ir. A.V. van Wagenberg
ir. N. Verdoes
dr. ir. E. Vranken[1]
prof. dr. ir. D. Berckmans[1]

[1] Laboratorium voor Agrarische Bouwkunde K.U. Leuven

Waterverdamping uit dunne mest; resultaten van modelberekeningen

Evaporation of water from slurry; results of model calculations

Praktijkonderzoek Varkenshouderij

Locatie:
Proefstation voor de Varkenshouderij
Postbus 83
5240 AB Rosmalen
tel. 073 - 528 65 55

Proefverslag nummer P 1.234
december 1999
ISSN 0922 - 8586

INHOUDSOPGAVE

	SAMENVATTING	4
	SUMMARY	6
1	INLEIDING	7
2	MATERIAAL EN METHODE	9
2.1	Beschrijving van het simulatiemodel	9
2.2	Beschrijving van de validatie-opstelling	11
2.3	Experimenten met de validatie-opstelling	13
2.4	Aanpassingen simulatiemodel	13
2'4.1	Uitvoering van de verdampingsinstallatie	13
2'4.2	Gegevens van de ventilatielucht	14
2'4.3	Uitgevoerde berekeningen met het simulatiemodel	15
3	RESULTATEN	16
3.1	Experimenten met de validatie-opstelling	16
3.2	Experimenten met het simulatiemodel	16
3'2.1	Temperatuur van de dunne mest in het recirculatievat	18
3'2.2	Drooglucht van verschillende afdelingen	18
3'2.3	Toepassing van externe energiebronnen	18
3.2.3.1	De efficiëntie van het toegevoegd vermogen (η)	19
3.2.3.2	Energie die vrijkomt bij de beluchting	19
3.2.3.3	Zonne-energie	20
3.2.3.4	Warmte-krachtkoppeling	20
3.2.4	Verdampen met buitenlucht	21
3.2.4.1	Verdampen met alleen buitenlucht	21
3.2.4.2	Bijmengen van buitenlucht	21
4	DISCUSSIE EN CONCLUSIES	23
4.1	Validatie van het simulatiemodel	23
4.2	Experimenten met het simulatiemodel	23
4.2.1	Vulmateriaal en dimensies verdamper	23
4.2.2	Verdamping	23
4.2.3	Externe energiebronnen	24
4.2.4	Luchtwassing	25
4.2.5	Energieverbruik	25
4.3	Conclusies	25
	LITERATUUR	26
	BIJLAGEN	28
	Bijlage 1: Resultaten van oriënterende berekeningen met betrekking tot drukval en vochtoverdracht	28
	Bijlage 2: Gebruikte klimaatinstellingen bij het doorrekenen van het klimaatmodel voor vleesvarkens van Berckmans et al. (1993)	30
	Bijlage 3: Berekening verdamping per productieve zeug	31
	Bijlage 4: Ontwerp voor vloerkoelcircuit waarbij de afvalwarmte aan het vat (recirculatievat) wordt toegevoegd	31
	REEDS EERDER VERSCHENEN PROEFVERSLAGEN	32

SAMENVATTING

In een geïntegreerd luchtbehandelingssysteem kunnen technische oplossingen voor de emissieproblematiek (ammoniak, geur) en de mestproblematiek worden gecombineerd. Door ventilatielucht uit de stal intensief in contact te brengen met mest kan water uit de mest verdampen. Daardoor droogt de mest. Door de lucht na het contact met de mest te wassen kan de emissie van ammoniak, geur en stof worden gereduceerd. Mogelijk kunnen ammoniak en geur al oplossen in de mest wanneer deze eerst is voorbehandeld (bijvoorbeeld door beluchten of aanzuren).
Het contactoppervlak tussen de mest en de lucht kan worden gecreëerd in een wasser. Het vulmateriaal bepaalt mede de grootte en de vorm van het contactoppervlak in de wasser en daarmee de mate van efficiëntie van de uitwisseling van stoffen tussen de lucht en de mest. In dit onderzoek is alleen het verdampingsproces bestudeerd.

Om in te schatten wat de mogelijke verdamping kan zijn en hoe een geïntegreerd luchtbehandelingssysteem eruit zou kunnen zien is een simulatiemodel ontwikkeld. Onder laboratoriumomstandigheden zijn bepaalde onderdelen van het simulatiemodel gevalideerd. Uit de metingen blijkt dat het model de verdamping van water uit dunne mest met 16% onderschat. Verklaring hiervoor is dat in het model de verdamping uit vallende druppeltjes en de verdamping van water in de druppelvanger niet meegenomen is. De bijdrage van de verdamping vanuit vallende druppeltjes aan de totale verdamping (verdamping vanaf vulmateriaal + verdamping vanaf vallende druppeltjes) in de wasser zal afhankelijk zijn van de uitvoering van de verdamper. Deze term kan in een later stadium aan het model worden toegevoegd.
Vervolgens is het gevalideerde simulatiemodel gebruikt om simulatie-experimenten uit te voeren. In de berekeningen is gekozen voor een vulmateriaal opgebouwd uit een structuur van niet verspringende pijpjes loodrecht op de luchtstroom. In verband met snel oplopende drukval over het vulmateriaal is voor bepaling van de dimensies uitgegaan van een maximale luchtsnelheid van 4 meter per seconde in het vulmateriaal.
De mogelijke hoeveelheid verdamping voor alle diercategorieën is berekend. De aannames die hierbij gedaan zijn staan in dit rapport beschreven. De resultaten staan in tabel 1.

Door warmte (energie) aan het systeem toe te voegen zal de temperatuur van de te verdampen mest stijgen en de verdamping toenemen Uit modelberekeningen blijkt dat de efficiëntie waarmee de toegevoegde energie omgezet wordt in verdamping 64% is.

Tabel 1: Verdamping voor de verschillende diercategorieën en percentage van de mestproductie van betreffende diercategorie dat verdampt kan worden

diercategorie	verdamping (kg/dpl/jaar)	% van de mestproductie
guste zeugen[1]	689	26%
drachtige zeugen[1]	1.073	36%
kraamzeugen[1]	1.037	20%
gespeende biggen'	243	50%
productieve zeugen'	1.602	30%
vleesvarkens[1]	488	41%
vleesvarkens*	396	33%

[1] statische binnenklimaatsimulatie, warmteproductie op basis van ANIPRO (Van Ouwerkerk, 1999)
[2] dynamische binnenklimaatsimulatie, warmteproductie op basis van Bruce en Clark (Berckmans et al., 1993)

In dit onderzoek zijn enkele externe energiebronnen bekeken. Bij toepassing van een beluchtingstank zal er energie vrijkomen als gevolg van afbraak van organisch materiaal. Bij een volledige afbraak zal afhankelijk van het gehalte aan organisch materiaal de verdamping 7% tot 21% kunnen toenemen.
Bij gebruikmaking van zonne-energie kan de verdamping toenemen, afhankelijk van het oppervlak van de collector. Bij een collector van 25 m^2 zal de verdamping ongeveer 8.320 kg hoger worden, bij 200 m^2 ongeveer 66.557 kg hoger. Ook restwarmte van een warmte-krachtkoppeling kan voor een verhoogde verdamping zorgen.
Toepassing van externe energiebronnen maakt het mogelijk de installatie optimaal te gebruiken door de mest zo ver mogelijk in te dikken. Optimaal gebruik betekent dat er zoveel water uit de mest verdampt dat er geen dunne mestfractie overblijft. De overgebleven dikke fractie kan dan nog eventueel verder drogen op mestbanden.

SUMMARY

In an integrated air-treatment installation, solutions for ammonia and odour emission and slurry problems can be combined. By creating intensive contact between ventilation air and slurry, ammonia and odour can dissolve in the pretreated slurry and at the same time water can evaporate.
The contact surface between slurry and air can be created in an air scrubber. The filling material determines the size and the shape of the contact surface in the air scrubber and the efficiency of the exchange of ammonia, odour and vapour between air and slurry. In this research only evaporation of water was monitored.

To estimate the possible amount of evaporation and what an integrated air-treatment installation would look like, a simulation model was developed. The simulation model was validated under laboratory conditions. From the measurements, it could be concluded that the model underestimated the evaporation by 16%. This can be explained by the fact that evaporation from falling drops in the evaporator was not considered in the model.

The simulation model validated was used to design simulation experiments. In the calculations a filling material was chosen, which consisted of horizontal tubes perpendicular to the air-stream direction. For determing the dimensions of the evaporator the maximum air-speed between the tubes was set at 4 metres per second.
The amount of evaporation for all animal categories was calculated. The assumptions made are described in this report. The results are in table 1.

By adding heat (energy) to the system, temperature of the slurry will raise and evaporation increase. The efficiency of extra heat input is 64%.

In this research some external energy sources were studied. With aeration, the slurry temperature will raise because of the breakdown of organic matter. Depending on the amount of organic matter in the slurry, evaporation may increase by 7 to 21%.
By using solar energy, evaporation can increase depending on the surface of the collector. With a collector of 25 m^2, evaporation will increase by 8,320 kg per year, a collector of 200 m^2 will increase evaporation by 66,557 kg per year. Also usage of heat from a heat-power generator will cause a higher evaporation.
Using external energy sources makes it possible to reduce the amount of slurry to a minimum. When most of the water from the slurry can be evaporated, the remaining product will be a solid mass, which can then be dried further on belts.

Table 1: Evaporation for the different animal categories and percentage of slurry production

animal category	evaporation (kg per animal place per year)	% of slurry production
empty sows[1]	689	26%
pregnant sows[1]	1,073	36%
farrowing sows[1]	1,037	20%
weanling pigs[1]	243	50%
productive sows[1]	1,602	30%
growing-finishing pigs[1]	488	40%
growing-finishing pigs[2]	396	33%

[1] static indoor climate simulation, heat production based on ANIPRO (Van Ouwerkerk, 1999)
[2] dynamic indoor climate simulation, heat production based on Bruce and Clark (Berckmans et al., 1993)

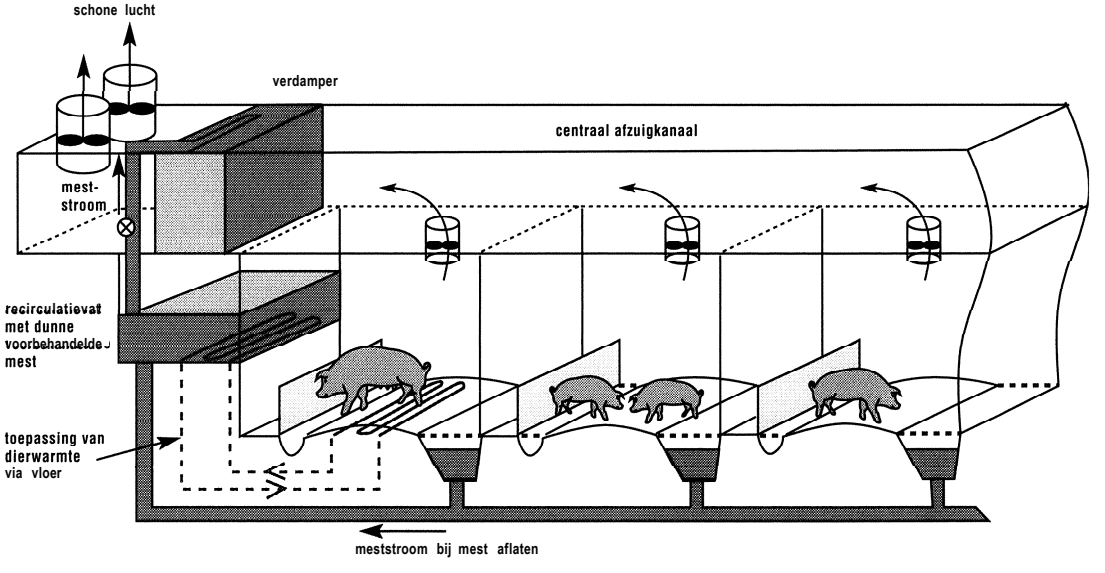
1 INLEIDING

Voor bemesting wordt er gestreefd naar evenwichtsbemesting. De hoeveelheid nutriënten die per hectare op het land mag worden gebracht is gelijk aan de hoeveelheid die door het gewas aan de grond wordt onttrokken plus de zogenaamde verliesnormen. In 1998 is de verliesnorm voor fosfaat 40 kg per hectare grasland. In het jaar 2000 is dit nog 35 kg (Projectgroep Comma, 1997). In concentratiegebieden betekent dit dat de mest afgevoerd dient te worden naar gebieden waar wel plaatsingsruimte is voor mest. Transport en aanwending van mest brengen hoge kosten en een hoog energieverbruik met zich mee.

