

Projektnummer : 5041  
Projektleider : F.R. Leenstra  
Datum : Februari 1994

Prijs : f. 20, =

INHOUD	pag.
Samenvatting	1
Voorwoord	1
<b>1 INLEIDING</b>	<b>2</b>
<b>2 SPECIFIEKE VOCHTAFGIFTE</b>	<b>2</b>
2.1 Drogestofgehalte, vochtigheid en vochtgehalte van mest	2
2.2 Definitie	4
2.3 Waterdampdruk van de mest	5
2.4 Temperatuur van de mest	6
2.5 Waterdampdruk van de drooglucht	7
2.6 Oppervlakte van de mest	7
2.7 Vochtverlies van mest	7
<b>3 INVLOEDSFACTOREN</b>	<b>7</b>
3.1 Vochtgehalte	8
3.2 Structuur van het mestoppervlak	11
3.3 Laagdikte van de mest	11
3.4 Frequentie van omzetten	11
3.5 Luchtsnelheid	11
3.6 Temperatuur van de drooglucht	12
<b>4 MATERIAAL EN METHODE</b>	<b>12</b>
4.1 Materiaal en meetopstelling	12
4.2 Berekening van de specifieke vochtafgifte	14
<b>5 RESULTATEN</b>	<b>15</b>
5.1 Tabellen	15
5.2 Temperatuur van de mest	18
5.3 Vochtgehalte van de mest	18
5.4 Structuur van het mestoppervlak	19
5.5 Laagdikte van de mest	19
5.6 Frequentie van omzetten	20
5.7 Luchtsnelheid	20
5.8 Temperatuur van de drooglucht	21
<b>6 FORMULE VOOR DE SCHATTING VAN DE SPECIFIEKE VOCHTAFGIFTE</b>	<b>21</b>
<b>BIJLAGEN</b>	
Foutenvoortplanting	
Onderscheid tussen de vochtafgifte van water en mest	
Keuze tussen vochtafgifte en dampstroomdichtheid	
Literatuur	
Symbolen en eenheden	

## **SAMENVATTING**

De specifieke vochtafgifte van leghennenmest is bepaald bij een droogluchttemperatuur van 20 en 30 °C, een relatieve vochtigheid van 60 % en een luchtsnelheid van 0,3 tot 5 m/s. De specifieke vochtafgifte is maximaal  $200 \times 10^{-9}$  kg/(m<sup>2</sup>.Pa.s) voor natte mest en  $25 \times 10^{-9}$  kg/(m<sup>2</sup>.Pa.s) voor droge mest. De specifieke vochtafgifte hangt af van de dikte van de mestlaag, de structuur van het oppervlak, het vochtgehalte van de mest en de snelheid van de drooglucht. Een benaderingsformule voor de specifieke vochtafgifte is met de simplex-methode (gebaseerd op de minimum kwadraatsom voor het verschil tussen gemeten en berekende waarde) afgeleid uit de metingen. Met de specifieke vochtafgifte is de droogtijd van leghennenmest in een droogtunnel te voorspellen.

## **VOORWOORD**

De Nederlandse maatschappij Voor Energie en Milieu bv (NOVEM) heeft het project mogelijk gemaakt door het gedeeltelijk te financieren. De technische dienst van COVP-DLO Spelderholt, met name dhr. G. Weenk, heeft zorg gedragen voor een handige, nauwkeurige en goed werkbare meetopstelling.

