaksolla 9.2. – 2.3.2006. Ulkoseinien läheisyydessä (5 cm verhon sisäpuolella) lämpötila on keskimäärin  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  astetta kylmempi kuin rakennuksen keskiosissa.

Hiilidioksidimittari toimi koko mittausjakson ajan, mutta sen 2000 ppm:n kapasiteetti loppui säännöllisesti kesken eli pitoisuudet kasvoivat sitä suuremmiksi. Tästä syystä ilmanvaihdon määrää ei voitu laskea luotettavasti hiilidioksiditiedoista.



Kuva 29. Sisä- ja ulkolämpötilojen välinen käyttäytyminen B-kohteessa mittausjaksolla 9.2. – 2.3.2006.



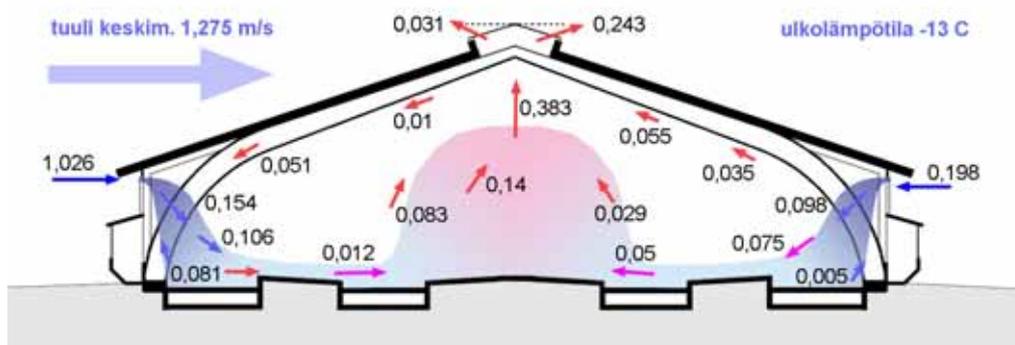
Kuva 30. sisälämpötilat B-kohteessa mittausjaksolla 9.2. – 2.3.2006.

## 5.4 Mittaustulokset kohteessa C

### 5.4.1 Ilman virtausnopeuden mittaus

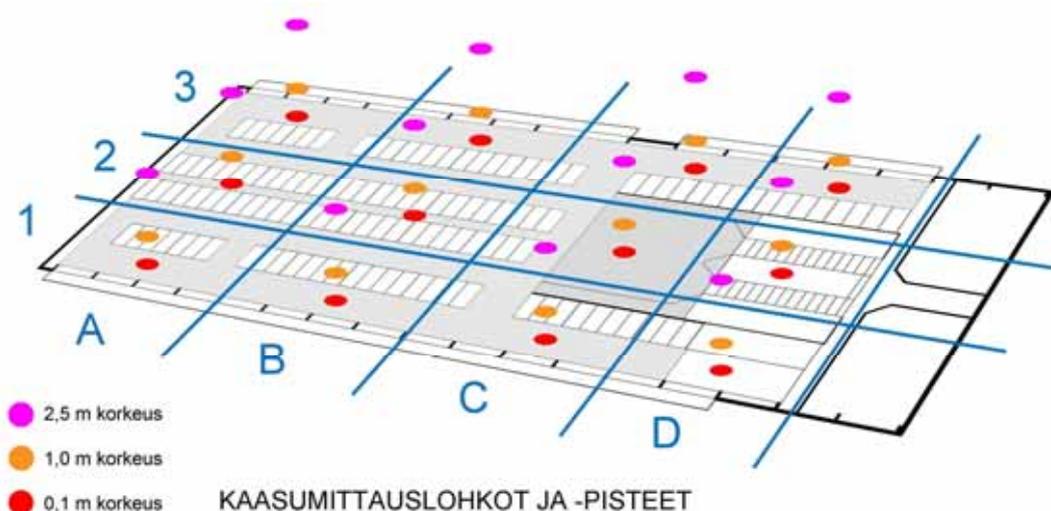
Ilman virtausnopeuksia tutkittiin kolmiulotteisesti mittaavalla anemometrillä. Mittaus antoi yhdellä kertaa tiedot ilman suunnasta, nopeudesta ja lämpötilasta. Ilman kulkusuunta vaihteli jonkin verran, mutta kuvassa 31 on esitetty pihaton poikkileikkaussuunnassa havaitut ilman virtaukset. Mittauksen aikana tuulen nopeus oli keskimäärin 1,2 m/s ja kohdistui pääasiassa toiselle julkisivulle, mikä näkyi tuulen toispuoleisena vaikutuksena ilman virtausnopeuksissa. Pakkanen oli  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$  astetta. Mittauksen aikana seinäverhot olivat auki muutaman senttimetrin ja harja noin 5 cm. Merkille pantavaa on se, että ilman virtausnopeus laski verrattain nopeasti heti tuloaukon jälkeen. Kylmä ilma lähti taipumaan kohti lattiaa, missä se siirtyi kohti rakennuksen keskustaa, alkoi lämmitä, nousta ja sekoittua. Ilman virtausnopeudet lehmien oleskeluvyöhykkeellä olivat enimmillään 0,154 m/s. Nautojen pidolle asetettavat eläinsuojeluväatimukset (MMMp 14/EEO/1997, F 20:1 6/EEO/2002) eivät määrittele naudoille suurinta sallittua virtausnopeutta. Ilman virtausnopeus oli suurimmillaan 0,38 m/s vain keskellä lähellä harjaa. Tuulenpuoleisella sisäläpällä oli havaittavissa paluupyörre, mutta tyynen puolella paluuvirtausta ei ollut, ilma siis nousi sisäläpettä myöden ylöspäin.

Luvut kuvaavat vain mittausajankohdan tilannetta. Tilanne muuttuu, kun tuulen nopeus kasvaa tai jos verhojen tuloaukkoa suurennetaan. Tätä seikka ilmentää kuva 48, jossa on esitetty C-kohteen ilman virtausnopeudet tuloaukoissa.



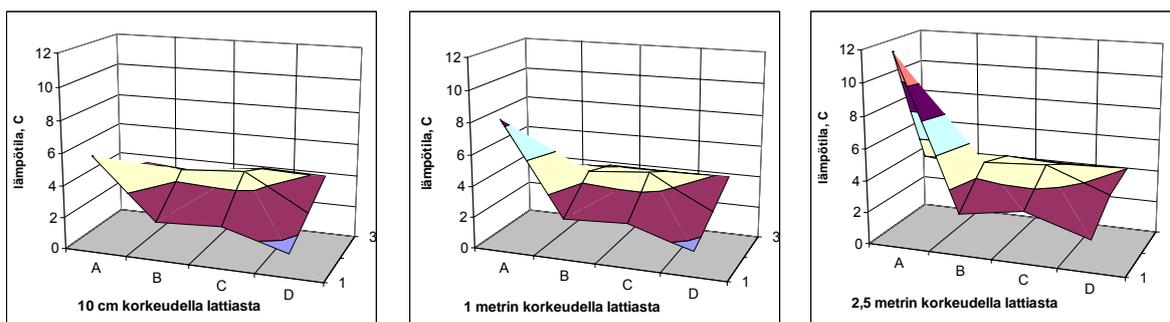
Kuva 31. Ilman virtausnopeudet C-kohteessa 8.2.2006.

## 5.4.2 Pihaton kaasumittaukset

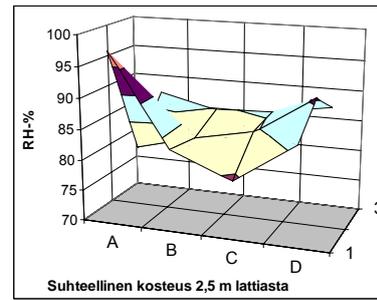
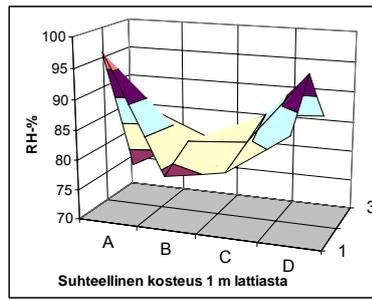
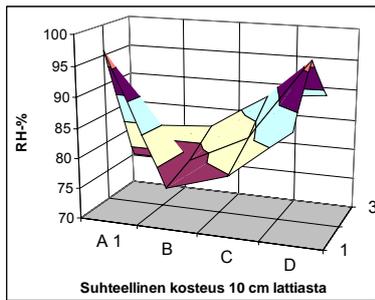


Kuva 32. Kaasumittauksissa pihaton pohja jaettiin A-D sektoreihin ja 1-3 lohkoihin. Vastaava jako esiintyy jäljempänä olevissa kolmiulotteisissa pitoisuuskuviissa 32 – 43.

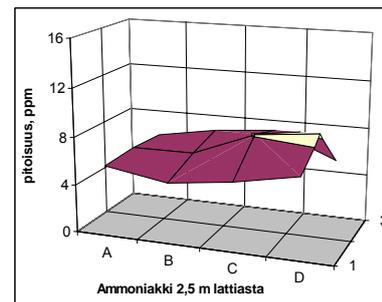
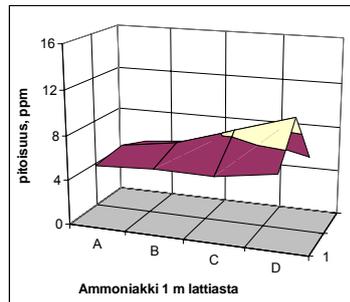
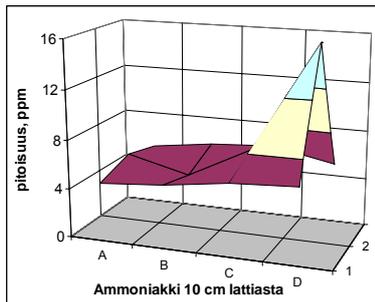
Kaasumittauksissa pihaton pohja oli jaettu pitkittäin 3 lohkoon ja poikittain neljään sektoriin. Mittauspisteitä oli siten 12 kpl, ja jokaisessa pisteessä mitattiin kolmelta korkeudelta 2 minuutin ajan. Mittaussessio kesti kaikkiaan noin 2 tuntia, jona aikana pihatton ilma vaihtui arviolta kaksi kertaa. Ajanjakso ei juurikaan vaikuttanut ammoniakkin ja hiilidioksidin paikallisiin pitoisuuksiin, mutta lämpötilaan jonkun verran, koska lehmät liikkuivat vapaasti makuuosastolta ruokintapöytään ja takaisin. Kuvissa 33-44 harmaa pohja kuvaa pihatton lattiaa mittaussektoreittain. Kuvien oikeassa laidassa D1-3 sektorissa sijaitsee lypsyasema ja keräilytila. Kuvat osoittavat, kuinka olosuhteet voivat vaihdella rakennuksen sisällä melkoisesti.



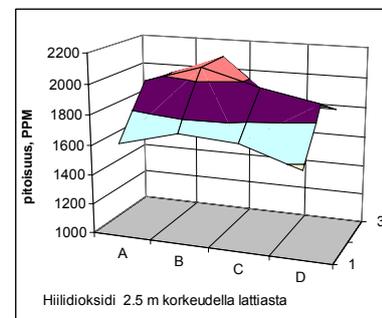
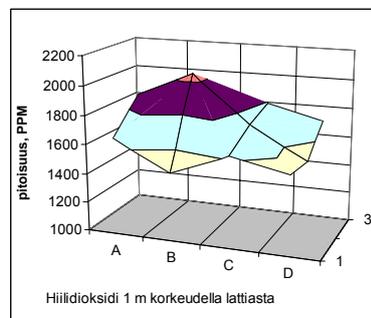
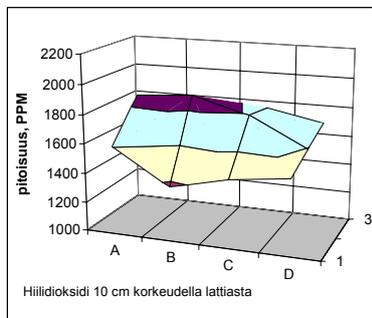
Kuvat 33-35. Lämpötilajakauma pihatton eri osissa 2 tunnin mittausjaksolla. Lämpötila on alhaisin poikimaosastossa D1, koska siellä ei ollut lehmiä lainkaan. Lypsyasema on muuta pihattoa viileämpi samasta syystä. A1 sektorin korkea lämpötila selittyy sillä, että kyseisellä lohkolla oli mittaushetkellä runsaasti lehmiä syömässä, jolloin lämpötila (ja myös kosteus) on paikallisesti noussut. Kylmimmän ja lämpimimmän mittauspisteen ero koko pihatossa on noin 10 °C astetta.



Kuvat 36-38. Kosteutta esiintyy lypsyaseman ja keräilytilan yhteydessä, koska siellä oli edellisen lypsyn jäljiltä pestyjä kosteita pintoja. Myös keräilytilan alla oleva lietekuilualue tuotti merkittävästi kosteutta. Kuivitetuilla parsialueilla suhteellinen kosteus oli noin 80 % luokkaa. A1 sektorin korkea kosteus selittyy ruokailevien lehmien määrällä juuri kyseisellä loholla.



Kuvat 39-41. Ammoniakkia esiintyi merkittävästi lypsyaseman edessä olevassa kokoomatilassa, ja sielläkin eniten lattiatasossa. Kokoomatilan ammoniakkipitoisuus pieneni ylöspäin mentäessä. Makuuparsiosaston ammoniakkipitoisuus on mitattu lantakäytävien keskeltä. Makuuparsissa pitoisuus voi olla vielä hieman pienempi.



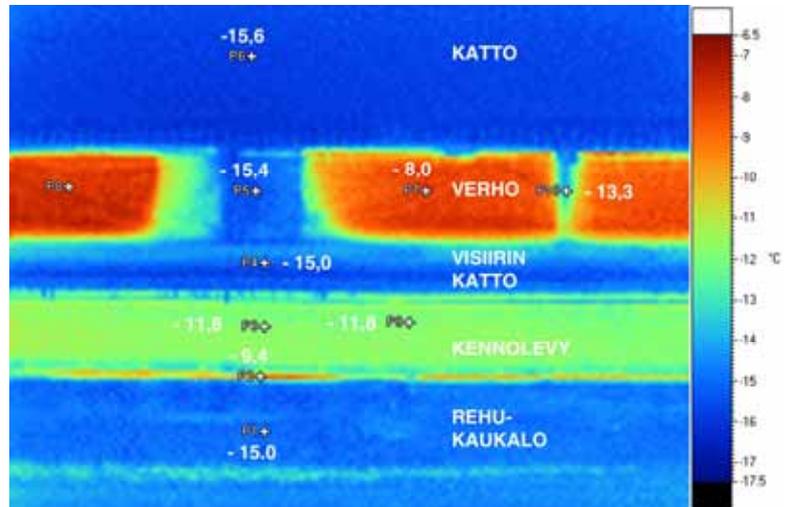
Kuvat 42-44. Hiilidioksidin määrä oli lypsyasemassa pienempi kuin keskellä makuuparsien alueella. Tämä on luonnollista, koska mittausjaksolla lehmiä ei ollut lypsyasemassa vaan kaikki olivat syömässä tai parsissa makaamassa. Vastaavasti hiilidioksidia esiintyy runsaammin siellä, missä sitä syntyy eli parsialueella. Ilmaa raskaamman hiilidioksidin määrä näyttää nousevan ylöspäin mentäessä, mikä selittyy ilman liikkeen ja keskialueella tapahtuvan nousun johdosta.

### 5.4.3 Infrapunakuvaus

Kohteessa tehtiin infrapunakuvaus mittausjakson alussa 8.2. Ulkolämpötila oli noin  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja sisälämpötila keskellä rakennusta noin  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Infrapunakuvat otettiin ulkoseinän verhoalueesta, kattoluukusta ja ulkoa. Lämpötilat ovat tarkkoja niillä pinnoilla, jotka ovat kohtisuorassa infrapunakameraan nähden. Kameraan nähden vinoilla pinnoilla lukeman luotettavuus pienenee.

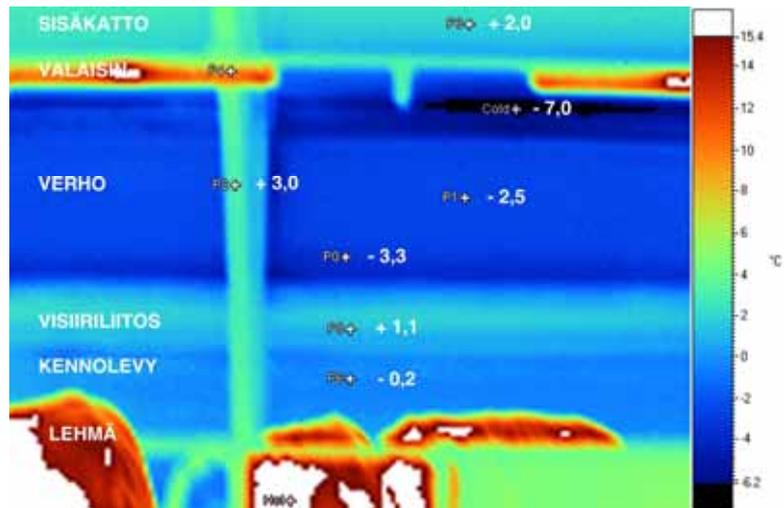
Kuva 45.

Infrapunakuva julkisivusta ulkona. Ulkolämpötila oli  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Verhojen pintalämpötila oli  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja visiiriseinän kennolevyn  $-11,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Visiirin kääntyvän kennolevyn alareunassa havaitaan lievää lämpövuotoa. Pisteessä P5 on verhojen säätövaijerit ja niiden suojana oleva tuplaverho, missä pintalämpötila on lähes sama kuin katolla olevan lumen.



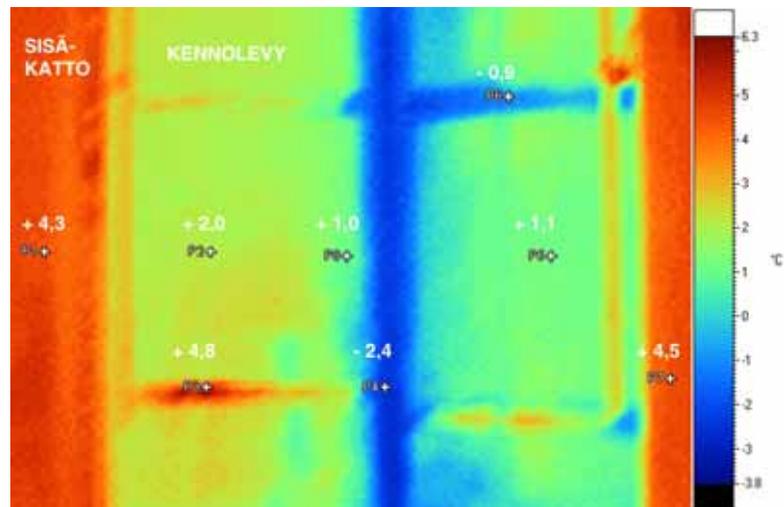
Kuva 46.

Infrapunakuva seinästä sisäpuolelta nähtynä. Kylmimmässä kohdassa  $-7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  verho on hieman auki ja sisään virtaa pakkasilmaa. Verhon sisäpinta on  $-2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ja kennolevy  $-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Muuten pinnat ovat plussan puolella. Kuvan alareunassa ruokailevia lehmiä.