De Nederlandse overheid heeft zich tot doel gesteld de ammoniakuitstoot van de agrarische sector in het jaar 2005 met 70% te hebben teruggebracht ten opzichte van de emissie in 1980. Hiertoe zijn maatregelen ingevoerd ten aanzien van de opslag en het uitrijden van mest en worden de intensieve veehouderijbedrijven verplicht tot het bouwen van emissie-arme stalsystemen (Aartsen, 1995).

De voornemens van de overheid ten aanzien van vermindering van de geuroverlast worden weergegeven in het Nationaal Milieubeleidsplan (1989) en de Nota Stankbeleid (1992). Als uitgangspunt geldt dat in het jaar 2000 minder dan 12% van de Nederlandse bevolking hinder mag ondervinden van geuremissies. Uit CBS-enquêtes blijkt dat dit in 1995 nog 20% bedroeg (Klarenbeek, 1995 a en b).

Om technische oplossingen voor de hierboven geschetste problemen te vinden wordt gewerkt aan zogenaamde geïntegreerde mest- en luchtbehandelingssystemen. Door ventilatielucht uit de stal intensief in contact te brengen met mest kan water uit de mest verdampen en droogt de mest. Door de lucht na het contact met de mest te wassen kan de emissie van ammoniak, geur en stof worden gereduceerd. Mogelijk kunnen ammoniak en geur al oplossen in de mest wanneer deze eerst is voorbehandeld. Door de dunne mest te beluchten (of aan te zuren) zullen er geen ammoniak en basische geurcomponenten aan de lucht wor-



Figuur 1: Mogelijke uitvoering van een geïntegreerd luchtbehandelingssysteem in een stal met centrale afzuiging

den afgegeven, maar juist ammoniak en geurcomponenten uit de lucht in de dunne mest oplossen. Tegelijkertijd zal water uit de dunne mest verdampen, waardoor er volumereductie optreedt.
In een geïntegreerd systeem worden de mestafzetkosten verlaagd en de ammoniak- en geuremissie beperkt.

Het verdampen van water uit mest met behulp van ventilatielucht wordt als perspectiefvol aangemerkt op basis van globale berekeningen en inschattingen (Ten Have et al., 1996). Mede hierdoor zijn er momenteel initiatieven in het agrarisch bedrijfsleven ontwikkeld. In figuur 1 is een mogelijke uitvoering van een geïntegreerd luchtbehandelingssysteem opgenomen.

Doel van dit onderzoek is het inschatten van het perspectief van een dergelijk systeem. Daarnaast kunnen aandachtspunten voor het ontwerp geformuleerd worden.

Afbakening

In het onderzoek wordt geen aandacht geschonken aan de invanging van ammoniak of geurcomponenten uit de stallucht. Alleen de verdamping en de drukval worden bestudeerd.

2 MATERIAAL EN METHODE

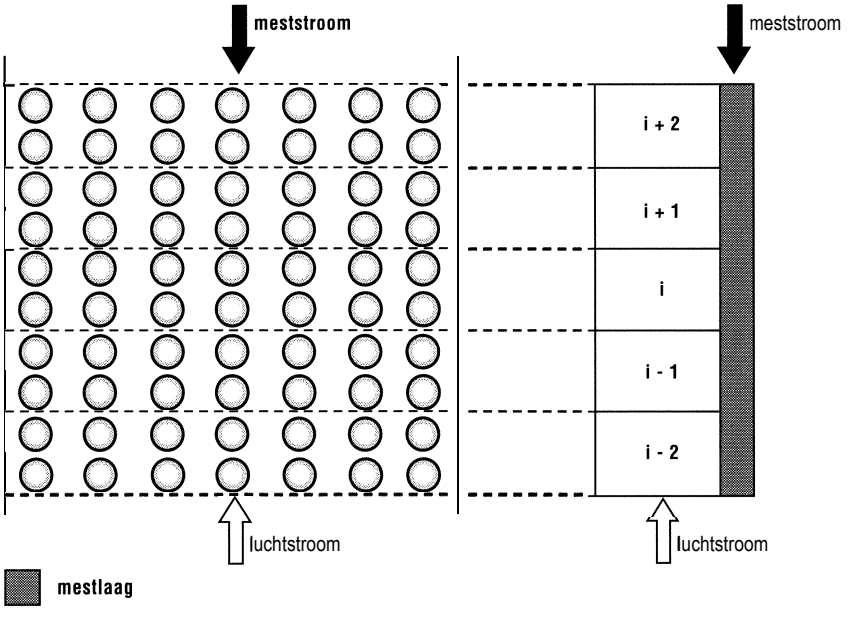
2.1 Beschrijving van het simulatiemodel

Met het simulatiemodel kan de verdamping van water (in een verdamper) uit zeer dunne mest worden berekend. In de verdamper worden vloeistof en lucht intensief met elkaar in contact gebracht, in tegenstroom, en zal warmte- en vochtoverdracht plaatsvinden. Het model is opgezet volgens figuur 2. Links in de figuur is de verdamper geschetst en rechts de modelopzet. Het soort vulmateriaal bepaalt de grootte van het uitwisselend oppervlak en van de overdrachtcoëff iciënten.

In het simulatiemodel is de verdamper opgedeeld in zes compartimenten. Binnen één compartiment zijn de fysische eigenschappen van lucht (temperatuur, vochtgehalte) en mest (temperatuur) homogeen verondersteld. Inhomogeniteit van de mest binnen één compartiment zal geen belangrijke rol spelen vanwege de geringe dikte van de mestlaag die aanwezig is op het vulmateriaal en vanwege de voortdurende menging van de mest die plaatsvindt als gevolg van het stromen van de mest. Voor eventueel optredende inhomogeniteit van de lucht binnen één compartiment wordt gecorrigeerd in de berekening van de overdrachtscoëff iciënten, die voor de totale luchtstroom door het vulmateriaal geldt (VDI, 1988).
Getracht is alle fysische verschijnselen die optreden, zoals bijvoorbeeld verwarming en verdamping, door middel van fysisch gebaseerde formules te beschrijven.

In het model zijn per compartiment de volgende balansen opgenomen:

Energiebalans mestlaag:
Hierin staan alle processen beschreven die invloed hebben op de temperatuur die de mest in een bepaald compartiment 'aanneemt. Een van die processen is de stroming van de mest in de verdamper: mest komt binnen met de messttemperatuur van compartiment i+1 en stroomt weg met de messttemperatuur van compartiment i. Ook is er warmte-overdracht met de lucht in compartiment i en zal de verdamping van water



Figuur 2: Opzet van het model van de verdamper

uit de mest (of condensatie van waterdamp uit de lucht in de mest) de messttemperatuur beïnvloeden.

Energiebalans lucht:
Hierin staan alle processen beschreven die invloed hebben op de temperatuur die de lucht in een bepaald compartiment aanneemt Een van die processen is de stroming van de lucht in de verdamper: lucht komt binnen met de luchttemperatuur van compartiment i-1 en stroomt weg met de luchttemperatuur van compartiment i. Ook is er warmte-overdracht met de mest in compartiment i.

Voch tbalans lucht:
Hierin staan alle processen beschreven die invloed hebben op de hoeveelheid waterdamp in de lucht in een bepaald compartiment Een van die processen is de stroming van de lucht in de verdamper: lucht komt binnen met het vochtgehalte van compartiment i-1 en stroomt weg met het vochtgehalte van compartiment i. Ook is er water-overdracht van de mest naar de lucht in compartiment i.

De energiebalans van de mestlaag, de energiebalans van de lucht en de vochtbalans van de lucht zijn op deze pagina in formulevorm weergegeven.
Door de balansvergelijkingen op te lossen wordt de grootte van alle energie- en vochtstromen berekend. Door middel van voorwaartse integratie (Euler Forward) is het simu-

Formule energiebalans mestlaag

$$V_{m,i}\,(\rho c_p)_m \frac{dT_{m,i}}{dt} = \Phi_{m,i}\,(\rho c_p)_m (T_{m\,i+1} - T_{m,i}) - A_m \alpha_{m\to l}\,(T_{m,i} - T_{l,i}) - r\,A_m\,k_{m\to l}\,(c_{m,i} - c_{l,i})$$

Formule energiebalans lucht

$$V_{l,i}\,(\rho c_p)_l \frac{dT_{l,i}}{dt} = \Phi_l\,(\rho c_p)_l\,(T_{l,i-1} - T_{l,i}) + A_m \alpha_{m\to l}\,(T_{m,i} - T_{l,i})$$

Formule vochtbalans lucht

$$V_{l,i} \frac{dc_{l,i}}{dt} = \Phi_l\,(c_{l,i-1} - c_{l,i}) + A_m k_{m\to l}\,(c_{m,i} - c_{l,i})$$

Waarin:

