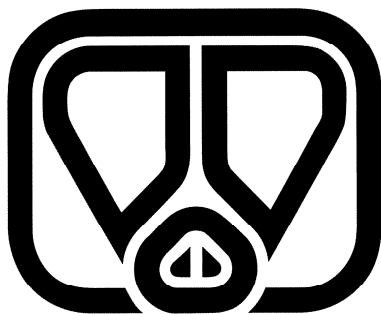


ir. A.V. van Wageningen
J.H.C. Rooseboom¹
ing. A.I.J. Hoofs
ing. M.A.H.H. Smolders
ing. P.F.M.M. Roelofs

¹ Agrarische Hogeschool
's-Hertogenbosch

Het praktisch en technisch functioneren van mestpanventilatie in kraamafdelingen

*Practical and technical
performance of manure
tray ventilation in
farrowing rooms*



Praktijkonderzoek Varkenshouderij

Locatie:
Varkensproefbedrijf
"Zuid- en West-Nederland"
Vlaamseweg 17
6029 PK Sterksel
tel. 040 - 226 23 76

Proefverslag nummer P 1.241
mei 2000
ISSN 0922 - 8586

INHOUDSOPGAVE

	SAMENVATTING	4
	SUMMARY	6
1	INLEIDING	8
1.1	Doelstelling van het onderzoek	8
1.2	Opbouw van het verslag	8
2	MATERIAAL EN METHODE	9
2.1	Inrichting van de proefafdelingen	9
2.2	Voeding en drinkwater	10
2.3	Ventilatie en verwarming	10
2.4	Proefbehandelingen	11
2.5	Duur van het onderzoek	11
3	WAARNEMINGEN	12
3.1	Klimaat	12
3.1.1	Temperaturen	12
3.1.2	Luchtdebiet	12
3.1.3	Luchtverdeling, luchtsnelheid, luchtkwaliteit en temperatuur op hokniveau	12
3.1.4	Stofconcentratie	12
3.2	Energiegebruik	13
3.2.1	Elektrisch energiegebruik	13
3.2.2	Energiegebruik verwarming	13
3.3	Productieresultaten	13
4	RESULTATEN	14
4.1	Klimaat	14
4.1.1	Temperaturen	14
4.1.2	Luchtdebiet	17
4.1.3	Luchtverdeling, luchtsnelheid, luchtkwaliteit en temperatuur op hokniveau	18
4.1.3.1	Luchtverdeling	18
4.1.3.2	Luchtsnelheid op dierniveau	18
4.1.3.3	CO ₂ - en NH ₃ -concentraties	18
4.1.3.4	Temperatuur op hokniveau	19
4.1.4	Stofconcentratie	19
4.2	Energiegebruik	21
4.2.1	Elektrisch energiegebruik	21
4.2.2	Energiegebruik ruimteverwarming	22
4.3	Productieresultaten	22
4.4	Praktische ervaringen	22
5	THEORETISCHE BESCHOUWING	24
5.1	De ventilatie-effectiviteit	24
5.2	Statische energiebalans over een afdeling	25
5.2.1	Energiestromen	25
5.2.2	Verschillen tussen plafondventilatie en mestpanventilatie	26
5.2.3	Resultaten statische energiebalans	26
5.3	Berekeningen met de statische energiebalans	28
5.3.1	Energiegebruik centrale gang	28

53.2	Energiegebruik ruimteverwarming	29
53.3	Energiegebruik ventilatie	29
5.4	Overzicht energiegebruik in kraamafdelingen	30
5.5	Dynamische energiebalans over een ondergronds luchtkanaal	31
6	DISCUSSIE EN CONCLUSIES	34
6.1	Klimaat	34
6.1.1	Stofconcentratie	35
6.2	Energiegebruik en ruimteverwarming	35
6.3	Praktische ervaringen	36
6.4	Statische en dynamische energiebalansen	36
6.5	Economische gevolgen	36
6.6	Conclusies	37
	LITERATUUR	38
	BIJLAGEN	39
	Bijlage 1: Resultaten van de stofmetingen	39
	Bijlage 2: Berekening van de energiestromen voor statische energiebalans	42
	Bijlage 3: Bepaling van de waarde van $k_{mestpan}$	45
	Bijlage 4: Berekening van het energiegebruik op de centrale gang	47
	Bijlage 5: Resultaten van berekening voor energiegebruik verwarming en ventilatie	48
	Bijlage 6: Theorie van de dynamische energiebalans over het luchtkanaal onder de mestpan	50

SAMENVATTING

Eén van de beleidsdoelstellingen van de overheid is te komen tot energiebesparing in de agrarische sector. In de varkenshouderij wordt een belangrijk deel van het totale energiegebruik veroorzaakt door gebruik voor ventilatie en verwarming van de stallen. In dit kader heeft het Praktijkonderzoek Varkenshouderij een nieuw luchtinlaatsysteem ontwikkeld voor kraamafdelingen, waarbij de verse lucht onder mestpannen door gaat zonder met de mest in contact te komen en via luchtgangetjes bij de neuzen van de zeugen omhoog komt. Dit ventilatiesysteem wordt mestpanventilatie genoemd.

Onderzocht is in hoeverre het luchtkanaal onder de mestpannen een conditionerende werking heeft: op de inkomende lucht en wat dit voor een energiebesparing tot gevolg kan hebben. Ook is onderzocht of het mogelijk is de ventilatiedebieten te vermindere(n). De lucht komt directer bij de dieren, wat een effectievere luchtverversing tot gevolg heeft (30% lager ventilatiedebiet dan traditioneel). Minder ventilatie leidt tot energiebesparing. De proefresultaten kunnen worden vertaald naar een situatie met een halfroostervloer waarbij de verse lucht onder de dichte vloer binnenkomt.

Tussen april 1998 en april 1999 is het technisch en praktisch functioneren van mestpanventilatie in twee kraamafdelingen onderzocht. Tussen de twee afdelingen zijn traditionele ventilatie-instellingen en 30% verlaagde ventilatie-instellingen gewisseld. Ook is een afdeling met plafondventilatie in het onderzoek opgenomen. Het onderzoek heeft plaatsgevonden op het Varkensproefbedrijf "Zuid- en West-Nederland" te Sterksel.

Het klimaat in de afdelingen met mestpanventilatie was goed. Gedurende de warmste uren tijdens warme dagen had het luchtkanaal onder de mestpannen een koelende werking, waardoor de afdelingstemperatuur lager was dan die in de afdeling met plafondventilatie. Ook bij de verlaagde ventilatie-instellingen (30% lagere maximale ventilatie) werd de afdeling met mestpanventilatie minder warm dan de afdeling met plafondventilatie. Tijdens koudere periodes was de afdelingstemperatuur bij mestpanventilatie

altijd hoger dan bij plafondventilatie. De hogere afdelingstemperatuur had tot gevolg dat er praktisch altijd meer dan minimaal geventileerd werd. De luchtkwaliteit was goed, net zoals de temperatuur en de luchtsnelheid in de hokken.

Het energiegebruik voor ventilatie en verwarming is gemeten. Bij mestpanventilatie met traditionele instellingen was het gemeten energiegebruik voor ventilatie 5% hoger dan bij plafondventilatie. Bij mestpanventilatie met verlaagde instellingen was het gemeten energiegebruik voor ventilatie 8% lager dan bij plafondventilatie. Het gemeten energiegebruik voor verwarming was tijdens de kraamperiode in alle drie de afdelingen nihil vanwege de grote warmteproductie van de zeugen en de voorverwarming van de lucht op de centrale gang tot 7°C.

In dit onderzoek zijn energiebalansen opgesteld die een nauwkeurig inzicht geven in de optredende energiestromen in en uit een afdeling. De resultaten van de berekeningen geven hetzelfde beeld als de waarnemingen in de praktijkproef. De opgestelde energiebalansen zijn gebruikt om energie- en klimaatberekeningen te doen voor niet bestaande, maar méér optimale afdelingen die in bepaalde opzichten afwijken van de afdelingen in de praktijkproef.

Berekeningen geven aan dat door het niet toepassen van voorverwarming op de centrale gang tot 7°C, het energiegebruik bij de drie proefbehandelingen aanzienlijk daalt. De verdeling van de verschillende energieposten voor twee fictieve afdelingen staat in tabel 1. Bij mestpanventilatie en verlaagde instellingen zijn de energiekosten dan f 16,05 lager dan bij plafondventilatie.

De extra jaarkosten voor toepassing van mestpanventilatie, in vergelijking met een afdeling met plafondventilatie zonder Groen Label-systeem, zijn berekend tussen de f 68,- en f 115,- per kraamhok, waarbij het energievoordeel is meegenomen. De grote variatie wordt met name veroorzaakt door de uitvoering van de luchtinlaat in de afdeling. Wanneer de luchtinlaatopening in de mest-

pan wordt geïntegreerd zijn geen grote afde-
lingsafmetingen nodig en wordt het systeem
goedkoper ten opzichte van de opstelling in

de proef waarbij er speciale gangetjes voor
de luchtinlaat zijn.

Tabel 1: Berekend energiegebruik bij mestpanventilatie en plafondventilatie met directe lucht-
inlaat per kraamhok per jaar

	mestpanventilatie		plafondventilatie	
	energie	kosten	energie	kosten
ventilatie (kWh, f)	55,6	11,13	71,2	14,23
verwarming (m³ gas, f)	0,19	0,13	19,8	13,08
biggennest (kWh, f)	324	64,80	324	64,80
Totaal (f)		76,06		92,11

SUMMARY

One of the government's policy goals is to realise energy-saving in agriculture. In pig husbandry a major part of energy is used for ventilation and heating of the facilities. Within in this framework the Research Institute for Pig Husbandry has developed a new air inlet system for farrowing rooms. First, the air flows underneath the manure trays without any contact with the manure and enters the rooms through an air inlet alley near the heads of the sows. This ventilation system is called manure tray ventilation. In this research, the conditioning effect of the air channel under the manure trays and the effect on energy use were determined. Moreover, it was studied whether it was possible to reduce the amount of ventilation air. This proved to be possible, since the air is brought into the compartments closer to the animals, which makes ventilation more effective (30% less ventilation air compared to traditional ventilation). The results of the research can also be used for a 50% slatted farrowing room, where the air-inlet channel is situated under the solid floor.

Between April 1998 and April 1999 the technical and practical performance of manure tray ventilation was studied in two farrowing rooms, as was a compartment with a porous ceiling inlet. The experiment was carried out at the experimental farm "South-and West-Netherlands" at Sterksel.

From the research, it became clear that the climate in the compartments with manure tray ventilation was good. During the hottest periods of a warm day, the air channel under the manure tray had a cooling effect on the incoming air, which resulted in a lower temperature in the compartment compared to the compartment with porous ceiling inlet. The 30% lower maximum ventilation did not cause a higher temperature in the compartment compared to the compartment with porous ceiling inlet. During cold periods, the temperature in the compartments with manure tray ventilation was always higher than

the compartment with porous ceiling inlet. The higher temperature caused the ventilation to be almost always higher than the minimum. The air quality was good, as was the temperature and the airspeed within the pens.

Energy consumption for ventilation and heating was measured. With 30% less ventilation, the use of energy for ventilation in the compartments with manure tray ventilation was 8% lower than in the compartment with the porous ceiling inlet. The energy consumption measured for heating was minimum for all three compartments, because of the high heat production of lactating sows and the preheating of the air in the central passage.

For this research a theoretical energy balance model was developed, which helps to understand and quantify the energy flows in and out a room. The results of the calculations are similar to the results of the measurements. The energy balance model was used to do calculations on climate and energy use for theoretical, but more optimal, circumstances, which differ at some points from the compartments in this research.

Calculations showed that the financial savings can increase to Dfl 16.- per pen per year (manure tray ventilation with 30% less ventilation compared to porous ceiling ventilation). Table 1 shows the results.

The extra yearly costs for manure tray ventilation compared to a porous ceiling inlet without a Green Label system depend on the situation and vary between Dfl 26.- and Dfl 105.- per farrowing pen. The large variation is caused by the design of the air inlet. If the air inlet is integrated into the manure tray in such a way that no extra space is needed in the compartment, manure tray ventilation is cheaper than if an extra air inlet path is built in front of the pens.

1 INLEIDING

Eén van de beleidsdoelstellingen van de overheid is om het energiegebruik in de land- en tuinbouw te verminderen. Daaraan zal ook de varkenshouderij moeten bijdragen. Een belangrijk deel van het energiegebruik op een varkensbedrijf wordt veroorzaakt door gebruik voor ventilatie en verwarming van de stallen. Het Praktijkonderzoek Varkenshouderij zoekt daarom naar luchtinlaatsystemen waarbij, ten opzichte van de gangbare systemen, het thermisch klimaat en de luchtkwaliteit beter zijn voor de varkens en de varkenshouder en het fossiel energiegebruik voor ventilatie en verwarming lager is. Systemen waarbij de verse lucht direct met lage lichtsnelheden bij de dieren komt en waarbij de lucht en de door de dieren geproduceerde warmte zo efficiënt mogelijk worden benut, lijken aan dit streven te voldoen.

Momenteel worden in dit kader nieuwe systemen ontwikkeld waarbij de lucht onder de werkvloer door de afdeling binnenkomt zonder met mest in contact te komen. Bij toepassing van mestpannen onder verhoogd opgestelde kraamhokken ontstaat een schone bufferruimte onder de werkvloer, die gebruikt kan worden als luchtinlaatkanaal. Wanneer de verse ventilatielucht in de winter onder de mestpannen aangezogen wordt, wordt de lucht opgewarmd zonder dat hiervoor fossiele energie wordt gebruikt. Het is mogelijk dat bij dit luchtinlaatsysteem de ruimteverwarming in kraamhokken achterwege kan blijven en dat de lokale biggennestverwarming slechts gedurende de eerste één à twee weken na de geboorte van de biggen ingezet hoeft te worden. Verhoogd opgestelde mestpannen zijn flexibel en goed in te bouwen in een bestaande situatie omdat het geheel op een vlakke ondervloer geplaatst wordt.

Door het toepassen van een luchtinlaatsys-

teem waarbij de verse lucht efficiënter wordt benut, kunnen mogelijk de ventilatienormen voor zowel minimale als maximale ventilatie verlaagd worden. Daardoor daalt het energiegebruik. Ook door het eventueel achterwege blijven van ruimteverwarming en een beperkter gebruik van de lokale biggennestverwarming kan energie bespaard worden. In hoeverre de ventilatienormen verlaagd kunnen worden ten opzichte van de gangbare normen is niet bekend.

1.1 Doelstelling van het onderzoek

Het doel van het onderzoek is het testen van het praktisch en technisch functioneren van mestpanventilatie bij kraamzeugen en het bepalen van de invloed ervan op het energiegebruik. De instellingen voor ventilatie worden verlaagd, waarbij het energiegebruik voor verwarming en ventilatie gemeten wordt en vergeleken met een gangbaar ventilatiesysteem (plafondventilatie). Het thermisch klimaat en de luchtkwaliteit voor mens en dier moeten hierbij gelijk blijven. Naast de praktijkproef worden de resultaten theoretisch onderbouwd.

1.2 Opbouw van het verslag

In hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van de proefafdelingen en de omstandigheden waaronder de praktijkproef is uitgevoerd. In hoofdstuk 3 komen de waarnemingen aan de orde die in de proefafdelingen gedaan zijn tijdens het onderzoek. De resultaten van deze waarnemingen staan in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 worden deze resultaten theoretisch onderbouwd en wordt met behulp van de ontwikkelde theorie inzicht gegeven in de haalbare energiebesparing door toepassing van mestpanventilatie.

2 MATERIAAL EN METHODE

De systemen waarbij verlaagde instellingen voor ventilatie worden gehanteerd zijn gebaseerd op de effectievere ventilatie ten opzichte van plafondventilatie, als gevolg van de verlaagde luchtinlaat. Verversing van lucht is bij plafondventilatie gebaseerd op menging van vervuilde en verse lucht. Bij systemen met een verlaagde luchtinlaat zal naast menging ook verdringing van vervuilde lucht plaatsvinden. De verse lucht komt directer bij de dieren en er vindt minder 'kortsluiting' van lucht plaats. Onder 'kortsluiting' van lucht wordt verstaan dat de binnenkomende verse lucht direct afgevoerd wordt zonder dat deze bij de dieren is geweest. De achterliggende theorie over de ventilatie-effectiviteit wordt in hoofdstuk 5 kort beschreven.

De praktijkproef is uitgevoerd op het Varkensproefbedrijf "Zuid- en West-Nederland" te Sterksel. In dit hoofdstuk worden de afdelingen waarin de praktijkproef is uitgevoerd beschreven.

2.1 Inrichting van de proefafdelingen

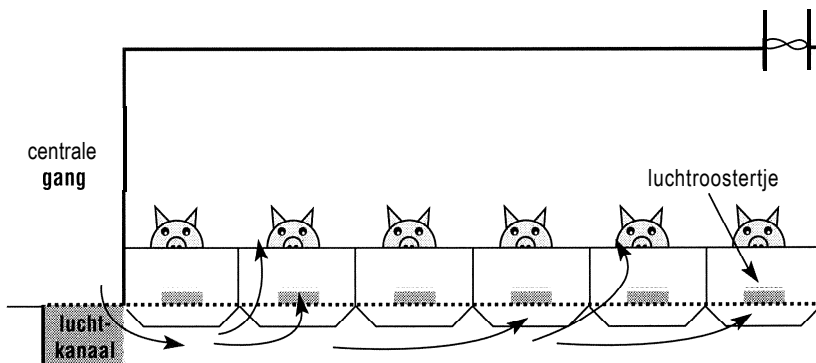
Afdelingen met mestpanventilatie

Deze twee afdelingen zijn vrijwel identiek en liggen naast elkaar aan een centrale gang. Beide afdelingen bestaan uit twee rijen verhoogd opgestelde kraamhokken die voorzien zijn van mestpannen. Tussen de rijen bevindt zich een controlegang. De zeugen staan met de achterzijde naar de controle-

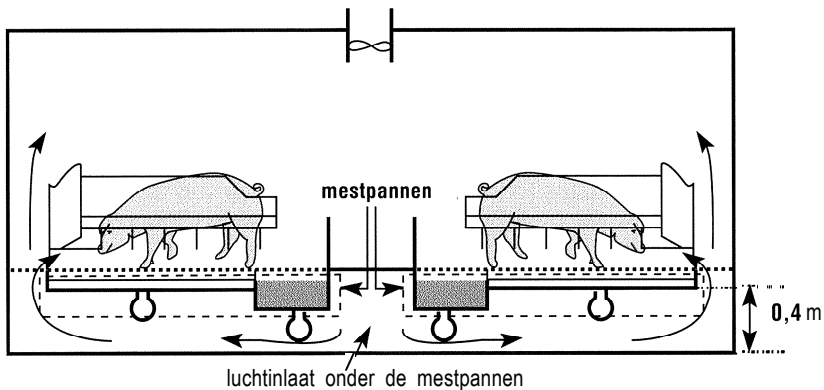
gang. Aan de voorzijde van beide rijen kraamhokken ligt een smalle gang, speciaal ten behoeve van de luchtaanvoer en de luchtverdeling (figuur 1 en 2).