# DE SPECIFIEKE VOCHTAFGIFTE VAN LEGHENNENMEST

## 1 INLEIDING

Droge mest met een vochtgehalte minder dan 40 % heeft praktische voordelen boven natte mest. Bij transport is de te vervoeren massa per kg drogestof minder. Tevens is de ammoniakproductie in de droge mest minder waardoor de ammoniakuitstoot relatief laag is (van Beek, 1990). Door aanscherping van wettelijke maatregelen die nadelige effecten van de ammoniakuitstoot tegengaan, is de toepassing van en belangstelling voor droging van mest op het pluimveebedrijf toegenomen. In de pluimveestal wordt mest op mestbanden gedroogd door er warme en liefst droge lucht met hoge snelheid te bewegen over het mestoppervlak (vd Weerdhof, 1991). Deze mestbanddroging vindt plaats in de stal onder de kippen. De mest kan in enkele dagen drogen tot een drogestofgehalte van 45 %. Met een droogtunnel, meestal gesitueerd parallel aan de lengte richting van de stal, is het mogelijk leghennenmest binnen 48 uur (na) te drogen tot lage vochtgehalten. De mest uit de stal wordt gedroogd op een aantal boven elkaar opgestelde mestbanden waarover drooglucht met hoge snelheid stroomt. Een snelle droging wordt verkregen met de droogtrommel waarbij met opgewarmde lucht mest binnen enkele uren droogt. De keuze van het droogstelsel hangt af van het gewenste eindvochtgehalte van de mest en de beschikbare tijd voor het bereiken daarvan. De droogtijd is ondermeer afhankelijk van de specifieke vochtafgifte van de mest, een grootheid die de vochtafgifte van leghennenmest bepaalt.

De meting van de specifieke vochtafgifte van leghennenmest is het onderwerp van dit rapport. De specifieke vochtafgifte kan gebruikt worden om de droogtijd in een droogtunnel te berekenen. Daarmee is het mogelijk geworden de prijs/prestatie-verhouding, de investerings- en variabele kosten van een droogtunnel en de droogtijd van de mest, van verschillende uitgevoerde droogtunnels met elkaar te vergelijken. Het project "Efficiënt en energiezuinig drogen van mest", een NOVEM-project waarin COVP-DLO Spelderholt, LEI-DLO en IM-AG-DLO samenwerken, heeft tot doel de werking van droogtunnels te verbeteren en daarbij is kennis van de specifieke vochtafgifte onontbeerlijk.

**MET DE TERM VOCHTAFGIFTE WORDT IN DIT RAPPORT  
BEDOELD DE VOCHTSTROOMDICHTHEID IN  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  OFWEL DE  
VOCHTSTROOM PER OPPERVLAKTE.**

## 2 SPECIFIEKE VOCHTAFGIFTE

### 2.1 Drogestofgehalte, vochtigheid en vochtgehalte

In de pluimveehouderij is het gebruikelijk de vochttoestand van de mest te karakteriseren met de term drogestofgehalte (kg drogestof/ kg mest). Omdat bij een droogproces het om de verwijdering van vocht gaat, wordt in dit verslag het vochtgehalte (kg water/ kg mest) en de mestvochtigheid (kg water/ kg droge stof) gebruikt. De onderlinge vergelijking van de specifieke vochtafgifte van leghennenmest bij verschillende behandelingen, zoals laagdikte, omzetfrequentie of voordroging en condities van de drooglucht, zoals temperatuur of

luchtsnelheid, wordt gemaakt op basis van gelijk vochtgehalte van de mest. Het nadeel van het vochtgehalte is dat een vaste verandering van het vochtgehalte in %, bijvoorbeeld 5 %, niet evenredig is met het vochtverlies. Voor 1000 g mest met 200 g drogestof en 800 g water is het vochtverlies 200 gram als het vochtgehalte daalt van 80 % naar 75 %, terwijl van 70 % naar 65 % het waterverlies 95 g is, dus minder dan de helft (tabel 1). Het voordeel van het vochtgehalte is dat de hoeveelheid water in een hoeveelheid mest snel berekend kan worden. In de meeste verhandelingen over drogen wordt de vochtigheid gebruikt, dat wil zeggen het vochtgehalte gebaseerd op drogestof. De vochtigheid wordt niet uitgedrukt in % omdat een vochtgehalte hoger dan 100 % kan voorkomen, maar in de verhouding massa water/massa drogestof. Het voordeel is dat een verandering van de mestvochtigheid rechtevenredig is met het vochtverlies. In tabel 1 is een daling van 0,05 van de mestvochtigheid steeds een vochtverlies van 10 g. De relatie tussen vochtgehalte  $X_n$  en vochtigheid  $X_d$  is:

$$X_n = \frac{X_d}{(1 + X_d)} \quad \text{en} \quad X_d = \frac{X_n}{(1 - X_n)} \quad (1)$$