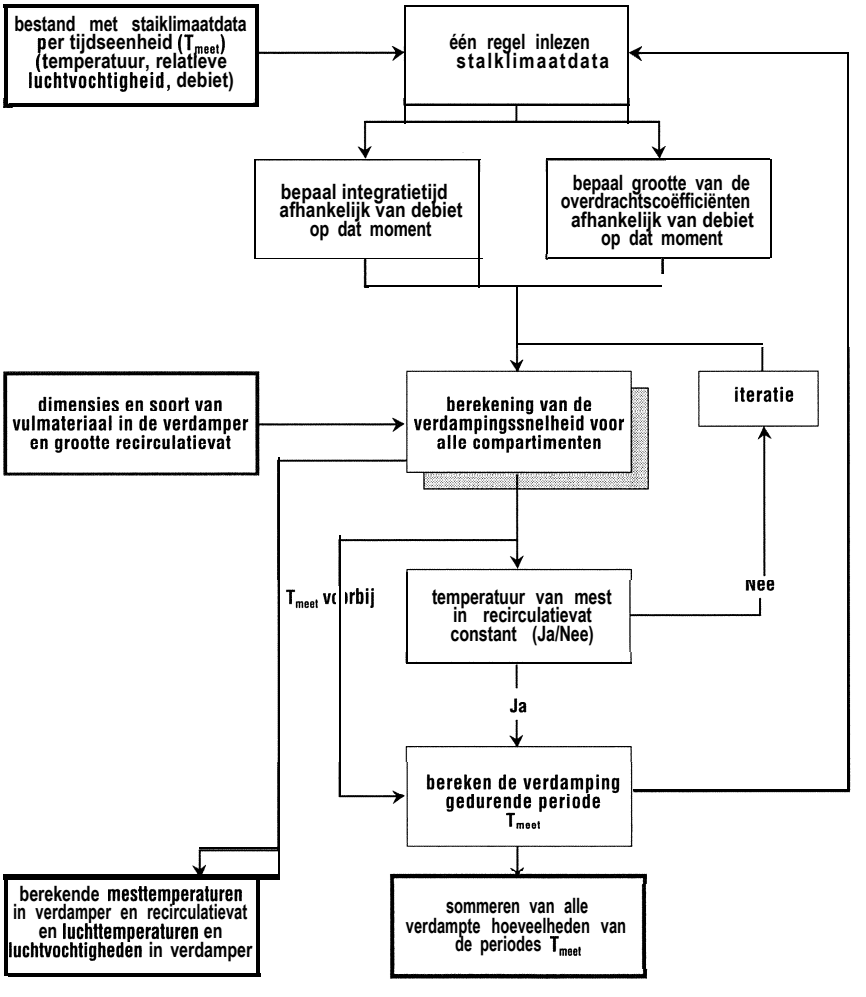
$v_{m,i}$	=	mestvolume in compartiment i	(m^3)
$(\rho c_p)_m$	=	warmtecapaciteit van mest	(J/m^3C)
$T_{m,i}$	=	messttemperatuur in compartiment i	(C)
$\Phi_{m,i}$	=	afnemende meststroom in het systeem	(m^3/s)
A_m	=	contactoppervlak mest - lucht	(m^2)
$\alpha_{m\to l}$	=	warmte-overdrachtcoëff iciënt mest - lucht	(J/m^2Cs)
$T_{l,i}$	=	luchttemperatuur in compartiment i	(C)
r	=	verdampingswarmte van water	(J/kg)
$k_{m\to l}$	=	vochtoverdrachtcoëff iciënt mest - lucht	(m/s)
$c_{l,i}$	=	dampconcentratie in lucht in compartiment i	(kg/m^3)
$c_{m,i}$	=	dampconcentratie in grenslaag mest - lucht in compartiment i	(kg/m^3)
$V_{l,i}$	=	luchtvolume in compartiment i	(m^3)
$(\rho c_p)_l$	=	warmtecapaciteit van lucht	(J/m^3C)
Φ_l	=	luchtstroom in het systeem	(m^3/s)

latiemodel dynamisch gemaakt. Een nieuwe situatie kan dan uit de voorafgaande situatie worden berekend. De tijdstap waarmee gerekend wordt is afhankelijk van het luchtdebiet en varieert van 0,001 tot 0,05 seconde. Randeffecten zijn niet meegenomen, dus alleen de verdamping vanaf het vulmateriaal wordt beschouwd. In figuur 3 is schematisch de werking van het simulatiemodel opgenomen.

2.2 Beschrijving van de validatie-opstelling

Om het simulatiemodel van de verdamper te valideren zijn experimenten op laboratoriumschaal gedaan. Hiertoe is een bestaande biowasser aangepast en voorzien van meetsensoren voor temperatuur en relatieve luchtvochtigheid (figuur 4). Loodrecht op de luchtstroom zijn PVC-pijpjes (dit is het vulmateriaal) geplaatst. Figuur 4 is een schematische weergave van de experimentele opstelling.

Met een ventilator werd een ingesteld luchtdebiet van onder naar boven door het vulmateriaal in de opstelling geblazen. De lucht verdeelde zich en verplaatste zich in een front naar boven (visueel waargenomen) waarna de lucht door een druppelvanger ging. Het niet verdampte water dat in de



Figuur 3: De werking van het simulatiemodel (schematisch)

vorm van druppeltjes aanwezig was in de uitgaande lucht werd hierdoor verwijderd.

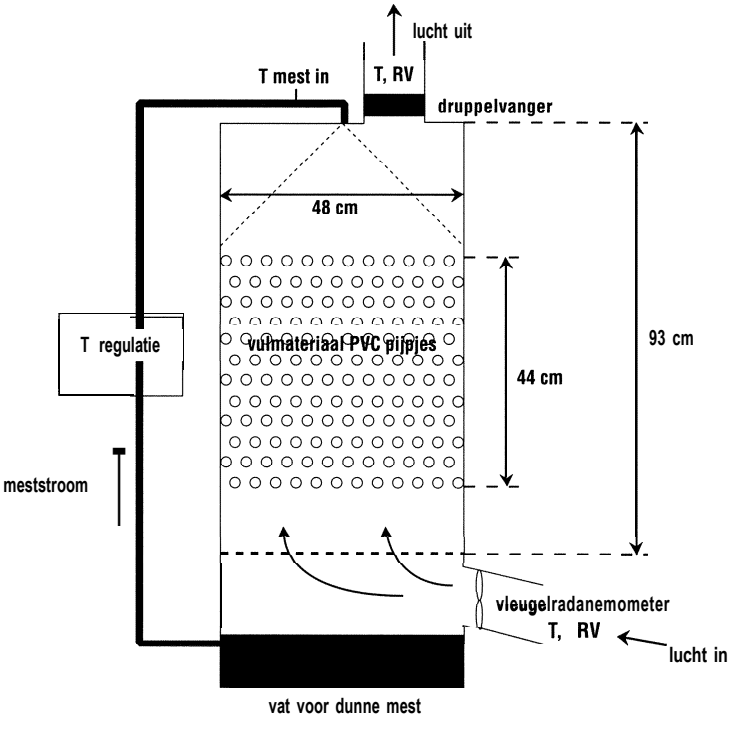
De te verdampen vloeistof (recirculatievloeistof) werd bovenin de opstelling verspreid met behulp van een “nozzle”. De kegel van de “nozzle” raakte de inwendige wand van de opstelling ter hoogte van de bovenzijde van het vulmateriaal. De vloeistof werd goed verdeeld (visueel waargenomen) over het gehele bovenoppervlak van het vulmateriaal. Met behulp van een warmwaterbad kon de recirculatievloeistof worden verwarmd tot een ingestelde temperatuur.

De condities van de ingaande drooglucht konden niet worden ingesteld omdat deze van het laboratorium werd betrokken (Kluskens et al., 1998).
In tabel 2 is weergegeven welke variabelen op welke locatie gemeten zijn. Het meetinterval was 30 seconden.

De grootte van de luchtstroom kon ingesteld worden. Met behulp van een vleugelradanemometer gekoppeld aan een display kon de luchtsnelheid in de aanvoerbuis worden gemeten en afgelezen. Hiermee kon direct de luchtsnelheid tussen de pijpjes worden

Tabel 2: Overzicht van gemeten variabelen in de experimentele opstelling

soort meting	locatie meting
temperatuur van de ingaande lucht	vóór de luchtinlaat van de opstelling
RV van de ingaande lucht	vóór de luchtinlaat van de opstelling
temperatuur van de uitgaande lucht	na de druppelvanger
RV van de uitgaande lucht	na de druppelvanger
temperatuur van de ingaande mest	vóór de nozzle in de mestleiding (deze waarde kon grofweg ingesteld worden)



Figuur 4: Schematische weergave van de experimentele opstelling

berekend (oppervlakteverhouding).
Ook de temperatuur van de ingaande mest kon ingesteld worden. Deze is ook gemeten omdat de instelling niet erg nauwkeurig was en er temperatuurschommelingen konden optreden.

2.3 Experimenten met de validatie-opstelling

De experimenten zijn uitgevoerd met water en met dunne mest (droge stof = 1%). Alle experimenten duurden twee uur. Een overzicht van de instellingen bij de uitgevoerde experimenten is weergegeven in tabel 3.

2.4 Aanpassingen simulatiemodel

Het simulatiemodel is gebruikt om verdamping in een praktijksituatie in te schatten. Hiervoor diende het gevalideerde model dat de experimentele opstelling beschreef aangepast te worden voor een meer praktische installatie. Er zijn uitgangspunten gekozen voor de vorm van het vulmateriaal, de dimensies van de verdamper en de grootte van het recirculatievat. De energiebalans over het recirculatievat is toegevoegd.

2.4.1 Uitvoering van de verdampingsinstallatie

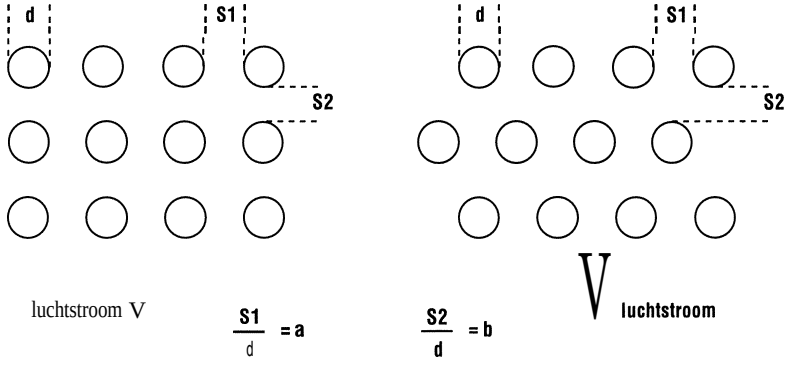
Vulmateriaal

Het vulmateriaal van de verdamper dient aan een aantal eisen te voldoen. Ten eerste dient de bevochtiging goed te zijn om een optimaal verdampend oppervlak te krijgen. Ten tweede dient de structuur zodanig te zijn dat het risico op verstopping minimaal is en ten derde dient de drukval geminimaliseerd te worden. De drukval bepaalt namelijk het energieverbruik van de ventilatoren. Voor dit onderzoek werd als aanvullende eis gesteld dat de warmte-overdacht van het vulmateriaal in de literatuur beschreven was, om oriënterende berekeningen mogelijk te

Tabel 3: Overzicht van experimenten met de validatie-opstelling

soort recirculatie-vloeistof	temperatuur recirculatievloeistof (°C)	snelheid van de lucht tussen de pijpjes (m/s)
water	15	0,3; 0,5; 0,7
	20	0,3; 0,5; 0,7
	25	0,3; 0,5; 0,7
dunne mest	15	0,3; 0,7
	20	0,3; 0,7

(Kluskens et al., 1998)



Figuur 5: Pijpjes, achter elkaar en in verspringende structuur, als vulmateriaal

maken. Het vulmateriaal waarvoor gekozen is bestaat uit pijpjes loodrecht op de luchtstroom.

De drukval over dit vulmateriaal wordt beschreven door de volgende formule (VDI, 1988):

$$\mathbf{\Delta p} = \xi n \frac{\rho_l v_l^2}{2}$$

$\mathbf{\Delta p}$ = drukval (N/m²)
ξ = weerstandscoëff iciënt (-)
n = aantal rijen met pijpjes (-)
ρ_l = dichtheid van lucht (kg/m³)
v_l = luchtsnelheid tussen de pijpjes (m/s)

De waarde van ξ hangt af van de luchtsnelheid, van de structuur van het materiaal en van de waarde van a en b in figuur 5 (VDI, 1988).