De kenmerken van de proefafdelingen zijn:

- tweemaal zes kraamhokken, rechte opstelling van de zeugen;
- onder de roosters in de hokken liggen kunststof mestpannen; in één afdeling met een gescheiden water- en mestkanaal (Nooyen/Inter Continental, Groen Label BB 98.10.063, emissie 2,9 kg NH₃ per dierplaats per jaar) en in één afdeling met een schuin aflopende vorm (ITEK, Groen Label BB 98.10.063, emissie 2,9 kg NH₃ per dierplaats per jaar);
- hokafmetingen: 1,80 m breed en 2,40 m diep;
- gangen in de afdeling: smalle gang aan de voorzijde van de kraamhokken: 0,26 m breed, voorzien van metalen driekantroosters. Controlegang in het midden: 0,75 m breed, dicht uitgevoerd;
- de ondervloer (putvloer) in de afdeling is vlak uitgevoerd. De putdiepte (afstand tussen ondervloer en werkvloer) bedraagt 0,4 m;
- vloeruitvoering: volledig roostervloer met geplastificeerde metalen roosters met een dicht kunststof vloergedeelte voor de biggen (0,6 m²);
- hokafscheiding van multiplex is 0,6 m hoog;
- inhoud van de afdeling: 11,30 m x 6,50 m x 2,50 m = 183,6 m³ (15,3 m³ per zeug);
- geen buitenmuur, dus drie binnenwanden



Figuur 1: Lengtedoorsnede van de afdelingen met mestpanventilatie



Figuur 2: Dwarsdoorsnede van de afdelingen met mestpanventilatie

- grenzend aan andere afdelingen en een binnenwand grenzend aan de centrale gang;
- het plafond is extra geïsoleerd met een 40 mm dikke glaswol deken. Dit is aan te bevelen als er geen plafondventilatie toegepast wordt.

Afdeling met plafondventilatie

De afdeling ligt aan een centrale gang en bestaat uit twee rijen kraamhokken met in het midden een controlegang.

De kenmerken van de referentie-afdeling zijn:

- tweemaal zes kraamhokken, aan de linkerzijde rechte opstelling van de zeugen, aan de rechterzijde diagonale opstelling;
- hokafmetingen: linkerzijde 1,8 m breed x 2,2 m diep, rechterzijde 1,8 m breed en 2,0 m diep;
- controlegang in het midden: 0,8 m breed, dicht uitgevoerd;
- het gehele kraamhok is onderkelderd (putdiepte 0,5 m). De mest wordt via een riole-ringssysteem afgevoerd;
- vloeruitvoering: volledig roostervloer met geplastificeerde metalen roosters met een dicht kunststof vloergedeelte voor de biggen. Het biggenest is vanuit de voorzijde van het kraamhok 0,45 m uit de hoek of in de hoek geplaatst;
- hokafscheiding van multiplex is 0,6 m hoog;
- inhoud van de afdeling: $11,1 \text{ m} \times 5,0 \text{ m} \times 2,2 \text{ m} = 122,1 \text{ m}^3$ ($10,2 \text{ m}^3$ per zeugenplaats);
- geen buitenmuur, dus drie binnenwanden grenzend aan andere afdelingen en een

binnenwand grenzend aan de centrale gang.

2.2 Voeding en drinkwater

Alle zeugen worden tweemaal daags individueel gevoerd. De zeugen krijgen een standaard-zeugenkorrel lactatie verstrekt ($\text{EW} = 1,06$). Drinkwater staat onbeperkt ter beschikking via drinkknippen in de trog.

De biggen krijgen vanaf circa tien dagen na de geboorte onbeperkt de beschikking over melkkorreltjes. Via een drinkbakje kunnen de biggen onbeperkt drinkwater opnemen.

2.3 Ventilatie en verwarming

Voorverwarming van de lucht vindt plaats op de centrale gang. Met radiatoren wordt de temperatuur op minimaal 7°C gehouden. Als het nodig is kan in de afdelingen naverwarmd worden,

Afdelingen met mestpanventilatie

Beide afdelingen met mestpanventilatie zijn identiek wat betreft ventilatie en verwarmingsinstallatie. Ruimteverwarming in de afdeling kan plaatsvinden via deltabuizen die in het luchtaanvoerkanaal hangen. Ook zijn op 2 m hoogte enkele kasbuizen opgehangen. De biggen nesten kunnen worden verwarmd met behulp van instelbare temperatuurgestuurde keramiekstralers met een maximaal vermogen van 250 W.

Er is één ventilator per afdeling met een diameter van 0,35 m en een maximale luchtverplaatsing van $209 \text{ m}^3/\text{h}$ per kraamhok in één afdeling en $227 \text{ m}^3/\text{h}$ per kraamhok in de

andere afdeling. De afvoerkoker is voorzien van een automatische diafragmaschuif en meetwaaier en bevindt zich boven de controlegang 2 m vanaf de achterzijde van de afdeling vlak onder het plafond. De temperatuurvoeler van de klimaatregelaar die de ventilator en verwarming aanstuurt hangt op 1,5 m boven de vloer, boven de hokafscheiding tussen het tweede en derde hok aan de rechterkant. De klimaatinstellingen waarmee gewerkt wordt staan in tabel 2. De maximale luchtintrede-snelheid door de afdekroosters in de luchtinlaatgangetjes is bij traditionele instellingen (250 m³/h per kraamhok) 0,29 m/s, bij verlaagde instellingen (175 m³/h per kraamhok) 0,2 m/s.

Afdeling met plafondventilatie
 In de afdeling met plafondventilatie kan ruimteverwarming in de afdeling plaatsvinden via zes ronde buizen die op 2 m hoogte vóór in de afdeling zijn opgehangen. De biggennesten kunnen worden verwarmd met behulp van instelbare temperatuurgestuurde keramiekstralers. Er is een ventilator met een diameter van 0,35 m en een maximale luchtverplaatsing van 239 m³/h per kraamhok. De afzuigkoker is voorzien van een automatische diafragma-schuif en meetwaaier en bevindt zich boven het achterste hok links 1,2 m onder het plafond, 1 m voor de achterzijde van de afdeling. De temperatuurvoeler van de klimaatregelaar die de ventilator en verwarming aan-

stuurt hangt op 1,5 m boven de vloer boven de hokafscheiding tussen het tweede en derde hok aan de rechterkant. De klimaatinstellingen waarmee gewerkt wordt staan in tabel 2.

2.4 Proefbehandelingen

Er zijn drie proefbehandelingen onderzocht. Ten eerste is mestpanventilatie met traditionele ventilatie-instellingen (1) vergeleken met plafondventilatie met traditionele ventilatie-instellingen (2). Ten tweede is mestpanventilatie met traditionele instellingen (1) vergeleken met mestpanventilatie met verlaagde ventilatie-instellingen. Deze instellingen zijn 30% lager (3). Bij de tweede vergelijking zijn de twee proefbehandelingen gewisseld tussen de twee afdelingen met mestpanventilatie.

2.5 Duur van het onderzoek

Het onderzoek heeft plaatsgevonden van april 1998 tot en met april 1999. In die periode zijn in één afdeling met mestpanventilatie acht rondes gedraaid. In de andere afdeling met mestpanventilatie en in de afdeling met plafondventilatie zijn zeven rondes gedraaid. Voor zover mogelijk werden de afdelingen tegelijk opgelegd. Meestal zaten er toch nog een of enkele weken verschil in de oplegmomenten. De definitie van een ronde in deze proef was: vanaf de eerste worp in een afdeling tot het moment waarop de laatste biggen werden gespeend.

Tabel 2: Gehanteerde klimaatinstellingen (ventilatie debieten per kraamhok)

	setpoint verwarming (°C)	begintemperatuur ventilatie (°C)	P-band (°C)	minimum- ventilatie (m³/h)	maximum- ventilatie (m³/h)
<i>traditioneel (mestpanventilatie en plafondventilatie)</i>					
voorwerpen	17	19	5	40	200
tijdenswerpen	20	22	5	40	200
nawerpen	18	20	5	50	250 *
<i>verlaagd (mestpanventilatie)</i>					
voorwerpen	17	19	4	28	140
tijdenswerpen	20	22	4	28	140
nawerpen	18	20	4	35	175

* in de afdelingen met mestpanventilatie was de geïnstalleerde capaciteit 209 en 227 m³/h, in de afdeling met plafondventilatie was dit 239 m³/h

3 WAARNEMINGEN

In dit hoofdstuk worden de waarnemingen die voor dit onderzoek zijn uitgevoerd behandeld en toegelicht. De resultaten van de waarnemingen komen in hoofdstuk 4 aan de orde.

3.1 Klimaat

3.1.1 Temperaturen

Op verschillende plaatsen in de proefafdelingen is met thermokoppels en Pt100-sensoren de luchttemperatuur gemeten. Ook is de buitenluchttemperatuur en de luchttemperatuur in de grondkanalen gemeten. Met behulp van een datalogstelsel zijn elk uur de momentane waarden weggeschreven. De locaties van de meetpunten staan in tabel 3.

3.1.2 Luchtdebiet

Het luchtdebiet is in de drie afdelingen uit dit onderzoek continu gemeten door een meetwaaier (Fancom). Het signaal van de meetwaaier werd ook gebruikt voor de klimaatregeling. Met behulp van het centrale stuurprogramma zijn ieder uur waarden weggeschreven van het momentane debiet.

3.1.3 Luchtverdeling, lichtsnelheid, luchtkwaliteit en temperatuur op hokniveau
Naast het geautomatiseerd verzamelen van klimaatgegevens, zoals in beide voorafgaande paragrafen is beschreven, is meerdere

keren een momentopname gemaakt van het binnenklimaat.

Voor het vastleggen van het luchtbewegingspatroon in de afdeling zijn rookproeven uitgevoerd. Daarnaast is op verschillende locaties in de hokken de lichtsnelheid gemeten met behulp van een draagbare elektronische lichtsnelheidsmeter. Met behulp van gasdetectiebuisjes (Dräger) zijn gasconcentraties gemeten. Hierbij is gekeken naar CO₂ en NH₃. De meting vond plaats voor in het hok bij de neus van de zeug in het voorste, derde en achterste kraamhok. Tijdens de metingen werden de volgende gegevens geregistreerd: productiestadium, luchttemperatuur op dierniveau en ventilatiedebiet. Bij mestpanventilatie met verlaagde ventilatie-instellingen waren CO₂-concentraties boven 0,3 vol. % aanleiding om het minimale ventilatiedebiet te verhogen. Bij de klimaatmetingen zijn met een handterminal temperatuurregistraties op verschillende locaties binnen een afdeling en binnen een hok uitgevoerd om eventuele temperatuurverschillen te meten.

3.1.4 Stofconcentratie

Tussen augustus 1998 en mei 1999 is (met een onderbreking in januari en februari) de dagelijkse gemiddelde stofconcentratie (inhaleerbaar en respirabel) in de stallucht gemeten. Inhaleerbaar stof bestaat uit deeltjes kleiner dan 10 micron, respirabel stof bevat

Tabel 3: Locaties van de meetpunten voor luchttemperatuur

afdeling	locatie van meting
mestpanventilatie	- buiten in de schaduw - luchttoevoeropening van centrale gang naar grondkanaal - luchttoevoeropening van grondkanaal naar afdeling, onder de trog van het tweede en van het vijfde kraamhok - op 1,5 m boven de vloer, boven de hokafscheiding tussen hok 2 en 3 rechts en ook boven de hokafscheiding tussen hok 3 en hok 4 links van de werkgang
plafondventilatie	- luchttoevoeropening van centrale gang naar ruimte boven plafond - op 1,5 m boven de vloer, boven de hokafscheiding tussen hok 2 en 3 rechts

deeltjes kleiner dan 5 micron.

Aan de zijkant van de controlegang, ongeveer halverwege de afdeling, zijn op 1,75 m hoogte de hoeveelheden inhaleerbaar en respirabel stof gemeten. Op ongeveer 0,80 m hoogte boven een biggennest, ongeveer halverwege de afdeling, is de hoeveelheid inhaleerbaar stof gemeten. De concentraties inhaleerbaar stof en respirabel stof zijn gemeten met Casella filterhouders (type TI 3087 respectievelijk A7650/1). Het meetprotocol voor deze metingen is weergegeven in Van 't Klooster et al. (1991). Aanvullend op het protocol zijn nulmetingen verricht.

De meetgegevens zijn verwerkt conform Roelofs en Binnendijk (publicatie in voorbereiding). De proefbehandeling plafondventilatie met traditionele ventilatie-instellingen is in slechts één afdeling uitgevoerd en derhalve verstrengeld met een eventueel afdelingseffect. Daarom is niet statistisch getoetst maar zijn de meetresultaten grafisch weergegeven. Per meetpunt en per ventilatiesysteem zijn het verloop van de stofconcentratie tijdens de ronde alsmede een lineaire trend van het gemiddelde weergegeven.

Vervolgens is getoetst of er aantoonbare verschillen waren tussen de verlaagde en traditionele ventilatie-instellingen bij mestpanventilatie, die in twee afdelingen afwisselend zijn uitgevoerd. In het statistisch model zijn de waargenomen stofconcentraties gecorrigeerd voor ronde-effecten en voor het aantal dagen nadat de eerste biggen in de afdeling waren geboren.

3.2 Energiegebruik

3.2.1 Elektrisch energiegebruik

Het energiegebruik door de ventilator is gemeten met behulp van een kWh-meter vóór de klimaatcomputer. Wekelijks is de cumulatieve waarde geregistreerd. Ook het energiegebruik van de biggennestverwarming is met behulp van een kWh-meter gemeten en wekelijks geregistreerd.

3.2.2 Energiegebruik verwarming

Het energiegebruik voor ruimteverwarming is gemeten met behulp van warmtemeters. Deze meters meten de temperatuur van het ingaande en uitgaande verwarmingswater en het waterdebiet. Met deze gegevens is de warmte-afgifte van de verwarming berekend, die afgelezen kan worden op een display. Wekelijks is de cumulatieve waarde geregistreerd.

Het energiegebruik van de voorverwarming op de centrale gang is niet gemeten. Wel wordt in hoofdstuk 5 het energiegebruik hiervan ingeschat met behulp van een berekening.

3.3 Productieresultaten

Via het managementsysteem zijn productie-resultaten van de dieren bijgehouden. Deze gegevens zijn niet statistisch geanalyseerd, maar dienen als achtergrondinformatie bij dit onderzoek.

4 RESULTATEN

Voor de presentatie van de resultaten is in de meeste gevallen gekozen voor resultaten van enkele willekeurige dagen in plaats van resultaten van de gehele meetperiode. Dit geldt voor de gevallen waarbij de willekeurige dagen een representatief beeld laten zien voor het gehele jaar. De grafieken zijn op deze manier beter leesbaar.

In de praktijkproef zijn de systeemgrenzen rondom de afdeling gelegd. Energiegebruik van de voorverwarming op de centrale gang is niet gemeten. Deze kan echter op een eenvoudige wijze worden afgeleid uit het luchtdebiet en het aantal graden opwarming op de centrale gang. Hoofdstuk 5 komt hierop terug.

4.1 Klimaat

4.1.1 Temperaturen

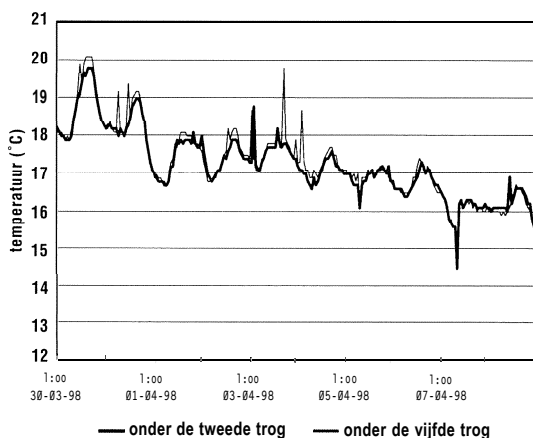
Als eerste worden in deze paragraaf de resultaten van de metingen binnen één afdeling behandeld. Daarna worden de temperaturen bij de verschillende proefbehandelingen vergeleken.

Voortraject

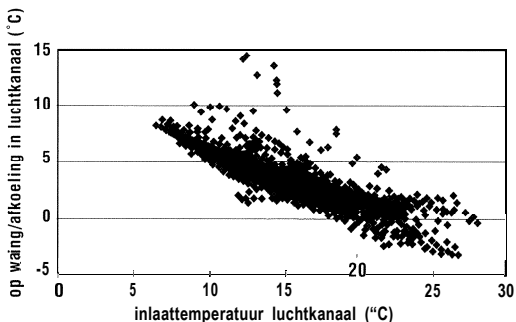
Het voortraject, dat buitenlucht in het stalgebouw aflegt voordat ze werkelijk in de afdeling komt, is in belangrijke mate van invloed op het klimaat in de afdeling. Het voortraject in de afdelingen met mestpanventilatie bestaat uit de centrale gang en de ruimte onder de mestpannen. Wanneer in dit rapport wordt gesproken over de binnenkomende lucht in de afdeling wordt de lucht bedoeld die het rooster waarmee de luchtkanalen zijn afgedekt passeert. Bij plafondventilatie bestaat het voortraject uit de centrale gang en de ruimte tussen het dak en het plafond. De binnenkomende lucht in de afdeling is hier de lucht die door het plafond stroomt. De lengte van het voortraject bij mestpanventilatie hangt af van de plaats waar de lucht uit het luchtkanaal door de roosters de afdeling binnenkomt. Wanneer deze lucht voor in de afdeling omhoog komt is de afgelegde weg veel korter dan wanneer deze achter in de afdeling omhoog komt. De in-

vloed van de afgelegde weg op de temperatuur van de in de afdeling binnenkomende lucht gedurende tien willekeurige dagen is weergegeven in figuur 3.

Uit figuur 3 kan worden afgelezen dat de invloed van de afgelegde weg op de luchttemperatuur gering is. Voor verdere behandeling van de resultaten is voor de binnenkomende lucht in de afdeling het gemiddelde van de temperatuur onder de tweede en onder de vijfde trog genomen.