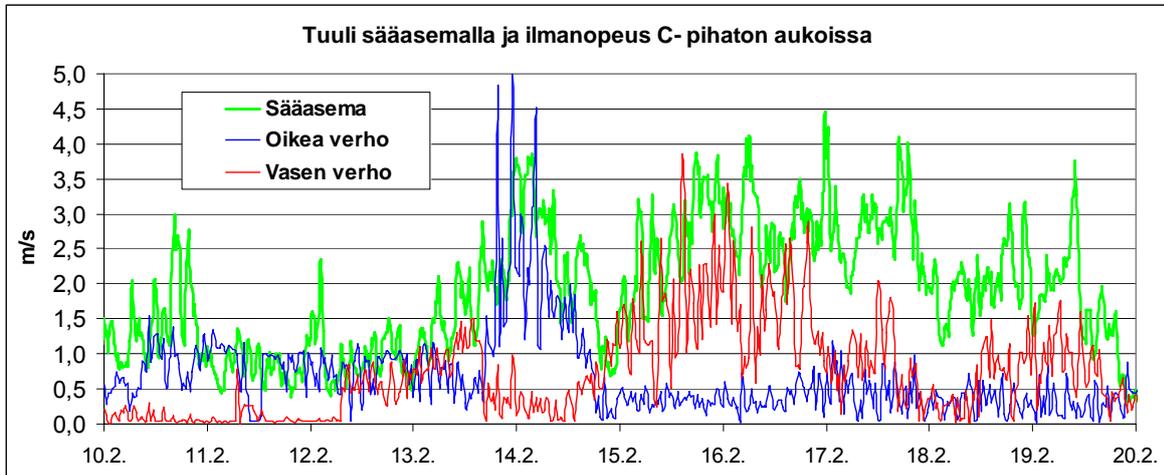
Kuva 47.

Infrapunakuva kattoluukusta sisäpuolelta nähtynä. Lämpöeristettyjen kattoelementtien sisäpinta on  $+4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kennolevytkin ovat plussan puolella. Puinen harjapalkki on  $-2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kuvassa oikeanpuoleinen luukku on hieman auki ja kennolevyn alumiininen jakopuite on hieman pakkasen puolella. Vasemman luukun puite on reilusti plussan puolella.

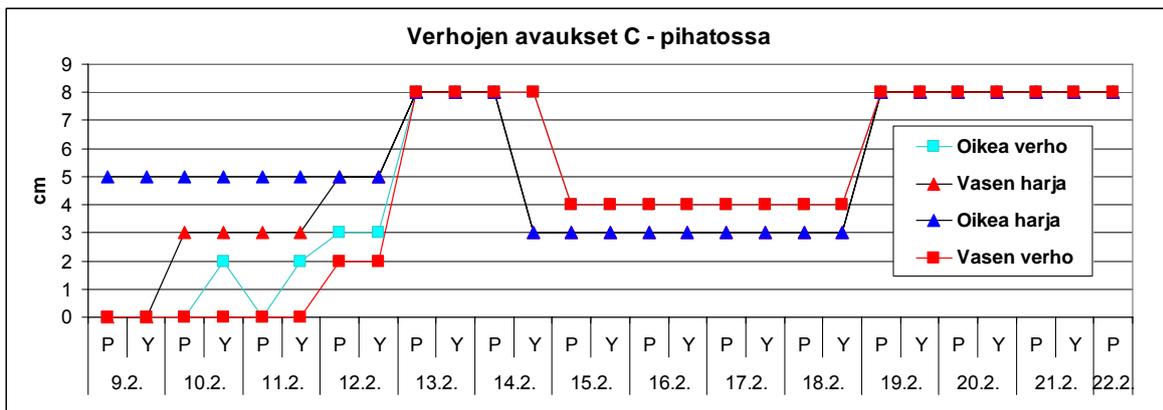


## 5.4.4 Olosuhteiden tunnusluvut mittausjaksolta

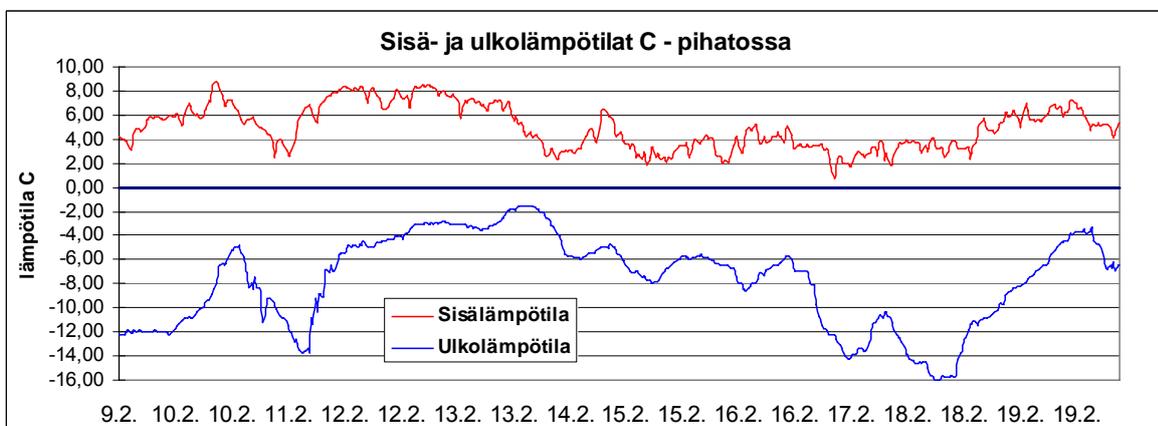
Kuva 48 osoittaa ilman virtausopeuden sääasemalla ja verhojen tuloaukoissa. Kuva 49 osoittaa viljelijän kirjapidon perusteella verhojen aukkoruokorkeuden senttimetreissä. Kuva 50 osoittaa ulko- ja sisälämpötilojen välisen suhteen. Kaikki kuvat esittävät samaa mittausjaksoa.



Kuva 48. Ilman virtausopeudet verhojen aukoissa



Kuva 49. Verhojen aukaisumäärät (P=päiväasento, Y=yöasento).

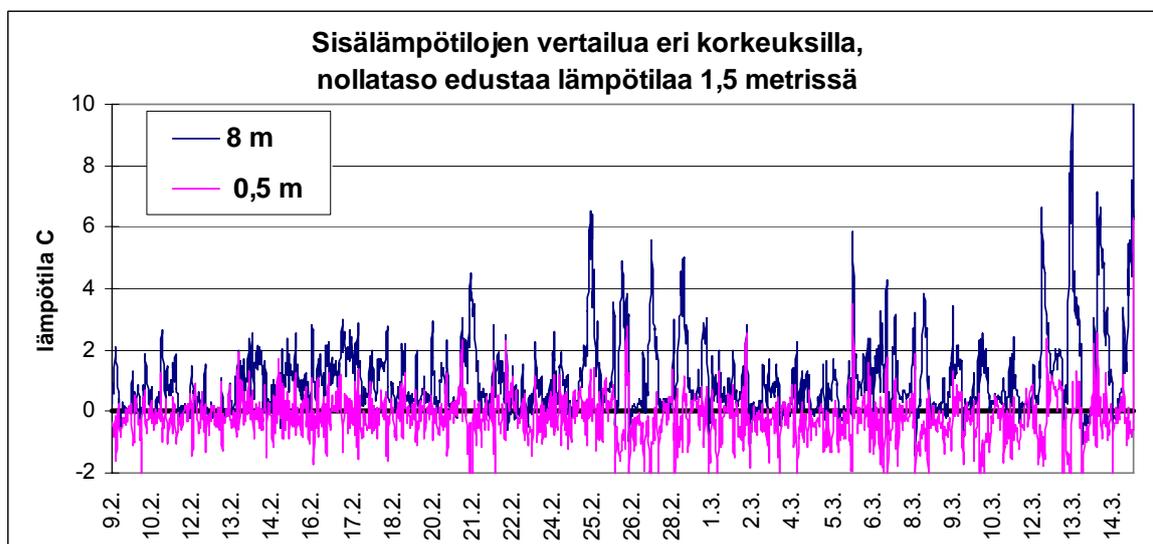


Kuva 50. Sisä- ja ulkolämpötilojen välisen käyttäytyminen, sisälämpötila on useiden mittauspisteiden keskiarvo.

Pihatton sisälämpötilan hetkellinen jakauma on esitetty kuvissa 33 – 35. Kuva 51 taasen osoittaa pihatton sisälämpötilavaihtelua mittaushäkissä 1,5 m korkeudella 5 viikon aikana. Vaihteluväli on + 15 °C asteesta -1,7 °C asteeseen. 6. ja 12. maaliskuuta pihatossa oli havaittavissa aamusumua, kun lämpötila oli käväissyt pakkasen puolella ja ilmassa oleva vesihöyry alkoi kondensoitua. Kuva 52 osoittaa, miten lämpötila vaihtelee 0,5 ja 8 metrin korkeuksissa 1,5 metrin korkeuteen verrattuna. Lehmän oleskeluvyöhykkeellä lämpötila vaihtelee pystysuunnassa yllättävästikin, mutta pääsääntöisesti 8 m korkeudella on aina lämpimämpää kuin 1,5 m korkeudella.



Kuva 51. Lämpötilan käyttäytyminen keskellä pihattoa 1,5 m korkeudessa.

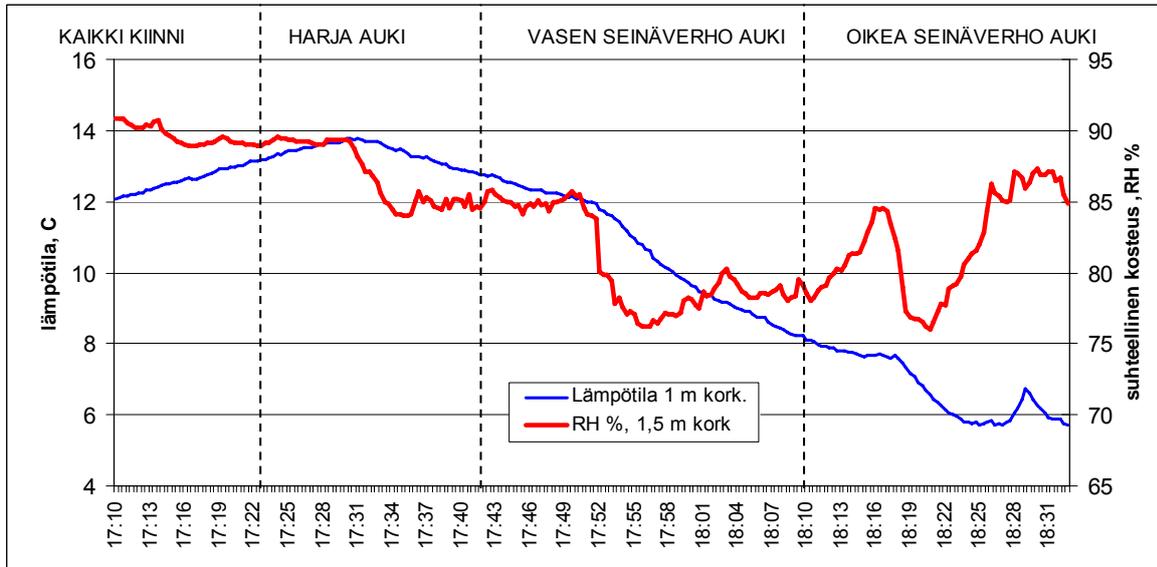


Kuva 52. Lämpötilaerojen vertailu 1,5 metrin korkeudella olevaan lämpötilaan (kuvassa 51). Puolen metrin korkeudella olevat lämpötilat vaihtelevat voimakkaasti 1,5 m verrattuna, mutta 8 metrissä on pääasiassa lämpimämpää.

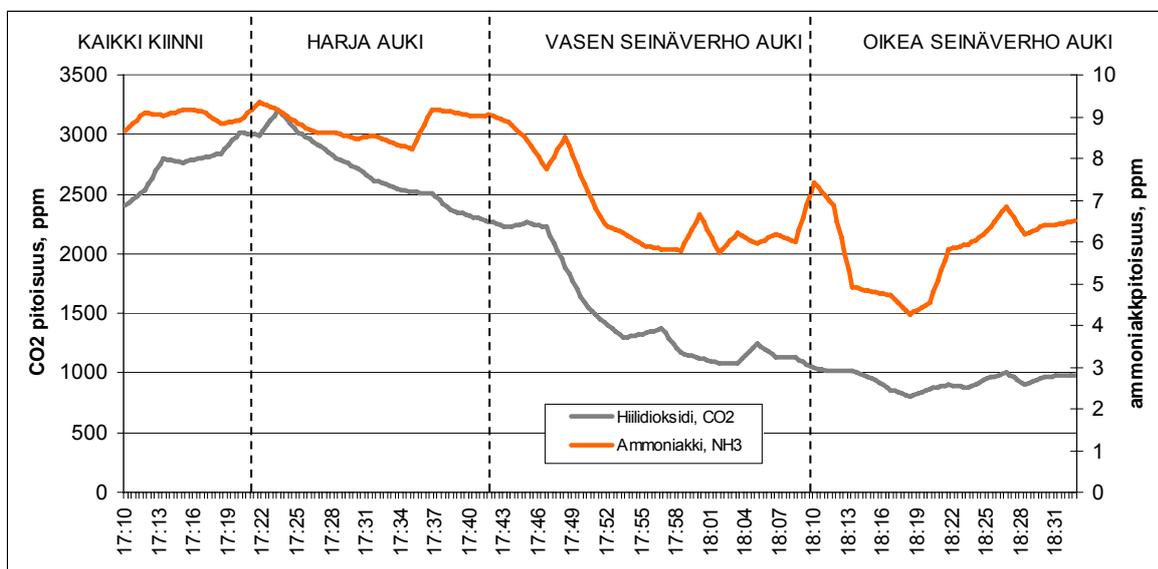
#### 5.4.5 Ilmanvaihdon koeajo kohteessa

Testiajon tarkoituksena oli tutkia, miten lämpötila, kaasut, kosteus ja ilmanvaihto käyttäytyvät keinotekoisesti luodussa tilanteessa. Testiajon aikana pihatossa oli lehmiä 78 kpl, ummessa olevia lehmiä 8 kpl ja nuorta karjaa 21 kpl. Yhteensä eläimet tuottivat lämpöä n. 130 kW. Energiatuotto oli laskennallisesti 20,5 W ilmakuutiometriä tai 105 W lattianeliometriä kohden.

Luukut suljettiin kello 16.30, jonka jälkeen ilmanvaihto oli minimaalista ja tapahtui lähinnä hallitsemattomien vuotoilmakohtien kautta. Harjaluukut avattiin klo 17.20, vasen verho kello 17.40 ja oikea verho 18.10. Lämpötila oli luukkujen sulkemisen jälkeen noussut lähelle + 14 °C astetta ja suhteellinen kosteus oli noin 90 %. Hiilidioksidi oli saavuttanut 3000 ppm rajan ja ammoniakki oli n. 9 ppm. Harjaluukkujen ja seinäverhojen aukaisujen myötä pitoisuudet laskivat pihaton normaaleille tasoille noin tunnissa. Testiajo osoitti, että hiilidioksidi on hyvä ilmanvaihdon indikaattori. Pitoisuuksien paluuliike keinotekoisesta maksimista takaisin normaaliin tilanteeseen tapahtui noin tunnissa.



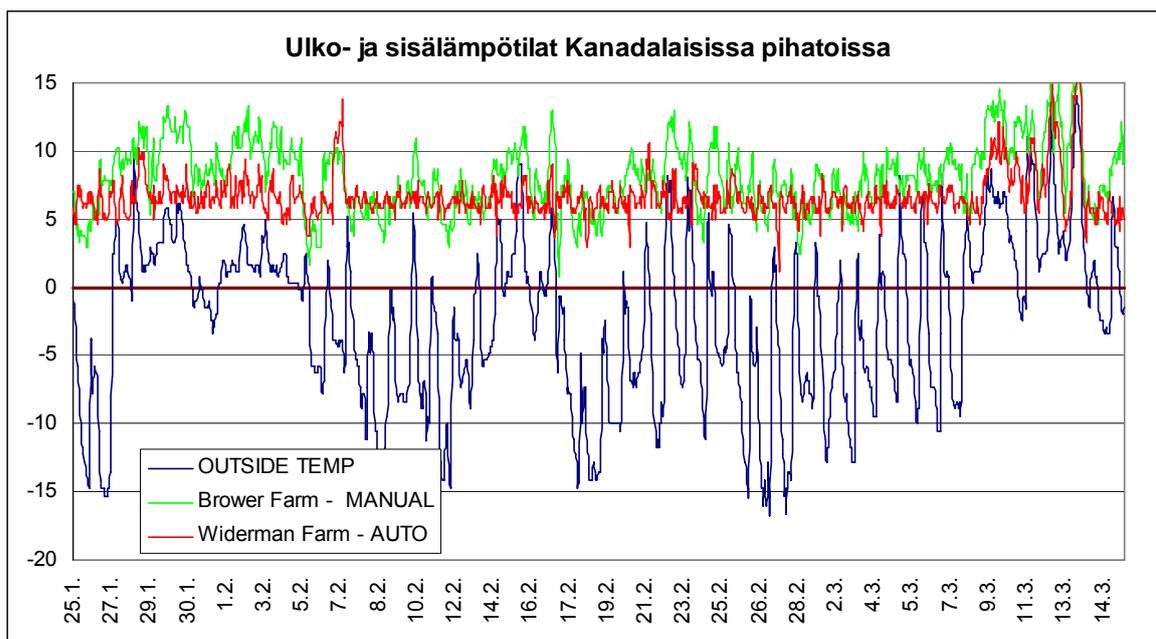
Kuva 53. Sisälämpötila ja ulkolämpötila Ähtärin pihatossa koeajon aikana.



Kuva 54. Hiilidioksidin ja ammoniakkin pitoisuuksien muutos koeajon aikana.

## 5.5 Mittaukset Kanadan Ontariossa

Kanadan Ontariossa kahdella tilalla tehtyjen mittausten tulokset on esitetty kuvassa 55. Ulkolämpötila oli minimissään laskenut  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$  asteeseen ja vuorokautinen vaihtelu oli suurta. Vaihteluun vaikutti eteläisempi sijainti (vastaa Etelä-Ranskan korkeutta) ja aurion säteilyn määrä. Pihaton sisälämpötila oli pysynyt molemmissa kohteissa keskimäärin  $+7\text{ }^{\circ}\text{C}$  asteessa. Mittaus osoittaa mielenkiintoisella tavalla käsi- ja automaattisäädön eron pihaton sisälämpötilan ohjauksessa. Automaatiikka pitää vaihteluvälin tarkemmin halutussa tavoitelämpötilassa, vaihteluväli on keskimäärin  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  astetta. Käsissäädössä vaihteluväli on keskimäärin  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  astetta. Mittaustuloksesta voidaan esittää kysymys, mikä on automaatiikkaohjauksesta syntyvä hyöty sisäilmastoon ja lehmille kun otetaan huomioon investoinnin arvo.



Kuva 55. Lämpötilojen käyttäytyminen Ontariolaisissa pihatoissa tammikuun lopusta maaliskuun puoliväliin 2006.

## 6 Ilmanvaihdon ja sisäilmaston laskentamalli

### 6.1 Yleistä mallinnuksesta

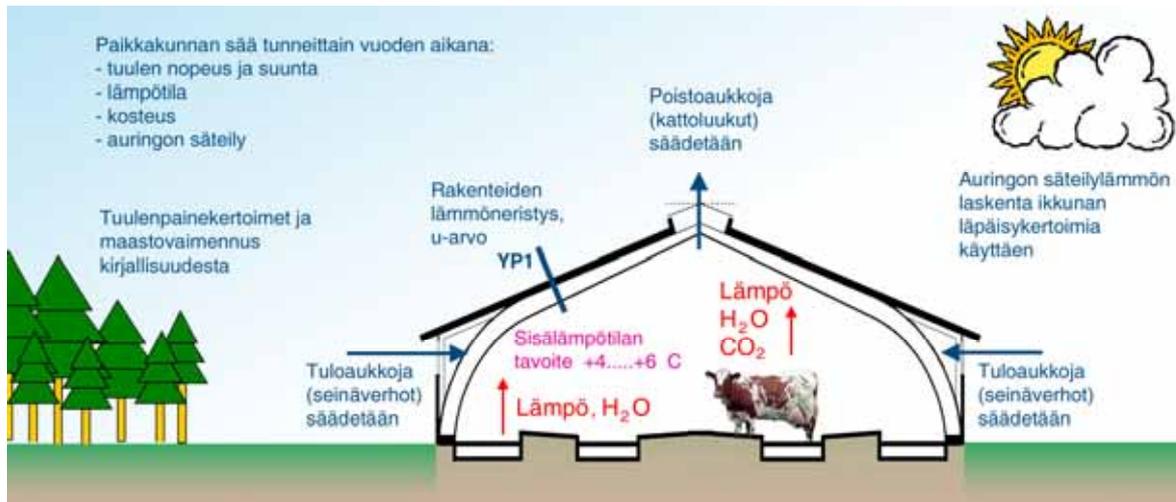
Verhoseinänavettaa varten kehitettiin laskentamalli, jolla voidaan ennustaa navetan sisälämpötila, kosteus ja hiilidioksidipitoisuus vuoden jokaisena tuntina. Kuva 56 antaa yleiskuvan laskentamallin käsittelemistä ilmiöistä.