Belangrijk is of de pijpjes achter elkaar of verspringend zijn (zie figuur 5). Wanneer een gelijke drukval nagestreefd wordt is de warmte- en vochtoverdracht bij niet verspringende pijpjes beter (VDI, 1988) (Bijlage 1). Ook Eckert (1966) noemt dit expliciet. Door de verticale afstand tussen de pijpjes te verkleinen bij dezelfde buitendimensies van de verdamper ontstaat een groter verdampend oppervlak. De overdrachtscoëff iciënt neemt af, maar het uitwisselend oppervlak neemt toe waardoor er uiteindelijk meer zal verdampen Voor a is 2 gekozen en voor b 1,25 (figuur 5).
Voor de grootte van de pijpjes is gekozen voor een diameter van 2 centimeter. Kleinere pijpjes zijn niet aan te bevelen omdat de structuur van het vulmateriaal dan weer te dicht wordt en de kans op verstopping toeneemt Als voor dikkere pijpen gekozen wordt zal het specifiek oppervlak van het vulmateriaal snel afnemen. Het specifiek oppervlak van het gekozen vulmateriaal is 62,8 m²/m³.

Dimensies van de verdamper
Bij de keuze voor de dimensies van de verdamper spelen de volgende zaken een rol:
1 de maximale luchtsnelheid in de verdamper: de energiebehoefte voor ventilatie in verband met extra drukval;
2 het bovenoppervlak van de verdamper: de energiebehoefte voor het rondpompen van de recirculatievloeistof;
3 inpasbaarheid in een praktijksituatie.

Bovenstaande punten bevatten tegenstrijdigheden. Een kleinere verdamper is in de praktijk gemakkelijker inpasbaar, maar in de verdamper zal de luchtsnelheid hoger zijn. De dimensies van de verdamper die in dit onderzoek verder doorgerekend worden zullen gebaseerd zijn op een maximale luchtsnelheid van 4 meter per seconde tussen de pijpjes (dit is dus 2 meter per seconde in een kanaal zonder vulmateriaal). De diepte waarvoor gekozen is bedraagt 1 meter.
De berekende drukval bij de maximale luchtsnelheid van 4 meter per seconde is 58 Pascal .

Grootte van het recirculatievat en debiet van de mest
De grootte van het recirculatievat is bepalend voor de snelheid waarmee de temperatuur van de recirculatievloeistof reageert op wisselingen in de temperatuur van de ventilatielucht. De invloed van de grootte van het recirculatievat op de uiteindelijke verdamping is met behulp van een aantal oriënterende berekeningen ingeschat.
Uitgangspunt was een ideale menging van dit vat. De invloed van de grootte van de recirculatietank was minimaal. Voor de verdere berekeningen is 4 kubieke meter gekozen.
Als vuistregel bij een biowasser geldt per vierkante meter bovenoppervlak een recirculatie van 6 m³ wasvloeistof per uur (Van de Sande-Schellekens et al., 1993). Deze vuistregel is toegepast bij alle berekeningen.

Ter illustratie is in figuur 6 schematisch de verdamper opgenomen die gebruikt is om simulatie-experimenten te doen.

2.4.2 Gegevens van de ventilatielucht
Om de mogelijke hoeveelheid verdamping in te kunnen schatten dienen er fysische gegevens van de drooglucht bekend te zijn. De eigenschappen van de drooglucht zullen gelijk zijn aan die van de afdelingslucht, en kunnen met behulp van simulatiemodellen

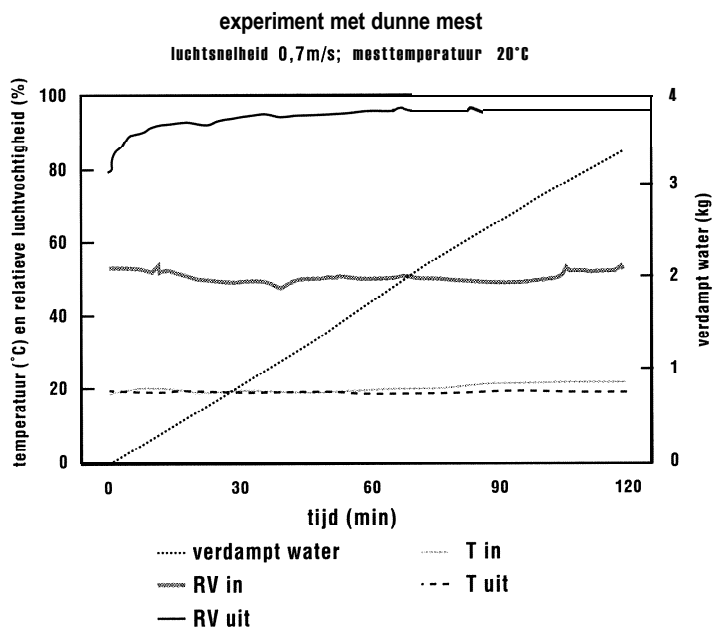
worden berekend. Voor alle diercategorieën is gebruik gemaakt van een statische energiebalans (Vranken, 1999) waarmee het binnenklimaat berekend kan worden, afhankelijk van onder andere het aantal dieren en het gewicht, de soort afdeling, de dikte van de isolatie en de buitencondities. De warmteproductie van de dieren is ingeschat met het model ANIPRO (van Ouwerkerk, 1999). Ook is gebruik gemaakt van het model van Berckmans et al. (1993), dat het binnenklimaat van een vleesvarkensafdeling op een dynamische manier kan berekenen. Voor de warmteproductie van de dieren is in het model van Berckmans uitgegaan van het model van Bruce en Clark (in Berckmans et al., 1993). Voor de buitencondities is gebruik gemaakt van een referentiejaar voor België.

De gehanteerde klimaatinstellingen voor de berekening met de klimaatmodellen voor vleesvarkens zijn opgenomen in bijlage 2.

2.4.3 Uitgevoerde berekeningen met het simulatiemodel

Het ontwikkelde en gevalideerde simulatiemodel kan worden ingezet om de hoeveelheid verdamping van water uit mest te berekenen De invloed van verschillende factoren op de uiteindelijke verdamping kan worden bepaald door één invloedsparameter te variëren. Als eerste is de haalbare hoeveelheid verdamping per diercategorie bepaald. De diercategorie bepaalt in belangrijke mate de condities en de grootte van de ingaande luchtstroom.

Vervolgens is de invloed van toevoeging van extra warmte aan de recirculatietank bepaald. Deze extra energie kan uit verschillende bronnen komen. Ook de mogelijkheden om buitenlucht in te zetten voor de verdamping zullen worden onderzocht. De invloed van menging van luchtstromen met verschillende temperaturen en luchtvochtigheden wordt ook onderzocht.



Figuur 6: Resultaat van een experiment met dunne mest van 20°C bij een luchtsnelheid van 0,7 m/s tussen de pijpjes

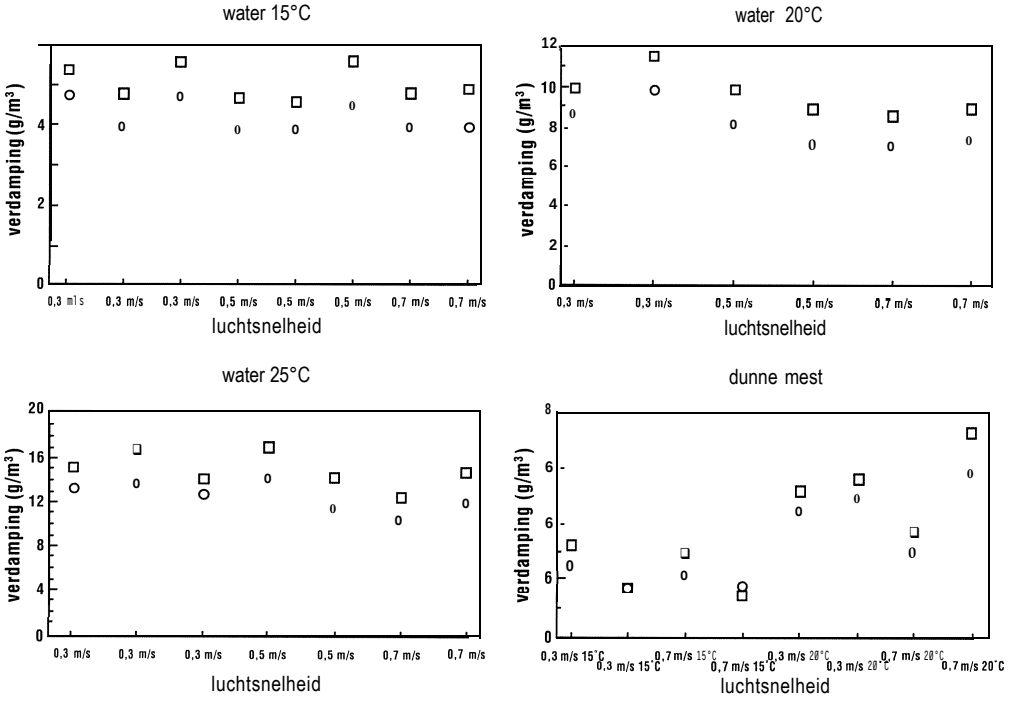
3 RESULTATEN

3.1 Experimenten met de validatie-opstelling

Ter validatie zijn de experimenten gedaan die genoemd staan in tabel 3. Als voorbeeld is in figuur 7 het resultaat van één experiment voor dunne mest te zien.

Het simulatiemodel is aangepast voor de specifieke situatie in de experimentele opstelling. Verdamping aan vlakke oppervlakken binnen de opstelling is toegevoegd. Ook zijn de dimensies van de opstelling ingevoerd in het model. De gemeten condities van de ingaande lucht zijn als invoer gebruikt bij de berekening, zodat het gemeten en berekende resultaat vergeleken mogen worden. In figuur 8 is een overzicht van de gedane experimenten met de model.-berekeningen met water en mest te zien.

Er zijn meerdere experimenten uitgevoerd waarbij dezelfde luchtsnelheid en vloeistoftemperatuur ingesteld waren. Uit de resultaten blijkt dat de experimenten die onder dezelfde condities zijn uitgevoerd een verschillende gemeten en berekende verdamping hebben. Dit heeft te maken met verschillen in de temperatuur en de luchtvochtigheid van de drooglucht die niet instelbaar waren. De luchtcondities zijn echter wel gemeten en gebruikt als invoer voor de modelberekeningen.
Er blijkt door het model een vrij constante onderschatting van de hoeveelheid verdamping te zijn. Gemiddeld was de gemeten verdamping bij experimenten met water 19% hoger dan berekend. Uit de validatiemetingen blijkt dat het model de verdamping van water uit dunne mest met 16% onderschat. Redenen hiervoor zijn dat in het



Figuur 7: Resultaten van model validatie-experimenten (experiment ❑ I, model o)

model géén rekening gehouden wordt met verdamping uit vallende druppeltjes en met verdamping van water in de druppelvanger.