Figuur 3: Temperatuur van de binnenkomende lucht onder de tweede en onder de vijfde trog



Figuur 4: Invloed van temperatuur van de inlaatlucht op de conditionering onder de mestpannen (4468 waarnemingen op uurbasis)

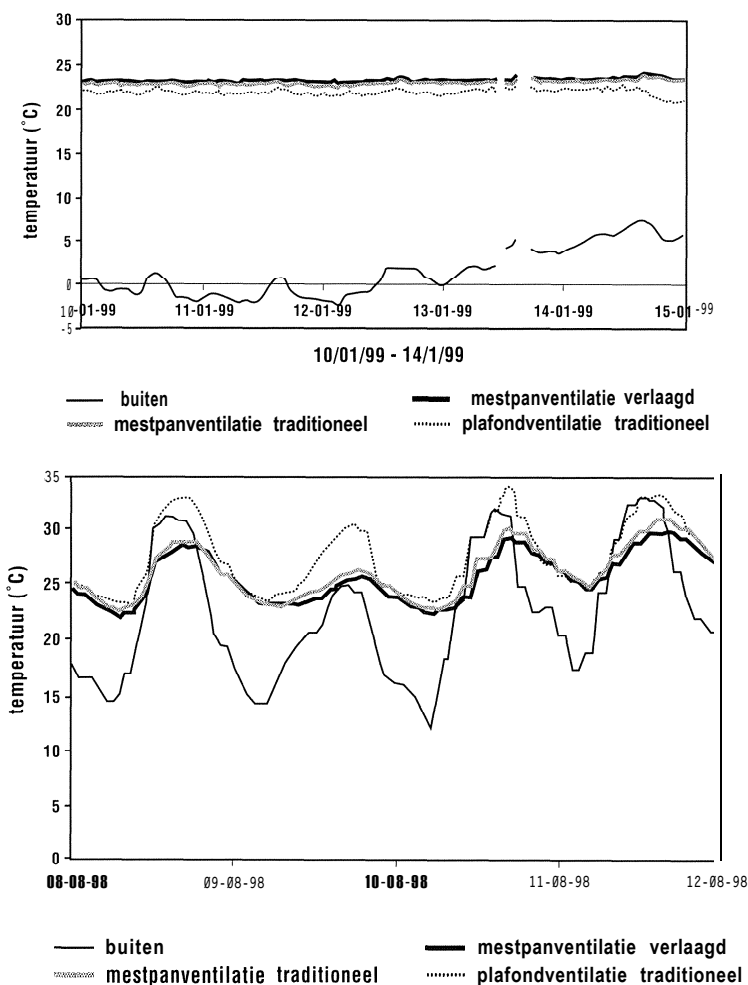
Invloed van temperatuur van de inlaatlucht op de opwarming onder de mestpannen

In de ruimte onder de mestpannen vindt opwarming of afkoeling plaats als gevolg van warmte-uitwisseling met de onderzijde van de mestpannen en de bodem. Het effect is weergegeven in figuur 4. Op de horizontale as staat de temperatuur van de lucht die vanuit de centrale gang het luchtkanaal onder de mestpannen binnenkomt, op de verticale as de temperatuursverandering die de lucht ondergaat voordat deze de afdeling binnenkomt. De stippen in figuur 4 stellen waarnemingen op uurbasis voor. Er is een duidelijk opwarmend effect waarneembaar wanneer de centrale-gangtempe-

ratuur onder de 15°C is. Bij zeer hoge temperaturen is er een lichte mate van koeling waarneembaar. Deze conditionerende werking heeft een stabiliserend effect op de temperatuur van de binnenkomende lucht.

Afdelingstemperaturen

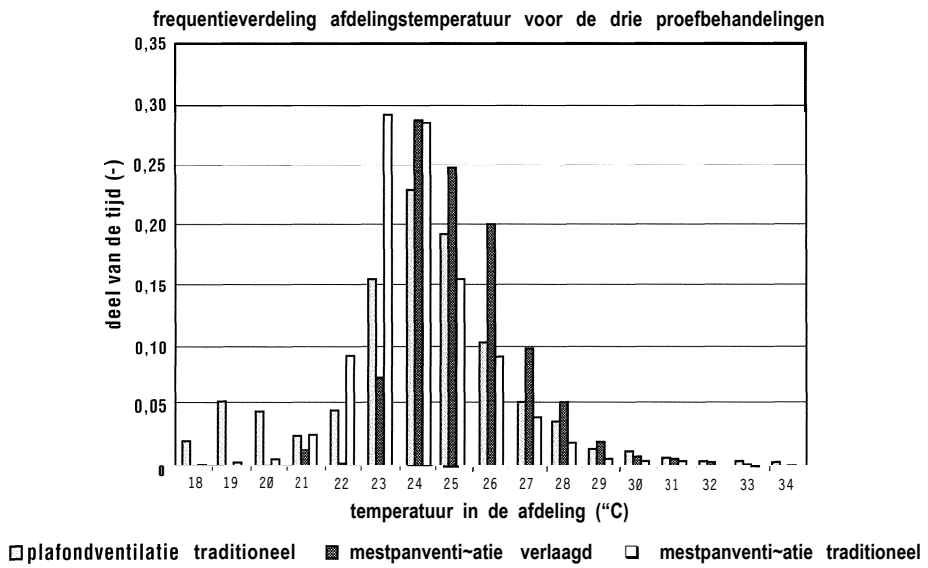
De twee temperatuurvoelers binnen één afdeling gaven nagenoeg dezelfde waarden. Voor verdere behandeling van de resultaten is voor de afdelingstemperatuur het gemiddelde van de twee gemeten temperaturen genomen. In figuur 5 zijn de afdelingstemperaturen in de drie proefafdelingen tijdens een koudere en een warmere periode weergegeven.



Figuur 5: Afdelingstemperatuur in de drie proefafdelingen gedurende een koudere (boven) en een warmere periode (onder)

Uit figuur 5 blijkt dat tijdens een koude periode de de afdelingstemperatuur in de afdeling met mestpanventilatie iets hoger ligt dan de temperatuur in de afdeling met plafondventilatie. Ook is het verloop wat stabielier (een geringere variatie per uur).

Tijdens een warme periode zijn de pieken in afdelingstemperatuur bij mestpanventilatie minder hoog dan bij plafondventilatie. Het dag - nachtritme in de afdelingstemperatuur van de drie afdelingen is duidelijk waarneembaar.



Figuur 6: Frequentieverdeling van de gerealiseerde afdelingstemperaturen gedurende de proefperiode

Tabel 4: Maandelijks gemiddelde afdelingstemperatuur en maandelijks gemiddelde van de standaardafwijking per dag voor de drie proefbehandelingen (°C)

	mestpan verlaagd		mestpan traditioneel		plafond traditioneel	
	gemiddeld	STD	gemiddeld	STD	gemiddeld	STD
apr-98	23,9	0,45	23,2	0,49	23,7	0,66
mei-98	25,1	0,66	24,5	0,58	25,3	1,61
jun-98	25,6	0,84	24,9	0,67	25,3	0,90
jul-98	25,8	0,76			24,3	1,01
aug-98	25,3	0,94	25,5	0,96	25,9	1,84
sep-98	25,9	0,69	25,2	0,55	24,7	0,64
okt-98	24,6	0,34	23,4	0,36	23,8	0,31
nov-98			22,6	0,41	22,2	0,39
dec-98			22,3	0,40	22,6	0,37
jan-99	23,2	0,35	22,6	0,51	21,8	0,51
feb-99					19,4	0,46
m rt-99	24,0	0,33	23,4	0,31	19,3	0,24
gemiddeld		0,60		0,52		0,74

In figuur 6 is de frequentieverdeling van de gemeten binnentemperaturen weergegeven.

In figuur 6 is te zien dat afdelingstemperaturen onder 20°C nauwelijks zijn voorgekomen in de afdelingen met mestpanventilatie. De afdelingstemperatuur in de proefafdelingen was over het algemeen tussen de 23 en 27°C. In de afdeling met mestpanventilatie en traditionele instellingen is het nauwelijks warmer geweest dan 28°C. De afdeling met mestpanventilatie en verlaagde instellingen was soms boven 29°C, maar niet zo vaak als de afdeling met plafondventilatie.

In tabel 4 staan maandgemiddelden voor de afdelingstemperatuur en gemiddelden van de standaardafwijking per dag weergegeven (op basis van waarnemingen op uurbasis). De standaardafwijking per dag is een indicator voor de variatie in de afdelingstemperatuur gedurende een dag. Wanneer de standaardafwijking 1 graad is, betekent dit dat 66% van de tijd de afdelingstemperatuur niet meer dan 1 graad afwijkt van het gemiddelde.

Voor enkele maanden is tabel 4 niet ingevuld. Van die maanden zijn er te weinig gegevens beschikbaar. De gemiddelde standaardaf-

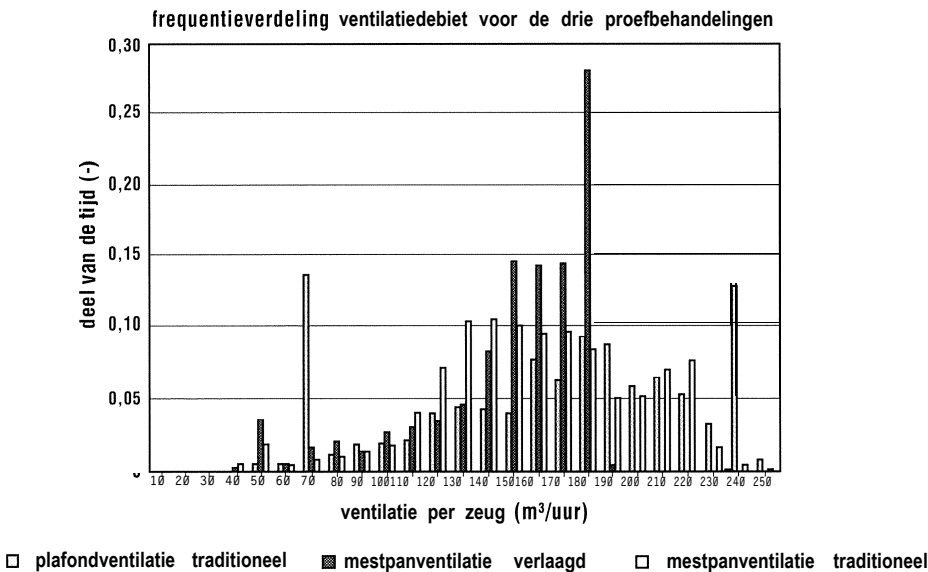
wijking per dag bij mestpanventilatie is kleiner dan bij plafondventilatie. Dit wordt veroorzaakt doordat tijdens warme perioden de standaardafwijking per dag bij plafondventilatie groter is, als gevolg van hogere pieken in de afdelingstemperatuur bij plafondventilatie gedurende de warmste uren van de dag. Gedurende koelere maanden zijn er nauwelijks verschillen tussen de twee ventilatiesystemen.

Het verschil in gemiddelde tussen mestpanventilatie met verlaagde instellingen en mestpanventilatie met traditionele instellingen wordt veroorzaakt door het ontbreken van een aantal gegevens van koelere maanden bij mestpanventilatie met verlaagde instellingen.

4.1.2 Luchtdebiet

In figuur 7 is de frequentieverdeling weergegeven van de gerealiseerde ventilatiedebieten in de drie proefafdelingen gedurende de perioden dat de zeugen in de afdeling waren.

Het gemiddelde ventilatieniveau per zeug was 162 m³/h in de afdeling met plafondventilatie met traditionele instellingen, 146 m³/h bij mestpanventilatie met verlaagde instellingen en 155 m³/h bij mestpanventilatie met traditionele instellingen.



Figuur 7: Frequentieverdeling van de gerealiseerde ventilatiedebieten gedurende de proefperiode (in klassen van 10 m³/h)

Uit figuur 7 kan worden afgelezen dat lagere ventilatiedebieten ($< 100 \text{ m}^3/\text{h}$ per zeug) bij de afdeling met plafondventilatie veel vaker zijn voorgekomen dan bij de afdelingen met mestpanventilatie. De piek bij plafondventilatie bij $60 - 70 \text{ m}^3/\text{h}$ duidt erop dat de afdelingstemperatuur vaak net iets boven de begintemperatuur-ventilatie was. In alle drie de afdelingen is het niveau van minimumventilatie zeer weinig voorgekomen. In de afdelingen met mestpanventilatie is ten opzichte van de afdeling met plafondventilatie veel vaker tussen de 100 en $180 \text{ m}^3/\text{h}$ per zeug geventileerd. Dit heeft te maken met het over het algemeen hogere temperatuurniveau van de afdelingen met mestpanventilatie. De piek in de klasse $170 - 180 \text{ m}^3/\text{h}$ bij mestpanventilatie met verlaagde instellingen laat zien dat er vaak maximaal geventileerd is. Hoger dan $180 \text{ m}^3/\text{h}$ is er slechts geventileerd bij de traditionele instellingen en in de afdeling met plafondventilatie. In de afdeling met plafondventilatie is vaker maximaal geventileerd. Naast de soort afdeling speelt hierbij de wat lagere geïnstalleerde maximale ventilatiecapaciteit in de proefafdelingen ook een belangrijke rol.

4.1.3 Luchtverdeling, luchtsnelheid, luchtkwaliteit en temperatuur op hokniveau
De momentopnamen van het binnenklimaat zijn gedaan op de volgende data: 14/4/98; 23/4/98; 23/11/98; 4/12/98; 9/12/98; 20/1/99. Op basis van de verzamelde gegevens zijn de in de volgende paragrafen gepresenteerde gegevens bepaald.

4.1.3.1 Luchtverdeling

Voor mestpanventilatie is het luchtbewegingspatroon bij lagere ventilatiedebieten geschetst in de figuren 1 en 2. De verse lucht komt gelijkmatig verdeeld de afdeling binnen via de roosters in de gangetjes voor

de hokken. Het gangetje wordt gevuld met verse lucht die kouder is dan de afdelingslucht en daarom laag blijft hangen. Een deel van de verse lucht gaat door het kleine luchtrooster heen en komt direct onder de trog bij de neus van de zeug. De rest van de lucht stroomt als een deken over de voorkant van de hokafscheiding de hokken in, waarna er menging met afdelingslucht optreedt. Bij meer ventilatie stroomt er relatief meer lucht over de hokafscheiding heen. Het patroon blijft verder gelijk.

Het luchtbewegingspatroon in de afdeling met plafondventilatie is moeilijk te schetsen. De meeste lucht komt binnen via de voorste helft van de afdeling aan de kant van waar de lucht vandaan komt. De binnenkomende lucht mengt zich direct met afdelingslucht, wat op een goede werking van dit ventilatiesysteem duidt. Er is geen koude luchtval.

4.1.3.2 Luchtsnelheid op dierniveau

In tabel 5 zijn de resultaten van luchtsnelheidmetingen rondom de dieren opgenomen. Dit zijn gemiddelden over verschillende hokken en verschillende waarnemingen.

Alle waarnemingen bleven ver onder de norm van maximaal $0,2 \text{ m/s}$ op dierniveau (Werkgroep klimaatsnormen, 1989).

4.1.3.3 CO_2 - en NH_3 -concentraties

In tabel 6 zijn de resultaten van de gasconcentratiemetingen weergegeven.

De norm voor wat betreft maximale CO_2 -concentratie van $0,2 \text{ vol.}\%$ (Werkgroep klimaatsnormen, 1989) werd in de afdelingen met mestpanventilatie niet overschreden, en in de afdeling met plafondventilatie slechts in zeer geringe mate. Er was dus voldoende luchtverversing.

Tabel 5: Resultaten van de luchtsnelheidmetingen (m/s , gemiddelde van zes waarnemingen)

locatie	mestpanventilatie verlaagde ventilatie	mestpanventilatie traditionele ventilatie	plafondventilatie traditionele ventilatie
vlak voor de neus van de zeug	0,10	0,09	0,00
vlak boven de rug van de zeug	0,00	0,05	0,05

Tabel 6: Concentraties CO₂ en NH₃ (gemiddelde en maximum van meerdere hokken over zes waarnemingen)

	mestpanventilatie verlaagde instellingen		mestpanventilatie traditionele instellingen		plafondventilatie traditionele instellingen	
	gem.	max.	gem.	max.	gem.	max.
CO ₂ (vol.%)						
vlak voor de neus	0,05	0,09	0,09	0,10	0,15	0,22
in het hok	0,13	0,20	0,15	0,17	0,14	0,22
NH ₃ (ppm)						
vlak voor de neus	1,7	1,8	16,	1,9	8,2	20,0
vlak boven de rug	3,6	55,	3,5	7,0	12,7	20,1

De norm voor maximale NH₃-concentratie van 10 ppm (Werkgroep klimaatsnormen, 1989) is in de afdelingen met mestpanventilatie niet overschreden. De hogere concentraties die gemeten zijn in de afdeling met plafondventilatie zullen met name zijn veroorzaakt door het ontbreken van een ammoniak-emissie-arm systeem, dat wel in de afdelingen met mestpanventilatie aanwezig was.

4.1.3.4 *Temperatuur op hokniveau*

De resultaten van de handmatige temperatuurregistraties op verschillende plaatsen in de afdelingen staan in tabel 7.

Uit de resultaten van deze metingen blijkt dat in de afdelingen met mestpanventilatie de temperatuur van de lucht die het hok binnentrad via het luchtroostertje in de hokafscheiding lager was dan de ruimtetemperatuur. In het hok nam de verse lucht zeer snel

de temperatuur aan van de reeds in het hok aanwezig lucht, waardoor er binnen het hok nauwelijks een temperatuurgradiënt meetbaar was. In de afdeling met plafondventilatie waren de verschillen tussen de luchttemperatuur bij de neus van de zeug en in de rest van het hok veel kleiner als gevolg van een intensieve menging van verse lucht met stallucht.