Malli perustuu jatkuvuustilanteen ilmavirta-, lämpö-, kosteus-, sekä epäpuhdistaseisiin, jotka esitellään seuraavassa. Ilmavirta-, lämpö- ja kosteustaseet kytkeytyvät toisiinsa joten ne on ratkaistava samanaikaisesti, mikä tekee laskentaohjelman ratkaisuosasta suhteellisen monimutkaisen.

Mallilla laskettiin ensin kahden viikon mittausjakso 10 – 23.2.2006, jonka avulla saatiin käsitys siitä, miten hyvin laskentamalli vastaa todellisuutta. Mittausjakson perusteella arviointiin lisäksi rakennuksen hallitsemattomien ilmavuotoreittien koko. Sää tiedot saatiin navetan katolla olleesta sääasemasta ja ilmanvaihtaukkojen avaukset isännän kirjanpidosta.

## 6.2 Ilmanvaihtomalli

Ilmanvaihtoa tapahtuu verhoseinän ja kattoikkunan lisäksi myös rakennuksen hallitsemattomien vuotokohtien kautta. Hallitsemattomien vuotoaukkojen kokonaispinta-alaksi arvioitiin mittausjakson 10 – 23.2.2006 perusteella  $3,4 \text{ m}^2$ , mikä vastaa ilmanvaihtotekniikassa käytettyä rakennuksen ilmapuotolukua  $n_{50}=10,5 \text{ l/h}$ . Laskentamallissa vuotoaukkoja sijoitettiin kaikille seinille sekä kattoon, joten ilmanvaihtoaukkoja oli yhteensä yhdeksän taulukon 7 mukaisesti.



Kuva 56. Ilmanvaihdon ja sisäilmaston laskentamallin tarvitsemat tiedot.

Taulukko 7. Ilmanvaihtoaukkojen sijainti ja koko laskentamallissa.

Aukon tyyppi	Korkeusasema, m	Pituus, m	Leveys, m
Verhoseinä, etelä	3	50	0...1
Verhoseinä, pohjoinen	3	54	0...1
Kattoikkuna, etelä	7,3	42	0...0,5
Kattoikkuna, pohjoinen	7,3	42	0...0,5
Vuoto, eteläseinä	0	56	0,02
Vuoto, pohjoiseinä	0	56	0,02
Vuoto, länsiseinä	0,5	22	0,01
Vuoto, itäseinä	2	22	0,01
Vuoto, katto	7,3	56	0,0122

Verhoseinän ja kattoikkunan avauksia säädetään laskennassa sisälämpötilan perusteella pienin portain siten, että sisälämpötila pysyy välillä  $4 \dots 6 \text{ °C}$  jos se on mahdollista. Ilmanvaihdon laskenta perustuu ilman massataseeseen, joka ilmaisee, että rakennukseen tulee aukkojen kautta yhtä suuri kuivan ilman massavirta kun sieltä poistuu.

$$\dot{m}_{\text{sisään}} = \dot{m}_{\text{ulos}}$$

Kaava 14.

Jotta massatase voidaan muodostaa koko rakennukselle, pitää ilmavirta vuotoraoista sekä tarkoituksellisista ilmavirta-aukoista ilmaista aukon kohdalla vallitsevan sisä- ja ulkoilman paine-eron avulla. Tässä on oletettu aukkovirtaus täysin turbulenttiseksi, jolloin ilman massavirta aukossa on laskettavissa kaavasta 15.

$$\dot{m} = wAC_d \sqrt{2\rho_{ref} |p_{sisä} - p_{ulko}|}$$

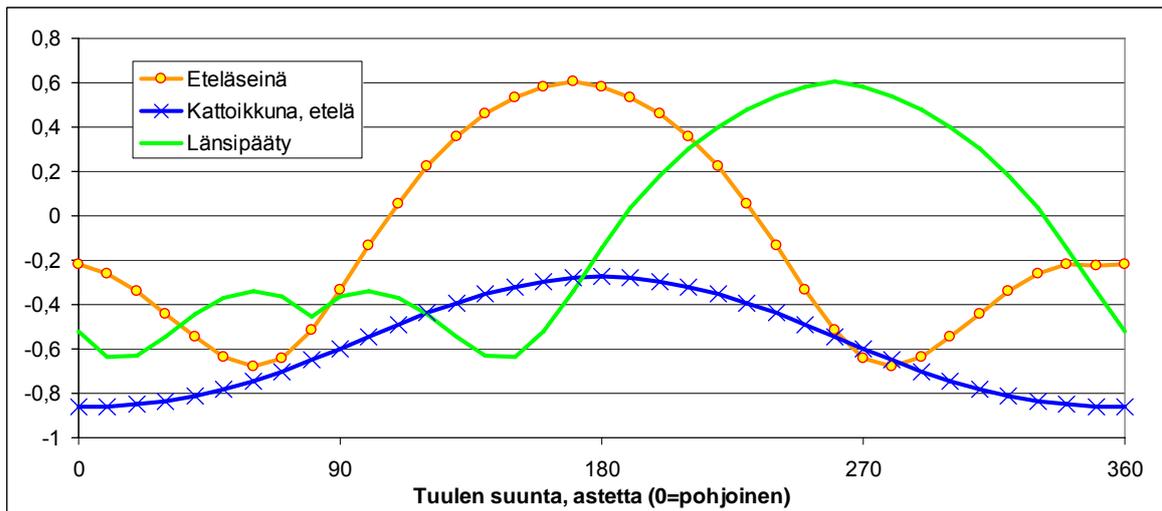
Kaava 15.

missä A on aukon pinta-ala,  $\rho_{ref}$  ilman referenssitiheys ( $1,2 \text{ kg/m}^3$ ) ja  $C_d$  aukon ulosvirtauskerroin (0,6), joka ottaa huomioon virtauksen kuroutumisen sekä kitkan. Korjauskerroin w ottaa huomioon ilman tiheyden poikkeaman referenssiarvosta ja viskositeetin riippuvuuden lämpötilasta. Kaavassa tarvittava paine-ero voidaan laskea kun kunkin aukon kohdalla ulkona vallitseva paine kirjoitetaan aukon korkeusaseman h sekä katon tasolla vallitsevan tuulen nopeuden v avulla kaavasta 16,

$$p_{ulko} = p_{ref} + \rho gh + C_p \frac{1}{2} \rho v^2$$

Kaava 16.

missä  $p_{ref}$  on ilman referenssipaine maanpinnan tasolla,  $\rho$  on ilman tiheys ja  $C_p$  tuulenpainekerroin (kuva 57). Seinien painekertoimet on laskettu Swamin ja Chandran (1988) korrelaatiokaavoista käyttäen rakennuksen sivuseiniin suhteelle arvoa 0.5. Kattoikkunan painekertoimen lähtökohtana on käytetty Kozain ja Sasen (ref. Wang ja Deltour 1998) ilmoittamia arvoja kasvihuoneikkunalle (-0,3 tuulen puolella ja -0,7 tuulen alapuolella). Kattossa olevalle ilmapuodolle on käytetty painekerrointa -0,6.



Kuva 57. Tuulenpainekertoimet seinille ja kattoikkunoille. "Eteläseinä" ei ole aivan tarkkaan etäsuuntaan: seinä on tuulen suuntaa vastaan suuntakulmalla 170 astetta. Pohjois- ja itäsuunnan painekertoimet ovat vastaavia näiden kanssa.

Tuulen nopeus kattotasolla on saatu testijaksolla katolla olleesta sääasemasta. Vuosilaskelmissa tuulen nopeudeksi on oletettu 96 % sääaseman tuulen nopeudesta mikä vastaa avointa maastotyyppiä. Lisäksi on tehty vertailulaskelma suojaisemmalle maastolle, jossa paikallinen tuulen nopeus on 44 % sääaseman nopeudesta. Paine kertoimet kuten myös maaston vaimennuskertoimet ovat herkkiä rakennuksen ja maaston muodon yksityiskohdille, joten niiden arviointi muodostaa merkittävän epävarmuustekijän luonnollisen ilmanvaihdon laskentaan. Vastaava painekaava sisäilmalle on

$$p_{sisä} = p_o + \rho gh$$

Kaava 17.

missä  $p_o$  on referenssipaine sisällä lattiapinnan tasolla.

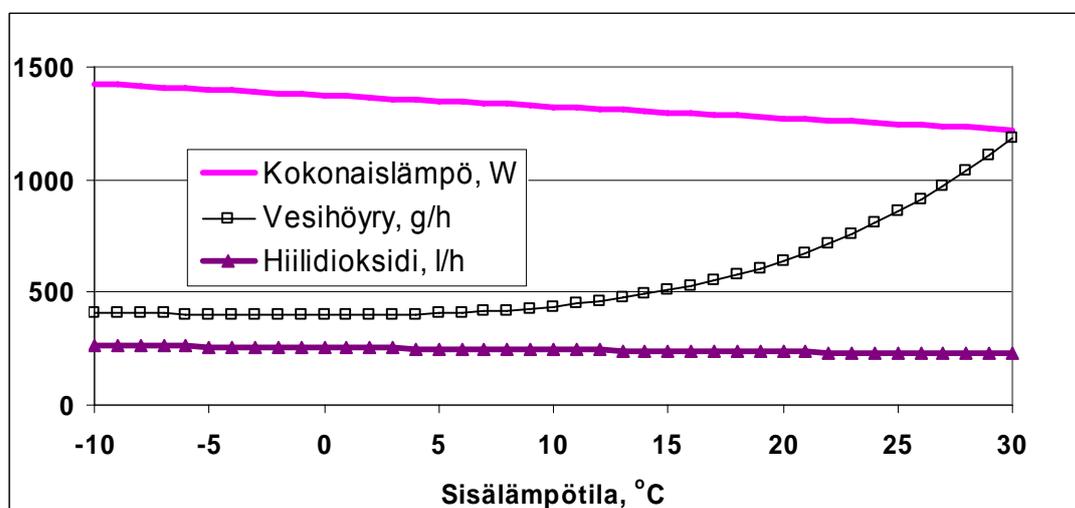
Tuntemattomaksi ilmanvaihtomallin kaavoissa 14-17 jää ero ulkoilman ja sisäilman referenssipaineiden välillä. Tämän paine-eron ratkaisun jälkeen kaikkien aukkojen ilmavirrat ovat laskettavissa.

### 6.3 Kosteustase

Sisäilman ajasta riippuva kosteustase

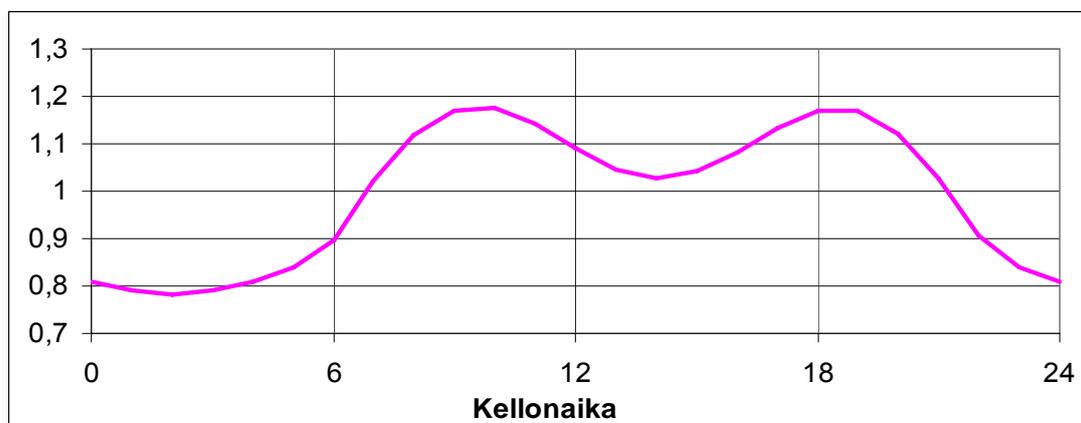
$$\frac{d}{dt}(V\rho_i x_{sisä}) = \dot{m}_{H_2O,eläin} + \dot{m}_{H_2O,lattia} - \dot{m}_{sisään}(x_{sisä} - x_{ulko}) \quad \text{Kaava 18.}$$

ilmaisee, että sisäilman absoluuttinen kosteus  $x_{sisä}$  lisääntyy eläimistä ja pinnoista haihtuvan kosteuden takia ja pienenee ilmanvaihdon ansiosta. Kosteustaseen vasemmanpuoleisella aikatermillä ei ole kovin paljon merkitystä laskennassa käytetyllä yhden tunnin aika-askeleella, koska ilma vaihtuu yleensä monta kertaa tunnissa. Eläimistä tuleva kosteus on laskettu lukujen 2.1 -2.4 kaavoista kuvan 58 esimerkin mukaisesti.



Kuva 58. 600- kiloisen lehmän lämmön, vesihöyryn ja hiilidioksidin tuotto eri sisälämpötiloissa.

Edellä mainittu eläinten kokonaislämmöntuotto samoin kuin kosteuden ja hiilidioksidin tuotto ovat vuorokauden keskiarvoja. Koko vuoden laskelmissa on käytetty kuvan 59 mukaista vuorokautista vaihtelua.



Kuva 59. Eläinten lämmön, kosteuden ja hiilidioksidin tuoton oletettu vuorokausivaihtelu verrattuna vuorokauden keskiarvoon (Pedersen ja Sällvik 2002).

Lattiapinnoilta haihtuva vesihöyryn massavirta on laskettu Kapuisen ja Karhusen (1989) kaavasta

$$\dot{m}_{H_2O,lattia} = \frac{A_{märkä}}{m^2} \left( 10,9 + 18,4 \left( \frac{v_{ilma}}{m/s} \right)^{1,2} \right) \left( \frac{P'(t_{sisä}) - P_{höyry, sisä}}{mbar} \right) g/h \quad \text{Kaava 19.}$$

missä ilman nopeudeksi  $v_{ilma}$  on asetettu 0,2 m/s ja märkäpinta-alaksi  $A_{märkä}$  57 % lattiapinta-alasta, mikä on todellinen pohjapiirroksesta laskettu märän lattiapinnan osuus koko eläinhallista.

## 6.4 Hiilidioksidin tase

Sisäilman ajasta riippuva hiilidioksiditase

$$\frac{d}{dt}(VC) = \dot{V}_{CO_2,eläin} - \frac{\dot{m}_{sisään}}{\rho_{ref}}(C_{sisä} - C_{ulko}) \quad \text{Kaava 20.}$$

ilmaisee, että sisäilman hiilidioksidipitoisuus  $C$  lisääntyy eläinten luovuttamasta hiilidioksidista ja pienenee ilmanvaihdon ansiosta. Laskentamallissa eläinten hiilidioksidituotto on arvioitu Pedersen ja Sällvikin (2002) mukaan 0,185 m<sup>3</sup>/h eläinten lämmöntuoton 1000 W kohti. Hiilidioksidin tuotto samoin kuin lämmöntuotto ovat riippuvaisia vuorokaudenajasta ja sisälämpötilasta kuvan 59 mukaan. Ulkoilman pitoisuutena on käytetty arvoa  $C_{ulko} = 350$  ppm.

## 6.5 Lämpötase

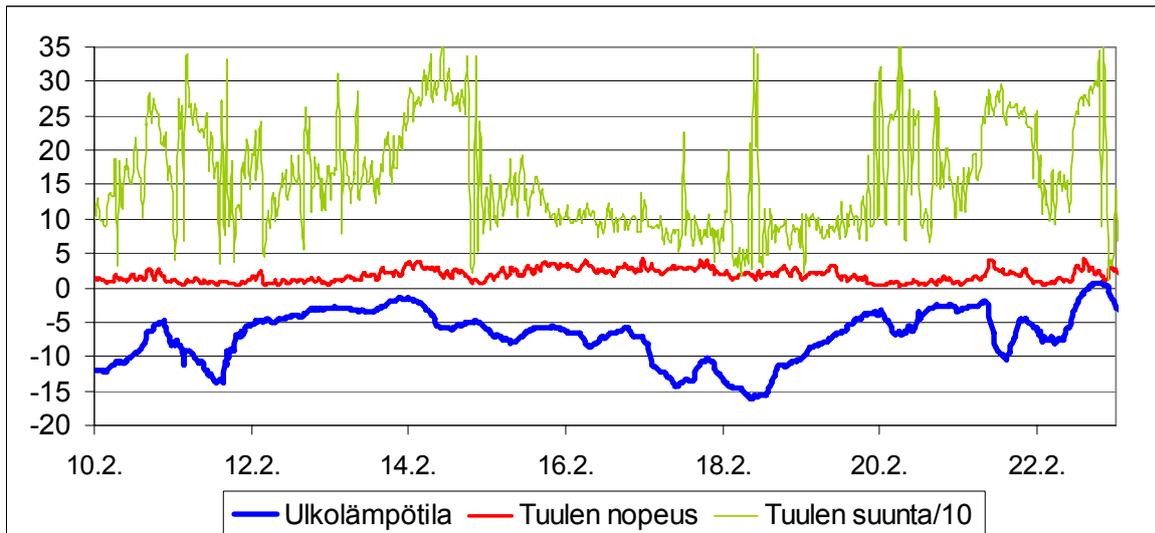
Sisäilman lämpötase

$$\frac{d}{dt}(C_{sisä}t_{sisä}) = \left( \sum UA + \dot{m}_{sisään}c_p \right) (t_{sisä} - t_{ulko}) + U_{lattia}A_{lattia}(t_{sisä} - t_{maa}) + \Phi_{eläin,tuntuva} + \Phi_{haihdutuslattia} + \Phi_{aurinko} \quad \text{Kaava 21.}$$

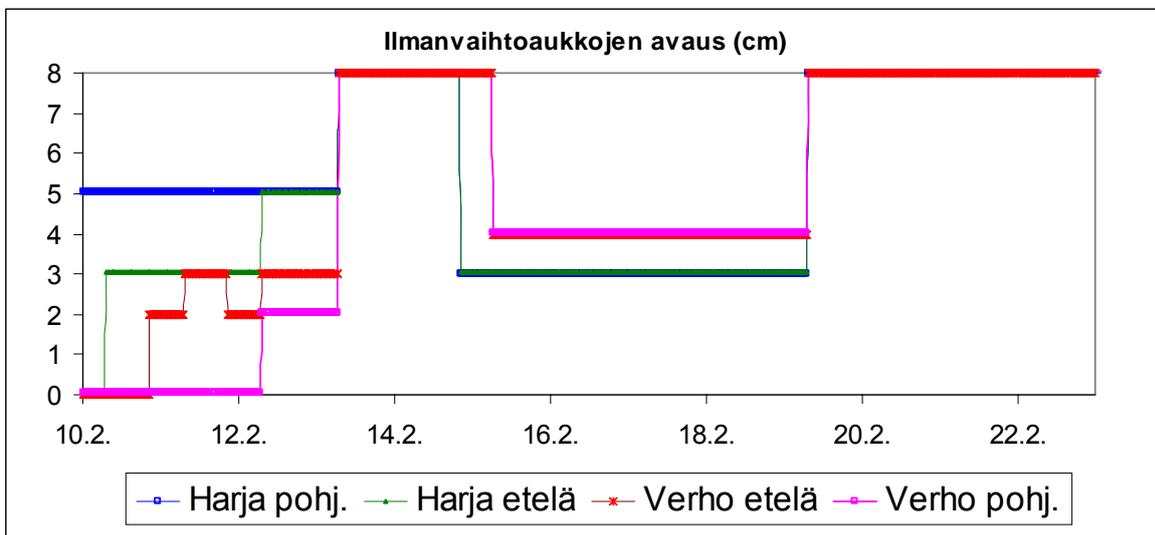
ilmaisee, että sisälämpötila laskee rakenteiden lämmöneristyksen heiketessä, ilmanvaihdon lisääntyessä sekä sisä- ja ulkolämpötilan eron kasvaessa. Toinen termi oikealla puolella ottaa huomioon lattian kautta maaperään menevän tai siitä tulevan lämpövirran, jonka vakioille saatiin koekohteen mittausten perusteella arvot  $U_{lattia} = 1,4$  W/m<sup>2</sup>K ja  $t_{maa} = 9$  °C. Seuraava termi on eläimistä tuleva tuntuva lämpö, joka saadaan kokonaislämmöntuotosta vähentämällä eläinten kosteudentuottoon menevä teho. Seuraava termi on lattiapinnalta haihtuvan vesimäärän (kaava 19) haihduttamiseen sisäilmasta tuleva teho. Viimeinen termi on sisälle tuleva auringon säteilyteho, joka laskettiin käyttäen katossa ja seinissä oleville kennolevyille läpäisysuhdetta 0,7. Kaavan vasemmalla puolella oleva lämpökapasiteetti  $C_{sisä}$  sisältää navetan sisäilman lämpökapasiteetin ja 15% suuruisen lisän, joka ottaa likimain huomioon sisäilman lämpötilaa viiveettä seuraavat rakenteet. Kaavan oikealla puolella olevat ulkovaipparakenteiden lämpövirrat lasketaan jatkuvuustilanteen mukaan joten lämmön varastoitumista rakenteisiin ei ole otettu mallissa huomioon. Tämä yksinkertaistaa laskentaa eikä aiheutuva virhe ole kovin suuri, koska seinä- ja kattorakenteet ovat suhteellisen kevyitä ja ilmanvaihdon lämpöhäviöt ovat kaavassa 21 hallitsevia rakenteiden lämpöhäviöihin verrattuna. Esimerkiksi tyypillisellä minimi-ilmanvaihtuvuudella 2 1/h ilmanvaihdon lämpöhäviöt ovat 2,5-kertaiset ulkovaipan lämpöhäviöihin verrattuna.