3.2 Experimenten met het simulatiemodel

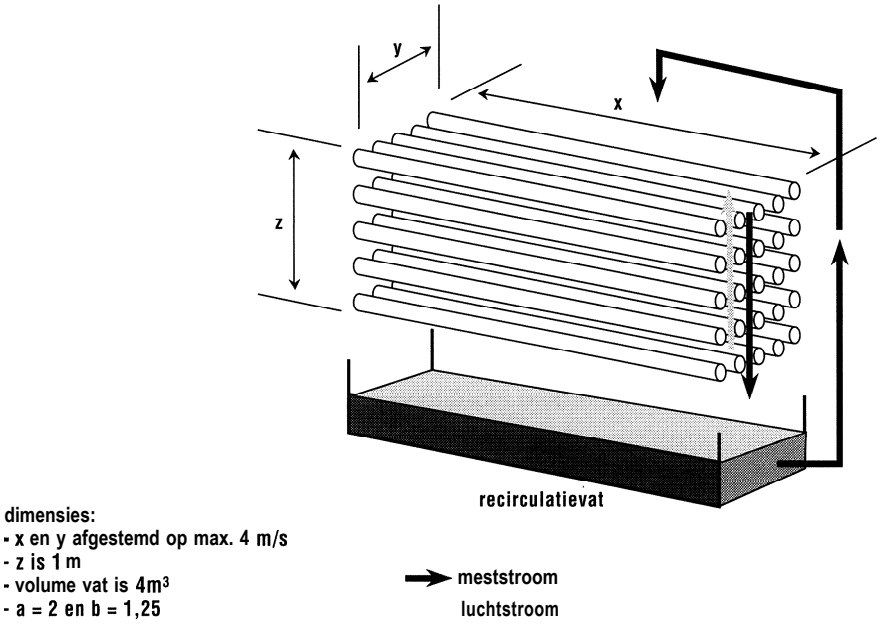
De mogelijke verdamping per diercategorie, berekend met bovenstaande aannames, is opgenomen in tabel 4.

Uitgaande van de gegevens uit tabel 4 kan per productieve zeug per jaar 1.602 kg water worden verdampt (bijlage 3). Dit is 30% van de mestproductie. Voor de twee berekeningsmethoden voor het binnenklimaat bij vleesvarkens bedraagt het verschil in verdamping 23%. De discussie (hoofdstuk 4) gaat nader hierop in.

Tabel 4: Verdamping voor de verschillende diercategorieën en percentage van de mestproductie van de betreffende diercategorie dat verdampt kan worden

diercategorie	verdamping (kg/dpl./jaar)	% van de mestproductie
guste zeugen[1]	689	26%
drachtige zeugen[1]	1.073	36%
kraamzeugen[1]	1.037	20%
gespeende biggen'	243	50%
productieve zeugen[1]	1.602	30%
vleesvarkens[1]	488	41%
vleesvarkens[2]	396	33%

[1] statische binnenklimaatsimulatie, warmteproductie op basis van ANIPRO (Van Ouwerkerk, 1999)
[2] dynamische binnenklimaatsimulatie, warmteproductie op basis van Bruce en Clark (Berckmans et al., 1993)

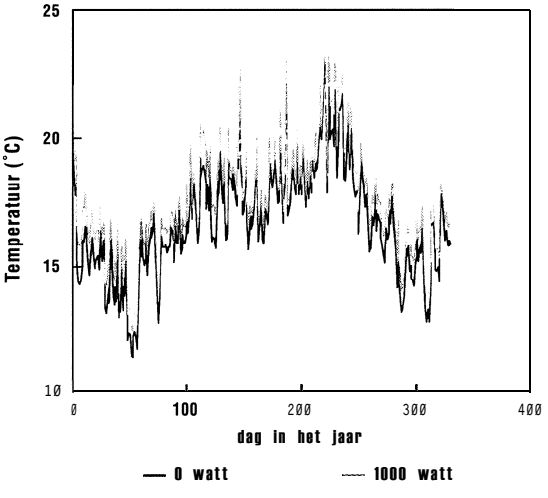


Figuur 8: Schematische voorstelling van verdampingsinstallatie die doorgerekend is

3.2.1 Temperatuur van de dunne mest in het recirculatievat

De temperatuur van de vloeistof in het recirculatievat volgt met enige vertraging globaal de natteboltemperatuur van de ventilatielucht. Door verdamping wordt energie aan de vloeistof onttrokken, waardoor de temperatuur afneemt en lager is dan die van de ventilatielucht.

In het simulatiemodel wordt continu de temperatuur van de vloeistof in alle compartimenten en in het recirculatievat berekend. In figuur 9 is de temperatuur van de vloeistof in het recirculatievat opgenomen wanneer deze een inhoud heeft van 4 kubieke meter en er met lucht van 80 vleesvarkens verdampt wordt (de verdamper is 1 bij 0,889 bij 1 meter).



Figuur 9: Temperatuur van de recirculatievloeistof in het vat (4 m^3) bij verdamping met ventilatielucht van 80 vleesvarkens met en zonder externe energiebron van 1 .OOO Watt

Uit figuur 9 is af te lezen dat het effect van 1.000 Watt energietoevoeging op de temperatuur van de vloeistof in het vat niet groot is (gemiddeld 0,81graad). Een kleine verhoging van de vattemperatuur heeft echter al merkbare positieve gevolgen voor de verdamping (paragraaf 3.2.3.1).

3.2.2 Drooglucht van verschillende afdelingen

In een centraal afzuigkanaal zal de lucht van verschillende afdelingen gemengd worden. De verdampingscapaciteit van de verschillende luchthoeveelheden mag niet zomaar opgeteld worden, omdat door menging de fysische eigenschappen van de lucht veranderen. In tabel 5 zijn de berekende verdampingsresultaten opgenomen wanneer lucht van verschillende afdelingen in verschillende productiestadia voor de verdamping wordt gebruikt.

Uit tabel 5 blijkt dat bij vleesvarkens de hoeveelheid verdamping per dierplaats per jaar niet negatief be'invloed wordt door het mengen van de luchthoeveelheden uit de verschillende afdelingen. Bij andere diercategorieën kan de invloed van het mengen van de lucht groter zijn. Dit is bijvoorbeeld te verwachten wanneer relatief warme lucht uit een biggenafdeling gemengd wordt met lucht uit een afdeling voor drachtige zeugen.

3.2.3 Toepassing van externe energiebronnen

De verdamping die met stallucht gerealiseerd kan worden is niet voldoende om alle

Tabel 5: Verdamping met drooglucht uit meerdere afdelingen in een ander productiestadium bij 80 vleesvarkens

aantal afdelingen	dagnummer op dag 1 van het jaar	verdamping totaal (kg/jaar)	verdamping per dierplaats (kg/jaar)
1	1	31.714	396
2	1 en 42	70.206	439
3	1 en 42 en 84	104.803	437

mest op een bedrijf te verwerken tot een meststof met hoog drogestofgehalte. Om de installatie optimaal te benutten zou dit echter wel gewenst zijn. Hierbij dient rekening gehouden te worden met de verpompbaarheid, die bij een toenemend drogestofgehalte een beperkende factor kan vormen. Voor verdere verdamping zijn andere drogingstechnieken of een scheidingsstap noodzakelijk.

Door energie (warmte) aan het recirculatievat toe te voegen zal de verdamping toenemen. De warmte aan de lucht toevoegen zal hetzelfde effect hebben, maar praktisch gezien lastiger zijn (extra drukval, installatiekosten). Ook naverwarming in de verdamper heeft een hogere verdamping tot gevolg (bijvoorbeeld buisjes verwarmen van binnenuit). Ook dit zal echter minder praktisch zijn dan energie direct aan het recirculatievat toe te voegen, terwijl het effect vergelijkbaar zal zijn.

3.2.3.1 *De efficiëntie van het toegevoegd vermogen (η)*

Door toevoeging van energie aan het recirculatievat zal de verdamping verhogen. Voor verschillende doorgerekende vermogens staat het berekende resultaat in tabel 6.

De efficiëntie van het toegevoegd vermogen is berekend uit de hoeveelheid water die verdampt kan worden met de hoeveelheid toegevoerde energie (op basis van de verdampingswarmte van water) en de hoeveelheid waarmee de verdamping is toegenomen ten opzichte van de uitgangssituatie.

De energie die toegevoegd wordt aan het vat kan uit verschillende bronnen komen. Een groot voordeel is dat de benodigde energie zogenaamde laagwaardige energie is. Warmte van een relatief laag temperatuurniveau is zeer geschikt om het recirculatievat op te warmen. Hieronder worden enkele mogelijke bronnen genoemd.

3.2.3.2 Energie die vrijkomt bij de beluchting

Bij beluchting van varkensmest komt energie vrij als gevolg van de afbraak van organisch materiaal. Bij de afbraak van 1 kilogram organisch materiaal komt 14 MJ energie vrij (Van der Kaa en Van Gastel, 1997).
De hoeveelheid energie die vrijkomt per kubieke meter mest met verschillende drogestofgehaltes staat in tabel 7. Ook de extra haalbare verdamping in kilogram per kubieke meter beluchte mest is in deze tabel genoemd.

Tabel 6: Toename van de verdamping bij 80 vleesvarkens door continue toevoeging van energie aan het recirculatievat en efficiëntie van de toegevoegde energie (verdampingswarmte van water bij 17°C is $2{,}46 \times 10^6$ J/kg)

toegevoegd vermogen (W)	verdamping (kg/jaar)	η - efficiëntie toegevoegd vermogen (%)
0	31.714	
500	35.844	64%
1.000	40.002	64%
1.500	44.188	65%
5.000	74.169	66%

Tabel 7: Hoeveelheid energie die vrijkomt bij beluchting van 1 m^3 mest bij verschillende organische stofgehaltes en extra haalbare verdamping per m^3 beluchte mest ($\eta = 64\%$)

organische stof (%)		extra energie (MJ)	extra verdamping/m^3 beluchte mest (kg)
2	(dunne fractie)	280	73
3,5	(zeugenmest)	490	128
6	(vleesvarkensmest)	840	219

3.2.3.3 Zonne-energie

Door zonne-energie in te vangen en aan de recirculatietank toe te voegen kan het temperatuurniveau van de mest in de recirculatietank omhoog gebracht worden. In een zonnecollector kan de dunne mest (of een andere warmtedrager) opgewarmd worden. Deze warmte kan weer worden afgegeven aan de mest in de recirculatietank.
De jaarlijkse instraling is in Nederland 3,4 GJ/m^2 (Lund, 1984). Een deel van deze energie zal voor opwarming van de mest in de collector kunnen zorgen. In een collector zal de zonnestraling worden omgezet in een opwarming van de vloeistof. Tegelijkertijd zal de mest in de collector warmte verliezen aan de omgeving door convectie en straling.
Een vergelijkbaar systeem met de hier voorgestelde zonnecollector is de zonneboiler (beide invanging van thermische zonne-energie). De hoeveelheid energie die door een zonneboiler jaarlijks vastgelegd kan worden bedraagt ongeveer 1,4 GJ/m^2 (Novem, 1998). Omdat voor opwarming van het recirculatievat energie van een lager temperatuurniveau nodig is dan bij een zonneboiler, kan de hoeveelheid ingevangen energie per vierkante meter collector wellicht nog hoger liggen.
Uitgaande van een efficiëntie van het toegevoegd vermogen van 64% zal de verdamping toenemen bij een groter oppervlak van de collector (tabel 8).

Afhankelijk van het gekozen oppervlak van de verdamper kan de verdampingscapaciteit dus flink opgekrikt worden. Wanneer het dak van de stal wordt gebruikt als collectoroppervlak zal tevens een stuk zonbelasting worden uitgesloten, wat een gunstige invloed heeft op het binnenklimaat. Over het algemeen is er een groot dakoppervlak aanwezig, waarvan met name de zonkant (zuidkant) geschikt is voor invanging van zonne-energie.