4.1.4 *Stofconcentratie*

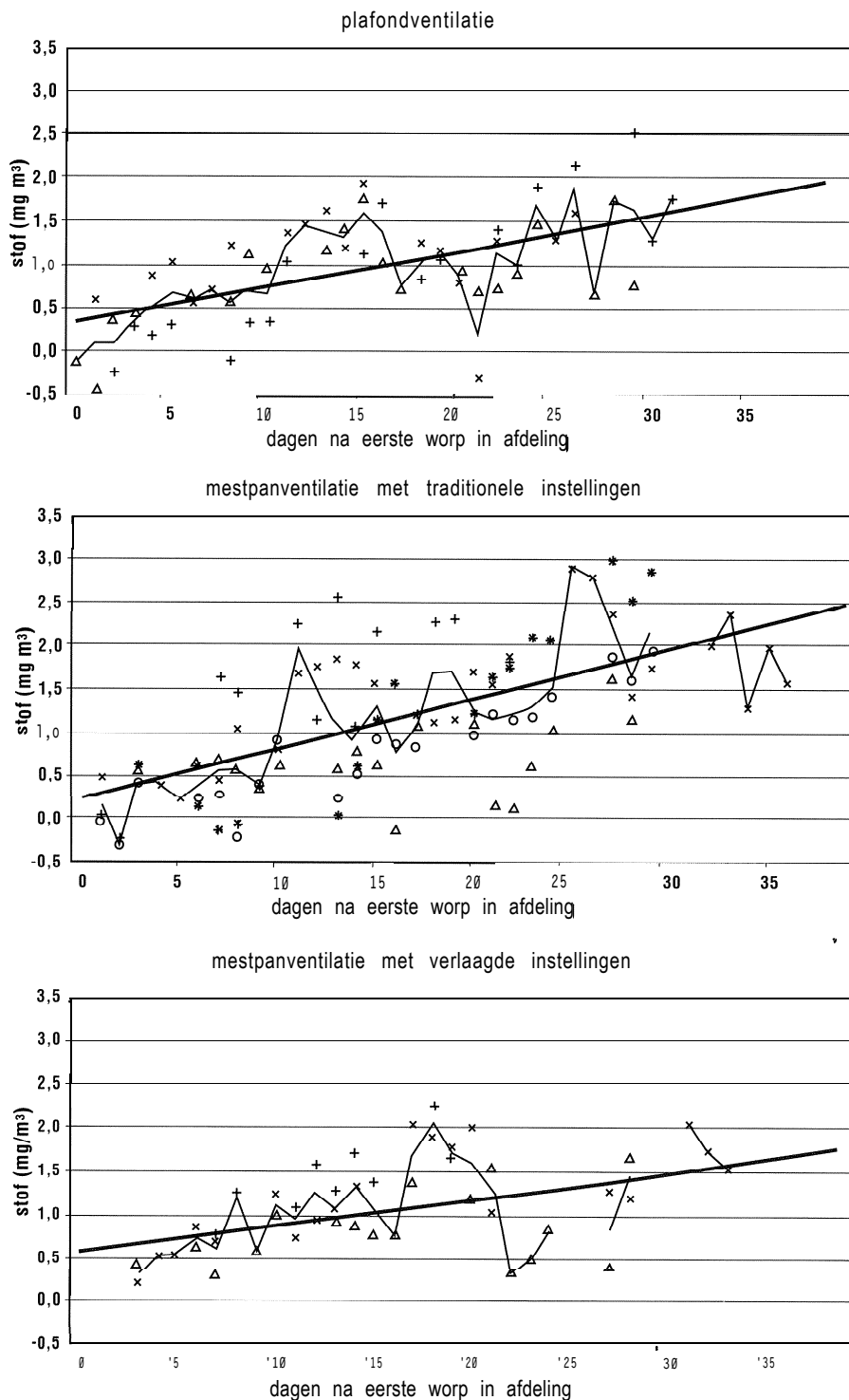
De gemeten concentraties inhaalbaar stof boven de controlegang zijn voor de drie proefbehandelingen weergegeven in figuur 8.

Uit figuur 8 kan worden afgelezen dat de stofconcentraties gedurende de ronde toenemen. De verschillen in gemeten stofconcentraties zijn klein. De resultaten van de overige stofmetingen zijn grafisch weergegeven in bijlage 1.

Tabel 7: Resultaten van enkele handmatige temperatuurregistraties (momentopnames, gemiddelde over twee hokken)

soort afdeling		temperaturen (°C)			
		centrale gang	vóór de neus v/d zeug	in het hok	bij uitlaat
mestpanventilatie	(V)*	12,8	17,8	22,0	23,7
	(T)*	14,7	17,1	21,8	22,8
	(T)	22,6	25,5	26,7	26,0
plafondventilatie		14,6	25,2	25,4	25,1
		22,7	26,9	27,6	29,8

* (V) = verlaagde ventilatie-instellingen; (T) = traditionele ventilatie-instellingen



Figuur 8: De gemeten concentratie inhaleerbaar stof boven de werkgang bij de drie proefbehandelingen (A ronde 3, x ronde 4, * ronde 5, o ronde 5*, + ronde 6, - gemiddelde, — lineair)

De gemeten stofconcentraties lijken bij mestpanventilatie en traditionele ventilatie-instellingen wat hoger dan bij plafondventilatie. Vanwege verstrengeling met de afdeling kan echter niet aangetoond worden of dit veroorzaakt is door het afdelingseffect of door het ventilatiesysteem.

Mestpanventilatie met verlaagde instellingen ten opzichte van traditionele instellingen

De gemeten stofconcentraties bij mestpanventilatie met verlaagde instellingen en met traditionele instellingen zijn statistisch geanalyseerd. De resultaten van de statistische analyse staat in tabel 8.

Er is geen invloed op de stofconcentratie in de stallucht aangetoond van het verlagen van de ventilatie-instellingen bij mestpanventilatie.

4.2 Energiegebruik

4.2.1 Elektrisch energiegebruik

Het gemeten elektrisch energiegebruik in de kraamafdelingen is met name bepaald door energie voor ventilatie en biggennestverwarming. In tabel 9 zijn de resultaten van de energie-waarnemingen voor de ventilatie per ronde weergegeven. Gegevens van rondes waarbij het moment van opleggen van de zeugen tussen de drie afdelingen meer dan drie weken verschilden zijn niet meegenomen.

Het gemeten verschil in gebruik van elektrische energie tussen mestpanventilatie met verlaagde instellingen en plafondventilatie met traditionele instellingen bedraagt 8%. In de afdeling met mestpanventilatie met traditionele instellingen is een iets hoger energiegebruik gemeten (5% hoger dan bij plafondventilatie).

Tabel 8: Stofconcentraties (mg/m³) bij mestpanventilatie met verlaagde en met traditionele ventilatie-instellingen

	verlaagde instellingen	traditionele instellingen	SEM ¹	sign. ²
inhaleerbaar stof boven de controlegang	1,19	1,23	0,06	n.s.
inhaleerbaar stof boven biggennest	1,25	1,39	0,06	n.s.
respirabel stof boven controlegang	0,20	0,15	0,04	n.s.

¹ SEM: gepoolde standard error van het gemiddelde

² sign. = significantie: n.s. = p > 0,1

Tabel 9: Gemeten elektrisch energiegebruik ventilatie (kWh per kraamhok per jaar)

ronde in periode	mestpanventilatie met verlaagde instellingen	mestpanventilatie met traditionele instellingen	plafondventilatie traditionele instellingen
apr. - mei 1998	70	70	85
mei - jun. 1998	64	97	85
sept. - okt. 1998	64	85	85
nov. - dec. 1998		67	46
dec. 1998 - jan. 1999	73	82	88
feb. - mrt. 1999	76	73	58
<i>gemiddeld</i>	69	79	75

De resultaten van de registraties van het energiegebruik van de biggennestverwarming zijn weergegeven in tabel 10.

Aan de hand van het liggedrag en het gewicht van de biggen werd de biggennestverwarming ingesteld of uitgezet. Deze werkwijze heeft geresulteerd in zeer veel brand-uren van de keramiekstralers waardoor ook het gemeten energiegebruik zeer hoog is.

Uit de registraties blijkt dat er zeer weinig verschil zit in het gemiddeld aantal dagen dat de biggennestverwarming aan was. Het gemeten energiegebruik in de afdelingen met mestpanventilatie en de afdeling met plafondventilatie verschilt daarom ook weinig. Er is geen invloed van het ventilatiesysteem op het energiegebruik van de biggennestverwarming aangetoond.

4.2.2 Energiegebruik ruimteverwarming

Het energiegebruik van de verwarming in de rondes (vanaf eerste worp tot laatste biggen spenen) was in alle afdelingen nihil. Dit heeft

onder andere te maken met de hoge warmteproductie van de kraamzeugen en de biggennestverwarming en de voorverwarming in de centrale gang.

4.3 Productieresultaten

De gemiddelde productieresultaten gedurende de proefperiode staan weergegeven in tabel 11.

Uit tabel 11 kan worden afgelezen dat de productieresultaten niet negatief worden beïnvloed door toepassing van mestpanventilatie in plaats van plafondventilatie.

4.4 Praktische ervaringen

Het klimaat in de afdelingen met mestpanventilatie was altijd goed. In de beginperiode van de proef was echter in één van de afdelingen met mestpanventilatie aan de achterzijde naast het laatste kraamhok een spleet, waarmee een directe verbinding met het luchtkanaal onder de mestpannen aan-

Tabel 10: Gemeten elektrisch energiegebruik biggennestverwarming (kWh per kraamhok)

	mestpanventilatie met verlaagde instellingen	mestpanventilatie met traditionele instellingen	plafondventilatie traditionele instellingen
aantal dagen energiegebruik	14,7	14,1	14,8
- kWh/ronde	82	71	79
- kWh/jaar*	738	639	711

* berekend op basis van negen rondes per jaar

Tabel 11: Enkele productieresultaten in de proefperiode per proefbehandeling (gemiddelden)

	mestpanventilatie		plafondventilatie traditioneel
	verlaagd	traditioneel	
levend geboren biggen per worp	12,1	11,0	11,3
lengte zoogperiode (dagen)	25	27	26
totale voerzeugen (kg)	113	128	115
groei per big per dag (g)	223	230	214
percentage gestorven biggen	7,8	9,1	11,1
gespeende biggen per worp	10,4	10,0	10,2
speengewicht per big (kg)	7,3	7,9	7,1

wezig was. Aangezien lucht de weg van de minste weerstand kiest ging een groot deel van de lucht via deze spleet de afdeling in, en niet via de gangetjes bij de koppen van de zeugen. Met een rookproef kunnen dergelijke lekkages gemakkelijk en snel opgespoord worden. De spleet is tijdens de proef dichtgemaakt.

Een belangrijke eis is dat de mestpannen het luchtkanaal goed afsluiten en er dus geen spleten tussen twee naast elkaar liggende mestpannen kunnen ontstaan. Als deze spleten aanwezig zijn gaat er veel lucht doorheen en dit heeft zeer nadelige gevolgen voor het klimaat in de hokken naast de spleet. Koude lucht komt dan van onderaf door de roosters ter hoogte van het biggennest.

In de ondergrondse luchtkanalen kan vuil terechtkomen. Over het algemeen zal de

hoeveelheid vuil die in het kanaal terechtkomt meevallen wanneer er geen voer in geknoeid kan worden en wanneer dieren en diervorzorger niet over de luchtgangetjes behoeven te lopen. Na verloop van tijd zal stof en dergelijke zich toch gaan ophopen in het luchtkanaal onder luchtinlaatroosters. Hier zijn problemen mee te verwachten ten aanzien van hygiëne en vliegen. Bij een luchtkanaal dient er daarom een reinigingsmogelijkheid ingebouwd te worden. Afdekken van de kanalen met opklapbare roosters in combinatie met een licht aflopen-de vloer met een afvoerputje kan hiervoor een oplossing zijn. Aanbevolen wordt het kanaal zodanig te construeren dat het met de hogedrukspuit van bovenaf gereinigd kan worden.

5 THEORETISCHE BESCHOUWING

In dit hoofdstuk wordt een theoretische onderbouwing van de proef behandeld. Als eerste wordt het begrip ventilatie-effectiviteit toegelicht. Op basis van een hogere ventilatie-effectiviteit is gekozen om de verlaagde instellingen in de praktijkproef te onderzoeken. Vervolgens wordt aan de hand van fysische wetmatigheden een energiebalans over een afdeling met plafondventilatie en een afdeling met mestpanventilatie opgesteld. Hiervoor worden de energiestromen behandeld. Met behulp van de energiebalans wordt voor enkele posten het energiegebruik berekend. Met behulp van de meetresultaten en de resultaten van deze berekening wordt een overzicht van de energiekosten onder verschillende omstandigheden gegeven.

Tenslotte wordt een dynamisch model behandeld waarmee de opwarming/afkoeling van lucht in een grondkanaal kan worden gesimuleerd. Het dynamische model is geschikt om nieuwe systemen mee te ontwerpen.

5.1 De ventilatie-effectiviteit

Binnen een afdeling zal de luchtkwaliteit meestal verschillend zijn voor verschillende locaties. Dit kan gunstig of ongunstig zijn. Het niet homogeen zijn van de lucht is goed wanneer de lucht op dierniveau een betere

kwaliteit heeft dan de afgezogen lucht. Wanneer de luchtkwaliteit op dierniveau slechter is dan de kwaliteit van de afgezogen lucht is het niet homogeen zijn van de lucht ongunstig.

De heterogeniteit van de luchtkwaliteit in een ruimte is te kwantificeren door de ventilatie-effectiviteit. De ventilatie-effectiviteit is gedefinieerd als:

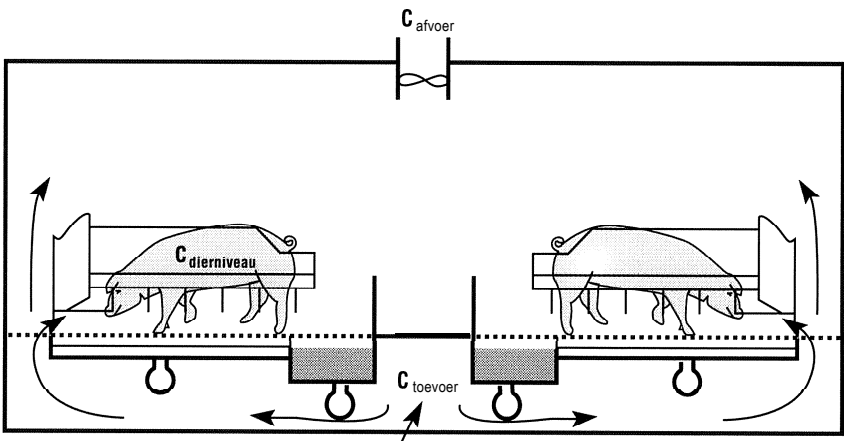
Formule 1:

$$\varepsilon = \frac{(C_{afvoer} - C_{toevoer})}{(C_{dierniveau} - C_{toevoer})}$$

waarin:

ε	= ventilatie-effectiviteit	(-)
C_{afvoer}	= concentratie vervuiling in de afvoerlucht	(m ³ /m ³)
$C_{toevoer}$	= concentratie vervuiling in de toevoerlucht	(m ³ /m ³)
$C_{dierniveau}$	= concentratie vervuiling op dierniveau	(m ³ /m ³)

De ventilatie-effectiviteit is afhankelijk van het luchtverdelingspatroon en daarmee van de verversingsgraad op dierniveau. Uit praktijkmetingen in kantoorruimtes blijkt dat de ventilatie-effectiviteit kan variëren tussen 0,2 en 1,4 (European prestandard, 1994). Dit is afhankelijk van het ventilatieprincipe en het



Figuur 9: Doorsnede van een afdeling met mestpanventilatie met daarin meetpunten

verschil tussen de temperatuur van de lucht in de leefzone en de temperatuur van de binnenkomende lucht. Om aan de luchtkwaliteitseisen te voldoen is in het ene geval zevenmaal zoveel lucht nodig als in het andere geval.

Het ventilatiesysteem bepaalt dus mede het ventilatiedebiet dat nodig is om te voldoen aan de eisen die aan het binnenklimaat in varkensstallen worden gesteld.

Aan de hand van figuur 9 kan een en ander verduidelijkt worden. De letter C staat voor een concentratie van bijvoorbeeld CO_2 . Een lage ventilatie-effectiviteit (< 1 , dat wil zeggen dat $C_{\text{afvoer}} - C_{\text{toevoer}}$ kleiner is dan $C_{\text{dierniveau}} - C_{\text{toevoer}}$) betekent dat de concentratie van in de stal geproduceerde gassen op dierniveau hoger is dan de concentratie van deze gassen in de afgevoerde lucht. Een hoge ventilatie-effectiviteit (> 1 , dat wil zeggen dat $C_{\text{afvoer}} - C_{\text{toevoer}}$ groter is dan $C_{\text{dierniveau}} - C_{\text{toevoer}}$) betekent dat de concentratie van deze gassen op dierniveau lager is dan de concentratie in de afgevoerde lucht. In het eerste geval zal meer ventilatie noodzakelijk zijn om op dierniveau de gewenste luchtkwaliteit te handhaven dan in het tweede geval. Kortom, hoe hoger de ventilatie-effectiviteit hoe beter. De ventilatie-effectiviteit is 1 wanneer C_{afvoer} gelijk is aan $C_{\text{dierniveau}}$.

De ventilatie-effectiviteit zal niet voor alle vervuilende stoffen gelijk zijn. Bij gassen (bijvoorbeeld CO_2 , NH_3) kan als gevolg van onder andere dichtheidsverschillen en productielocatie de verdeling in een afdeling verschillend verlopen. Bij luchtstromingen zoals die in afdelingen meestal plaatsvinden zal het verschil in ventilatie-effectiviteit voor de verschillende gassen echter klein zijn. De ventilatie-effectiviteit voor stof zal meestal wel verschillen van de ventilatie-effectiviteit voor gassen. De verspreiding van stof in de lucht zal anders verlopen dan die van gassen, omdat stofdeeltjes veel zwaarder zijn dan lucht.

Het is ook mogelijk de ventilatie-effectiviteit voor temperatuur te bepalen. Als de temperatuur in de afgevoerde lucht lager is dan de temperatuur bij het dier (ventilatie-effectiviteit < 1) is er meer ventilatie nodig, als de temperatuur van de afgevoerde lucht hoger

is dan de temperatuur op dierniveau (ventilatie-effectiviteit > 1) is er minder ventilatie nodig.

5.2 Statische energiebalans over een afdeling

In deze paragraaf wordt een afdeling in een varkensstal fysisch doorgerekend. Eerst worden alle energiestromen in beeld gebracht. Vervolgens wordt behandeld hoe dat resulteert in een binnentemperatuur en een ventilatiedebiet. Uitgangspunt bij deze berekening is dat de lucht in de afdeling homogeen gemengd is, dus op alle locaties in de afdeling dezelfde temperatuur heeft. Verder wordt in deze beschouwing warmte-opslag in gebouw en constructie niet meegenomen (dat maakt het een statische energiebalans).

5.2.1 Energiestromen

De belangrijkste energiestromen (warmtestromen) in een varkensstal zijn de warmteproductie van de dieren, de afvoer van warmte met de ventilatielucht en warmte-uitwisseling met de omgeving via muren, ramen, plafond en vloer. Eventueel kan via verwarming extra energie worden toegevoegd. Hieronder worden de energiestromen aan de hand van fysische wetmatigheden gekwantificeerd.