## 7 Mittausjakson laskenta

Mallilla laskettiin kahden viikon mittausjakso 10. – 23.2.2006, jonka perusteella pyrittiin saamaan käsitys siitä miten hyvin laskentamalli vastaa todellisuutta. Mittausjakson perusteella arvioitiin lisäksi rakennuksen hallitsemattomien ilmapuotoreittien koko. Sää tiedot (kuva 60) saatiin navetan katolla olleesta sääasemasta ja ilmanvaihtoaukkojen avaukset (kuva 61) isännän kirjanpidosta. Mittausjakson laskennassa jätettiin taseista pois aikatermi, koska ilmanvaihtotuloksia haluttiin verrata jatkuvuustilaan perustuviin mittaustuloksiin. Samasta syystä jätettiin huomiotta myös eläinten aktiviteetin vuorokautinen vaihtelu.

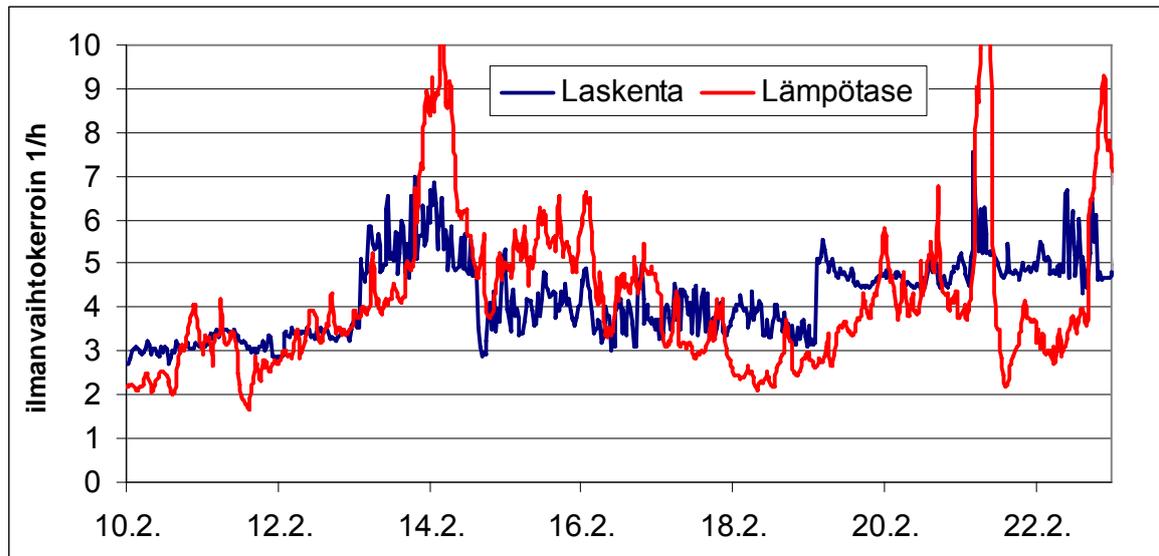


Kuva 60. Mittausjakson ulkolämpötila (°C), tuulen nopeus (m/s) ja tuulen suunta (astetta). Tuulen suunnat 0 ja 360 astetta tarkoittavat pohjoistuulta.



Kuva 61. Ilmanvaihtoaukkojen avaukset (cm) mittausjaksolla isännän kirjanpidon mukaan. Tässä on oletettu, että kirjanpitolomakkeen yöaika tarkoittaa kellonaikaa 21-07.

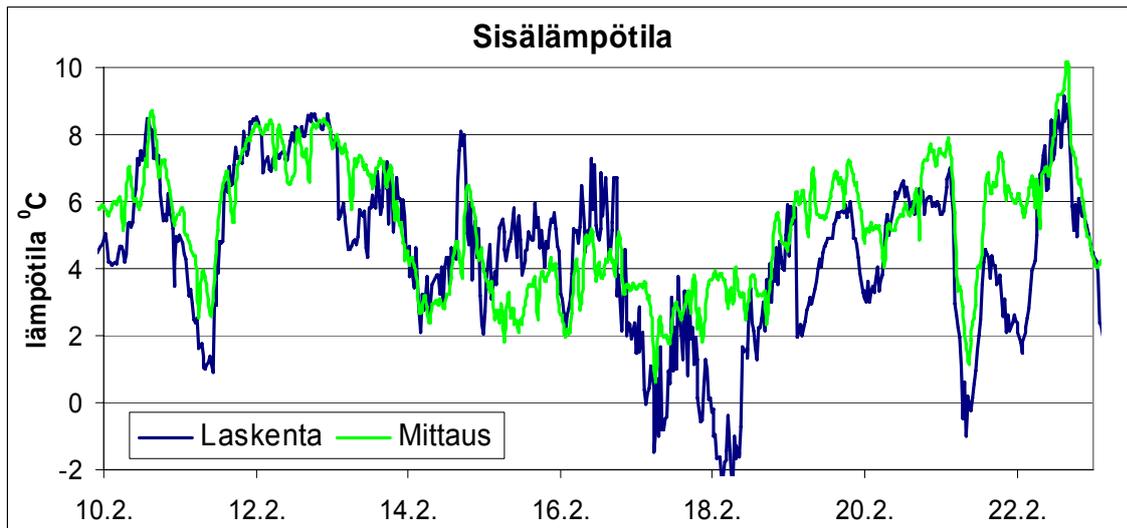
Kuvassa 62 on verrattu mallilla laskettua ilmanvaihtokerrointa lämpötaseen mittauksiin perustuvaan ilmanvaihtokerrotimeen. Lämpötaseeseen perustuva ilmanvaihtokerroin valittiin vertailuun, koska muuten periaatteessa tarkemmassa hiilidioksiditaseessa ilmeni mittausten epätarkkuudesta aiheutuvia virheitä ja mitatussa kosteustaseessa taas ei ole otettu mukaan lattiapinnasta haihtuvaa vesihöyryä.



Kuva 62. Laskentamallin ilmanvaihtokerroin verrattuna mittausten lämpötaseesta laskettuun.

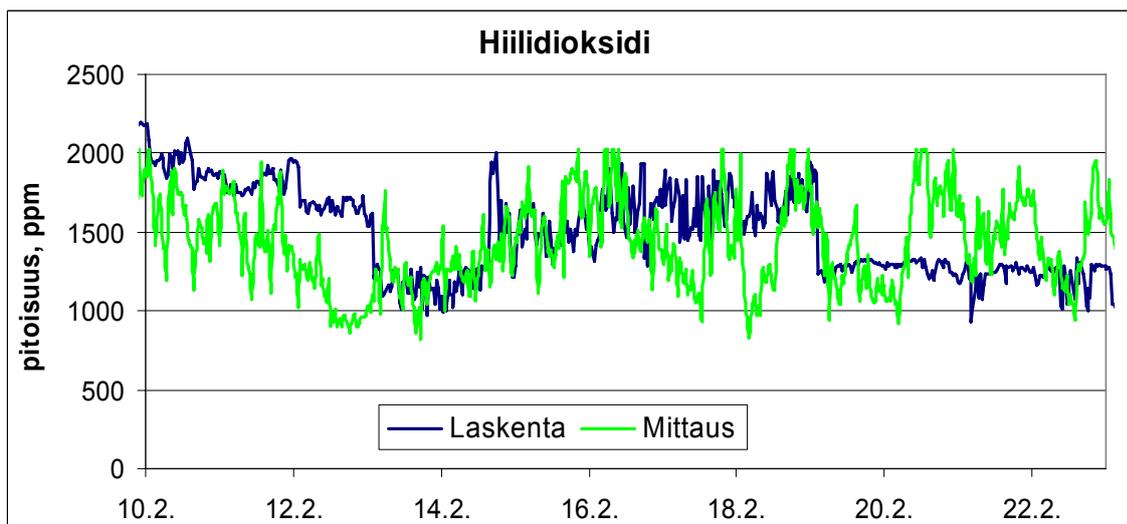
Lasketut ja mitatut ilmanvaihtokertoimet kuvassa 62 ovat samaa suuruusluokkaa ja myös niiden vaihtelut muistuttavat toisiaan. Lasketussa ilmanvaihtokertoimessa näkyy selvästi ilmanvaihtoaukkojen avausten (esitetty kuvassa 61) aiheuttamat porrasmuutokset, jotka ovat selvempiä kuin mittauksissa. Ilmeisesti avausten muutosten ajankohdat eivät ole todellisuudessa aivan samat kuin kuvassa 61 ja muutoksia voi olla myös päivän kuluessa toisin kuin laskennassa on oletettu. Myös aukkojen avausten suuruudessa on epävarmuutta. On huomattava, että lämpötaseeseen perustuva mittauskaan ei anna tarkkaa ilmanvaihtokerrointa mittausten epävarmuuksien takia ja myös koska rakenteiden lämpöhäviöt perustuvat oletettuihin nimellisiin rakenteiden lämmönläpäisykertoimiin (U-arvoihin). Pedersen (2005) esittää vertailuja siitä miten hyvin mitatusta lämpö-, kosteus- ja hiilidioksiditaseesta saatu ilmanvaihtokerroin korreloi todella mitatun ilmanvaihtokertoimen kanssa. Nämä seikat huomioonottaen yhtäpitävyyttä laskennan ja mittausten välillä kuvassa 62 voidaan pitää hyvänä. Suuret mitatut ilmanvaihtokertoimet viikon välein 14. ja 21.2 liittyvät tilanteisiin, joissa päätyövet olivat auki kun bobcat-tyyppisellä kuormaajalla ajettiin kuiviketta lehmien parsiin.

Kuvassa 63 on verrattu mitattua ja mallilla laskettua sisälämpötilaa. Yhtäpitävyys on varsin hyvä lukuun ottamatta joitakin matalia sisälämpötiloja laskennassa (esim. 18.2 ja 22.2). Syynä voi olla rakenteisiin varastoituvan lämpöenergian puuttuminen laskennasta mutta syy ei ole ilmeinen koska ylöspäin tapahtuvat lämpötilanheilahtelut tulevat kuitenkin esiin samaan tapaan laskennassa ja mittauksessa. Eräs syy voi olla, että ilmanvaihtoaukkojen avauksia tai rakennuksen vuotoaukkoja on pienennetty ulkolämpötilan laskiessa ilman että ne näkyvät kirjanpidossa. Tätä tukevat myös vastaavaan aikaan 18.2 ja 22.2 mitatut hiilidioksidipitoisuuden kohoamispiikit kuvassa 64. Samantapaista poikkeamaa alimmissa sisälämpötiloissa esiintyi myös maaliskuun 2006 mittausjaksolla, joten on mahdollista, että laskenta antaa enemmän matalia sisälämpötiloja kuin todellisuudessa esiintyy. Mahdollisesti seikka liittyy rakennuksen ulkovaipan oletettua parempaan tiiviyyteen ja siksi vuosilaskelmissa luvussa 8.2 on varioitu myös ulkovaipan tiiviyyttä.



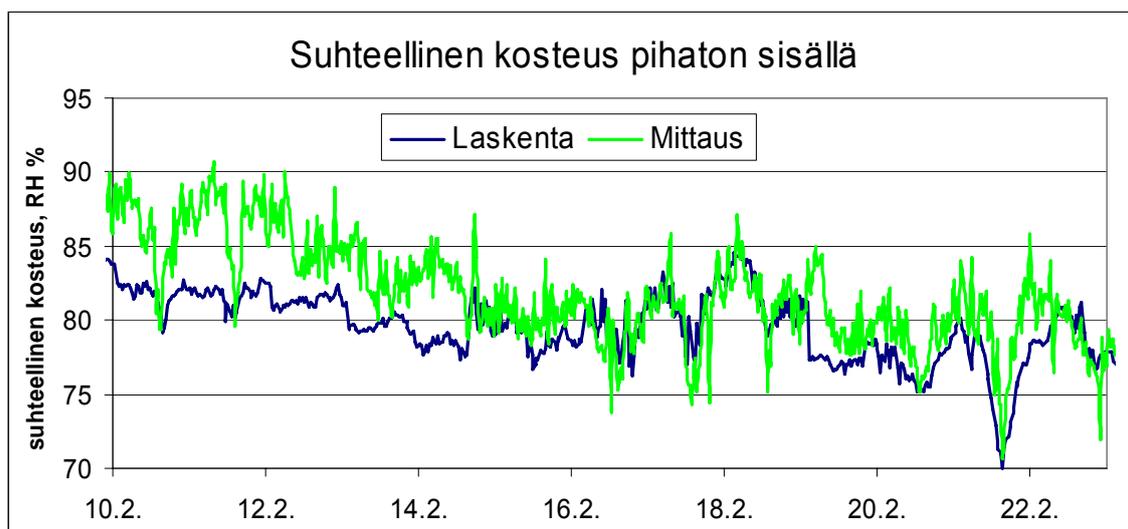
Kuva 63. Laskentamallin sisälämpötila verrattuna mittauksiin.

Myös laskettu hiilidioksidipitoisuus (kuva 64) on samaa luokkaa mitatun kanssa. Mitatussa pitoisuudessa näkyy enemmän vaihtelua mikä liittyy osaksi eläinten aktiiviteetin vuorokautiseen vaihteluun.



Kuva 64. Hiilidioksidipitoisuuden laskenta- ja mittaustulokset.

Sisäilman kosteus (kuva 65) on samalla tasolla sekä laskennassa että mittauksissa. Laskentamallissa sisäilmaan tulee kosteutta paitsi eläimistä myös lattiapinnasta haihtumalla kaavan 19 mukaan. Kuvassa 66 on esitetty lattiapinnasta haihtuva vesihöyry määrä suhteessa eläimistä tulevaan vesihöyry määrään. Lattialta haihtuva vesimäärä on mittausjaksolla 20 - 60 % eläinten tuottamasta kosteudesta.



Kuva 65. Sisäilman suhteellisen kosteuden laskenta- ja mittaustulokset.



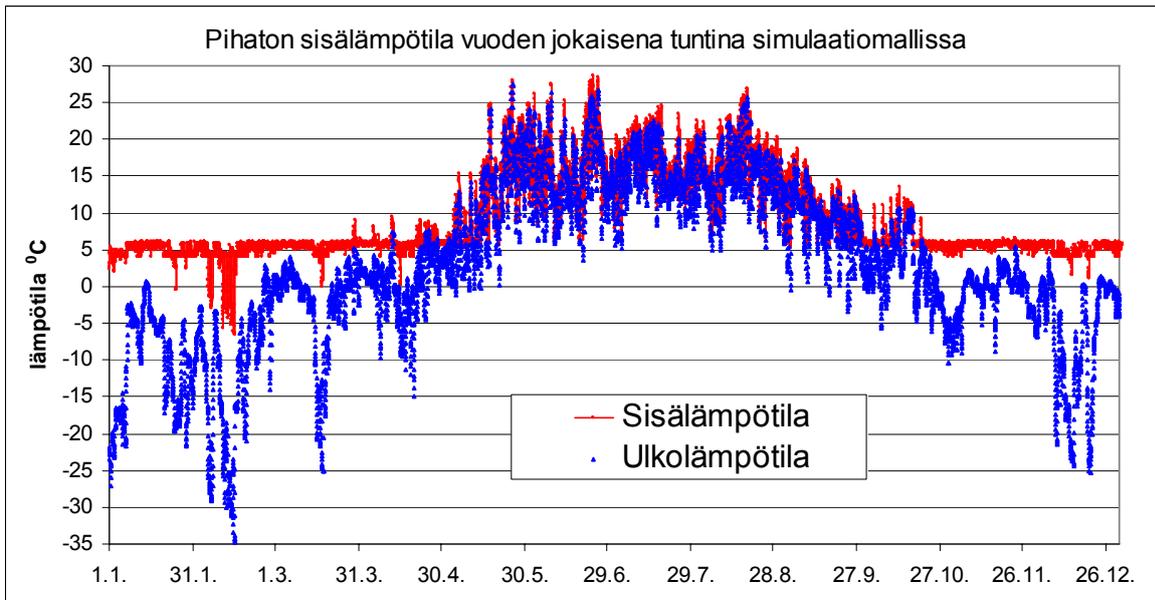
Kuva 66. Lattiapinnalta haihtuva vesihöyrymäärä verrattuna eläinten tuottamaan vesihöyrymäärään.

## 8 Koko vuoden laskenta

### 8.1 Perustapauksen tulokset

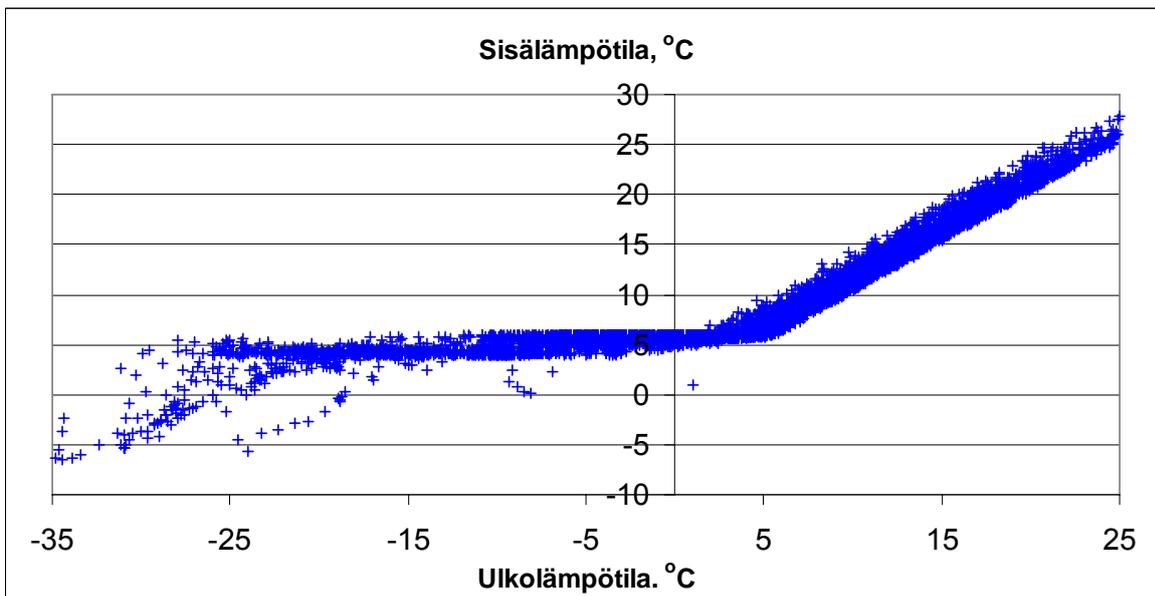
Kuvassa 67 on laskennan antamat sisälämpötilat vuoden jokaisena tuntina perustilanteessa. Perustilanteena pidetään C-pihatton laajuustietoja eli 6350 m<sup>3</sup>, 1245 m<sup>2</sup> sekä eläinmääränä 78 lypsylehmää, 8 umpilehmää ja 21 hiehoa, jotka yhdessä tuottavat 125 kW.