3.2.3.4 *Warmte-krachtkoppeling*

Bij het gebruik van een warmte-krachtkoppeling (WKK) is het het aantrekkelijkst om de relatief hoogwaardige (hoog temperatuurniveau) restwarmte te gebruiken voor de verwarming in de stallen. Op momenten dat deze verwarming niet nodig is kan de restwarmte van deze installatie worden benut om de mest in het recirculatievat op te warmen. De hoeveelheid restwarmte die hiervoor beschikbaar is, is afhankelijk van vele factoren. Hieronder is voor één mogelijke situatie de invloed van een WKK ingeschat. Warmte die anders verloren zou gaan wordt dan gebruikt voor de extra verdamping.

Een moderne WKK kan een elektrisch rendement halen van ongeveer 35% en een thermisch rendement van ongeveer 55% (Nijssen et al., 1997). Wanneer de WKK gedimensioneerd wordt op de elektriciteitsbehoefte, dient er per jaar ongeveer 286 kWh per productieve zeug geleverd te worden en 32 kWh per gemiddeld aanwezig vleesvarken (Hoste, 1995; Hanegraaf, 1996). De hoeveelheid warmte die bij de productie van die hoeveelheid elektrische energie vrijkomt en de hoeveelheid verdamping die daarmee gerealiseerd kan worden staan in tabel 9. In deze berekening wordt gesteld dat bij een zeugenbedrijf 70% van de warmteproductie van de WKK ingezet kan worden voor verwarming. Bij een vleesvarkensbedrijf is dat 10%. De extra verdamping door op-

Tabel 8: Ingevangen hoeveelheid energie door een zonnecollector met verschillende oppervlakken en de daardoor toenemende verdamping (η = 64%)

oppervlak collector (m^2)	ingevangen energie (GJ/jaar)	extra verdamping (kg/jaar)
10	14	3.642
25	35	9.106
80	112	29.138
200	280	72.846

warming van het recirculatievat met de restwarmte van de WKK staat weergegeven in tabel 9. Op het bedrijf is dan nog steeds energie nodig voor verwarming. De warmtebehoefte bedraagt 3,7 GJ per productieve zeug en 0,23 GJ per vleesvarken (Hoste, 1995; Hanegraaf, 1996).

De resultaten dienen als richtwaarden en niet als absoluut geldende waarden beschouwd te worden. Bovendien is in de begrote elektriciteitsbehoefte geen rekening gehouden met een extra vraag voor het geïntegreerde luchtbehandelingssysteem (drukval over verdamper, pompen et cetera).

3.2.4 Verdampen met buitenlucht
De haalbare verdamping kan worden vergroot door met extra lucht te gaan drogen. Deze lucht kan gewoon van buiten genomen worden. De verdamping die met buitenlucht gehaald kan worden is ook met het simulatiemodel te berekenen.

3.2.4.1 Verdampen met alleen buitenlucht
In plaats van stallucht kan ook buitenlucht door de verdamper heen worden getrokken. De hoeveelheid buitenlucht die in de berekening gebruikt is, is gelijk aan de gebruikte ventilatiehoeveelheid van 80 vleesvarkens zoals deze ook eerder gebruikt is (tabel 10).

De gemiddelde droogcapaciteit van de buitenlucht van een geheel jaar blijkt 38% te zijn van die van stallucht. Gedurende koude periodes verdampt er echter zeer weinig en is het risico van condensatie van vocht in de verdamper groot.

3.2.4.2 Bijmengen van buitenlucht
Een andere mogelijkheid om buitenlucht te gebruiken om de verdampingscapaciteit te vergroten is het realiseren van een min of meer continue luchtstroom door de verdamper. Als de lucht niet uit de afdeling komt wordt er lucht van buiten bijgemengd. Bijkomend voordeel van dit systeem is dat de ventilator op continu vermogen draait en er dus geen (frequentie-)regeling nodig is. De grootte van de luchtstroom dient zodanig te zijn dat er bij maximale ventilatie geen luchtstroom van buiten bijkomt. In deze berekening is dus geen gelijktijdigheid meegenomen

De lucht waarmee verdampt wordt is een stroom van continue grootte. Als de lucht niet uit de afdeling komt wordt deze van buiten aangezogen (tabel 11).

Vanwege het mengen van de lucht veranderen de fysische eigenschappen, waardoor niet de verdampingscapaciteit van beide

Tabel 9: Elektriciteitsvraag en warmteproductie WKK (specifieke voorbeeldsituatie) en de daarmee haalbare verdamping per jaar (warmte bij zeugen voor 30% toegevoegd aan het vat en bij vleesvarkens voor 90%, $\eta = 64\%$)

	elektriciteits-behoefte (kWh)	warmte-productie (GJ)	warmte toegevoegd (MJ)	extra hoeveelheid verdamping (kg/jaar)
per productieve zeug	286	16	480	125
per vleesvarken	32	0;12	108	28

Tabel 10: De haalbare verdamping met buitenlucht en stallucht van 80 vleesvarkens, in beide gevallen gelijke grootte van de luchtstroom

	verdamping (kg/jaar)
stallucht van 80 vleesvarkens	31.714
buitenlucht	11.980

luchthoeveelheden afzonderlijk mag worden opgeteld. Of drogen met buitenlucht een goede methode is hangt onder andere af van de extra benodigde energie voor de ventilatoren.

Tabel 11: De haalbare verdamping door bijmengen van buitenlucht aan de stallucht van 80 vleesvarkens tot een constante luchtstroom en de gemiddelde drukval over de verdamper

	verdamping (kg/jaar)	gemiddelde drukval (Pa)
stallucht van 80 vleesvarkens	31.714	8,5
bijmengen met buitenlucht tot max. cap	42.854	58

4 DISCUSSIE EN CONCLUSIES

Het onderzoek bestond uit twee delen. Ten eerste is het simulatiemodel gevalideerd, waarvoor in een laboratoriumopstelling experimenten zijn gedaan. Ten tweede is het gevalideerde model gebruikt om de haalbare verdamping bij verschillende diercategorieën en uitvoeringen te berekenen.

Het is mogelijk om met het ontwikkelde simulatiemodel een praktijkinstallatie te ontwerpen. In een vervolgonderzoek op praktijkschaal dienen de gestelde vuistregels getoetst te worden. Praktische aspecten van een géintegreerd mest- en luchtbehandelingssysteem zoals dat in dit verslag is beschreven zullen dan tevens aan de orde komen, zodat een gefundeerd en praktijkrijp ontwerp ontwikkeld kan worden.

4.1 Validatie van het simulatiemodel

Gemiddeld was de gemeten verdamping bij experimenten met water 19% hoger dan berekend. Uit de validatiemetingen blijkt dat het model de verdamping van water uit dunne mest met 16% onderschat. De verklaring voor het verschil is dat verdamping van vallende druppeltjes en verdamping in de verdamper niet meegenomen zijn in de modelberekeningen. De bijdrage van de verdamping vanuit vallende druppeltjes aan de totale verdamping (verdamping vanaf vulmateriaal + verdamping vanaf vallende druppeltjes) in de wasser zal afhankelijk zijn van de uitvoering van de verdamper. Deze term kan in een later stadium aan het model worden toegevoegd.

4.2 Experimenten met het simulatiemodel

4.2.1 Vulmateriaal en dimensies verdamper

In het onderzoek is uitgegaan van een vulmateriaal van buisjes loodrecht op de luchtstroom. Met dit vulmateriaal zijn talrijke configuraties denkbaar. De structuur waarmee gerekend is is weergegeven in figuur 6. Bij verspringende pijpjes zal de bevochtiging gemakkelijker gaan, maar dit hoeft bij een voldoende recirculatie van wasvloeistof bij deze variant ook geen probleem te zijn.

Er zijn ook andere vulmaterialen mogelijk die voldoen aan de eisen die de praktijk eraan zal stellen. Hierbij valt te denken aan kunststof platen of constructies met een zeer open structuur en een goede bevochtiging. Van deze vulmaterialen zijn de overdrachtscoëfficiënten echter onbekend, waardoor modelleren van deze verdampers onmogelijk is. Voor dit onderzoek was dit echter een eis. Bij toepassing van andere vulmaterialen kan de verdamping afwijken van de waarden die vermeld zijn in dit verslag.

De dimensies van de verdamper dienen zodanig gekozen te worden dat de luchtsnelheid (dus de drukval) bij maximale ventilatie acceptabel blijft. Wat acceptabel is hangt af van technische, praktische en economische randvoorwaarden. Wat technisch mogelijk is hangt af van de gebruikte ventilatoren, maar overbruggen van een groot drukverschil kost veel energie. Praktische randvoorwaarden stellen eisen aan hoe groot de verdamper maximaal mag zijn. Dit zal bijvoorbeeld afhangen van de afmetingen van het centraal afzuigkanaal. Voor bepaling van het economische optimum dienen de jaarkosten voor de verdamper met verschillende dimensies (dus afschrijving, rente, onderhoud en energieverbruik) afgezet te worden tegen de grootte van de gerealiseerde verdamping.

4.2.2 Verdamping

Binnenklimaatmodellen

De verdamping zoals die berekend wordt in hoofdstuk 3 wekt de indruk een zeer nauwkeurige waarde te zijn. De genoemde getallen zijn echter niet meer dan een richtlijn. Dit blijkt bijvoorbeeld uit het verschil in resultaat bij vleesvarkens voor de twee verschillende benaderingen van de warmteproductie van de dieren (tabel 12).

Vele factoren hebben invloed op de uiteindelijk haalbare verdamping. Enkele voorbeelden zijn: de warmteproductie van de dieren die afhangt van voersoort en voerhoeveelheid, de gehanteerde klimaatinstellingen, de vloeruitvoering en de plek van

afzuiging en de buitenomstandigheden op een specifieke plek in een specifiek jaar. De verschillen in uitkomst in de berekeningen kunnen vooral worden verklaard door een andere aanname voor de warmteproductie van de dieren. Daarnaast is in het statisch model geen verdamping vanuit natte oppervlakken binnen de afdeling meegenomen.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van klimaatinstellingen zoals die door het praktijkonderzoek gehanteerd worden. Voor bepaling van de binnenklimaatgegevens met behulp van het model van Berckmans et al. (1993) is gebruik gemaakt van een referentiejaar voor België.

Uitvoering van de verdamper
Voor bepaling van de dimensies van de verdamper zijn de volgende ontwerprichtlijnen gehanteerd: maximale luchtsnelheid tussen de pijpjes *4* meter per seconde en minimaal 60 vierkante meter contactoppervlak per vierkante meter doorstroomd oppervlak. Een groter doorstroomd oppervlak van de verdamper zal een gunstig effect hebben op de drukval en de verdamping.
In de modelberekeningen is geen rekening gehouden met verdamping van water uit vallende druppels en van de vlakke platen binnen de verdamper. Uitgangspunt was wel dat de buisjes rondom geheel bevochtigd waren, om vochtuitwisseling over een zo groot mogelijk oppervlak te hebben.

In alle berekeningen in deze studie is uitgegaan van een tegenstroom-verdamper. In een praktijksituatie zal kruisstroom wellicht gemakkelijker inpasbaar zijn (bijvoorbeeld de situatie als in figuur 1). De effectiviteit van de vochtuitwisseling is afhankelijk van het principe en zal bij tegenstroom het grootst zijn. Hoewel theoretisch de effectiviteit van de vochtoverdracht minder is (Gaswassers, 1984), blijkt uit praktijkexperimenten met tegen- en kruisstroom de effectiviteit van de luchtwassing niet aantoonbaar te verschillen (Klarenbeek, 1995 a en b).