Warmteproductie van de zeugen

Voor een inschatting van de warmteproductie van zeugen zijn vele modellen beschikbaar. Een belangrijke invloedvariabele is in ieder geval de voeropname. Uitgaande van een normale voeropname kunnen hiervoor de getallen uit het Handboek voor de Varkenshouderij (1993) worden gebruikt. Vóór en tijdens het werpen is de warmteproductie 180 W per zeug, en tijdens de lactatie, wanneer de zeugen weer volop voer opnemen, 250 W per zeug. De invloed van de omgevingstemperatuur op de voelbare warmteproductie van de zeugen is hierin niet meegenomen.

Afvoer van warmte via de ventilatielucht

De hoeveelheid energie die afgevoerd wordt via de ventilatielucht hangt af van het temperatuurverschil tussen de binnenkomende en uitgaande lucht en het ventilatiedebiet.

Met behulp van de volgende formule kan de grootte van de stroom berekend worden:

Formule 2:

$$Q_{vent} = \Phi_{lucht} \cdot (\rho c_p)_{lucht} \cdot (T_{in} - T_{uit})$$

waarin:

Q_{vent}	= energiestroom via ventilatie	(W)
Φ_{lucht}	= luchtdebiet	(m ³ /s)
$(\rho c_p)_{lucht}$	= volumetrische warmte-capaciteit van lucht	(J/m ³ K)
T_{in}	= temperatuur van de binnenkomende lucht	(°C)
T_{uit}	= temperatuur van de uitgaande lucht	(°C)

In praktijksituaties wordt de hoeveelheid afgevoerde warmte vooral geregeld via ventilatie. Wanneer er een klein temperatuurverschil ($T_{in} - T_{uit}$ is klein) tussen binnenkomende en uitgaande lucht is zal de afvoer van warmte dus gering zijn. Om hiervoor te compenseren zal er meer geventileerd worden (Φ_{lucht} wordt groter), waardoor de warmte-afvoer weer toeneemt.

Warmte-uitwisseling met de omgeving via muren, ramen, plafond en vloer

Wanneer er een temperatuurverschil is tussen de afdeling en haar omgeving zal er energie gaan stromen door de constructie heen. De grootte van de energiestroom kan worden berekend met de volgende formule:

Formule 3:

$$Q_{omg} = k \cdot A \cdot dT$$

waarin:

Q_{omg}	= warmtestroom door een bepaald oppervlak (b.v. muur, raam)	(W)
k	= warmtedoorgangscoëfficiënt horend bij het oppervlak	(W/m ² K)
A	= grootte van het oppervlak	(m ²)
dT	= temperatuurverschil tussen de twee zijden van het vlak	(°C)

Formule 3 kan worden uitgewerkt voor de verschillende oppervlakken tussen de afdeling en haar omgeving. De waarde van k wordt bepaald door de isolerende werking en de dikte van het materiaal. Ook kan met formule 3 het warmteverlies door de vloer worden bepaald, energie stroomt dan naar het grondwater met een temperatuur van circa 10 graden.

Warmteproductie door de verwarming

Wanneer het in een afdeling te koud wordt gaat de verwarming aan. Bij een optimale regeling zal de afgegeven hoeveelheid warmte voldoende zijn om de afdeling op de gewenste temperatuur te houden. Daarnaast wordt in een kraamafdeling ook veel warmte toegevoerd via de biggennestverwarming (instelbare keramiekstralers 100 - 250 W -> verder aangenomen 150 W). Deze brandt onafhankelijk van de energiebehoefte van de afdeling.

52.2 Verschillen tussen plafondventilatie en mestpanventilatie

De afdelingen die in deze proef zijn onderzocht verschillen in warmte-uitwisseling met de omgeving en in warmte-afvoer via de ventilatie.

Ten eerste zal er bij mestpanventilatie met verlaagde instellingen minder worden geventileerd en dus minder warmte afgevoerd worden. Ten tweede zal door het voortraject de temperatuur van de ingaande lucht worden beïnvloed (paragraaf 4.1), waardoor het temperatuurverschil tussen ingaande en uitgaande lucht anders is. De verschillen in warmte-uitwisseling zitten met name in de vloer en het plafond. Bij plafondventilatie komt alle warmte die door het plafond verloren gaat ten goede aan de opwarming van de ingaande ventilatielucht. Dit is dus geen energieverlies. Bij mestpanventilatie is deze energie wel verloren. Daarom zijn de afdelingen in de praktijkproef voorzien van extra plafondisolatie. Bij warmteverliezen door de vloer is dit net omgekeerd. Een nauwkeurige beschrijving van de processen in het luchtkanaal onder de mestpan staat in de volgende paragraaf en in bijlage 2.

52.3 Resultaten statische energiebalans

Wanneer de hoeveelheid energie die de

afdeling inkomt gelijk is aan de hoeveelheid energie die de afdeling verlaat is de binnentemperatuur constant. Wanneer de energiestromen niet in balans zijn, warmt de afdeling op of koelt de afdeling af.

In een spreadsheet-programma zijn de formules voor de in paragraaf 5.2.2 genoemde energiestromen ingevoerd voor de afdelingen in de proef. Als de energiestromen in balans zijn, zijn ze opgeteld gelijk aan nul. De binnentemperatuur is als de te berekenen variabele genomen, Bijlage 2 gaat nader in op de achtergrond van de berekeningen

Belangrijke uitgangspunten waren: warmte-instraling door de zon is buiten beschouwing (hierbij is dus uitgegaan van een perfect geïsoleerd dak). Er is geen warmte-uitwisseling tussen de lucht boven het plafond en buiten via de golfplaten. De hoeveelheid ventilatie hangt volgens de instellingen af van de binnentemperatuur (hiervoor is uitgegaan van de instellingen van na het werpen (tabel 2)). De warmtedoorgangscoefficiënt van de mestpannen is bepaald aan de hand van meetgegevens van enkele dagen en constant verondersteld (bijlage 3). Voor de

berekeningen in dit hoofdstuk is voor de warmtedoorgang uitgegaan van de mestpan met een gescheiden water- en mestkanaal.

De resultaten van de berekeningen staan in tabel 12 en tabel 13.

Uit tabel 12 kan worden afgelezen wat de evenwichtstemperatuur zal zijn die zich in de afdeling in zal stellen en welk ventilatiedebiet daarbij hoort. In de afdelingen met mestpanventilatie zal de temperatuur dus iets hoger zijn. Dit is in de praktijkproef ook waargenomen. Dit heeft tot gevolg dat het debiet in de afdeling met mestpanventilatie en verlaagde instellingen hoger is dan in de afdeling met plafondventilatie.

Ook staan de waarden van de verschillende energiestromen vermeld. De warmtetoevoer in het voortraject en het ventilatiedebiet hebben bij de mestpanventilatie de opwarming of afkoeling van de lucht onder de mestpan tot gevolg. Bij plafondventilatie is de grootte van de energiestroom door het plafond bepalend voor de hoeveelheid opwarming in het voortraject. Bij mestpanventilatie is de stroom door het plafond ondanks de extra isolatie even groot als bij plafondventilatie. Dit heeft te maken met het grotere plafond-

Tabel 12: Resultaten van berekening van een koude periode (centrale gang is 7°C) met de statische energiebalans

	mestpanventilatie met verlaagde instellingen	mestpanventilatie met traditionele instellingen	plafondventilatie met traditionele instellingen
afdelingstemperatuur (°C)	23,7	23,2	22,7
ventilatie per hok (m³/h)	75	78	63
<i>warmtestromen (W)</i>			
zeugen	3.000	3.000	3.000
keramiekstralers	1.800	1.800	1.800
ventilatie	-5.003	-5.065	-3.980
grond	-248	-233	-462
wanden	-488	-474	-358
plafond	-769	-746	-762
voortraject			
luchtkanaal	1.708	1.707	
boven plafond			762
Totaal	0	0	0

Tabel 13: Resultaten van berekening van een warme periode (centrale gang is 25°C) met de statische energiebalans

	mestpanventilatie met verlaagde instellingen	mestpanventilatie met traditionele instellingen	plafondventilatie met traditionele instellingen
afdelingstemperatuur (°C)	29,5	28,2	29,0
ventilatie per hok (m³/h)	175	250	250
<i>warmtestromen (W)</i>			
zeugen	3.000	3.000	3.000
keramiekstralers	1.800	1.800	1.800
ventilatie	-3.144	3.200	-4.018
grond	-1.092	1.047	-690
wanden	-131	-94	-92
plafond	-207	-148	-227
voortraject			
luchtkanaal	-226,	-312	
boven plafond			227
Totaal	0	0	0

oppervlak en het grotere temperatuurverschil bij mestpanventilatie.

Uitgangspunt bij de berekening was dat de biggennestverwarming wél aan bleef tijdens de warme omstandigheden. De evenwichtstemperatuur in de afdeling met mestpanventilatie en verlaagde instellingen is vergelijkbaar met de temperatuur in de afdeling met plafondventilatie. Dit heeft te maken met de afvoer van warmte in het voortraject (koeling), waardoor er met minder lucht een zelfde evenwichtstemperatuur gehaald wordt. Wanneer in een afdeling met plafondventilatie de maximumventilatie op 175 m³/h per kraamhok wordt gezet, wordt de evenwichtstemperatuur 31 °C.

5.3 Berekeningen met de statische energiebalans

De ontwikkelde statische energiebalans over een kraamafdeling met mestpanventilatie en een kraamafdeling met plafondventilatie kan worden gebruikt om energieberekeningen mee uit te voeren. In de volgende paragrafen wordt eerst de methode toegepast om het energieverbruik van de voorverwarming op de centrale gang in te schatten.

Daarna wordt de methode gebruikt om het energieverbruik te berekenen in verschillende uitgevoerde kraamafdelingen. Gegevens van het buitenklimaat zijn afkomstig uit de graadurentabel (In: Van Ouwkerk, 1999), waarin het aantal uren vermeld staat dat een bepaalde buitentemperatuur voorkomt in het Nederlandse klimaat.

Uit de meetresultaten is duidelijk geworden dat de afdelingen waarin de praktijkproef is uitgevoerd energetisch niet optimaal waren. Zo zou theoretisch het energieverbruik van de ventilatoren verder kunnen dalen wanneer een kleinere ventilator wordt toegepast. Vanwege de koelende werking bij mestpanventilatie is dit een verantwoorde keuze. Daarnaast heeft voorverwarming van de lucht tot 7°C extra veel energie gekost en heeft de biggennestverwarming zeer lang aan gestaan. De haalbare energiebesparing bij mestpanventilatie met verlaagde instellingen wijkt dan ook af van de energiebesparing die in de afdelingen uit de praktijkproef gemeten is.

5.3.1 Energiegebruik centrale gang
Het energieverbruik op de centrale gang is ingeschat aan de hand van een theoretische

berekening (bijlage 4). Uitgangspunt is dat de centrale-gangtemperatuur niet lager mag worden dan 7°C. Hierbij zijn het ventilatie-debiet en de afdelingstemperatuur bepaald met behulp van de statische energiebalans. De resultaten van de berekening staan in tabel 14.

Bij een temperatuur in de centrale gang van 7°C wordt de afdelingstemperatuur in alle gevallen hoger dan de begintemperatuur voor ventilatie (zie tabel 14), waardoor er meer dan minimaal wordt geventileerd. Alle ventilatielucht wordt echter opgewarmd tot 7°C, wat energetisch dus zeer ongunstig is. Met name in de afdelingen met mestpan-

ventilatie is de ventilatie fors hoger dan het ingestelde minimum, waardoor de energiekosten om de centrale gang op 7°C te houden fors zijn.

5.3.2 Energiegebruik ruimteverwarming

Voor de berekening is gebruik gemaakt van de statische energiebalans uit paragraaf 5.2 en bijlage 2. In bijlage 5 is een overzicht van de uitgevoerde berekening te zien. De resultaten voor het energiegebruik van de ruimteverwarming staan in tabel 15.

5.3.3 Energiegebruik ventilatie

Als gevolg van minder luchtverplaatsing door de ventilatoren kan energie bespaard

Tabel 14: Resultaten van berekening van de energiebehoefte en energiekosten voor de centrale gang (7°C) per kraamhok per jaar (bij 66 cent per m³ aardgas, ketel- en leidingverliezen 20%)

	mestpanventilatie met verlaagde instellingen	mestpanventilatie met traditionele instellingen	plafondventilatie met traditionele instellingen
afdelingstemperatuur(°C)	23,7	23,2	22,7
ventilatie per hok (m ³ /h)	75	78	63
aardgas (m ³) ^r	43,2	45,7	35,9
kosten (f)	28,51	30,18	23,67

Tabel 15: Resultaten van de berekening voor energiegebruik ruimteverwarming (per kraamhok per jaar)

	gasverbruik (m ³)	kosten (f)
mestpanventilatie verlaagde instellingen	0,19	0,13
mestpanventilatie traditionele instellingen	2,92	1,93
plafondventilatie	19,8	13,08

Tabel 16: Resultaten van de berekening voor energiegebruik ventilatie met triac-regeling (per kraamhok per jaar)

	elektriciteit (kWh) kosten (f)	
mestpanventilatie verlaagde instellingen, traditionele ventilator	69,6	13,92
mestpanventilatie verlaagde instellingen, kleinere ventilator	55,6	11,13
mestpanventilatie traditionele instellingen, traditionele ventilator	71,6	14,31
plafondventilatie, traditionele ventilator	71,2	14,23

worden voor elektriciteit. Door de lagere normen voor de minimale ventilatie als gevolg van een efficiënter gebruik van de lucht kan tevens energie voor verwarming bespaard worden. De theoretisch te halen energiebesparing is berekend. Met behulp van de statische energiebalans is bepaald wat het ventilatiedebiet in een kraamafdeling is bij verschillende buitentemperaturen en bij verschillende productiestadia. Een aanname is dat er geen verschil is in tegendruk bij de verschillende ventilatiesystemen is. In tabel 16 staan de berekende energiekosten voor ventilatie.

Als de ventilator met triac-regeling gedimensioneerd is op conventionele ventilatienormen en slechts de instellingen worden verlaagd, zal het voordeel ten opzichte van plafondventilatie zeer gering zijn (f 0,31 per kraamhok per jaar). Dit heeft te maken met de minder gunstige efficiëntie van de triac-geregelde ventilator in het lage werkgebied waardoor het opgenomen vermogen per kubieke meter verplaatste lucht stijgt. Wanneer de capaciteit van de ventilator aangepast wordt aan de lagere maximale ventilatiebehoefte is het te halen voordeel groter (f 3,10 per kraamhok per jaar).

5.4 Overzicht energiegebruik in kraamafdelingen

In de volgende paragrafen wordt een overzicht gegeven van de verschillende gemeten en berekende energiestromen.

Elektrisch energiegebruik ventilatie

Het gemeten elektrisch energiegebruik lag bij de drie afdelingen zeer dicht bij elkaar. Bij mestpanventilatie met verlaagde instellingen was het energiegebruik 69 kWh per kraamhok per jaar (berekend 69,6 kWh), bij mestpanventilatie met traditionele ventilatie-instellingen was het gemeten verbruik 79 kWh per kraamhok per jaar (berekend 71,6 kWh), en in de afdeling met plafondventilatie was het energiegebruik 75 kWh per kraamhok per jaar (berekend 71,2 kWh). De metingen en de berekeningen laten een vergelijkbaar resultaat zien. De haalbare energiebesparing door het hanteren van verlaagde instellingen is zeer gering. Bij toe-

passing van een kleinere ventilator kan volgens de berekening de besparing op ventilatie-energie oplopen tot 22% (15,6 kWh). Dit is f 3,10 per kraamhok per jaar.

Elektrisch energiegebruik biggennestverwarming

Tijdens de proef is geen effect van het ventilatiesysteem op het aantal benodigde brand-uren van de biggennestverwarming aangetoond. Het gemeten energiegebruik was gemiddeld 696 kWh per kraamhok per jaar, wat zeer hoog is. Dit is veroorzaakt door de werkwijze waarbij de biggennestverwarming lang aan was. In de praktijk wordt vaak een andere werkwijze gehanteerd, waarbij de biggennestverwarming veel korter aan staat. Hiervoor is met behulp van een berekening het energiegebruik bepaald op 324 kWh per kraamhok per jaar (f 64,80).

Bij toepassing van vloerverwarming met warm water als biggennestverwarming zal dit anders zijn.

Energiegebruik ruimteverwarming

Het energiegebruik voor de afdelingsverwarming tijdens de rondes in de proef was nihil. Bij voorverwarming van de lucht op de centrale gang tot 7°C is de aanwezigheid van ruimteverwarming in een kraamafdeling dan ook niet nodig. Ook de berekeningen geven dit aan. De stookgrens komt in geen enkele geval boven de 7°C (bijlage 5).

Zonder voorverwarming bedragen de berekende verwarmingskosten f 0,13 bij mestpanventilatie met verlaagde instellingen, f 1,93 bij mestpanventilatie met traditionele instellingen en f 13,08 bij plafondventilatie per kraamhok per jaar.

Wanneer de biggen na het spenen nog enige tijd blijven liggen in het kraamhok is de aanwezigheid van ruimteverwarming naast een voorverwarming op de centrale gang wel nodig.

Energiegebruik centrale gangverwarming

De berekende verwarmingskosten om de centrale gang op 7°C te houden zijn een stuk hoger bij de afdelingen met mestpanventilatie dan bij de afdeling met plafondventilatie. Bij mestpanventilatie met verlaagde instellingen zijn die berekende kosten

ruim f 29,-, bij mestpanventilatie met traditionele instellingen bijna f 30,- en bij plafondventilatie f 24,- (tabel 14).

In tabel 17 is een overzicht weergegeven waarin de verschillende posten van het energiegebruik, zoals die in deze proef zijn onderzocht, staan opgesomd.

Energiegebruik voor verlichting is in dit onderzoek niet meegenomen. Uit eerdere onderzoeken blijkt dat dit voor zeugenbedrijven gemiddeld 12% is van het totale energiegebruik (Hoste, 1995).

Voor mestpanventilatie en plafondventilatie met directe luchtinlaat staan de posten van het energiegebruik in tabel 18.

De berekende totale besparing bij mestpanventilatie met directe luchtinlaat ten opzichte van plafondventilatie met directe luchtinlaat komt dan uit op f 16,05 per kraamhok per jaar.

Voorverwarming op de centrale gang is in principe bij zowel mestpanventilatie als plafondventilatie overbodig. Bij systemen waar bij de lucht hoog in de afdeling wordt gebracht kan het echter wel gewenst zijn om de lucht enigszins op te warmen voordat deze boven het plafond komt, om het risico van koude luchtval en tocht te minimaliseren.

5.5 Dynamische energiebalans over een ondergronds luchtkanaal

In paragraaf 5.2 zijn de optredende processen statisch beschreven. In de praktijk zal het echter een dynamisch proces zijn, omdat allerlei parameters steeds veranderen in de tijd (bijvoorbeeld de buitentemperatuur). Voor een meer nauwkeurige benadering is een dynamisch model nodig. In een dynamisch model worden zaken als warmteopslag in muren en in de grond, met een langzame opwarming of afkoeling van een gebouw tot gevolg, wel meegenomen.