**TABEL 1**

Onderscheid tussen vochtgehalte [kg water/ kg mest] en vochtigheid [kg water/ kg drogestof] voor een hoeveelheid mest van 1000 g met 200 g drogestof en 800 g water wat betreft het vochtverlies [g].

Vochtgehalte verandering		Vochtverlies in g	
Natte basis en Droge basis		Natte basis	Drogestof basis
van	naar	Vochtgehalte	Vochtigheid
-	-	gram	
0,80	0,75	200	10
0,75	0,70	133	10
0,70	0,65	95	10
0,65	0,60	71	10
0,60	0,55	56	10
0,55	0,50	44	10
0,50	0,45	36	10
0,45	0,40	30	10
0,40	0,35	26	10
0,35	0,30	22	10

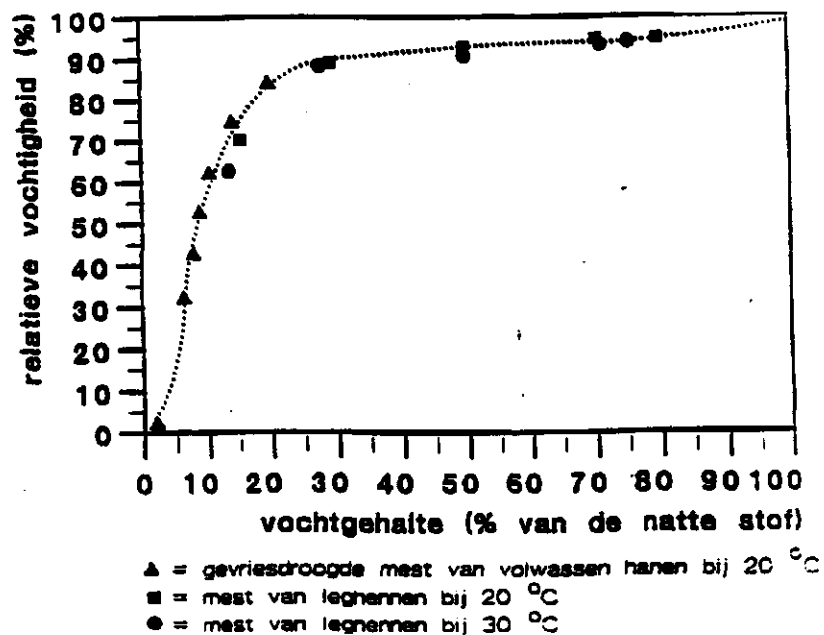
## 2.2 Definitie

De specifieke vochtafgifte is de vochtafgifte per dampdrukdeficit (Fockens 1972). Voor mestdroging in een droogtunnel met banden is de vochtafgifte op basis van oppervlak [kg/(m<sup>2</sup>.s)] gekozen in plaats van vochtafgifte op basis van drogestofmassa [kg/(kg.s)] omdat in droogtunnels mest ligt op een bandoppervlak. Het is mogelijk de vochtafgifte op basis van oppervlak om te rekenen op basis van drogestofmassa. Het dampdrukdeficit is het verschil tussen de evenwichtsdampdruk van de mest en de dampdruk van de drooglucht. De specifieke vochtafgifte is de verhouding tussen de vochtafgifte  $w$  en het dampdrukdeficit  $\Delta p$ :

$$k = \frac{w}{\Delta p} \text{ of } k = \frac{\left(\frac{\Delta m}{\Delta t}\right)}{F (p_m - p_l)} \quad (2)$$

Door de introductie van de specifieke vochtafgifte is het mogelijk het effect van verschillende behandelingen op de vochtafgifte te kunnen vergelijken. De specifieke vochtafgifte is een maat voor de vochtdoorlatendheid van de drogende oppervlakkige lagen van de mest en de transportsnelheid van waterdamp in de luchtgrenslaag boven het mestoppervlak. Voor de meting van de specifieke vochtafgifte is nodig:

1. de waterdampdruk aan het oppervlak van de mest,
2. de waterdampdruk van de drooglucht,
3. de oppervlakte van de mest en
4. het vochtverlies in een bepaalde tijd.