Drogestofpercentage van de mest
Wanneer de dunne mest gebruikt wordt om te recirculeren zal in veel gevallen een scheidingsstap gewenst zijn. Bij zeugenmest is scheiden door bezinking zeer geschikt. De dunne fractie heeft een drogestofgehalte van rond de 2%. Bij vleesvarkensmest kan een mechanische scheider de mest scheiden in een dunne en een dikke fractie. Voor berekening van het percentage van de mest dat kan worden verdampt is in de tabel uitgegaan van normwaardes van de totale mestproductie per diercategorie (KWIN, 1997). De invloed van een toenemend drogestofgehalte op de verdamping is pas merkbaar bij hogere drogestofgehaltes dan 50% (Derikx, 1995). De verpompbaarheid en het risico op verstopping zijn dus eerder bepalend voor de mate waarin dunne mest ingedikt kan worden.

4.2.3 Externe energiebronnen
In dit verslag zijn enkele mogelijke externe energiebronnen genoemd. In principe is alle warmte geschikt om toe te voegen aan het recirculatievat. Een voordeel is dat de temperatuur van de dunne mest vrij laag is, waardoor laagwaardige warmte al voor een opwarming van het vat kan zorgen.

Tabel 12: Verdamping bij vleesvarkens voor de twee verschillende benaderingen van het binnenklimaat

	verdamping (kg/dpl./jaar)	% van de mestproductie
vleesvarkens[1]	488	41%
vleesvarkens	396	33%

[1] statische binnenklimaatsimulatie, warmteproductie op basis van ANIPRO (Van Ouwerkerk, 1999)
[2] dynamische binnenklimaatsimulatie, warmteproductie op basis van Bruce en Clark (Berckmans et al., 1993)

Een andere mogelijke energiebron die ingezet kan worden en energietechnisch interessant kan zijn is bijvoorbeeld de warmte die afkomstig is van vloerkoeling bij zware vleesvarkens (bijlage 5). Naast het warmwatercircuit voor de vloerverwarming kan er een secundair koelwatercircuit zijn waaruit ook water kan worden afgetapt en gerecirculeerd door het vloercircuit. Bij zware vleesvarkens gedurende warme perioden zal de afgegeven warmte ongeveer 40 Watt per dier bedragen. Dit systeem heeft echter ook invloed op het stalklimaat, dus ook op de verdamping die met de ventilatielucht zonder externe energiebronnen kan worden gerealiseerd.
Het voordeel van toepassing van dit systeem zit in eerste instantie in de koeling van de vloer. Het daar gewenst temperatuurniveau komt overeen met het temperatuurniveau in de recirculatietank (natte boltemperatuur van de afdelingslucht).

4.2.4 Luchtwassing
Voor een effectieve luchtwassing is een goede vochtoverdracht tussen de lucht en de vloeistof noodzakelijk. Een goede overdracht is ook voor de verdamping van belang.

Bij invanging van ammoniak uit de lucht in de vloeistof is van belang dat de concentratie van opgeloste ammoniak in de wasvloeistof niet te hoog is. Aanzuren zorgt voor een lagere ammoniakconcentratie in de vloeistof. Verwarmen heeft een hogere ammoniakconcentratie tot gevolg (Elzing et al., 1992).
De concentratie ammonium in de vloeistof kan worden verlaagd door beluchting. Ook zullen tijdens de beluchting organische stoffen (geurstoffen) worden afgebroken (Van der Kaa et al., 1997).

Bij een verder ontwerp van een geïntegreerd luchtbehandelingssysteem is de eventuele behandeling van de dunne mest voordat deze geschikt is als wasvloeistof een belangrijk aandachtspunt. Gebruikmaken van een luchtwasser na de verdamper is natuurlijk ook mogelijk.

4.2.5 Energieverbruik
Het ge'integreerde luchtbehandelingssysteem zal een extra energievraag op bedrijfsniveau betekenen. De extra energievraag bestaat uit:
1 energie voor de ventilatoren; om de lucht door de verdamper (en eventuele druppelvanger) te verplaatsen zal de drukval over het systeem toenemen, dit geeft een hogere energievraag voor ventilatie;
2 energie voor rondpompen van de recirculatievloeistof;
3 energie voor de mestbehandeling (bijvoorbeeld beluchting).

Door vermindering van het mestvolume zal de energievraag voor transport en aanwending van de mest echter aanzienlijk verminderen

4.3 Conclusies

- Het simulatiemodel beschrijft de verdamping vanaf het vulmateriaal op een betrouwbare manier.
- Het uitgangspunt is dat het vulmateriaal in de verdamper bestaat uit buisjes die loodrecht op de luchtstroom staan. De gunstigste configuratie is de pijpjes achter elkaar te zetten en niet te laten verspringen (figuur 5).
- Uitgaande van een maximale luchtsnelheid van 4 meter per seconde tussen de pijpjes (dit is bij maximale ventilatie) is een indicatiewaarde van de verdampingscapaciteit per diercategorie berekend (tabel 4).
- De berekende verdamping per productieve zeug per jaar bedraagt 30% van de mestproductie. Bij vleesvarkens is dit 30% à 40% van de mestproductie.
- De verdamping kan worden verhoogd door energie aan het recirculatievat toe te voegen. De efficiëntie waarmee deze energie wordt omgezet in extra verdamping bedraagt ongeveer 64%. De verdamping van water kost erg veel energie. Een groot voordeel is dat laagwaardige energie (laag temperatuurniveau) goed gebruikt kan worden.

LITERATUUR

Aartsen, J.J. van 1995. *Integrale Notitie Mest- en Ammoniakbeleid.* Ministerie van LNV, Den Haag.

Berckmans, D., E. Vranken en M. van Pee 1992. *Evaluation of livestock environment control by simulation technique.* ASAE-Summermeeting, 1992 North-Carolina, USA, no. 924055, 24 p.

Derikx, P. J.L., P.J.W. ten Have, F. van Voorneburg en T.E. Hoogerwerf 1995. *Technische haalbaarheid van centrale mestverwerking van rundermengmest.* Rapport 95-22, IMAG-DLO, Wageningen.

Eckert, ERG 1966. *Warme- und Stoffaustausch.* Berlin.

Elzing, A., W. Kroodsma, R. Scholtens en G.H. Uenk 1992. *Ammoniakemissie-metingen in een modelsysteem van een rundveestal: Theoretische beschouwingen,* Rapport 92-3, IMAG-DLO, Wageningen.

Gaswassers 1984. *Gaswassers.* In: handboek modelvoorschriften luchtverontreiniging, Staatsuitgeverij, 29 p.

Hanegraaf, M.C. en J.A.M. van Bergen *1996. Ervaringen met de energiemeetla t in de veehouderij.* Centrum voor landbouw en milieu, Utrecht, 96 p.

Have, P.J.W. ten, J.J.M. Schellekens, J. Doornbos, J. Rijpma en J. Uenk 1996. *Vergroting afzet van varkensmest door be- en verwerking.* Centrum voor Informatie en Ondersteuning mestverwerking, Wageningen.

Hoste, R. *1995. Oorzaken van verschillen in energiegebruik op varkensbedrijven.* Publikatie 3.161, Landbouw Economisch Instituut, Den Haag, 40 p.

Kaa, C.C.R. van der en J.P.B.F. van Gastel 1997. *Ontwerp van biologische stikstofverwijderings-systemen voor varkensmest.* Proefverslag P1. 192, Praktijkonderzoek Varkenshouderij, Rosmalen.

Klarenbeek, J.V.1995a. *Bestrijding van emissies bij mestvarkensstallen; Rendementsmeting van een BTW-6 tegenstroombiowasser,* nota P 95-45 IMAG-DLO, Wageningen.

Klarenbeek, J.V.1995b. *Bestrijding van emissies bij mestvarkensstallen; Rendementsmetingen van een MKS-6 kruisstroombiowasser* nota P 95-46 IMAG-DLO, Wageningen.

Kluskens, R., O.L.H. Verhagen en P.G.H. Verberkt *1998. Waterverdamping uit dunne mest,* Afstudeerverslag Agrarische Hogeschool, Den Bosch.

Lund, H. 1984. *Test Reference Years.* CEC Programme Solar Energy.

KWIN, Projectgroep *1997. Kwantitatieve Informatie Veehouderij 19974998* (KWIN). IKC-veehouderij, Ede.

Projectgroep Comma *1997. Mestbeleid op maat.* Ministerie van LNV, Den Haag

Novem, *Zonneprikkel.* Nummer 7, juli 1998.

Nijssen, J.M.A., S.J.F. Antuma en A.T.J. van *Scheppingen 1997. Perspectieven mestvergisting op Nederlandse Melkveebedrijven.* Publicatie 122, Praktijkonderzoek Rundvee, Schapen en Paarden, Lelystad.

Ouwerkerk, E.N.J. van 1998. *ANIPRO Versie 1.15, productiekenmerken voor landbouwhuisdieren.* IMAG-DLO, Wageningen.

Sande-Schellekens, A.L.P. van de en G.B.C. Backus 1993. *Ervaringen met biowassers op vleesvarkensbedrijven in PROPRO.* Proefverslag Pi .93, Praktijkonderzoek Varkenshouderij, Rosmalen.

Schenk, J. *1993. Fysische transportverschijnselen.* Landbouwuniversiteit, Wageningen.

Verein Deutsche Ingenieure 1988. VDI-Wärmeatlas: *Berechnungsbiätter für die Wärmeübertragung.*

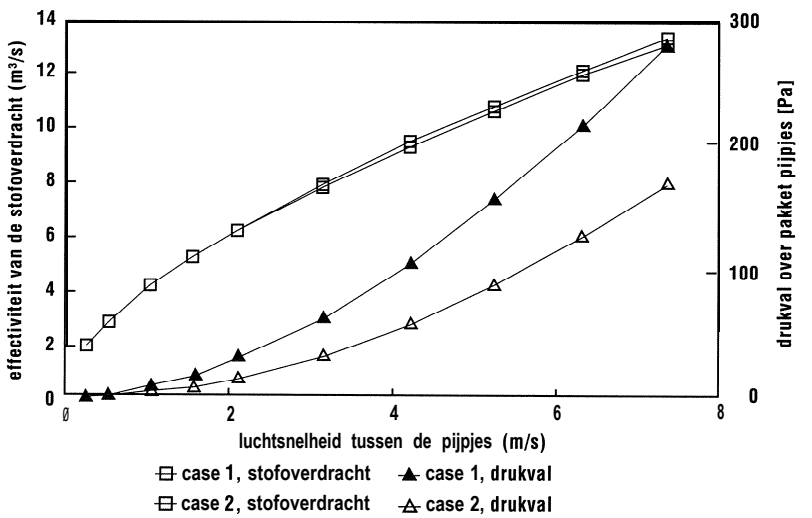
Vran ken, E. 1999. *Persoonlijke mededeling.*

Wagenberg, A.V. van 1998. *Evaporation of water from slurry using ventilation exhaust air:* International conference on agricultural Engineering AgEng 98, Oslo August 1998, CD-rom.