Tabel 17: Energiegebruik van de afdelingen in de praktijkproef per kraamhok per jaar

ventilatie-instellingen	mestpanventilatie verlaagd		mestpanventilatie traditioneel		plafondventilatie traditioneel	
centrale gang (m ³ gas, f) b ¹	43,2	28,51	45,7	30,18	35,9	23,67
ventilatie (kWh, f)	69	17,25	79	19,75	75	18,75
biggenest (kWh, f)	696	139,20	696	139,20	696	139,20
Totale energiekosten (f)	184,96		189,13		181,62	

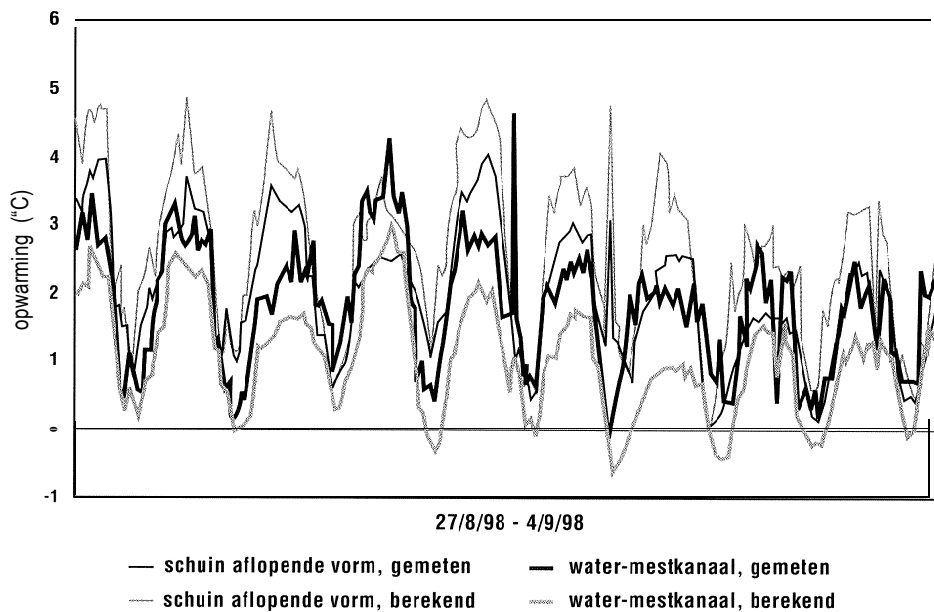
¹ b = berekend: a_g = gemeten

Tabel 18: Berekend energiegebruik optimale (directe luchtinlaat, kleinere ventilator) afdeling met mestpanventilatie en plafondventilatie per kraamhok per jaar

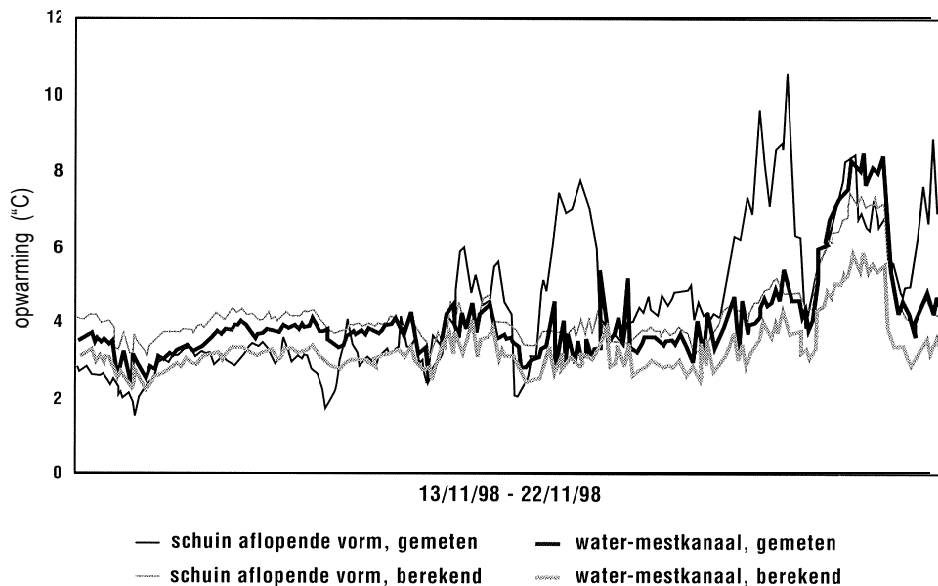
	mestpanventilatie		plafondventilatie	
	energie	kosten	energie	kosten
ventilatie (kWh, f)	55,6	11,13	71,2	14,23
verwarming (m ³ gas, f)	0,19	0,13	19,8	13,08
biggenest (kWh, f)	324	64,80	324	64,80
Totale energiekosten (f)	76,06		92,11	

Bij het maken van een dynamisch model geldt grotendeels dezelfde theorie als beschreven in paragraaf 5.2 en in bijlage 2. De extra theorie die gebruikt is staat beschreven in bijlage 5. De resultaten van

het dynamische model van het luchtkanaal onder de mestpannen en de metingen van enkele willekeurige dagen staan in de figuren 10 en 11. Hierbij is onderscheid gemaakt tussen de twee types mestpannen



Figuur 10: Model versus meting in een warme periode



Figuur 11: Model versus meting in een koude periode

die in het onderzoek betrokken waren (met schuin aflopende vorm en met gescheiden water-mestkanaal). De conditionering van de lucht onder de mestpannen wordt hierdoor beïnvloed.

Uit de figuren 10 en 11 kan worden afgelezen dat de met het model berekende waarden een vergelijkbaar beeld laten zien als de gemeten waarden. Door een verdere verfijning van het model zullen de verschillen tussen modelresultaat en gemeten resultaat kleiner worden. Hiervoor dient een meer nauwkeurige fysische beschrijving van de

tussenvloer tussen het luchtkanaal en de afdeling gemaakt te worden, waarbij onder andere rekening gehouden dient te worden met het oppervlak van de werkgang, de luchtstroming onder de roosters en het mestniveau in de mestpannen. De resultaten uit het huidige model geven echter al duidelijk een goede richting aan. Het model is geschikt om de conditionerende werking van systemen met een verlaagde luchtinlaat in te schatten, waardoor beslissingen ten aanzien van de maximaal te installeren ventilatiecapaciteit en de benodigde hoeveelheid ruimteverwarming kunnen worden onderbouwd.

6 DISCUSSIE EN CONCLUSIES

Het luchtinlaatsysteem dat beproefd is in dit onderzoek is gekoppeld aan de toepassing van mestpannen van een Groen-Labelsysteem. De resultaten kunnen echter voor een groot deel vertaald worden naar vergelijkbare luchtinlaatsystemen bij andere Groen-Labelsystemen en bij andere hokuitvoeringen. Dit is mogelijk bij hokken voorzien van een dichte vloer vóór in het kraamhok. De ruimte onder de dichte vloer dient dan als luchtinlaatkanaal. Het conditionerend effect van dit luchtkanaal kan echter afwijken van de waargenomen conditionering in dit onderzoek vanwege een afwijkende warmte-doorgang van de dichte vloer in verhouding met de mestpan, en vanwege een geringer contactoppervlak tussen de binnenkomende lucht en de ondervloer.

6.1 Klimaat

Het klimaat in de proefafdelingen was goed. De luchtverdeling in de afdelingen met mestpanventilatie was gelijkmatig over alle hokken en onafhankelijk van het ventilatie-debiet. De geïnstalleerde ventilatiecapaciteit in de drie afdelingen in de proef was onvoldoende om 250 m³/h per kraamhok te halen, wat wel de bedoeling was. In de afdeling met plafondventilatie was de afwijking met 11 m³/h per kraamhok gering (239 m³/h). In de afdelingen met mestpanventilatie waren de verschillen groter (maximaal 209 en 227 m³/h per kraamhok). Voor het proefresultaat is dit echter geen groot probleem, omdat gebleken is dat de maximale ventilatie lager mag zijn vanwege de koelende werking van het luchtkanaal onder de mestpannen. Een kleine invloed op het proefresultaat kan veroorzaakt zijn door het verschil in stalinhoud tussen de afdelingen met mestpanventilatie (15,3 m³ per zeug) en de afdeling met plafondventilatie (10,2 m³ per zeug). Een grotere inhoud per zeug betekent dat er een grotere buffer in de afdeling aanwezig is en dus is er een meer constante binnentemperatuur. Daarbij leidt een groter oppervlak van muren en ramen tot grotere warmteverliezen.

Tijdens koude periodes was de temperatuur in de afdelingen met mestpanventilatie

hogere dan in de afdeling met plafondventilatie. Dit had te maken met de voorverwarming van de lucht op de centrale gang tot 7°C. Als de lucht met 7°C het luchtkanaal onder de mestpannen in gaat, verwarmt deze daar nog zeker 5°C op. De temperatuur van de in de afdeling binnenkomende lucht wordt dan dus 12°C, wat een afdelingstemperatuur tot gevolg heeft die boven de begintemperatuur van de ventilatie ligt (blijkt uit zowel meting als berekening). Tijdens koude periodes wordt er dus meer geventileerd in de afdelingen met mestpanventilatie. Als de lucht niet voorverwarmd zou worden wordt er minder geventileerd.

Het voorgaande heeft tot gevolg gehad dat tijdens de praktijkproef nauwelijks op het niveau van minimumventilatie is geventileerd (zie figuur 7). Of het minimum-ventilatie-niveau van 28 m³/h en later 35 m³/h per kraamhok voldoende is kan dan ook niet direct uit de luchtkwaliteitsmetingen van de praktijkproef worden geconcludeerd. Gezien de gemeten lage concentraties van vervuillende stoffen in de lucht (tabel 6) in de afdelingen met mestpanventilatie en de waargenomen luchtstroming is er bij de berekeningen in hoofdstuk 5 van uitgegaan dat de genoemde luchtdebieten bij lagere inlaattemperaturen niet leiden tot een overschrijding van de normen voor de luchtkwaliteit. Deze gedachte wordt ondersteund door de theorie van de ventilatie-effectiviteit (paragraaf 5.1).

In een vervolgonderzoek is het gewenst de buitenlucht direct onder de mestpannen te brengen, waarbij het lagere ventilatieniveau wel gehaald zal worden en het energiegebruik omlaag gaat.

De variatie in binnentemperatuur was gedurende de warmere maanden bij plafondventilatie wat groter dan bij mestpanventilatie. Dit werd veroorzaakt door hogere pieken in de afdelingstemperatuur gedurende de warmste uren op een dag. Tijdens koelere maanden was de afdelingstemperatuur bij beide ventilatiesystemen even stabiel.

6.1.1 Stofconcentratie

De verschillen in gemeten stofconcentratie bij de drie proefbehandelingen zijn minimaal. Een reden hiervoor kan zijn dat in de proefafdelingen weinig verschil in ventilatie-debiet is gerealiseerd (paragraaf 4.12). Doorgaans resulteert een hoger ventilatieniveau in een lagere stofconcentratie (Takai, 1987; Heber et al., 1988). In dit onderzoek was de stofconcentratie in de afdelingen met mestpanventilatie iets hoger dan in de afdeling met plafondventilatie. Vanwege verstrengeling tussen afdeling en ventilatiesysteem en verschillen in voersysteem tussen de afdelingen is niet bekend wat de invloed van het ventilatiesysteem en het daaraan gekoppelde luchtbewegingspatroon op de stofconcentratie in de werkgang was.

Er zijn nog geen goede grenswaarden vastgesteld voor blootstelling aan stof in stallen. Op basis van epidemiologisch onderzoek heeft Donham (1999) als grenswaarden voorgesteld 2,4 mg/m³ voor totaal stof en 0,16 mg/m³ voor respirabel stof. Op basis van de concentratie endotoxinen in het stof in stallucht kan een No Effect Level (NEL) worden verwacht van ongeveer 1 mg/m³ (Roelofs en Binnendijk, publicatie in voorbereiding).

De gemeten concentraties inhaleerbaar stof bij plafondventilatie zijn ongeveer de helft van de grenswaarden volgens Donham (1999) en zijn ongeveer gelijk aan de genoemde 1 mg/m³. De gemeten concentraties bij mestpanventilatie zijn wat hoger. De gemeten hoeveelheden respirabel stof voldoen redelijk aan de voorgestelde normen. Hierbij moet echter worden bedacht dat de stofconcentratie overdag hoger is dan 's nachts (Roelofs en Binnendijk, publicatie in voorbereiding). Hierdoor zullen varkenshouders die hele dagen in dergelijke stallen werken aan iets meer stof worden blootgesteld dan volgens de voorgestelde grenswaarden als acceptabel kan worden beschouwd.

6.2 Energiegebruik en ruimteverwarming

Het gemeten energiegebruik van de keramiekstralers als biggennestverwarming is met 696 kWh per kraamhok per jaar zeer hoog. De energiekosten bedragen ongeveer

f 1,- per biggenlamp per branddag. Deze post bedroeg tussen de 60 en 90% van de totale energiekosten in een kraamafdeling. Het energiegebruik van de biggennestverwarming was gelijk bij alle proefbehandelingen. In de praktijk zal als gevolg van een andere werkwijze de biggennestverwarming vaak korter branden. Bij acht branddagen op 150 Watt is het energiegebruik 324 kWh per kraamhok per jaar (f 0,72 per branddag per lamp).

Door de voorverwarming van de lucht op de centrale gang tot 7°C wordt er meer geventileerd dan minimaal, wat bij alle proefbehandelingen negatieve gevolgen heeft voor het energiegebruik op de centrale gang. Beter is om een lagere centrale-gangtemperatuur of een directe luchtinlaat van buiten toe te passen. Wanneer buitenlucht direct onder de mestpannen komt zijn er geen problemen te verwachten ten aanzien van de afdelingstemperatuur.

De berekende energiekosten van een afdeling met mestpanventilatie met directe luchtinlaat van buiten, een ventilator die is berekend op de lagere normen en biggen die niet na spenen in de kraamafdeling blijven liggen, zijn f 76,06 per kraamhok per jaar. Bij plafondventilatie met directe luchtinlaat bedragen deze kosten f 92,11. De besparing bedraagt in dat geval f 16,05 per kraamhok per jaar.

Opgemerkt dient te worden dat bij de berekeningen van de kosten voor elektriciteit in dit onderzoek uitgegaan is van een kWh-prijs van f 0,20 (KWIN, 1999). Het gemiddelde tarief is in werkelijkheid afhankelijk van de stroomleverancier, het tijdstip van afnemen (dal- en piektarief) en het totale verbruik op een bedrijf (grootverbruiktarief). Ook heeft het afnamepatroon invloed op de kWh-prijs. Voor de kosten voor verwarming is gerekend met een gasprijs van 66 cent per m³ (KWIN, 1999). Ook hierin zijn variaties mogelijk. Tevens is standaard een efficiëntie van 80% in de berekeningen aangenomen. Dit is hoog en is afhankelijk van de uitvoering van de ketel en de leidingen (met name isolatie en lengte). Vooralsnog wordt ervan uitgegaan dat de energieprijzen komende tijd niet veel zullen veranderen.

6.3 Praktische ervaringen

In afdelingen met mestpanventilatie is het zinvol om het plafond extra te isoleren. Warmte die door het plafond verloren gaat bij plafondventilatie komt weer terug met de ventilatielucht en is dus niet verloren. Bij mestpanventilatie is deze warmte wel verloren en dient dus beperkt te worden. De reinigbaarheid van de luchtkanalen onder de mestpannen gaf geen grote problemen. Toch is het verstandig rekening te houden met een werkbaar reinigingsmogelijkheid van luchtkanalen om problemen met vervuiling te voorkomen.

6.4 Statische en dynamische energiebalansen

Met de statische energiebalans is het mogelijk om aan de hand van dimensies en uitvoering van een afdeling en een buitentemperatuur een inschatting te geven van de binnentemperatuur die zich zal instellen. De resultaten van de metingen en de berekeningen laten beide een vergelijkbaar beeld zien van de binnentemperatuur tijdens een warme en een koude periode, wat de correctheid van de berekening ondersteunt. De statische energiebalans kan prima worden gebruikt om het energiegebruik van de verschillende posten te berekenen. Bij het dynamische model van een luchtkanaal onder een mestpan worden de optredende processen beschreven met hun dynamiek in de tijd. Met deze berekeningsmethode kan een exacter beeld verkregen worden van het temperatuurverloop in de

tijd. Verdere verfijning van het model leidt tot een grotere nauwkeurigheid.

6.5 Economische gevolgen

De vergelijking in deze paragraaf betreft een afdeling met mestpanventilatie met directe luchtinlaat en een afdeling met plafondventilatie, ook met directe luchtinlaat. In beide afdelingen worden de biggen direct na spenen verplaatst.

De extra jaarkosten ten gevolge van de hogere investeringen bedragen f 79,91 per kraamhok bij een afdeling van gelijke grootte waarbij het luchtkanaal geïntegreerd is in de mestpan. Bij toepassing van grotere afdelingsmaten in verband met een extra luchtinlaatgang vóór de hokken bedragen de meerkosten van mestpanventilatie f 126,54 per jaar per kraamhok (Van Zeeland en Verdoes, 1998).

Uit dit onderzoek is gebleken dat er f 3,10 per kraamhok per jaar aan energiekosten voor ventilatie bespaard kan worden. De besparing op verwarmingskosten bedraagt f 12,95 per kraamhok per jaar.

In tabel 19 is een overzicht van de extra jaarkosten weergegeven.

In de meest optimale situatie bedragen de extra jaarkosten van een afdeling met mestpanventilatie ten opzichte van een traditionele afdeling met plafondventilatie zonder Groen-Labelsysteem bijna f 70,- per kraamhok

Toepassing van mestpannen maakt een combinatie van een Groen-Labelsysteem

Tabel 19: Extra jaarkosten van mestpanventilatie ten opzichte van plafondventilatie zonder Groen Label (per kraamhok per jaar)

	luchtkanaal geïntegreerd in mestpan (f)	extra ventilatiegang vóór de hokken (f)
hogere jaarkosten van hogere investering	79,91	126,54
jaarkosten extra plafondisolatie	3,64	4,04
energiebesparing ventilatie en centrale gang	- 3,10	- 3,10
energiebesparing afdelingsverwarming	- 12,95	- 12,95
extra jaarkosten mestpanventilatie	67,50	114,53

met een ventilatiesysteem mogelijk. De extra jaarkosten van het Groen-Labelsysteem kunnen dan deels worden terugverdiend door lagere kosten voor klimaatbeheersing in de stal. Dit maakt mestpannen een interessant alternatief om emissiereductie toe te passen. De jaarkosten per kilogram emissiereductie bedragen ongeveer f 12,-.