Perustapaus on laskettu sekä Jyväskylän että Helsingin mallivuoden perusteella. Tämän kokoisessa pihatossa ja energiatuotolla lämpötila pysyy tavoitearvossa 4...6 °C suurimman osan vuotta, mutta kylmimpinä päivinä sisälämpötila laskee pakkasen puolelle. Alin ulkolämpötila Jyväskylän mallivuonna on -34,8 °C ja alin sisälämpötila on laskentamallin mukaan -6,5 °C. Kesällä sisälämpötila on hieman ulkolämpötilaa korkeampi.



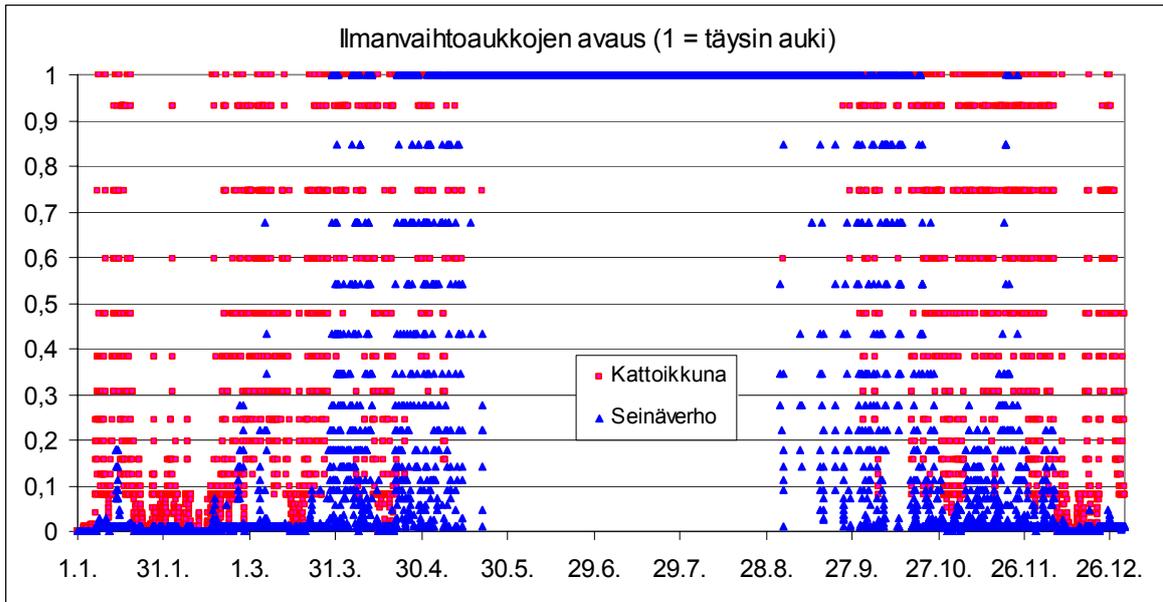
Kuva 67. Perustilanteessa (Jyväskylän mallivuosi) lasketut lämpötilat (°C) vuoden jokaisena tuntina.

Kuvasta 68 näkyy selvemmin sisälämpötilan riippuvuus ulkolämpötilasta. Lämpötila pysyy tavoitearvossa 4 ... 6 °C suotuisissa tuulioloissa ulkolämpötilavälillä -26 ... +6 °C. Kesällä sisälämpötila on 0,5 – 4 °C ulkolämpötilaa korkeampi; ero on suurimmillaan tynellä säällä kun tuuli ei avusta ilmanvaihtoa. Talvella – 5 °C alittuu 8 tunnin aikana.



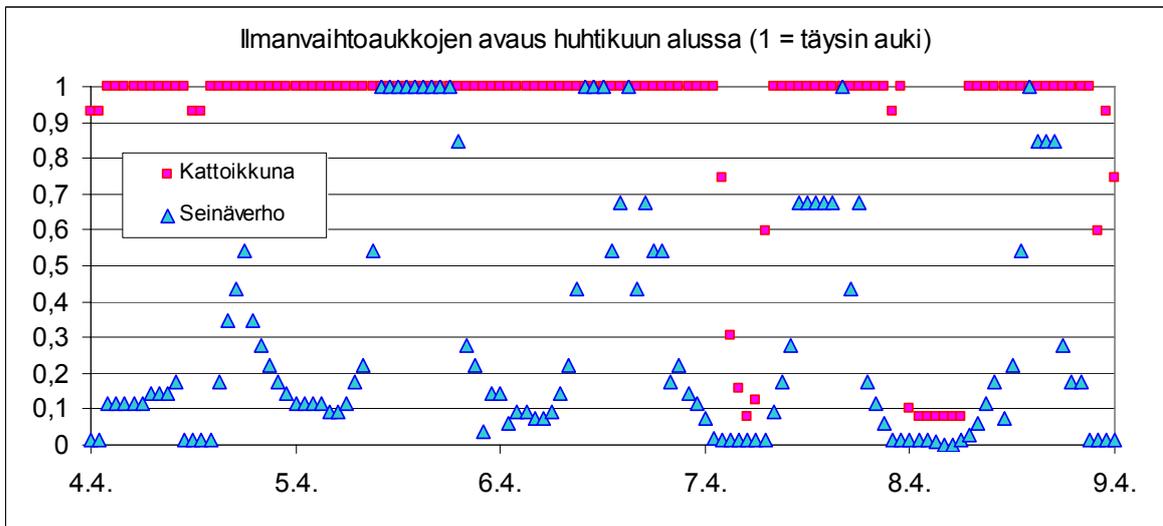
Kuva 68. Perustilanteessa (Jyväskylän mallivuosi) lasketut sisälämpötilat (°C) vuoden jokaisena tuntina ulkolämpötilan funktiona.

Kuvassa 69 on tunti tunnilta ilmanvaihtoaukkojen avaukset, jotka on tarvittu lämpötilan säätämiseen mahdollisuuksien mukaan välille 4 ... 6 °C. Talvella verhoseinä on kiinni tai lähes kiinni. Kattoikkuna on ajoittain täysin auki myös talvella.



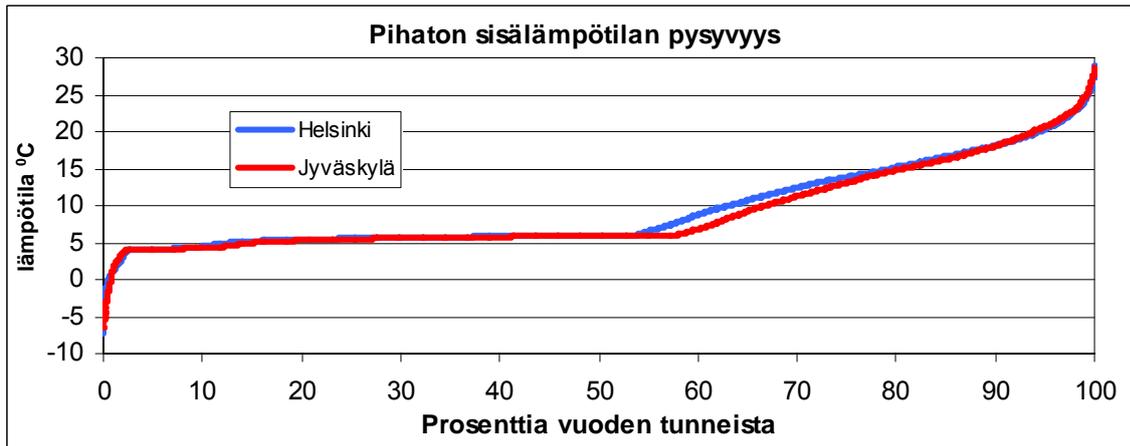
Kuva 69. Ilmanvaihtoaukkojen avaus perustilanteessa (Jyväskylän mallivuosi).

Kuvassa 70 on vastaavat aukkojen avaukset lyhyemmältä jaksolta huhtikuussa, jolloin ulkolämpötilan, tuulen nopeuden ja auringon säteilyn vaihtelut ovat suuria ja siten ilmanvaihdon säätötarve suuri. Lämpimänä päivänä 5.4 (ulkolämpötila 3 ...4 °C, tuulen nopeus 0-1 m/s ja auringon säteilyteho enimmillään 605 W/m<sup>2</sup>) sekä kattoikkuna että verhoseinä ovat täysin auki. Viileänä yönä 8.4 (ulkolämpötila -10 °C, tuulen nopeus 0-1 m/s) verhoseinä menee kokonaan kiinni ja kattoikkunanakin on vain 8 % auki.

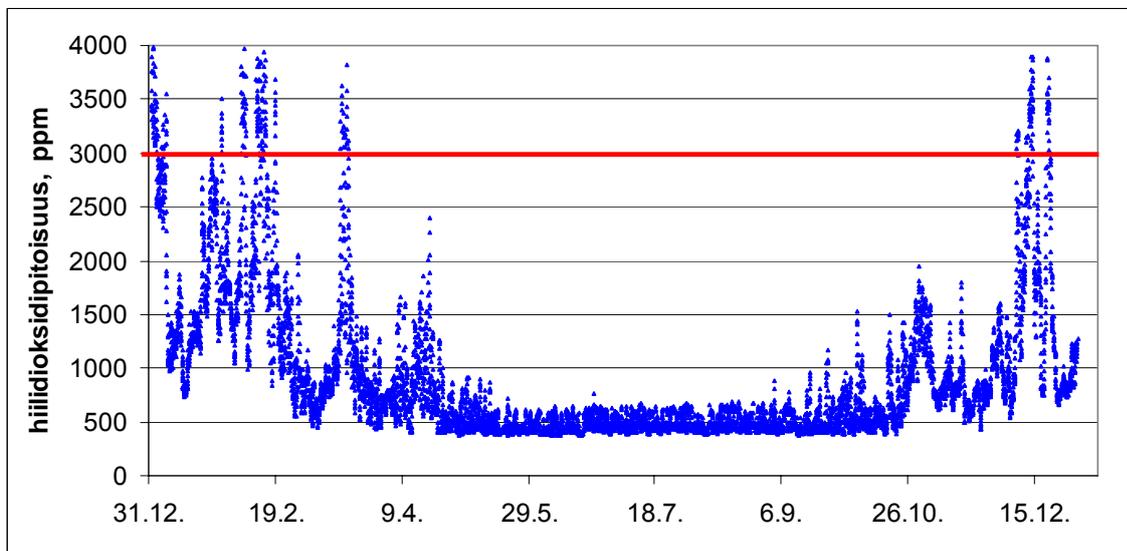


Kuva 70. Ilmanvaihtoaukkojen avaus viiden päivän jaksolla huhtikuussa, perustilanne (Jyväskylän mallivuosi).

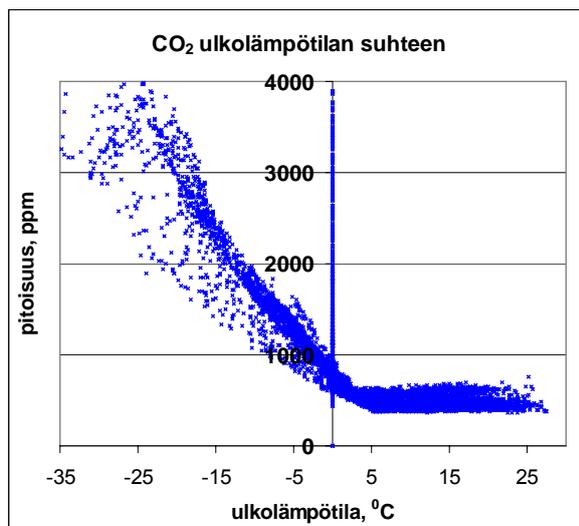
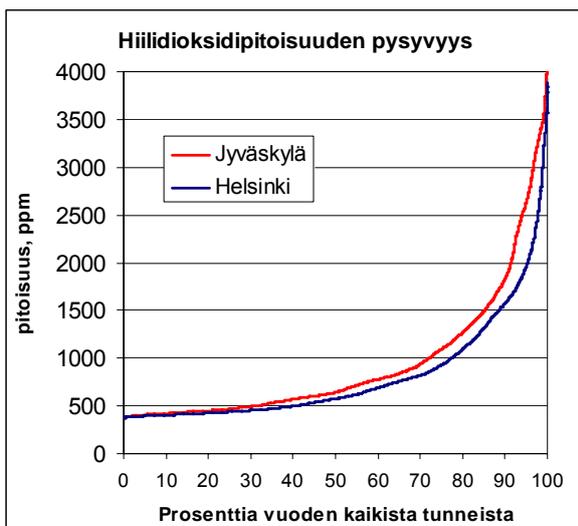
Eri lämpötilojen esiintymisajan saa paremmin selville kuvan 71 pysyvyyskäyrästä. Sisälämpötila pysyy tavoitearvossa 4 ... 6 °C hieman yli 50 % vuoden tunneista. Sisälämpötila 0 °C alittuu 0,8 % vuodesta eli 66 tunnin ajan. Kuvassa on myös vastaava pysyvyyskäyrä Helsingin säätiedoilla laskettuna.



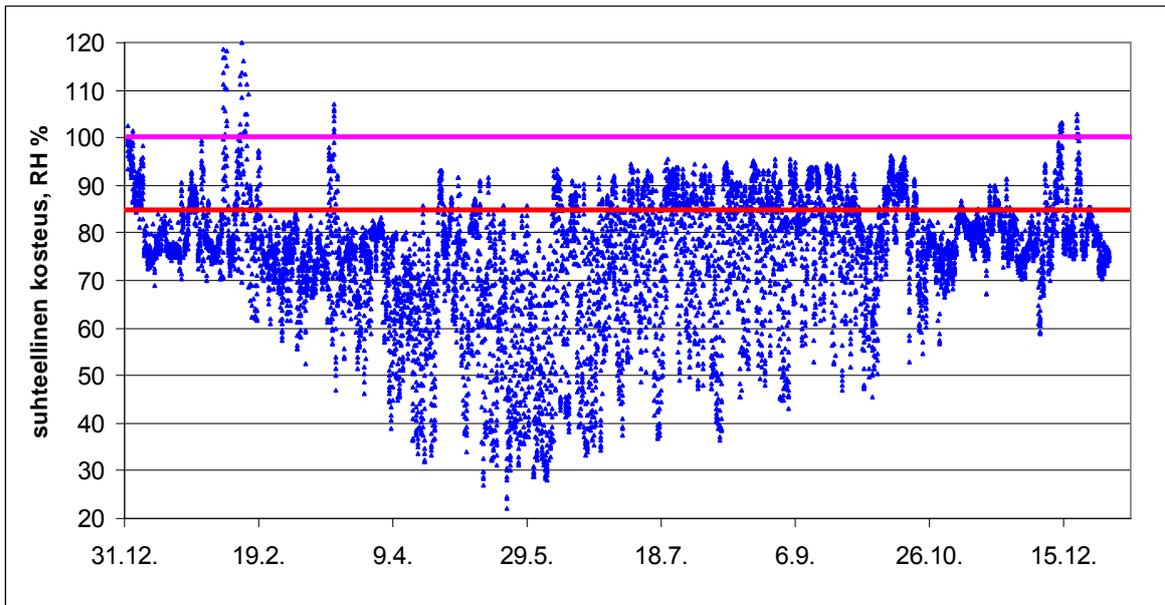
Kuva 71. Sisälämpötilan pysyvyys perustilanteessa Jyväskylän ja Helsingin säätiedoilla.



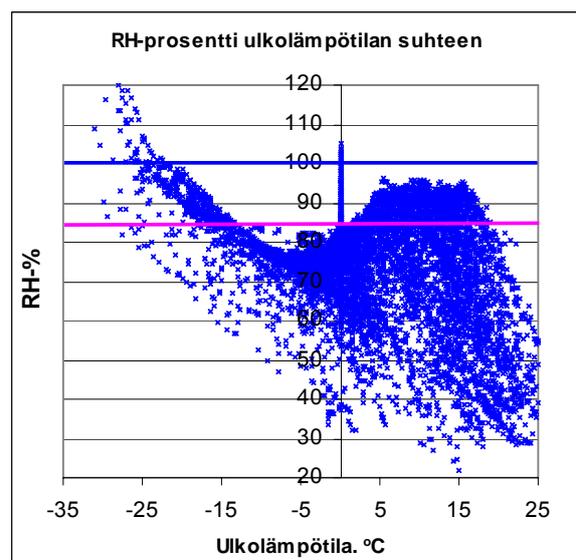
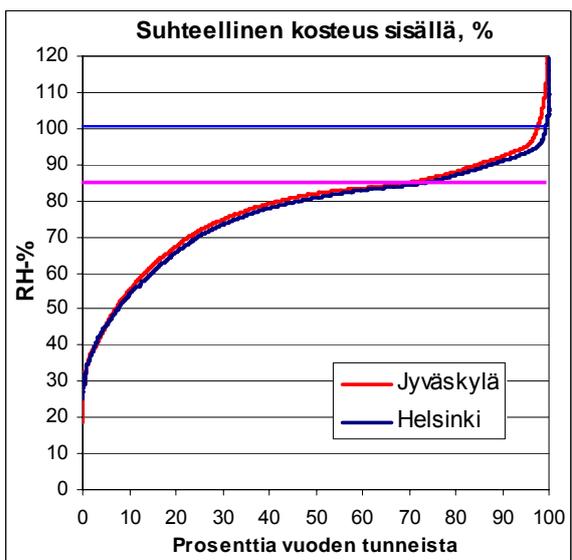
Kuva 72. Hiilidioksidipitoisuus vuoden jokaisena tuntina (Jyväskylän mallivuosi). Hiilidioksidipitoisuuden ohjeraja 3000 ppm (MMM 2005a) ylittyy 293 tuntin aikana vuodessa eli 3,4 % ajasta.