Figuur 1. De wateractiviteit van leghennenmest en mest van volwassen henen.

### 2.3 Waterdampdruk van de mest

Mest bestaat uit een vaste structuur, opgebouwd uit organische onoplosbare stoffen, met daartussen de mestvloeistof die min of meer gebonden is aan die structuur of gevangen is in kleine inwendige holtens. De mestvloeistof is water met daarin opgelost anorganische zuurresten, ionen en laagmoleculaire organische stoffen. In mest is de verplaatsing van de mestvloeistof langzaam omdat de stroming ervan voornamelijk door diffusie plaats vindt (Foust 1980). De waterdampdruk aan het oppervlak van mest is maximaal gelijk aan de verzadigde waterdampdruk van zuiver water ( $p_s$ ) bij de heersende temperatuur aan het oppervlak. Doordat in de mestvloeistof veel opgeloste stoffen aanwezig zijn, is de wateractiviteit van de mest lager dan 1 (de waarde voor zuiver water). De wateractiviteit van mest is gelijk aan de relatieve vochtigheid van lucht in thermodynamisch evenwicht met de mest (Loncin 1988). De wateractiviteit  $aW$  [%] is afhankelijk van het vochtgehalte  $X_n$  [%] en wordt beschreven (fig. 1) door een 6e-graads polynoom ( $5 \% < X_n < 85 \%$ ):

$$aW = -48,9534 + 15,2084 X_n - 0,67943 X_n^2 + 0,015720 X_n^3 - 0,0001964 X_n^4 + 1,2456 \cdot 10^{-6} X_n^5 - 3,1053 \cdot 10^{-9} X_n^6 \quad (3)$$

Tussen een vochtgehalte van 75 en 30 % daalt de wateractiviteit geleidelijk van 94,5 naar 89,4 %. De waterdampdruk aan het oppervlak van mest  $p_m$  met een bekende wateractiviteit  $aW$ , afgeleid uit het vochtgehalte  $X$ , is:

$$p_m = \frac{aW p_s}{100} \quad (4)$$

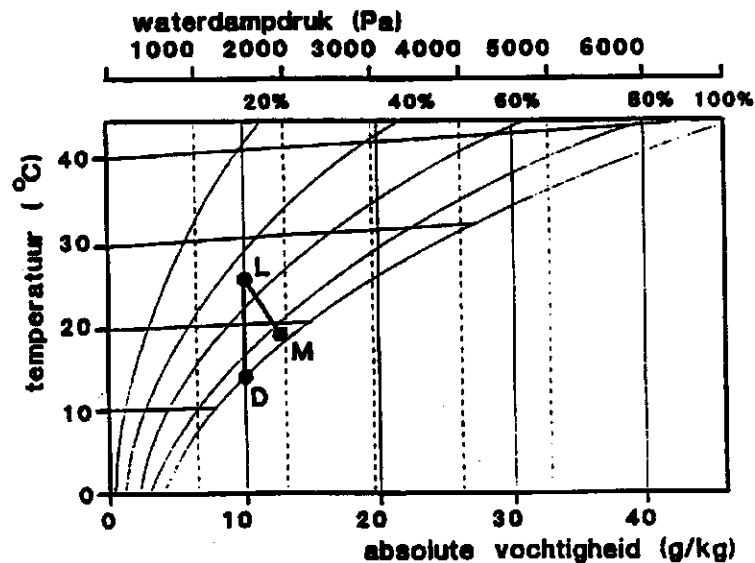
De dampdruk van het mestoppervlak wordt bepaald uit het gemiddelde vochtgehalte van de mest en de laagst gemeten temperatuur (meestal bij het oppervlak) van de mest. Een betere schatting is niet mogelijk omdat we niet meten hoe de vochtigheid van de mest in verticale richting in de mestlaag verloopt. De verzadigde dampspanning van lucht  $p_s$  (in Pa) wordt berekend met de vergelijking van Magnus, waarin de temperatuur  $T$  (in °C) de enige onafhankelijke variabele is (Knobbout 1972):