6.6 Conclusies

- Het praktisch functioneren van mestpanventilatie is goed.
- Bij mestpanventilatie kunnen de normen voor maximumventilatie 30% omlaag ten opzichte van de traditionele instellingen (van 250 naar 175 m³/h per kraamhok) zonder dat dit ten koste gaat van de kwaliteit van het stalklimaat.
- De stofconcentratie in de kraamafdelingen waarin het onderzoek is uitgevoerd ligt ongeveer op het niveau van voorgestelde grenswaarden die voor mensen acceptabel worden geacht.
- Verlaging van de ventilatie-instellingen bij mestpanventilatie heeft niet geleid tot verhoging van de stofconcentratie.
- 30 % minder ventilatie en de conditionerende werking van het luchtkanaal onder de mestpan leiden tot energiebesparing. Uit de metingen is gebleken dat de energiekosten f 15,- per kraamhok per jaar lager zijn.
- Voorverwarming tot 7°C kost veel energie. In plaats daarvan kan voorverwarmd worden tot een lager temperatuurniveau of een directe luchtinlaat onder de mestpannen of boven het plafond worden toegepast.
- De extra jaarkosten van mestpanventilatie ten opzichte van plafondventilatie zonder Groen-Labelsysteem zijn afhankelijk van de omstandigheden en kunnen liggen tussen de f 68,- en f 115,- per kraamhok.
- Met de ontwikkelde theoretische modellen worden de resultaten uit de praktijkproef ondersteund. De modellen zijn geschikt als hulpmiddel om voorspellingen te doen voor qua opzet vergelijkbare systemen bij andere diercategorieën. Ook geven ze onderbouwing voor keuzes in de te installeren ventilatie- en verwarmingscapaciteit.

LITERATUUR

Donham, K. en D. Cumro 1999. Setting *maximum dust exposure levels for people and animals in livestock facilities*. In: Congress proceedings of the international symposium on dust control in animal production facilities, May 30th - June 2nd, p. 93-110. Århus, Danmark.

European prestandard prENV1752 (final draft) 1994. *Ventilation for buildings - Design criteria for the indoor environment*. 55 p.

Feijen, J.J. 1987. *Inleiding tot de warmte-techniek*. Tweede druk, 175 pp.

IKC-L 1993. *Handboek voor de Varkenshouderij*. Informatie en Kennis Centrum, Wageningen

Heber, A.J., M. Stroik, J.L. Nelssen en D.A. Nichols 1988. *Influence of environmental factors on concentrations and inorganic content of aerial dust in swine finishing buildings*. In: American society of agricultural engineers (31), nr. 3, p. 875-881.

Hoste, R. 1995. *Oorzaken van verschillen in energieverbruik op varkensbedrijven*. Publicatie 3.161, Landbouw Economisch Instituut (LEI-DLO), Den Haag.

Klooster, C.E. van 't, P.F.M.M. Roelofs, G.P. Binnendijk en M.J.M. Duijf 1991. *Verlagen van het stofgehalte van de lucht in varkensstallen; resultaten anno 1991*. Proefverslag

P 1.70, Proefstation voor de Varkenshouderij, Rosmalen

Kwantitatieve Informatie voor de Veehouderij (K WIN) 1999.

Ouwerkerk, E.N.J. van 1999. *ANIPRO klimaat- en energiesimulatiesoftware voor stallen*. IMAG Nota V99-109. Wageningen, 87 pp.

Roelofs, P.F.M.M. en G.P. Binnendijk 2000. *Gezondheidseffecten van stof in varkensstallen en de invloed van een aangepast ventilatiesysteem op de stofconcentratie*. Praktijkonderzoek Varkenshouderij, Rosmalen, Proefverslag in voorbereiding.

Takai, H. 1987. *Forekomst af støv i svinestalde, samt mulighederne for at reducere støvmængden*. In: proceedings seminar 'Den rullende afprøvnings staldtekniske opgaver, arbejdsmiljø i svinestalde, 16-17 september, Grenå, Denemarken.

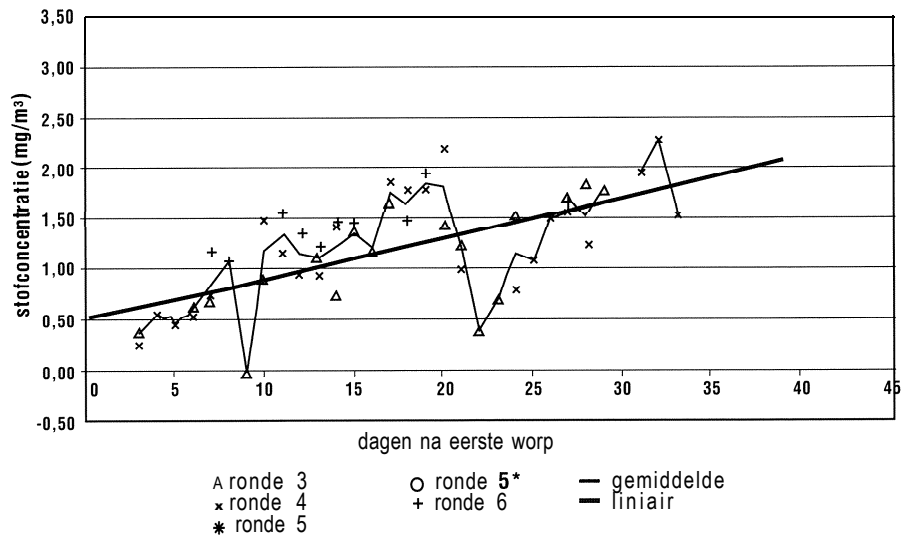
Werkgroep klimaatsnormen 1989. *Klimaatsnormen voor varkens*. Proefverslag P 1.43, Proefstation voor de Varkenshouderij, Rosmalen.

Zeeland, A.J.A.M. van en N. Verdoes 1998. *Ammoniakemissie in kraamafdelingen met mestpannen*. Proefverslag P 1.201, Praktijkonderzoek Varkenshouderij, Rosmalen.

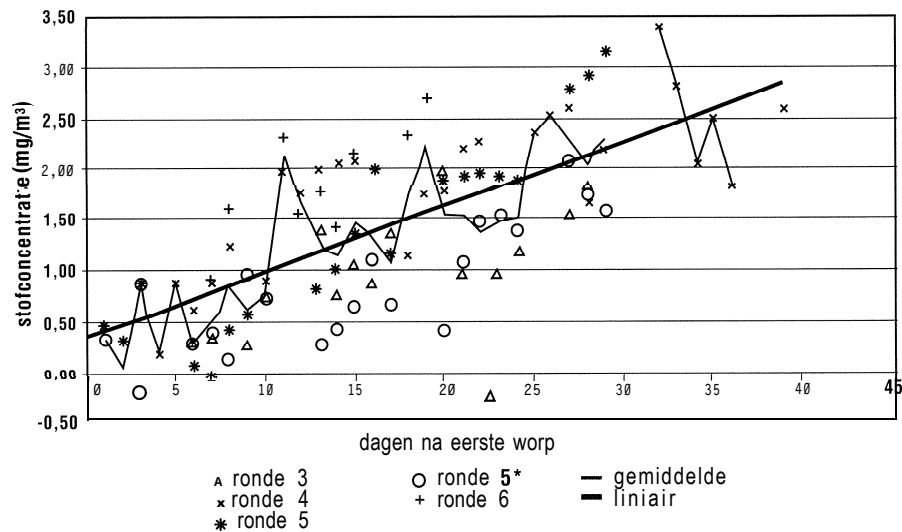
BIJLAGEN

Bijlage 1: Resultaten van de stofmetingen

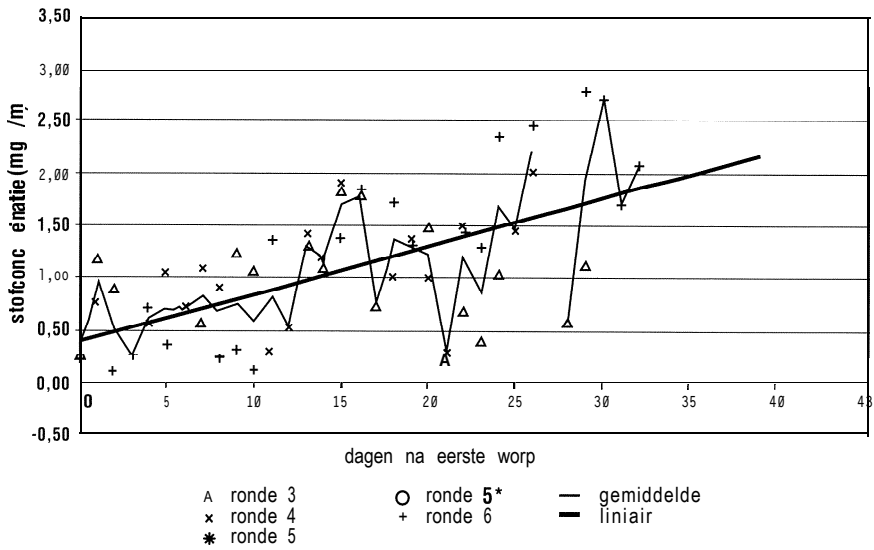
inhaleerbaar stof boven biggennest bij mestpanventilatie met verlaagde instellingen



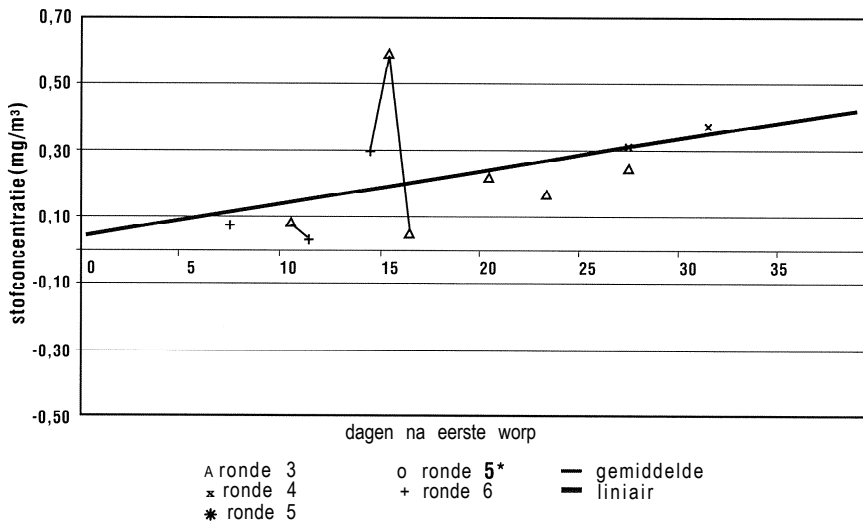
inhaleerbaar stof boven biggennest bij mestpanventilatie met traditionele instellingen



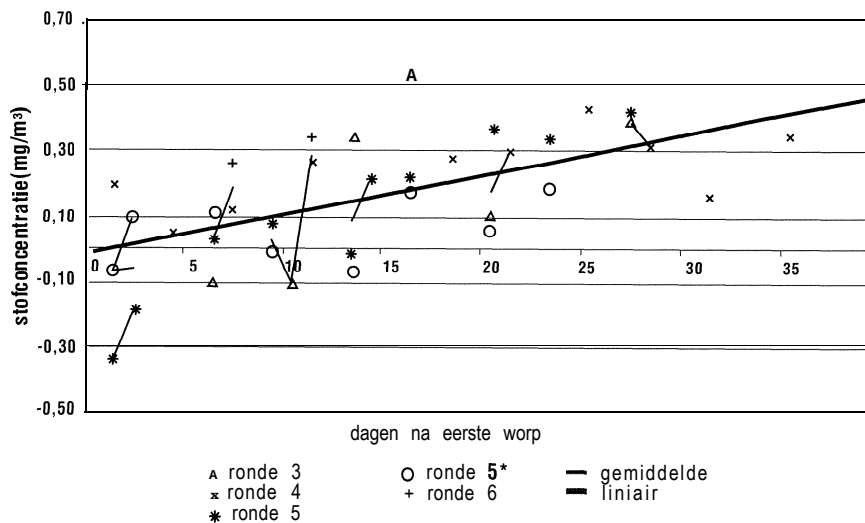
inhaleerbaar stof boven biggennest bij plafondventilatie



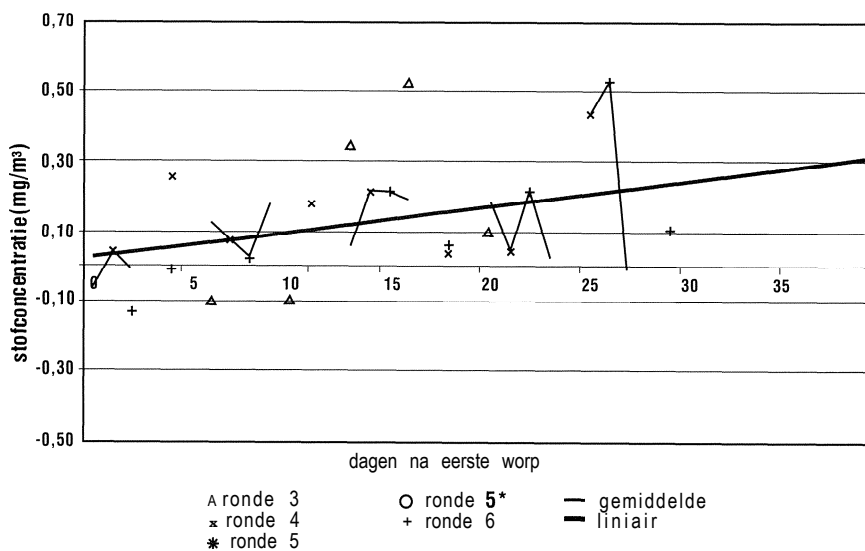
respirabel stof boven de controlegang bij mestpanventilatie met verlaagde instellingen



respirabel stof boven de controlegang bij mestpanventilatie met traditionele instellingen



respirabel stof boven de controlegang bij **plafondventilatie**



Bijlage 2: Berekening van de energiestromen voor statische energiebalans

In deze bijlage wordt nader toegelicht hoe de berekeningen uit paragraaf 5.2 zijn uitgevoerd

Warmtestroom door ventilatie

Formule B1:

$$Q_{vent} = \Phi_{lucht} \cdot (\rho c_p)_{lucht} \cdot (T_{in} - T_{uit})$$

waarin:

Q_{vent}	= hoeveelheid afgevoerde energie via ventilatie	(W)
Φ_{lucht}	= luchtdebiet	(m ³ /s)
$(\rho c_p)_{lucht}$	= volumetrische warmtecapaciteit van lucht	(J/m ³ K)
T_{in}	= temperatuur van de binnenkomende lucht	(°C)
T_{uit}	= temperatuur van de uitgaande lucht	(°C)

Voor T_{in} is de temperatuur van de centrale gang genomen. Dit betekent dat dus de energieafvoer door ventilatie vanuit voortraject en afdeling wordt berekend. T_{uit} is de afdelingstemperatuur (homogeen verondersteld), Φ_{lucht} hangt van de afdelingstemperatuur af volgens de instellingen zoals in tabel 2 staan vermeld. $(\rho c_p)_{lucht}$ is constant verondersteld op 1.200 J/m³K.

Warmtestroom door de vloer

Formule B2:

$$Q_{grond} = k_{grond} \cdot A_{grond} \cdot (T_{lucht} - T_{grdw})$$

waarin:

Q_{grond}	= warmtestroom van of naar grondwater door de bodem	(W)
k_{grond}	= warmtedoorgangscoefficiënt van de grond	(W/m ² K)
A_{grond}	= grondoppervlak	(m ²)
T_{lucht}	= temperatuur van de lucht boven de grond	(°C)
T_{grdw}	= temperatuur van het grondwater	(°C)

In een afdeling met mestpanventilatie is T_{lucht} de temperatuur van de lucht in het luchtkanaal onder de mestpannen. Voor een afdeling met plafondventilatie is dit de temperatuur van de afdelingslucht (homogeen verondersteld).

De warmtedoorgangscoefficiënt k_{grond} is berekend met de volgende formule:

Formule B3:

$$k_{grond} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_{grdw}}{\lambda_{grond}}}$$

waarin:

α_i	= warmteoverdrachtscoefficient van lucht naar bodem	(W/m ² K)
d_{grdw}	= diepte van het grondwater onder het bodemoppervlak	(m)
λ_{grond}	= warmtegeleidingscoefficient van droog zand	<u>(W/mK)</u>

Voor invulling van de formules zijn de volgende waarden gebruikt:

T_{grdw}	= 10°C
d_{grdw}	= bij mestpanventilatie 1 m onder de bodem, bij plafondventilatie 1,4 m onder de bodem
λ_{grond}	= 1 W/mK
α_i	= 7,7 W/m²K

Warmtestroom door de wanden

Er is aangenomen dat warmtestroom door scheidingswanden met andere afdelingen nul is. Over het algemeen zal de stroom ook klein zijn vanwege een gering temperatuurverschil tussen twee aan elkaar grenzende afdelingen. De warmtestroom door de scheidingswand tussen de afdeling en de centrale gang is berekend met de volgende formule:

Formule B4:

$$Q_{\text{wand}} = k_{\text{glas}} \cdot A_{\text{glas}} \cdot (T_{\text{afd}} - T_{\text{cg}}) + k_{\text{muur}} \cdot A_{\text{muur}} \cdot (T_{\text{afd}} - T_{\text{cg}}) + k_{\text{deur}} \cdot A_{\text{deur}} \cdot (T_{\text{afd}} - T_{\text{cg}})$$

waarin:

$k_{\dots}$	= warmtedoorgangscoefficiënt horend bij het oppervlak	(W/m²K)
$A_{\dots}$	= grootte van het oppervlak	(m²)
T_{cg}	= temperatuur op de centrale gang	(°C)

De waarden die zijn ingevuld staan in tabel 20.

Tabel 20: Waarden van warmtedoorgangscoefficiënt (W/m²K) en oppervlak (m²) voor berekening warmtestroom vanuit afdeling naar centrale gang en naar de ruimte boven het plafond

	k_{glas}	A_{glas}	k_{muur}	A_{muur}	k_{deur}	A_{deur}	k_{plafond}	A_{plafond}
Afdeling met mestpanventilatie	1,8	4,1	2,5	6,6	2,8	2,0	0,6	74
Afdeling met plafondventilatie	1,8	3,2	2,5	5,1	2,8	1,6	1,1	55

Warmtestroom door het plafond

De warmtestroom door het plafond is berekend met de formule:

Formule B5:

$$Q_{\text{plafond}} = k_{\text{plafond}} \cdot A_{\text{plafond}} \cdot (T_{\text{afd}} - T_{\text{pla}})$$

k_{plafond} wordt in belangrijke mate bepaald door de dikte van de isolatielaag op het plafond. In tabel 20 staan de waardes waarmee is gerekend.