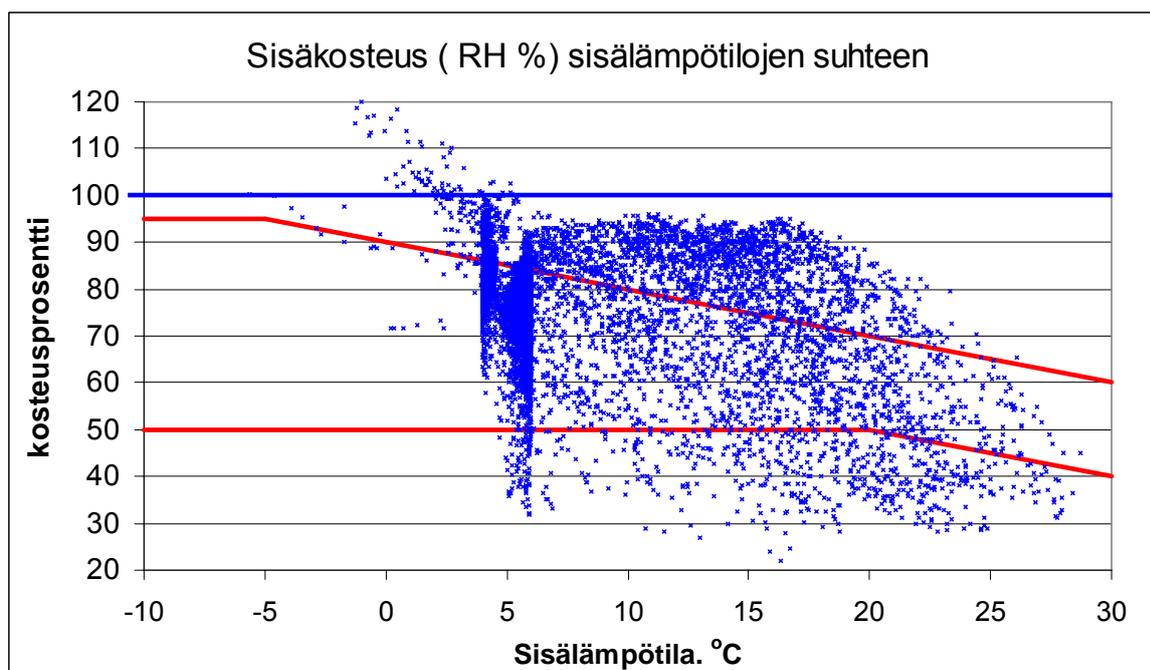
Kuvat 73-74. Hiilidioksidipitoisuuden pysyvyys Jyväskylän ja Helsingin säätiedoilla sekä hiilidioksidipitoisuus ulkolämpötilan mukaan. Yli 3000 ppm pitoisuuksia esiintyy vain talvella alle -15 asteen pakkasilla. Nollarajan yläpuolella hiilidioksidi laskee noin 700 ppm:ään



Kuva 75. Suhteellinen kosteus vuoden jokaisena tuntina (Jyväskylän mallivuosi). Yli 100 % kosteus tarkoittaa, että osa vesihöyrystä kondensoituu pinnoille tai muodostaa sumua. Punainen viiva 85 %:n kohdalla osoittaa raja-arvoa, jota kotieläinrakennuksissa ei pitäisi ylittää (MMM-RMO-C.2.2). Simuloidussa mallissa yli 85 % kosteutta esiintyy noin 3 kuukautta vuodessa.

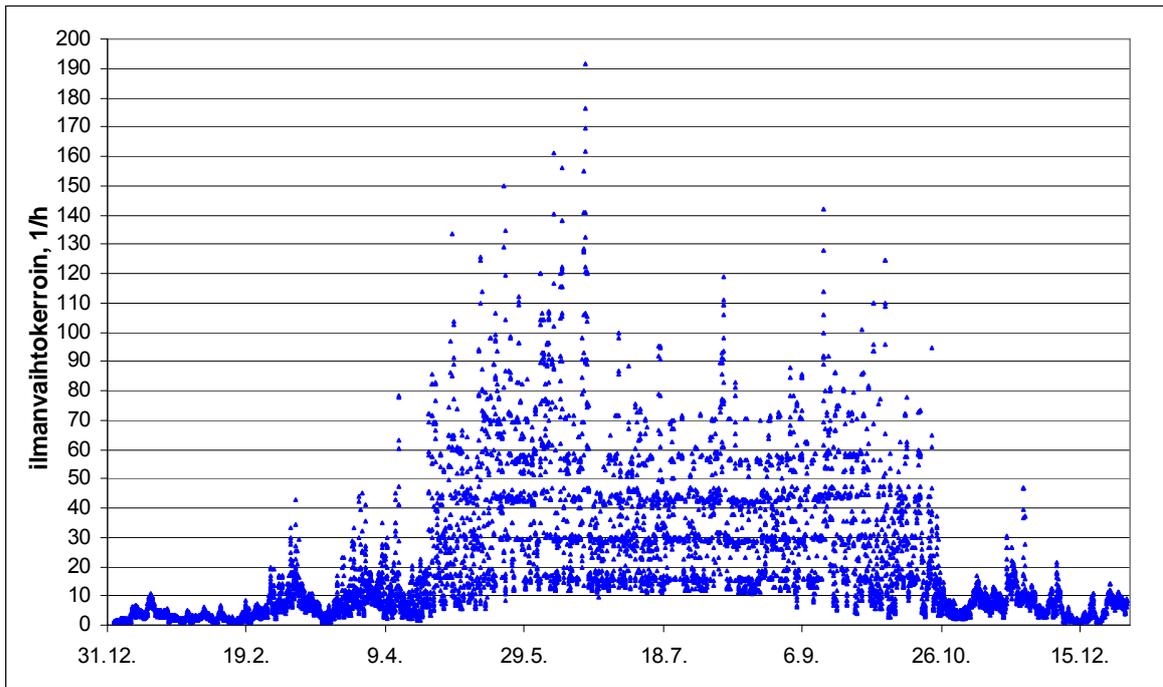


Kuvat 76-77. Sisäilman suhteellisen kosteuden pysyvyys ja esiintyminen ulkolämpötilan suhteen. (Jyväskylän mallivuosi) . Kuivinta sisäilma on noin -5 asteen pakkasella ja kosteutta kireiden pakkasten aikaan talvella sekä + 5 ja +18 asteen välillä keväällä ja syksyllä.

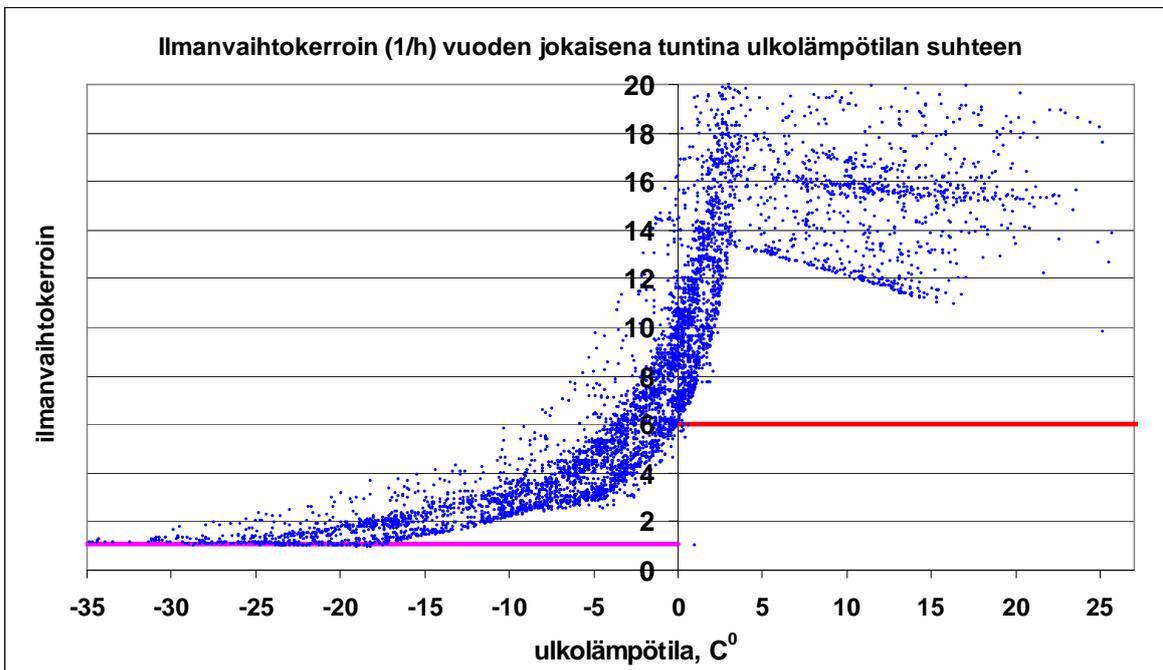


Kuva 78. Punaiset viivat osoittavat ylä- ja alarajan eri sisälämpötiloissa esiintyville kosteusarvoille CIGR:n suosituksen mukaisesti. Kuviosta voidaan todeta, että verhoseinäisen pihatton suhteellisen kosteuden esiintymät ovat suurimmaksi osaksi tavoitelämpötila-alueella +4 - +6 °C ja ne ovat pääosin CIGR:n suosituksen piirissä. Kylmällä säällä korkeita kosteuksia esiintyy suhteellisen vähän ja ne keskittyvät +5 ja + 20 asteen välille. Pihatossa on ajoittain myös liian kuivaa (RH-% alle 50 – 40) + 5 ja + 25 asteen välillä.

Ilmanvaihtokerroin (kuvat 79 ja 80) kuvaa kuinka monta kertaa navetan ilmatilavuus vaihtuu tunnissa. Kesällä ilmanvaihtokerroin on ajoittain yli 100 vaihtoa tunnissa kun taas talvella minimiarvo on 1,0 vaihtoa tunnissa. Suositeltu minimi-ilmanvaihto (MMM 2005a) 600 kg painavalle lehmälle on 65 m<sup>3</sup>/h mikä vastaa ilmanvaihtokerrointa 1,1 1/h tämän navetan mitoilla ja eläinmäärällä. Siten ministeriön ohjearvo ilmanvaihdosta alittuu hieman talvella 96 tunnin aikana eli 1,1 % vuodesta.. Ilmanvaihdon tavoitearvon alitukset liittyvät siihen, että ilmanvaihdon määrää säädellään laskentamallissa sisälämpötilan perusteella. Heti kun sisälämpötila pyrkii laskemaan 5 asteen alapuolelle kaikki ilmanvaihtoaukot suljetaan ja ilmanvaihto on pelkkien vuotojen varassa. Eräs tapa turvata riittävä ilmanvaihto kaikissa tilanteissa on järjestää sopivat minimiavaukset ilmanvaihtoaukoille. Saattaisi esimerkiksi riittää, että poistoilma-aukot eivät mene koskaan täysin kiinni. Tämä minimiavaus on määritettävä kokeellisesti esimerkiksi hiilidioksidipitoisuuksia seuraamalla: vaikuttavia tekijöitä ovat ainakin rakennuksen ilmapuodot ja eläinten lämmöntuotto, joita ei tarkalleen tunneta suunnitteluvaiheessa. Toinen tapa turvata riittävä ilmanvaihto on ilmanvaihdon säätö hiilidioksidipitoisuuden perusteella. Tätä mahdollisuutta on laskennallisesti tarkasteltu seuraavassa luvussa.



Kuva 79. Ilmanvaihtokerroin vuoden jokaisena tuntina (Jyväskylän mallivuosi). Talvikaudella ilmanvaihtokerroin on välillä 1-5. Kesällä ilmanvaihtokerroin vaihtelee 10-noin150 välillä. Kesäkaudella ilmanvaihtokertoimen laaja vaihtelu johtuu tuulisista säistä ja siitä, että ilmanvaihtoluukut ovat täysin auki.



Kuva 80. Ilmanvaihtokerroin esitettynä ulkoilman lämpötilan suhteen.(Jyväskylän mallivuosi). Määräysten mukainen ilmanvaihto 1,1 vaihtoa per tunti toteutuu vuoden kylmimpinäkin jaksoina. Määräysten edellyttämä kesäaikainen maksimivaihto 6 vaihtoa per tunti ylittyy reilusti. Tyynelläkin säällä ilma vaihtuu keskimäärin 12 kertaa tunnissa. Tuulisella säällä ilmanvaihtokerroin voi olla 50 ja jopa 150 vaihtoa tunnissa.

## 8.2 Vuosimallilla lasketut vaihtoehtoiset tapaukset

Koko vuodelle laskettiin taulukon 8 mukaiset 12 tapausta, joissa on muutettu eläimistä tulevan lämmön määrää, rakennuksen ulkovaipan tiivyyttä sekä maaston tuulisuutta. Laskentatapauksessa 12 navetan lattialta haihtuvaa kosteutta ei ole laskettu erikseen, vaan navetan koko kosteustuotto on laskettu CIGR –kaavasta 10. Sää tietoina käytettiin Jyväskylän mallivuotta 1979 tai vaihtoehtoisesti vastaavaa Helsingin mallivuotta, joista on lämpötila- ja tuulitietoja taulukossa 9.

Taulukko 8. Vuosimallilla lasketut tilanteet.

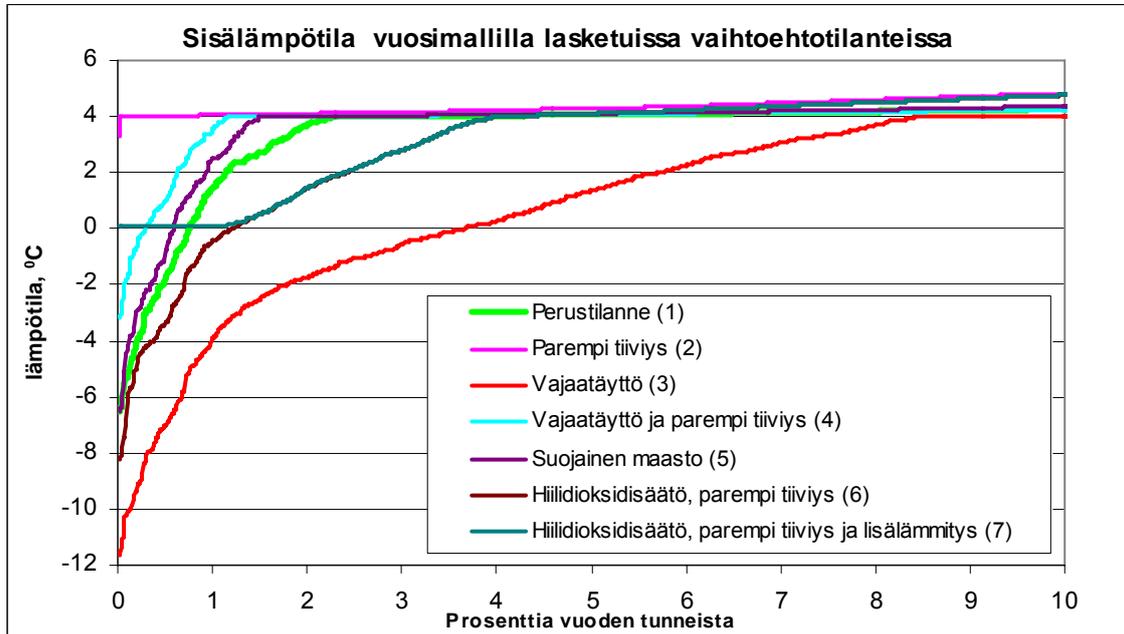
Numero	Tilanteen kuvaus	Sää tiedot	Eläin- lämpö	Ilmavuodot	Maasto- tyyppi
1	Perustilanne	Jyväskylä	100 %	100 %	Avoin
2	Parannettu tiiviys	Jyväskylä	100 %	25 %	Avoin
3	Vajaatäyttö	Jyväskylä	60 %	100 %	Avoin
4	Vajaatäyttö, parempi tiiviys	Jyväskylä	60 %	25 %	Avoin
5	Suojainen maasto	Jyväskylä	100 %	100 %	Suoj.
6	Hiilidioksidisäätö, parempi tiiviys	Jyväskylä	100 %	25 %	Avoin
7	Hiilidioksidisäätö, parempi tiiviys ja lisälämmitys	Jyväskylä	100 %	25 %	Avoin
8	Helsingin sää, muuten kuten 1	Helsinki	100 %	100 %	Avoin
9	Helsingin sää, muuten kuten 2	Helsinki	100 %	25 %	Avoin
10	Helsingin sää, muuten kuten 3	Helsinki	60 %	100 %	Avoin
11	Helsingin sää, muuten kuten 4	Helsinki	60 %	25 %	Avoin
12	CIGR-kaavat myös rakennuksen kos- teustuotolle, muuten kuten 1	Jyväskylä	100 %	100 %	Avoin

Taulukko 9. Jyväskylän ja Helsingin mallivuoden 1979 lämpötila-, tuuli- ja kosteustietoja.

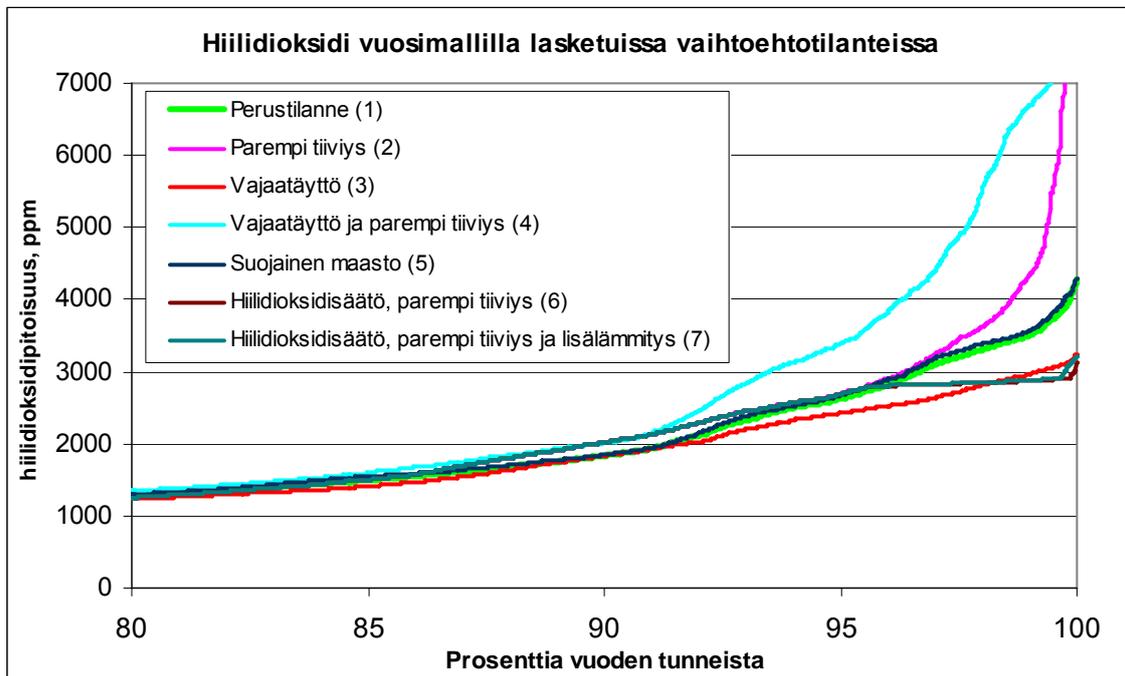
	Keskiarvo	Minimi	Maksimi
Ulkolämpötila, Jyväskylä	2,8 °C	-34,8 °C	27,5 °C
Ulkolämpötila, Helsinki	4,3 °C	-30,0 °C	28,5 °C
Tuulen nopeus, Jyväskylä	3,0 m/s	0 m/s	18 m/s
Tuulen nopeus, Helsinki	4,1 m/s	0 m/s	14 m/s
Suhteellinen kosteus, Jyväskylä	81 %	15 %	100 %
Suhteellinen kosteus, Helsinki	80 %	22 %	100 %

Ilmanvaihtoa säädetään laskennassa siten, että sisälämpötila pyritään pitämään välillä +4 ... +6 °C verhoseinän ja kattoikkunan avasta säätämällä. Lämpötilan pyrkiessä nousemaan avataan ensin kattoikkunaa ja jos se on kokonaan auki avataan lisäksi verhoseinää. Sädön lähtökohtana on verhoseinän avaus 1,2 cm ja kattoikkunan avaus 4 cm. Jos lämpötila pyrkii laskemaan pienennetään ensi sijassa verhoseinän avaus ja toissijaisesti kattoikkunan avaus. Kovalla pakkasella sekä verhoseinä että kattoikkuna voivat olla kokonaan kiinni ja ilmanvaihto on rakennevuotojen varassa. Etenkin tiiviissä rakennuksessa (laskenta numero 2) hiilidioksidipitoisuus ja ilman kosteus nousevat korkeiksi ja siksi laskentatapauksissa 6 ja 7 ilmanvaihtoa ohjataan lisäksi hiilidioksidipitoisuuden maksimin 2800 ppm perusteella. Lisälämmitystapauksessa 7 sisälämpötila nostetaan lisäksi lämpötilaan 0 °C erillisellä lämmityslaitteella.