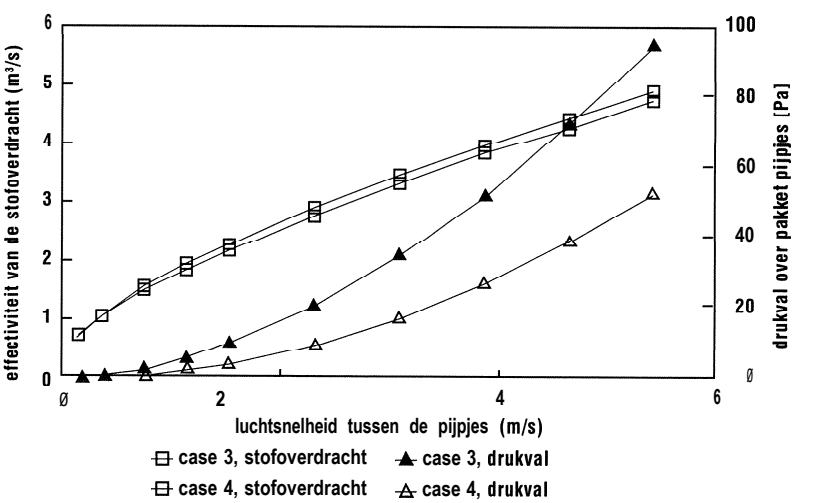
BIJLAGEN

Bijlage 1: Resultaten van oriënterende berekeningen met betrekking tot drukval en vochtoverdracht

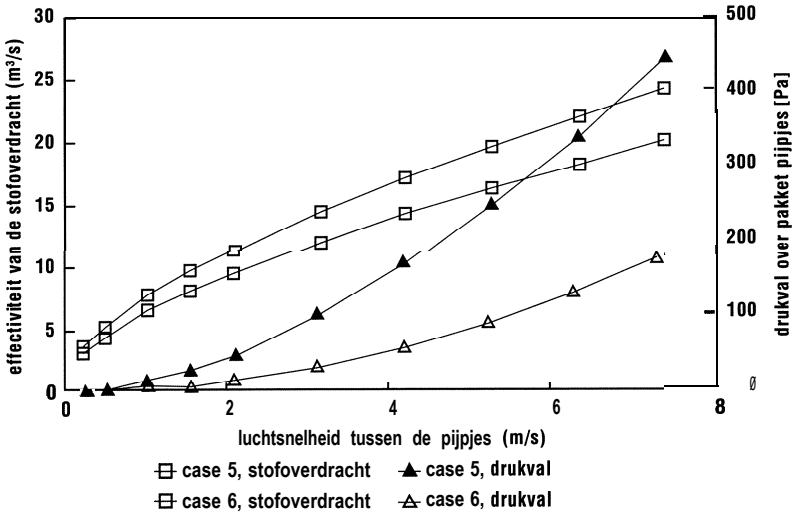
De invloed van de configuratie van het vulmateriaal op de drukval en de vochtoverdracht is onderzocht. De cases die in onderstaande figuren worden genoemd verschillen in vulmateriaal en worden hieronder gekenmerkt door:
- a en b; verhoudingsgetallen voor ruimte tussen de pijpjes (ad figuur 5)
- x en y; de lengte en breedte van het doorstroomd oppervlak [m]; bij alle cases is x 2 en y 2
- z; de diepte van het doorstroomd oppervlak [m]; bij alle cases is z 1
- d_{vul}; diameter van de pijpjes in het vulmateriaal [m]



case 1: verspringende pijpenbundel, a = 2 en b = 2, d_{vul} = 0,02
case 2: niet verspringende pijpenbundel, a = 2 en b = 2, d_{vul} = 0,02



case 3: verspringende pijpenbundel, a = 3 en b = 3, d_{vul} = 0,02
case 4: niet verspringende pijpenbundel, a = 3 en b = 3, d_{vul} = 0,02



case 5: verspringende pijpenbundel, a = 2 en b = 1,25, d_{vul} = 0,02

case 6: niet verspringende pijpenbundel, a = 2 en b = 1,25, d_{vul} = 0,02

Bijlage 2: Gebruikte klimaatinstellingen bij het doorrekenen van het klimaatmodel voor vleesvarkens van Berckmans et al. (1993)

Vleesvarkens (23 - 110 kg):

Temperatuurcurve	Dagnr.	Begintemperatuur ventilatie (°C)	Streefwaarde verwarming (°C)
knikpunt 1	1	26	24
knikpunt 2	3	25	23
knikpunt 3	7	24	22
knikpunt 4	14	23	21
knikpunt 5	21	22	20
knikpunt 6	28	22	19
knikpunt 7	42	21	16
knikpunt 8	63	21	15
knikpunt 9	120	21	15

Ventilatiecurve	Dagnr.	Band breedte ventilatie (°C)	Minimumventilatie per dier (m^3/uur)	Maximumventilatie per dier (m^3/uur)
knikpunt 1	1	3	8	30
knikpunt 2	3	3	8	35
knikpunt 3	7	3	9	40
knikpunt 4	14	3	10	47
knikpunt 5	21	3	12	55
knikpunt 6	28	3	14	65
knikpunt 7	42	3	14	70
knikpunt 8	63	3	16	80
knikpunt 9	120	3	16	80

Bijlage 3: Berekening verdamping per productieve zeug

Verdamping per productieve zeug:
De haalbare verdamping per jaar per productieve zeug kan worden berekend (2,35 is worp-index).

	Aantal dagen			Verdamping (kg/jaar)
aantal dagen dekstal	= 31 x 2,35	=	73	137,5
aantal dagen drachtige-zeugenstal	= 91 x 2,35	=	214	628,7
aantal dagen kraamstal	= 33 x 2,35	=	78	220,3
			------ +	
		Totaal	365	

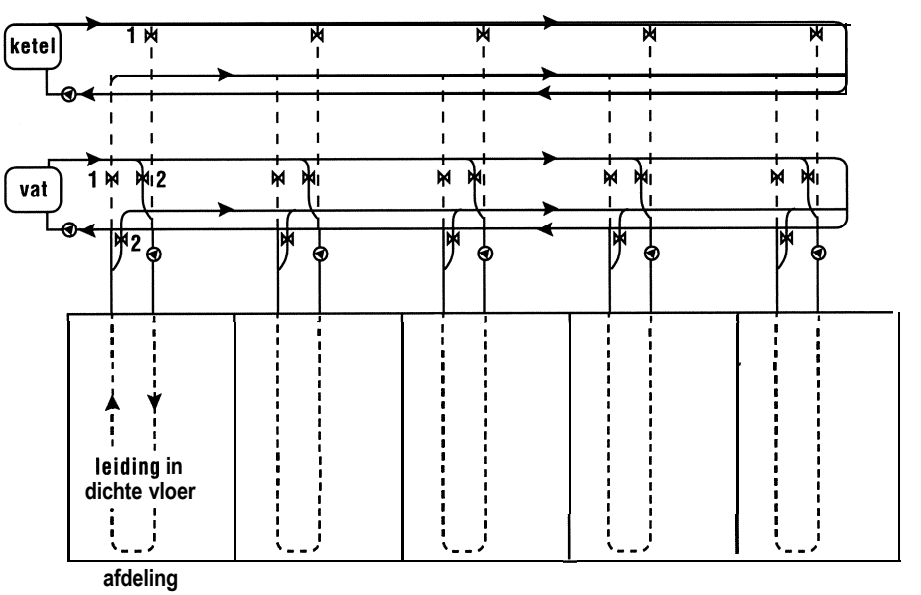
aantal biggen per zeug per jaar = 22 (biggen 42 dagen in biggenopfok) 615,2

---------- +

Totaal 1.601,7

Productie van mest per productieve zeug is 5.300 kg/ jaar. Er kan dus per productieve zeug 30% van de geproduceerde mest worden verdampt.

Bijlage 4: Ontwerp voor vloerkoelcircuit waarbij de dierwarmte aan het vat (recirculatievat) wordt toegevoegd



REEDS EERDER VERSCHENEN PROEFVERSLAGEN

Proefverslag P 1.219
Reconstructie vanaf de basis. Fase 1: toekomstverkenningen van Limburgse varkenshouders. W.P.J. Stroucken-Steeghs, Vleuten, C.W.J.M. van der, Hoff, H.M. en Backus, G.B.C., maart 1999.

Proefverslag P 1.220
De invloed van geboorte-inductie en het tijdstip van vlekziekte-vaccinatie tijdens de zoogperiode op het interval spenen-bronst van zeugen. MC. Vonk, Binnendijk, G.P. en Vesseur, P.C., maart 1999.

Proefverslag P 1.221
Model MINERALENSTROOM. C.P.A. van Wagenberg en Backus G.B.C., april 1999.

Proefverslag P 1.222
Doelstellingen, inrichting en fasering van de Dierveiligheidsindex. M.H. Bokma-Bakker en Vesseur, P.C., april 1999.

Proefverslag P 1.223
Scharrelvarkens bij verschillende houderijsystemen, hokuitvoeringen en koppelgroottes. J.H. Huiskes, Roelofs, P.F.M.M., Altena, H., Plagge, J.G. en Scholten, R.H.J., april 1999.

Proefverslag P 1.224
Ammoniakemissie van grote groepen gespeende biggen met een hokoppervlak van 0,4 m^2 per dier. A.J.A.M. van Zeeland, Brok, G.M. den, Asseldonk, M.G.A.M. van en Verdoes, N., april 1999.

Proefverslag P 1.225
Technische en economische resultaten van bedrijven met vleesvarkens 1997. L.M.C.J. Kuunders, Mandersloot, F. en Lubben, J., mei 1999.

Proefverslag P 1.226
Technische en economische resultaten van bedrijven met zeugen 1997. L.M.C.J. Kuunders, Mandersloot, F. en Lubben, J., mei 1999.

Proefverslag P 1.227
Vernevelen van water voor koeling in varkensstallen. A.V. van Wagenberg en Zeeland, A.J.A.M. van, juni 1999.

Proefverslag P 1.228
Gedeeltelijk spenen van eerste- en tweedeworpszeugen. P.C. Vesseur, Binnendijk, G.P. en Hoofs A.I.J., augustus 1999.

Proefverslag P 1.229
Vleesvarkens in een alternatief houderijsysteem met of zonder voerbespaarders. J.H. Huiskes en Plagge, J.G., augustus 1999.

Proefverslag P 1.230
Haalbaarheid van luchtdesinfectie door UV-straling in varkensstallen. P.F.M.M. Roelofs, Nooijen, P.J.J.M. en Vesseur, P.C., augustus 1999.

Proefverslag P 1.231
De waarde van een vervangingsindex voor het vervangingsbeleid van zeugen. H.J.P.M. Vos, Elst-Wahle, E.R. ter en Vesseur, P.C., oktober 1999.

Proefverslag P 1.232
Taaktijden voor de varkenshouderij. P.F.M.M. Roelofs, Asseldonk, M.G.A.M. van en Schilden M. van der, oktober 1999.

Proefverslag P 1.233
Individuele voeropnamekenmerken van in groepen gehuisveste gespeende biggen. E.M.A.M. Bruininx en Peet-Schwering, C.M.C. van der, november 1999.

Exemplaren van proefverslagen kunnen worden verkregen door *f* 25,- per verslag (m.u.v. P 1.117, deze kost *f* 50,-) over te maken op Postbanknummer 51.73.462 ten name van het Proefstation voor de Varkenshouderij, Lunerkampweg 7, 5245 NB ROSMALEN, onder vermelding van het gewenste verslagnummer. Buitenlandse abonnees betalen *f* 30,- per P l-verslag (dit is inclusief verzendkosten) én *f* 15,- administratiekosten per bestelling (m.u.v. P 1.117, deze kost *f* 75,-). Ook bestaat de mogelijkheid een abonnement te nemen op de proefverslagen voor f 300,- per jaar. Buitenlandse abonnees betalen *f* 375,- per jaar.