Warmtetoevoer voortraject

In een afdeling met plafondventilatie is de warmtetoevoer in het voortraject gelijk verondersteld aan het warmteverlies door het plafond. Uitgangspunt is dus een perfect geïsoleerd dak. In de praktijk zal tijdens koude periodes er echter altijd wat extra afkoeling in de ruimte onder het plafond optreden. Tijdens warme periodes kan de lucht in die ruimte ook wat opgewarmd worden (ten gevolge van zoninstraling).

In een afdeling met mestpanventilatie is de grootte van deze energiestroom berekend aan de hand van formule B6.

Formule B6:

$$Q_{\text{voortr}} = k_{\text{mestpan}} \cdot A_{\text{mestpan}} \cdot (T_{\text{afd}} - T_{\text{kan}}) - Q_{\text{grond}}$$

waarin:

Q_{voortr}	= hoeveelheid toegevoerde energie in het luchtkanaal	(W)
k_{mestpan}	= warmtedoorlaatcoëfficiënt van de tussenvloer	(W/m ² K)
A_{mestpan}	= oppervlak van de tussenvloer	(m ²)
T_{kan}	= temperatuur van de lucht in het luchtkanaal	(°C)
Q_{grond}	= warmtestroom van luchtkanaal naar grondwater (formule B2)	(W)

De waarde van k_{mestpan} is bepaald aan de hand van analyses van de meetresultaten ($k_{\text{mestpan}} = 2,59 \text{ W/m}^2\text{K}$, $A_{\text{mestpan}} = 74 \text{ m}^2$)

Daarnaast is in een statische situatie de hoeveelheid toegevoerde energie natuurlijk gelijk aan de hoeveelheid afgevoerde energie. Formule B6 is daarom gelijk aan:

Formule B7:

$$Q_{\text{voortr}} = \Phi_{\text{lucht}} \cdot (\rho c_p)_{\text{lucht}} \cdot (T_{\text{cg}} - T_{\text{kan}})$$

waarin:

Q_{voortr}	= hoeveelheid afgevoerde energie via ventilatielucht uit het luchtkanaal	(W)
$(\rho c_p)_{\text{lucht}}$	= volumetrische warmtecapaciteit van lucht	(J/m ³ K)

Uit formule B6 en formule B7 kan de temperatuur van de lucht in het grondkanaal worden berekend.

Bijlage 3: Bepaling van de waarde van $k_{mestpan}$

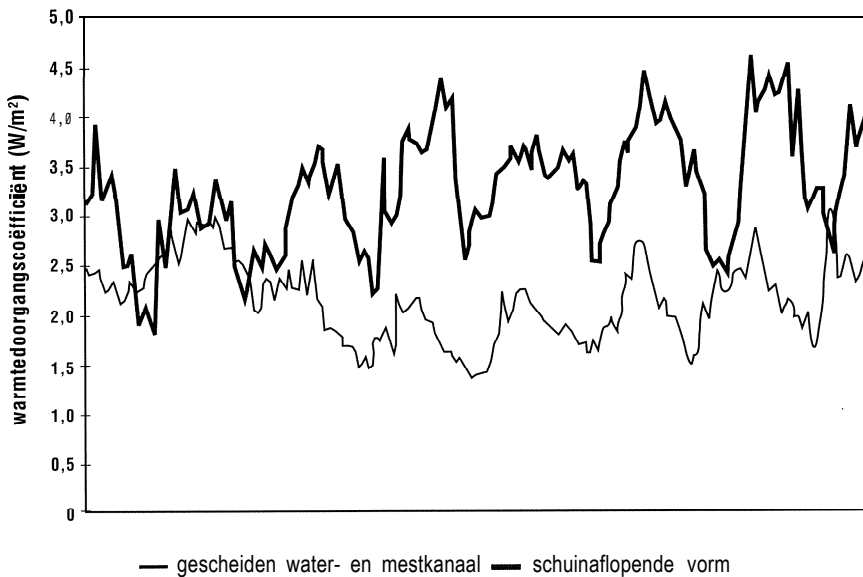
Voor bepaling van de waarde van $k_{mestpan}$ is gebruik gemaakt van de theorie van de statische energiebalans over een afdeling met mestpanventilatie (paragraaf 5.2 en bijlage 1). Als de warmte-opslag in de mestpan gelijk aan 0 wordt verondersteld, kan de waarde van $k_{mestpan}$ worden berekend met de volgende formule:

Formule B8:

$$k_{mestpan} = \frac{Q_{grond} + Q_{voortr}}{T_{afd} - T_{kan}}$$

De grootte van de energiestromen en temperaturen aan de rechterzijde van de vergelijking kan direct worden afgeleid uit de meetgegevens. Dit is gedaan voor beide afdelingen met verschillende types mestpan (schuin aflopende vorm en gescheiden water- en mestkanaal). Voor ieder uur is de waarde van $k_{mestpan}$ bepaald.

In figuur 12 staat het resultaat van de berekening met meetgegevens van zeven geselecteerde dagen voor de twee typen mestpannen die in het onderzoek betrokken waren.



Figuur 12: Verloop van de warmtedoorgangscoefficiënt $k_{mestpan}$ voor de twee soorten mestpannen (4-4-98 tot 11-4-98)

Er is een dag-nachtritme herkenbaar in figuur 12, wat duidt op de dynamiek van het proces. De gemiddelde waarde van $k_{mestpan}$ gedurende deze vier dagen was bij de mestpan met schuin aflopende vorm 3,27 (W/m²K) en bij de mestpan met gescheiden water- en mestkanaal 2,14 (W/m²K).

In de berekeningen met de statische en dynamische energiebalans zijn deze gemiddelde waarden gebruikt.

De waarde van $k_{mestpan}$ is benaderd met behulp van meetgegevens. Hiervoor is de totale warmteoverdracht tussen stallucht en lucht onder de mestpan bepaald.

Een betere benadering van de waarde van $k_{mestpan}$ is mogelijk door een nauwkeurige fysische beschrijving te maken van de processen tussen de stallucht en de mestpan en deze te modelleren. De hoeveelheid mest in de mestpan speelt daarbij een belangrijke rol. Dit is in het kader van dit onderzoek niet gedaan.

Bijlage 4: Berekening van het energiegebruik op de centrale gang

Voor de berekening van de energiebehoefte van de centrale gang zijn in een eenvoudig model de energiestromen tussen de centrale gang en zijn omgeving beschreven.

Formule B9:

$$Q_{\text{verwarming}} + Q_{\text{wand}} + Q_{\text{buitenwand}} + Q_{\text{vent}} = 0$$

waarin:

$Q_{\text{verwarming}}$	= de hoeveelheid energie die door de verwarming wordt geleverd	(W)
Q_{wand}	= de hoeveelheid energie die vanuit de afdeling komt	(W)
$Q_{\text{buitenwand}}$	= de hoeveelheid energie die door de buitenwand verloren gaat	(W)
Q_{vent}	= de hoeveelheid energie die met de ventilatielucht wordt afgevoerd	(W)

De warmtestromen door de vloer en het dak zijn verwaarloosd. Voor Q_{wand} zijn de waardes genomen zoals die berekend zijn met de theorie uit bijlage 2. Voor $Q_{\text{buitenwand}}$ is dezelfde theorie van toepassing (formule B4). De warmtedoorlaat van de buitenwand is op 40 W/K geschat. Q_{vent} kan worden berekend aan de hand van formule B1, waarbij de ingaande luchttemperatuur de buitentemperatuur is en de uitgaande luchttemperatuur 7°C. $Q_{\text{verwarming}}$ kan dan voor alle buitentemperaturen worden opgelost.

Het aantal uren dat een bepaalde buitentemperatuur optreedt in Nederland is gehaald uit de graadurentabel (In: Van Ouwerkerk, 1999).

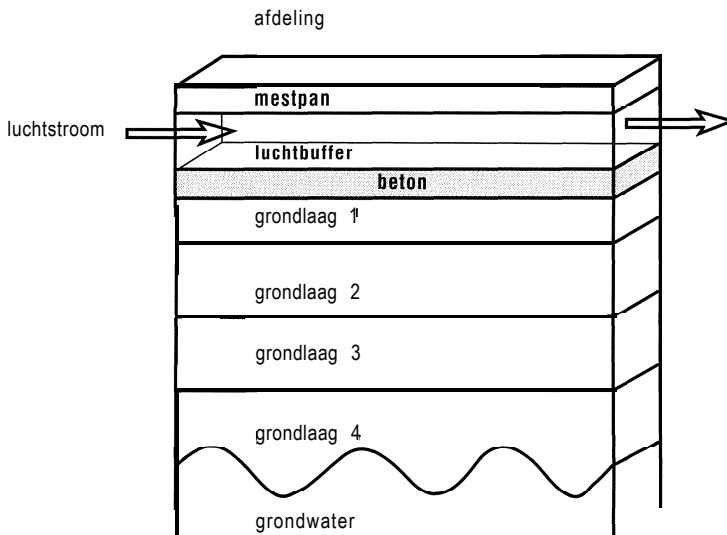
Bijlage 5: Resultaten van berekening voor energiegebruik verwarming en ventilatie'

verwarmings- temperatuur		min. vent. per kraamhok	max. vent. per kraamhok	per stook- grens*	verwarming3 (gas)	ventilatie4 (tr. vent.)	ventilatie4 (kl. vent.)	biggennest				
(°C)	(m³/h)	(m³/h)	(m³/h)	(°C)	(m³)	kosten (f) (kWh)	kosten (f) (kWh)	kosten (f)				
mestpanventilatie verlaagd												
voor werpen ^a	17	28	140	-1,1	0,11	0,08	8,3	1,67	6,0	1,21	-	-
tijdens werpen ^b	20	28	140	-21,0	-		3,3	0,66	2,7	0,54	64,8	12,96
na werpen ^c	18	35	175	-33,6	-		16,0	3,20	14,5	2,90	259,2	51,84
na werpend	18	35	175	-7,5	0,08	0,05	34,1	6,81	27,0	5,39	-	-
leegstand ^e	5	25	25	-13,0	-		7,8	1,57	5,4	1,08	-	-
<i>totaal</i>					0,19	0,13	69,6	13,92	55,6	11,13	324	64,8
mestpanventilatie traditioneel												
voor werpen ^a	17	40	200	3,1	0,65	0,43	8,4	1,68				
tijdens werpen ^b	20	40	200	-10,9	-		3,4	0,68			64,8	12,96
na werpen ^c	18	50	250	-17,4	-		16,9	3,39			259,2	51,84
na werpend	18	50	250	0,2	2,26	1,49	35,0	6,99			-	-
leegstand ^e	5	25	25	-13,0	-		7,9	1,57				
<i>totaal</i>					2,92	1,93	71,6	14,31			324	64,8
plafondventilatie												
voor werpen ^a	17	40	200	6,6	3,65	2,41	8,6	1,73				
tijdens werpen ^b	20	40	200	0,3	0,24	0,16	3,4	0,69			64,8	12,96
na werpen ^c	18	50	250	-2,2	0,48	0,32	15,8	3,17			259,2	51,84
na werpend	18	50	250	5,8	15,0	9,90	35,4	7,08				
leegstand ^e	5	25	25	2,5	0,44	0,29	7,85	1,57				
<i>totaal</i>					19,8	13,08	71,2	14,23			324	64,8

- ¹ De berekeningen zijn uitgevoerd met de statische energiebalans over een afdeling met mestpanventilatie en plafondventilatie zonder voorverwarming. Uitgangspunt voor de energieberekeningen is dat er negen rondes per jaar gedraaid worden. Voor de berekening van de energiekosten is gerekend met 20 cent per kWh elektriciteitsgebruik, 66 cent per m³ aardgas en 20% ketel- en leidingverliezen.
- ² De stookgrens geeft de waarde van de buitentemperatuur waaronder de verwarming aan zal slaan.
- ³ Het aantal uren dat het in Nederland kouder is dan de stookgrens is gehaald uit de graadurentabel (In: Van Ouwerkerk, 1999), waarmee het energiegebruik en de energiekosten zijn berekend.
- ⁴ Tegendruk bij maximale ventilatie bij zowel mestpanventilatie als plafondventilatie is in de berekening gesteld op 30 Pascal.
- ^a gedurende vijf dagen per ronde, warmteproductie per zeug 180 W, biggennestverwarming uit
- ^b gedurende twee dagen per ronde, warmteproductie per zeug 180 W, biggennestverwarming aan 150 W per lamp
- ^c gedurende acht dagen per ronde, warmteproductie per zeug 250 W, biggennestverwarming aan 150 W per lamp
- ^d gedurende twintig dagen per ronde, warmteproductie per zeug 250 W, biggennestverwarming uit
- ^e gedurende veertig dagen per jaar is de afdeling leeg en wordt er minimaal geventileerd (25 m³/h per kraamhok)

Bijlage 6: Theorie van de dynamische energiebalans over het luchtkanaal onder de mestpan

Voor het opstellen van een dynamische energiebalans is het model gebruikt dat staat weergegeven in figuur 13.



Figuur 13: Modelopzet van luchtkanaal en ondergrond ter bepaling van opwarming/afkoeling van de lucht onder de mestpannen

Het model is eendimensionaal. In figuur 13 zijn één luchtlaag en vier grondlagen weergegeven. De warmteopslag in de mestpan-laag is nul verondersteld. Tussen de verschillende lagen zal er warmte-uitwisseling optreden. Wanneer er meer energie uit een laag wegstroomt dan dat erbij komt, koelt een laag af. Wanneer er meer energie in een laag bijkomt warmt deze laag op.

De warmtestromen per laag zijn:

Luchtlaag

Via de mestpannen zal er energie uit de afdeling in het luchtkanaal terechtkomen. Met behulp van formule B10 kan de grootte van deze stroom worden berekend. Tevens zal er met grondlaag 1 warmte-uitwisseling zijn. Ventilatie in het luchtkanaal kan ook energie afvoeren of aanvoeren.

Grondlaag 1

Tussen de bovenste grondlaag en de lucht in het luchtkanaal is er convectieve warmteoverdracht. Tevens zal via geleiding warmte-uitwisseling plaatsvinden met de dieper gelegen grondlaag.

Grondlaag 2 t/m 4

Via geleiding is er warmte-uitwisseling met de hoger en dieper gelegen grondlaag. Grondlaag 4 wisselt warmte uit via geleiding met het grondwater.

In formulevorm ziet dat er als volgt uit:

Dynamische energiebalans van de lucht onder de mestpan

Formule B10:

$$V_{kan}(\rho c_p)_l \frac{dT_{kan}}{dt} = \phi_l \cdot (\rho c_p)_l \cdot (T_{cg} - T_{kan}) - \left(\frac{\lambda_{grond}}{2 \cdot d_{grl}} + \alpha_i \right) \cdot A_{grond} \cdot (T_{kan} - T_{grl1}) + k_{mestpan} \cdot A_{grond} \cdot (T_{afd} - T_{kan})$$

waarin:

V_{kan}	= volume van de lucht onder de mestpan	(m ³)
$(\rho c_p)_l$	= volumetrische warmtecapaciteit van lucht	(J/m ³ K)
T_{kan}	= temperatuur van de lucht in het luchtkanaal onder de mestpan	(°C)
dt	= integratietijd	(s)
Φ_l	= grootte van de luchtstroom	(m ³ /s)
T_{cg}	= temperatuur van de centrale gang	(°C)
λ_{grond}	= warmtegeleidingscoëfficiënt van de grond	(W/mK)
d_{grl}	= hoogte van de grondlaag	(m)
α_i	= warmte-overdrachtscoëfficiënt van lucht naar grond	(W/m ² K)
A_{grond}	= oppervlak waarover de warmtestroming plaatsvindt	(m ²)
T_{grl1}	= temperatuur van de bovenste grondlaag	(°C)
$k_{mestpan}$	= experimenteel bepaalde k-waarde van de vloer in een afdeling met mestpannen	(W/m ² K)
T_{afd}	= temperatuur van de afdeling	(°C)

Balans van bovenste grondlaag (grondlaag 1):

Formule BI 1:

$$V_{grl}(\rho c_p)_{grl} \frac{dT_{grl1}}{dt} = \frac{\lambda_{grond}}{d_{grl}} \cdot A_{grond} \cdot (T_{grl2} - T_{grl1}) + \left(\frac{\lambda_{grond}}{2 \cdot d_{grl}} + \alpha_i \right) \cdot A_{grond} \cdot (T_{kan} - T_{grl1})$$

waarin:

V_{grl}	= volume van een grondlaag	(m ³)
$(\rho c_p)_{grl}$	= volumetrische warmtecapaciteit van grond	(J/m ³ K)
T_{grl2}	= temperatuur van de tweede grondlaag	(°C)

Balans van de tweede grondlaag:

Formule B12:

$$V_{grl}(\rho c_p)_{grl} \frac{dT_{grl2}}{dt} = \frac{\lambda_{grond}}{d_{grl}} \cdot A_{grond} \cdot (T_{grl3} - T_{grl2}) + \frac{\lambda_{grond}}{d_{grl}} \cdot A_{grond} \cdot (T_{grl1} - T_{grl2})$$

waarin:

T_{grl3}	= temperatuur van de derde grondlaag	(°C)
------------	--------------------------------------	------

Balans van de derde grondlaag:

Formule 13:

$$V_{grl}(\rho c_p)_{grl} \frac{dT_{grl_4}}{dt} = \frac{\lambda_{grond}}{d_{grl}} \cdot A_{grond} \cdot (T_{grl_4} - T_{grl_3}) + \frac{\lambda_{grond}}{d_{grl}} \cdot A_{grond} \cdot (T_{grl_2} - T_{grl_3})$$

waarin:

T_{grl_4} = temperatuur van de vierde grondlaag (°C)

Balans van de onderste grondlaag:

Formule B14:

$$V_{grl}(\rho c_p)_{grl} \frac{dT_{grl_4}}{dt} = \frac{\lambda_{grond}}{2 \cdot d_{grl}} \cdot A_{grond} \cdot (T_{grdw} - T_{grl_4}) + \frac{\lambda_{grond}}{d_{grl}} \cdot A_{grond} \cdot (T_{grl_2} - T_{grl_4})$$

waarin:

T_{grdw} = temperatuur van het grondwater (°C)

Voor bepaling van de overdrachtscoëfficiënt α_i wordt gebruik gemaakt van de formules van Pohlhausen en Kroujiline voor stroming over een vlakke wand (Feijen, 1987). De waarde van α_i is in belangrijke mate afhankelijk van de luchtsnelheid boven de vloer.