Kaikkien 12 lasketun tilanteen keskinäinen vertailu edellisen luvun kuvien kaltaisista tuloista vaatisi suuren sivumäärän. Toinen tapa on verrata eri tilanteiden pysyvyyskäyriä kuvien 81-82 tapaan.



Kuva 81. Sisälämpötilan pysyvyyskäyrän kylmä pää Jyväskylän säätiedoilla (tilanteet numero 1-7).



Kuva 82. Hiilidioksidipitoisuuden pysyvyyskäyrän suuren pitoisuuden pää Jyväskylän säätiedoilla (tilanteet numero 1-7).

Kuvasta 81 näkyy esimerkiksi, että vajaatäytön tapauksessa 3 sisälämpötila on 3,7 % vuodesta (eli  $8760 \cdot 3,7/100 = 321$  tuntia) alle 0 °C ja 0,8 % vuodesta alle -5 °C. Rakennuksen tiiviyttä parantamalla (tilanne 4) lämpötilan 0 °C alituksia on enää alle 0,3 % vuodesta. Mutta koska ilmanvaihtoaukkoja on suljettu lämpötilan pitämiseksi korkeana voi hiilidiok-

sidipitoisuus sisällä nousta korkeaksi tilanteen 4 tiiviissä rakennuksessa (kuva 82): ministeriön ohjearvo 3000 ppm (MMM 2005a) ylittyy 6,4 % vuodesta (100 – 93,6 kuvasta).

Taulukkoon 10 on laskettu kaikista 12 tapauksista ajat, jonka aikana sisälämpötila, hiilidioksidipitoisuus ja suhteellinen kosteus alittavat tai ylittävät tietyt raja-arvot. Vajaatäyttön tapauksissa 3 ja 10 sisälämpötilan raja 0 °C alittuu pitkiksi ajoiksi mutta hiilidioksidipitoisuudet eivät ylitä koskaan ohjearvoja. Rakennus on siten vajaatäyttöä ajatellen liian hatara koska ajoittain ilmanvaihto on ylisuurta vaikka ilmanvaihtoaukot ovat kiinni.

Taulukko 10. Lämpötilan 0 °C alitusaika, hiilidioksidipitoisuuden 3000 ppm ylitysaika ja suhteellisen kosteuden 100 % ylitysaika sekä kosteussääntö 90 %:n (kuva 78, ylärajakäyrä) ylitysaika kaikissa 12 laskentatapauksessa tunteina vuodessa. Vuodessa on 8760 tuntia.

Numero	Tilanteen kuvaus	0°C alitusaika, tuntia	CO <sub>2</sub> 3000 ppm ylitysaika, tuntia	100 % kosteuden ylitysaika, tuntia	Kosteussääntö-90:n ylitysaika, tuntia
1	Perustilanne	66	293	108	2587
2	Parannettu tiiviys	0	316	135	2656
3	Vajaatäyttö	321	74	199	3198
4	Vajaatäyttö, parempi tiiviys	25	572	415	3460
5	Suojainen maasto	52	313	115	2541
6	Hiilidioksidisäätö, parempi tiiviys	106	4	84	2651
7	Hiilidioksidisäätö, parempi tiiviys ja lisälämmitys	0	21	8	2651
8	Helsingin sää, muuten kuten 1	51	99	32	2526
9	Helsingin sää, muuten kuten 2	0	142	43	2614
10	Helsingin sää, muuten kuten 3	270	14	66	3017
11	Helsingin sää, muuten kuten 4	8	266	186	3373
12	CIGR-kaavat myös kosteustuotolle	87	420	642	3118

Taulukko 11. Lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden minimi- ja maksimiarvot kaikissa 12 laskentatapauksessa.

Numero	Tilanteen kuvaus	Lämpötila, °C		CO <sub>2</sub> -pitoisuus, ppm	
		Minimi	maksimi	Minimi	Maksimi
1	Perustilanne	-6,5	28,7	368	4292
2	Parannettu tiiviys	3,3	28,8	369	9886
3	Vajaatäyttö	-11,6	28,3	361	3245
4	Vajaatäyttö, parempi tiiviys	-3,2	28,3	361	8117
5	Suojainen maasto	-6,5	29,7	391	4292
6	Hiilidioksidisäätö, parempi tiiviys	-8,2	28,8	369	3137
7	Hiilidioksidisäätö, parempi tiiviys ja lisälämmitys	0,1	28,8	369	3204
8	Helsingin sää, muuten kuten 1	-7,3	28,9	374	3888
9	Helsingin sää, muuten kuten 2	3,6	28,9	374	6988
10	Helsingin sää, muuten kuten 3	-11,6	28,9	364	3178
11	Helsingin sää, muuten kuten 4	-1,5	28,9	364	7504
12	CIGR-kaavat myös kosteustuotolle	-7,9	28,7	368	4524

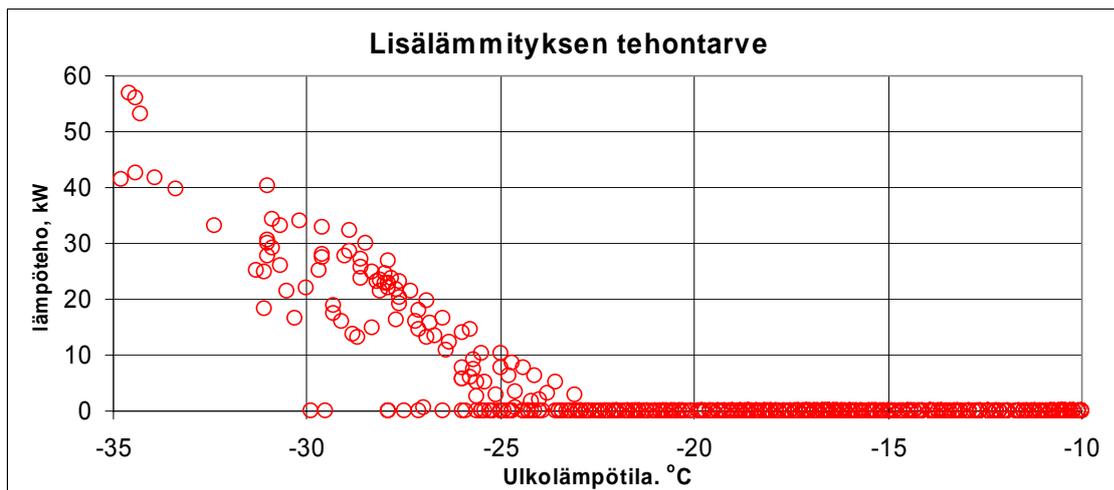
Taulukoissa 11 ja 12 on vastaavasti sisälämpötilan, hiilidioksidipitoisuuden, ilmanvaihtokertoimen ja suhteellisen kosteuden minimi- ja maksimiarvot. Absoluuttisiin minimi- ja maksimiarvoihin ei kannata kiinnittää kovin paljon huomiota koska ne ovat hetkellisiä ääriarvoja mutta niiden perusteella saa kuitenkin käsityksen eri laskentatapausten eroista.

Taulukko 12. Ilmanvaihtokertoimen ja suhteellisen kosteuden minimi- ja maksimiarvot kaikissa 12 laskentatapauksessa.

Numero	Tilanteen kuvaus	Ilmanvaihtokerroin, 1/h		Suhteellinen kosteus, %	
		Minimi	maksimi	Minimi	Maksimi
1	Perustilanne	0,97	205	19	174
2	Parannettu tiiviys	0,30	202	19	236
3	Vajaatäyttö	0,76	205	19	186
4	Vajaatäyttö, parempi tiiviys	0,25	202	19	293
5	Suojainen maasto	0,89	91	23	174
6	Hiilidioksidisäätö, parempi tiiviys	1,08	202	19	176
7	Hiilidioksidisäätö, parempi tiiviys ja lisälämmitys	1,04	202	19	103
8	Helsingin sää, muuten kuten 1	0,97	167	25	124
9	Helsingin sää, muuten kuten 2	0,34	164	25	162
10	Helsingin sää, muuten kuten 3	0,82	167	25	138
11	Helsingin sää, muuten kuten 4	0,24	164	25	211
12	CIGR-kaavat myös kosteustuotolle	0,93	205	16	292

Ilmanvaihtokertoimen minimiarvoja taulukossa 12 voi verrata ministeriön ohjearvoihin (MMM-RMO C2.2), jotka ovat tässä rakennuksessa 1,1 1/h täydelle navetalle ja 0,67 1/h 60 % vajaatäytölle. Ilmanvaihtokerroin jää ohjearvoja pienemmäksi etenkin parannetun tiiviyn tapauksessa jos ei käytetä samalla ilmanvaihdon ohjausta ilman laadun perusteella kuten tapauksissa numero 6 ja 7 on tehty. Samalla myös hiilidioksidipitoisuudet nousevat korkeiksi. Riittävän ilmanvaihdon turvaaminen kylmällä säällä on haastava tehtävä silloin kun on tarvetta pienentää ilmanvaihtoa sisälämpötilan laskemisen estämiseksi. Hiilidioksidipitoisuuden perusteella tapahtuva ilmanvaihdon minimin ohjaus on eräs vaihtoehto. Toinen vaihtoehto on määrittää pienimmät mahdolliset avaukset ilmanvaihtoaukoille, joilla riittävä ilmanvaihto toteutuu kaikissa oloissa mutta kuitenkin siten, ettei sisälämpötila laske tarpeettoman alas. Tämä ei ole helppo tehtävä sillä kussakin rakennuksessa hallitsemattomien ilmavuotojen määrä vaihtelee ja eri rakennuksissa ilmanvaihdon herkkyys tuulelle vaihtelee.

Lisälämmitystilanteessa 7 tehontarvetta alkaa ilmetä ulkolämpötilan noin -23 °C alapuolella (kuva 83). Lisälämmitykseen tarvittava energia on 2800 kWh vuodessa.



Kuva 83. Lisälämmityksen tehontarve eri ulkolämpötiloilla (tilanne numero 7).

### 8.3 Johtopäätökset laskelmista

Laskentamallin tulosten perusteella painovoimaista ilmanvaihtoa voidaan säädellä laajoissa rajoissa verhoseinän aukkoja ja poistoilma-aukkoja säätämällä. Kesällä ilmanvaihto on tehokasta tuulen avustamana ja myös tyynellä säällä saavutetaan tehokas ilmanvaihto kun poistoilma-aukot ovat suurikokoiset.

Sisälämpötila pysyy ilmanvaihtoaukkoja säätämällä rajoissa 4 - 6 °C noin 50 % vuodesta. Koekohteen rakenteilla lisälämmitys alkaa olla tarpeen noin -23 °C alapuolella jos halutaan estää sisälämpötilan laskeminen alle 0 °C. Ulkovaipan lämmöneristyksen parantaminen vähentäisi tai jopa poistaisi lisälämmitystarpeen.

Rakennuksen riittävä tiiviys on edellytys ilmanvaihdon hallinnalle. Etenkin vajaakuormitustilanteessa ilmanvaihto voi tulla kylmällä säällä liian suureksi, jos rakennuksen ulkovaippa ei ole riittävän tiivis. Toisaalta tiiviissä rakennuksessa riittävän ilmanvaihdon turvaaminen kylmällä säällä on haastava tehtävä ilmanvaihtojärjestelmän käytölle. Hiilidioksidipitoisuuden perusteella tapahtuva ilmanvaihdon ohjaus on tähän eräs vaihtoehto. Toinen vaihtoehto on määrittää kokeellisesti ilmanvaihtoaukoille sellaiset minimiavaukset, joilla riittävä ilmanvaihto toteutuu kaikissa oloissa.

## 9 Johtopäätökset ilmanvaihdon toimivuudesta

### 9.1 Yleiset havainnot

Lämpöeristetyn verhoseinäisen lypsykarjapihaton ilmanvaihdon toimivuudesta ja soveltuvuudesta on saatu selkeä käsitys maamme ilmastossa ja etenkin talviolosuhteissa. Optimaalisesti toimiakseen pihatossa täytyy olla riittävästi lämpötuottoa talvella. Tämä merkitsee karjamäärän suunnitelmallista lisäämistä siten, että uusi rakennus saadaan heti täyteen eläimiä. Ilmanvaihtoa tulisi käytännössä säätää avaamalla ensin kattoluukkuja tai hormeja ja vasta sen jälkeen seinäverhoja. Verhojen ja luukkujen avausmäärille ei voida antaa yleisohjetta, käyttäjien on opeteltava käytännöt itse. Tuntuman haku kestää yleensä yhden vuodenvieron. Jokainen pihatto on yksilöllinen ja tilanteeseen vaikuttavat sijainti ja ympäröivän maaston peitteisyys sekä poisto- ja tuloilma-aukkojen avauksien keskinäiset suhteet.

Verhoseinä soveltuu pikku heikkouksista huolimatta suomalaisiin navetoihin. Merkittävin heikkous lienee sisälämpötilan käynti pakkasen puolella noin 3 vuorokautena vuodessa ellei lisälämmitysmahdollisuutta ole. Nollan alitukset ovat lieviä, eikä pintojen jäätyksiä ehdi tapahtua varsinkaan jos pakkaspäivät jakautuvat sattumavaraisesti talviaikaan. Toinen heikkous on suhteellinen kosteus, joka ylittää 85 %:n noin 3 kuukauden ajan. Muutamina talvipäivinä pihatossa voi esiintyä sumua kun ulkolämpötila laskee alle  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  asteen. Verhoseinän vahvuutena voidaan pitää ilmanvaihdon riittävyttä kaikissa tilanteissa niin talvella kuin kesällä, ja että navettakaasujen pitoisuudet pysyvät ohjearvojen alapuolella.

## 9.2 Eläinnäkökulma

Verhoseinäisen pihaton vuosimallinnus tehtiin  $+4 - +6\text{ }^{\circ}\text{C}$  sisälämpötilalle. Pihatto pysyy tavoitelämpötilassa yli puoli vuotta. Lehmän näkökulmasta lämpötila on ihanteellinen. Talven muutamat pakkaspäivät sisälämpötilassa eivät lehmää haittaa, ehkä pikemminkin päinvastoin. Rakennuksen toiminnallisessa suunnittelussa poikimatilojen sijoitus pitää suunnitella siten, ettei vasikat altistu alhaisille lämpötiloille ja vedolle. Verhoseinän käyttötilanteen äänettämyys on yksi suurimmista eduista lehmälle, koska se ei altistu koneellisesti ilmanvaihdosta tutulle korkeahkalle melulle.

## 9.3 Työntekijän näkökulma

Verhoseinäinen pihatto on perinteistä  $+10\text{ }^{\circ}\text{C} - +12\text{ }^{\circ}\text{C}$  asteessa pidettävää navettaa kylmempi. Eläinten tarkkailu ja hoito, ajo lypsylle, parsien puhdistus ja kuivitus onnistuvat  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  asteessa yhtä hyvin. Asia on pukeutumiskysymys. Lypsyasemassa voi olla kohdelämmitys, joka tekee työolosuhteista miellyttävän. Verhoseinän meluttomuus on hyvä asia myös ihmisen kannalta. Verhoseinä edellyttää käyttäjältään säätilan jatkuvaa seurantaa ja valppautta puuttua muutoksiin. Ilmanvaihdon säätö tapahtuu ”nenätuntumalla”, koska automaattikaohjaukset ovat harvinaisia. Verhojen säätö on helppoa ja onnistuu käsivoimin.

## 9.4 Rakennuksen näkökulma

Painovoimaisen ilmanvaihdon toimivuuteen vaikuttavat rakennuksen muoto, pituus ja leveys ja sijoitus maastossa. Ilmanvaihto on riippuvainen tuulen suunnasta ja nopeudesta. Suomen oloissa verhoseinän korkeudeksi riittää metri. Näin rakennukseen saadaan maksimaalinen määrä eristettyä vaippaa. Avara, harjalle nouseva sisäkatto toimii paremmin kuin perinteinen vaakasuora sisäkatto. Sisäilman suhteellinen kosteus on verraten suuri yli puoli vuotta, mikä rasittaa runko- ja pintarakenteita eikä veden tiivistymiseltä pinnoille välttyä. Tästä huolimatta runko- ja vaipparakenteet voidaan tehdä teräksestä ja puusta. Puun lahoriski on pieni, koska kosteusrasitus on suurin juuri silloin kuin lämpötilat ovat alhaisimmillaan. Suhteellinen kosteus voi vaikuttaa teräkseen enemmän kuin puuhun. Rakennuksen riittävä tiiviys on edellytys ilmanvaihdon hallinnalle.

Verhoseinä soveltuu myös eristämättömiin kylmäpihatoihin, jollaisia ovat lähes kaikki Viron uudet suuret maidontuotantoyksiköt. Sisälämpötila riippuu ulkolämpötilasta ja seuraa tätä erilailla kuin eristetyssä pihatossa. Helmikuun 2006 kireissä pakkasjaksoissa virolaisissa kohteissa esiintyi lantakäytävien jäätymistä ja lannanpoiston ongelmia.

Tämä tutkimus koskee ainoastaan lämpöeristettyjä lypsykarjapihatoita. Tuloksia voitaneen varovaisesti soveltaa myös nautakarjakasvattamoihin. Viime kädessä verhoseinän toimivuus on suhteessa rakennuksessa syntyneeseen energiaan ja miten se vaikuttaa kosteuden poiston mahdollisuuksiin. Tällöin myös lantasysteemi, kuivituksen määrä ja materiaali

sekä lypsytila vaikuttavat kosteuden määrän syntyyn. Nautakasvattamo on tässä suhteessa erilainen kuin lypsykarjapihatto, eläinten tuottama energia on pienempi, kuivutusta voi olla enemmän ja lypsytoimintoja ei esiinny lainkaan.

## 9.5 Ilmanvaihdon näkökulma

Verhoseinällä voidaan saavuttaa riittävä ilmanvaihto kaikissa olosuhteissa samalla kun navettakaasujen pitoisuudet ovat MMM-RMO C2.2 ohjeiden rajoissa ja eläintä kohti vaihtuva ilmamäärä on määräysten mukainen. Talvella minimi-ilmanvaihdon toteutuminen ja sisälämpötilan samanaikainen hallinta on kuitenkin haastava tehtävä. Hallitsemattomat ilmavuodot, jotka käytännössä tapahtuvat verhojen raoista ja jatkoskohtien saumoista huolehtivat suurelta osin ilmanvaihdon tarpeesta kylmällä säällä. Lisäksi ovet, niiden liitokset ja visiiriseinä voivat vuotaa. Ilmavuotopaikkojen suuruudesta riippuu miten paljon varsinaisia ilmanvaihtoaukkoja on syytä pitää avoimina kovilla pakkasilla. MMM-RMO C2.2 ohjeiden minimivaihtovaatimus on laskuesimerkkinä olleen pihaton suuruudessa rakennuksessa 1,1 vaihtoa tunnissa ja verhoseinällä toteutuva minimivaihto on 1,0 vaihtoa tunnissa mikäli ilmanvaihtoaukot ovat pakkasella kokonaan kiinni. Rakennuksen riittävä tiiviys on edellytys ilmanvaihdon hallinnalle. Etenkin vajaakuormitustilanteessa ilmanvaihto voi tulla kylmällä säällä liian suureksi, jos rakennuksen ulkovaippa ei ole riittävän tiivis. Kesäaikaan ilmanvaihdon riittävyys on yhtä kriittistä kuin talviaikanakin, koska vaihdettavat kuumiomäärät ovat suuria. Kesällä luonnollinen ilmanvaihto on riippuvainen tuulista, niiden suunnasta ja nopeudesta. Kriittisin tilanne onkin juuri tyynellä säällä. MMM-RMO C2.2 maksimivaatimus laskuesimerkkinä olleen pihaton suuruudessa rakennuksessa on 6 vaihtoa tunnissa. Verhoseinällä toteutuu vähintäänkin 10 vaihtoa tunnissa läpi koko kesän. Neljän kesäkuukauden aikana toukokuun puolivälistä syyskuun puoliväliin ilmanvaihdon määrä vaihtelee 10 ja 100 vaihdon välillä tuulesta riippuen. Harvinaisena ääritapauksena on 207 vaihtoa tunnissa.

Suojaisa maasto pienentää maksimivaihtoa (92 kertaa tunnissa), mutta ei juurikaan minimivaihdon määrää. Rakennusten sijoittelun merkitys pihapiiriin kasvaa koneellisiin ivjärjestelmiin verrattuna. Helsingin ja Jyväskylän säätiedoilla ei ole merkittävää vaikutusta ilmanvaihtomääriin. Voidaan olettaa, että ilmanvaihtomäärät toteutuvat esitetyllä tavalla Etelä- ja Keski-Suomessa aina Oulun – Kajaanin korkeudelle.

Ilmanvaihdon riittävä määrä on siis mahdollista toteuttaa kaikissa oloissa. Jäljelle jäävät lämpötilan nollan alitukset pihaton sisällä. Tilannetta voidaan muuttaa parantamalla rakennuksen tiiviyyttä ja/tai antamalla lisälämmitystä tai lisäämällä rakennuksen eristystasoa. Samalla kuitenkin ajaututaan kompromisseihin ja uusiin valintoihin. Tiiviiden parantaminen pienentää ilmavuotoja, ja pihaton sisälämpötilan pakkaspäivistä päästään kokonaan eroon, mutta samalla hiilidioksidipitoisuudet voivat kasvaa jopa yli 7000 ppm:n. Lisälämmityksellä saadaan pakkaspäivät pidetyksi loitolla ja hiilidioksidi nousee vain hieman 3000 ppm:n yläpuolelle. Lisälämmitystarve alkaa vasta -23 °C asteen alapuolella eli kyseessä on todellinen täsmälämmitystarve noin 5 päivänä vuodessa Jyväskylän säämallin vaikutusalueella. Harkittavaksi jää, kannattaako kiinteään lämmitysjärjestelmään investoida vai pärjätäänkö siirrettävillä lämmittimillä; vai tarvitaanko lisälämmitystä ensinkään, koska pihaton sisäiset pakkaspäivät ovat suhteellisen harvinaisia. Vajaatäyttötilanteissa lisälämpö voi olla perusteltua.

Rakennuksen eristystason lisäämisessä on tarkasteltava ensin kokonaisuutta. Verhojen osuus nyt tutkituissa kohteissa oli 3 % vaippapinta-alasta. Verhoja on saatavissa kennorakenteisina, joihin pumpataan jatkuvasti ilmaa, joka muodostaa ulko- ja sisätilan väliin eristävän vyöhykkeen ja siten paremman U-arvon. Vaippakokonaisuuden kannalta yksinker-

taisella verholla tai kennoverholla ei ole suurta merkitystä. Lämpöeristettävien seinien osuus on 17 % vaipasta. Seinien lisäeristyksellä saavutetaan lieviä parannuksia. Katon osuus vaipasta on 40 %, ja sen eristystason kasvattamisella saadaan tuntuvaa muutosta sisäilmasto-olosuhteisiin. Lattian osuus vaipasta on myös 40 %. Lattian eristämistarpeeseen tutkimus toi uuden pohdittavan näkökulman, kun alapohja havaittiin lämpöakuksi. Tätä seikkaa tulisikin jatkossa tutkia tarkemmin. On oletettavaa, että talvella alapohja ja sen alla oleva maa toimivat lämpöakkuna ja kesällä jäähdyttäjänä. Akun/jäähdyttimen kuukausittaiset ja viikoittaiset lämpöliikkeet seuraavat ulko- ja sisälämpötilaa hitaasti muuttuen. Näin ollen tässä tutkimuksessa helmikuussa havaittu +9 °C asteen lämmön luovutuksen /varastoinnin vaihtumispiste on vain yksi mahdollinen tapaus ja tilanteet vaihtelevat pihatoittain, paikkakunnittain ja vuosittain.

Kanadalaispihatoissa tehty mittausta osoitti, miten automatiikka pitää vaihteluvälin tarkemmin halutussa tavoitelämpötilassa, kun vaihteluväli oli keskimäärin 3 °C astetta. Käsisäädössä vaihteluväli oli keskimäärin 5 °C astetta. Nämä säädöt perustuivat lämpötilaohjaukseen. Yhtenä mahdollisena uutena ohjauskeinona voitaisiin käyttää hiilidioksidimittausta. Anturitekniikka ja ohjauslogiikka ovat olemassa, mutta siitä ei ole ainakaan vielä tehty sovellusta lypsykarjapihatoihin. Hiilidioksidiohjauksella ja rakennuksen paremmalla tiiviydellä pihaton pakkaspäivät vähenisivät yhteen päivään ja silti hiilidioksidi pysyisi 3000 ppm alapuolella.

## 9.6 Kylmäpihatto, lämminpihatto vai viileä pihatto?

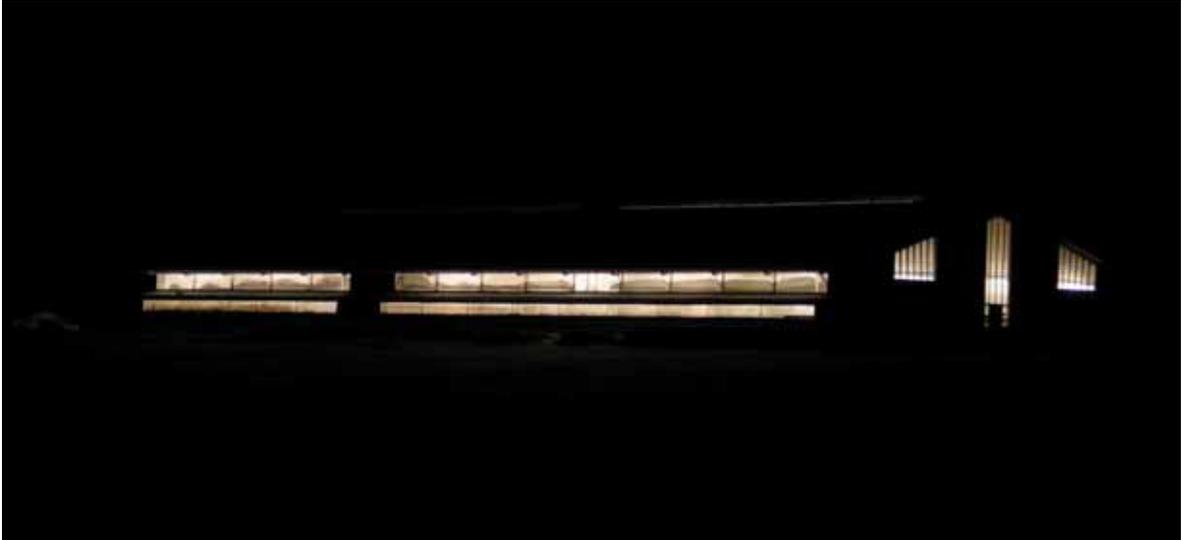
Kylmäpihattoja tutkittiin ja kehitettiin Suomessa intensiivisesti 1990-luvulla ennen Suomen EU jäsenyyttä. Silloisessa keskustelussa lämpimän ja kylmän rakennuksen välimuotoa – silloisen terminologian mukaan puolilämmintä pihattoa - pidettiin teknisesti hankalana hallita. Kylmäpihatoista saadut kokemukset osoittavat, että paras talvinen kylmäpihattokeli lehmille on nollan ja – 15 °C asteen välillä niin ulkona kuin pihaton sisällä. Kylmäpihattojen vaikeudet alkavat varsinaisten kireiden pakkasten aikaan alle – 20 °C asteessa. Ihmisen työskentelyolosuhteiden näkökulmasta perinteinen + 10 °C asteinen pihatto on optimaalinen. Tässä tutkimuksessa on saatu varmuus siitä, että eläinten hoito- ja lypsytyö +5 °C asteessa toimivat yhtä hyvin kuin perinteisessä tilanteessa. Koneellisen ilmanvaihdon eristettyjä pihattoja vaivaavat navettakaasujen korkeat pitoisuudet erityisesti minimi-ilmanvaihdon aikana talvella. Koneellistetun ilmanvaihdon rasitteena ovat lisäksi melu ja moottorien energiatarve. Olisikin mielenkiintoista laskea, kuinka tehokkaat moottorit tarvitaan ja millainen sähkölasku syntyy, kun koneellisesti toteutetaan vuoden ajan sama ilmanvaihdon määrä 1 – 10 vaihtoa tunnissa, mikä saavutetaan minimienergialla ja meluttomasti verhoseinän avulla.

Tämä tutkimus on osoittanut, että viileän pihaton ilmanvaihto toimii, jopa paremmin kuin osattiin odottaa. Ainoa käytännön reunaehto liittyy niihin noin kolmeen satunnaisesti valikoituvaan päivään talvella, jolloin pihaton sisälämpötila laskee nollarajan alapuolelle. Jos käyttäjäkunta hyväksyy tämän seikan henkisesti tasolla, kynnys verhoseinän valinnalle ilmanvaihtoratkaisuksi onkin jo ylittetty. Verhoseinästä syntyvät hyödyt näyttävät ylittävän siitä mahdollisesti aiheutuvat haitat. Perinteisen lämpöeristetyn lämminpihaton ja altavastajan asemaan jääneen kylmäpihaton väliin näyttäisi syntyneen teknisesti kelvollinen ja maamme olosuhteisiin soveltuva pihattokonsepti: viileä pihatto.

Verhoseinä luo osaltaan myös uudenlaista tuotantorakennusarkkitehtuuria, jota voisi luonnehtia keveäksi ja ilmapaksiksi. Rakennusten ilme muuntuu päivällä ja yöllä sekä myös vuodenaikojen mukaan.



Kuva 84. Virolainen verhoseinäinen kylmäpihatto kuumana kesäpäivänä ja keskellä talvea.



Kuva 85. Suomalainen viileäpihatto talviyössä.

## 10 Kirjallisuus

- A-lab. 2006. a-Weather sääseman datasheet. [Viitattu 24.4.2006] Saatavilla www-muodossa:  
<URL:<http://www.a-lab.fi/?l=fi&p=main>>
- Bruce, J. M. 1999. CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume II Animal Production & Aquacultural Engineering Edited by CIGR–The International Commission of Agricultural Engineering Part I Livestock Housing and Environment. S. 54-67.
- Caenegem, L. & Wechsler, B. 2000. Stallklimawerte und ihre Berechnung. FAT-Schriftenreihe julkaisu 51: 89.
- Ehrlemark, A. 1991. Heat and Moisture Dissipation from Cattle. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för lantbrukets byggnadsteknik, dissertation, rapport 77: 1 - 120.
- Envic 2006. AFT-1D Datasheet. [Viitattu 22.2.2006] Saatavilla www-muodossa:  
<URL: <http://www.envic.fi/TL-AFT1D.pdf>>
- Gasmet 2006. Gasmet Ftir Dx-4015N Datasheet. [Viitattu 1.4.2006] Saatavilla www-muodossa:  
<URL:<http://www.gasmet.fi/datasheets/GASMET%20Dx-4015%20Technical%20Data%202006%20v1.pdf>>
- Gemini 2005. Gemini tinytalk Datasheet. [Viitattu 1.12.2005] Saatavilla www-muodossa:  
<URL: <http://www.tinytag.info/ecommm/files/TK0023.pdf>>
- Holmström, M-H. 2005. Naudalle hyvä navetta. KMVET 1/2005. 26-29 s. Yhtyneet Kuvalehdet Oy.
- Hänninen, J., Lehtinen, T. & Viljanen, M. Kylmäpihaton lämpö- ja kosteusteknisen suunnittelun perusteet. Teknillinen korkeakoulu talonrakennustekniikan laboratorion julkaisuja 124. 93 s.
- Ilmatieteen laitos. 2005. Suomen ilmasto. [Viitattu 30.9.2005] Saatavilla www-muodossa:  
<URL: [http://www.fmi.fi/tutkimus\\_ilmasto/ilmasto\\_3.html](http://www.fmi.fi/tutkimus_ilmasto/ilmasto_3.html)>
- Janni, K.A & Allen, D.M. 2001. Thermal environment conditions in curtain sided naturally ventilated dairy freestall barns. Asae publication number 701P0201. 10 s.
- Jeppsson, K-H. 2005. Kirjallinen tiedoksiänto 23.9.2005.
- Kapuinen, P. & Karhunen, J. 1989. Kosteiden pintojen kosteudentuotanto navetoissa. Vakolan tutkimusselostus 56. Vihti. 85 s.
- Maaseudun tulevaisuus 2004. Lehmien keskituotos kasvoi 8121:n kiloon. Julkaisupäivä 21.4.2004.
- Maaseudun tulevaisuus 2005. Puolet maitotiloista suunnittelee luopuvansa vuoteen 2012 mennessä. Julkaisupäivä 1.8.2005.
- MMM 2005a. Maa- ja Metsätalousministeriön rakentamismääräykset ja ohjeet. Maatalouden tuotantorakennusten lämpöhuolto ja huoneilmasto. [Viitattu 14.9.2005.] Saatavilla www-muodossa:  
<URL:<http://www.mmm.fi/attachments/5havOPYVH/5iiBVUyGW/Files/CurrentFile/L10-rmoC22-01.pdf>>
- MMM 2005b. Maa- ja Metsätalousministeriön rakentamismääräykset ja ohjeet. Kotieläinrakennukset, lypsykarjarakennukset. [Viitattu 4.10.2005.] Saatavilla www-muodossa:  
<URL:<http://www.mmm.fi/attachments/5havOPYVH/5iiBVUyGW/Files/CurrentFile/L2-rmoC121-01.pdf>>
- Morgan, K. 1996. Short-term thermoregulatory responses of horses to brief changes in ambient temperature. Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering, Report 4, Dissertation. Uppsala. 61 s.

- Mälkiä, P. 2003. Veden lämmittämisestä on hyötyä talvella. KMVET 4/2003. Yhtyneet Kuvalehdet Oy.
- Mälkiä, P. 1999. Rehun tarve ja rehuarvojärjestelmät. Lypsylehmän ruokinta. Tietoa tuottamaan 82: 127 Gummerus Kirjapaino oy. Jyväskylä.
- Pedersen, S. (2005). Climatization of Animal Houses. A biographical review of three decades of research. DIAS report Livestock no. 66, October 2005, 83 s.
- Pedersen, S. & Sällvik, K. 1999. CIGR Handbook of Agricultural Engineering Volume II Animal Production & Aquacultural Engineering Edited by CIGR–The International Commission of Agricultural Engineering Part I Livestock Housing and Environment. s. 41-43.
- Pedersen, S. & Sällvik, K. 2002. CIGR 4th Report of Working Group on Climatization of Animal Houses Heat and moisture production at animal and house levels. s. 45.
- Seppänen, O. 1996. Ilmastointitekniikka ja sisäilmasto. Espoo. 348 s.
- Seppänen, O. & Säteri, J. 2001. Sisäilmastoluokitus 2000. Sisäilmastoyhdistyksen julkaisu 5. Espoo. [Viitattu 5.2.2006.] Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.tervetalo.net/lataa/siy5-luku1.pdf>>
- Sunnorth. 2005. Sunnorth yhtiön kotisivut. [Viitattu 1.11.2005.] Saatavilla www-muodossa: <URL: <http://www.sunnorth.com/curt-pho.htm>>
- Swami, M.V & Chandra, S. 1988. Correlations for Pressure Distribution of Buildings and Calculation of Natural-Ventilation Airflows. ASHRAE Transactions, Vol. 88(2), s. 78-91..
- Tuunanen, L. & Karhunen, J. 1984. Eläinsuojien ilmanvaihdon mitoitus. Vakolan tutkimusselostus 39: 112. Vihti.
- Young. 2006. Young 3-D ultrasonic anemometrinen tiedot. [Viitattu 1.4.2006.] Saatavilla www-muodossa: < <http://www.youngusa.com/81000.pdf>>
- Vaisala. 2005. Säälähetin Vaisala WTX510 tiedot. [Viitattu 28.11.2005.] Saatavilla www muodossa:<URL:<http://www.vaisala.com/fi/businessareas/instruments/tuotteet/saalahetin/teknisetiedot?SectionUri=%2ffi%2fbusinessareas%2finstruments%2ftuotteet%2fsaalahetin&Tab=0&#tabs>>
- Wang, S, Deltour, J. 1998. Theoretical study of natural ventilation flux in a single span greenhouse. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2(4), 256-263.

Raportin kaikki valokuvat ja kaaviot, Tapani Kivinen,

paitsi seuraavat

Knut-Håkan Jeppson (SLU): kuvat 6 ja 7

Frederick Teye (HY): kuvat 33-44

Jorma Heikkinen (VTT): kuvat nro 57 – 83

## MTT:n selvityksiä sarjan Teknologia-teeman julkaisuja

- 119 Lämpöeristetyin verhoseinäisen lypsykarjapihatton ilmanvaihdon toimivuus. *Kivinen ym.*, 63 s. Hinta 20 €
- 110 Kotieläinrakennusten lattioiden pinnan laatu. *Puumala ym.* 77 s. Hinta 20 €
- 108 Käyttöveden riittävyys ja laatu maatalouden suurissa tuotantoyksiköissä. *Sorvala ym.* 34 s. Hinta 15 €
- 107 Maatalousteknologisen tutkimuksen teknologiastrategia. *Manni ym.* 54 s. Hinta 20 €
- 99 Kotieläintilojen huoltovarmuus. *Tertsunen ym.* 35 s. (verkkojulkaisu osoitteessa: [www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts99.pdf](http://www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts99.pdf))
- 94 Johtamisella hyvinvointia – Viljelijöiden johtamistoimea käsittelevän internet- sivuston sisällön luominen. *Leppälä ym.* 28 s. (verkkojulkaisu osoitteessa: [www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts94.pdf](http://www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts94.pdf)).
- 87 Maatilan talouskeskuksen toiminnallinen ja maisemallinen suunnittelu. *Tapani Kivinen.* 67 s. Hinta 20 €
- 85 Teknologiaalla tulosta! Toinen teknologiapäivä 11.1.2005. MTT maatalousteknologian tutkimus (Vakola), Vihti. *Kallioniemi (toim.)*. 102 s. (verkkojulkaisu osoitteessa: [www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts85.pdf](http://www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts85.pdf)).
- 78 Benefits of agricultural and forestry machinery standardization in Finland. *Teye ym.*, 93 p. Price 20 €
- 72 Jaloittelutarhat – rakenteet ja varusteet. *Puumala*. 17 s., 7 liitettä. Hinta 15 €
- 50 Maatalouden uusi teknologia – tarkkuutta ja tehokkuutta. Ensimmäiset teknologia-päivät 1.-2.10.2003. *Kallioniemi (toim.)*. 105 s. (verkkojulkaisu osoitteessa: [www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts50.pdf](http://www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts50.pdf)).
- 35 Suurten maatalousrakennusten puurunkoratkaisut. Olosuhdemittaukset ja toiminnalliset mallit. *Kivinen*. 62 s. Hinta 20 €
- 23 Esiselvitys kotieläintalouden ympäristökuormitusta vähentävien menetelmien ja tekniikoiden kustannuksista ja tehokkuudesta. *Kallioniemi*. 51 s. (verkkojulkaisu osoitteessa: [www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts23.pdf](http://www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts23.pdf)).
- 21 Suomalaisen maatalouskoneteollisuuden tulevaisuuden haasteet. *Manni & Riipinen*. 208 s. Hinta 25 €
- 18 Sata vuotta tutkittua maataloustekniikkaa. *Kallioniemi (toim.)*. 61 s. Hinta 20 €
- 17 Pihatton lypsyjärjestelmät. *Manninen ym.* 53 s., 2 liitettä. (verkkojulkaisu osoitteessa: [www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts17.pdf](http://www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts17.pdf)).
- 16 Parsinavetan lypsykone: Hankitaanko uusi vai korjataanko vanhaa? *Manninen & Nyman*. 10 s. (verkkojulkaisu osoitteessa: [www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts16.pdf](http://www.mtt.fi/mmts/pdf/mmts16.pdf)).