$$p_s = \exp\left(6,414311 + \frac{17,2693T}{237,2 + T}\right) \quad (5)$$

Voorbeeld: Bij een mesttemperatuur van 20 °C en een vochtgehalte van 50 % is de waterdampdruk aan het mestoppervlak gelijk aan  $aW * p_s / 100 = 92,25 * 2337,6 / 100 = 2156,5$  Pa. De wateractiviteit  $aW$  is berekend met vergelijking 3 en de verzadigde dampspanning met vergelijking 5. De berekening van de evenwichtsdampspanning in de mest vereist een schatting van de mesttemperatuur aan het oppervlak.

## 2.4 Temperatuur van de mest

De temperatuur van de mest is afhankelijk van de droogsnelheid. Temperatuur en dauwpunt van de drooglucht bepalen de waterdampdruk en de ligging van de nattebollijn in het Mollier-diagram (fig. 2). De temperatuur van de drogende natte mest ligt op het snijpunt van de nattebollijn (uitgaande van de condities van de drooglucht) en de evenwichts relatieve vochtigheid van de lucht in contact met mest (aW is ongeveer 92 % voor natte mest). De mesttemperatuur is iets hoger dan de natteboltemperatuur van de drooglucht.



Figuur 2: Mollier-diagram voor vochtige lucht  
 L toestand van drooglucht,  $T = 25^{\circ}\text{C}$ , r.v. = 50%  
 D dauwpunt van drooglucht,  $T = 13,9^{\circ}\text{C}$   
 M toestand vlak boven mestoppervlak

Zodra de aanvoer van water uit de mest naar het mestoppervlak tekort schiet ten opzichte van de verdamping, stijgt de temperatuur van de mest naar de luchttemperatuur. De specifieke vochtafgifte is in principe recht evenredig met het dampdrukdeficit, het verschil tussen dampdruk van mest en drooglucht, en nauwelijks van temperatuur en dauwpunt van de drooglucht. De berekening van de temperatuur van het mestoppervlak volgt uit de warmtebalans over het mestoppervlak. In de stationaire toestand is de verdampingswarmte gelijk aan de warmtetoevoer door convectie van drooglucht naar mestoppervlak plus die door geleiding via de mest naar het oppervlak (Bruin 1968). De temperatuur van het mestoppervlak volgt uit:

$$T_{opp} = \frac{-rw + hT + UT}{h + U} \quad (6)$$

waarin de warmtedoorgangcoëfficiënt in onze meetopstelling volgt uit:

$$U = \frac{1}{\left( \frac{d_{ta}}{\lambda_{ta}} + \frac{d_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{d_{me}}{\lambda_{me}} \right)} \quad (7)$$



## 2.5 Waterdampdruk van de drooglucht

De waterdampdruk van de drooglucht volgt uit het dauwpunt van de lucht ( $T_d$ ) of uit temperatuur ( $T$ ) en relatieve vochtigheid ( $\varphi$ ) (fig.2). Indien het dauwpunt bekend is, volgt uit vergelijking 5 de dampdruk ( $p_l$ ) van de drooglucht door substitutie van het dauwpunt. Als temperatuur en relatieve vochtigheid van de drooglucht bekend zijn, volgt de dampdruk uit:

$$p_l = \frac{\varphi p_s(T)}{100} \quad (8)$$

De verzadigde dampdruk ( $p_s$ ) van de drooglucht bij temperatuur  $T$  volgt uit de Magnus-vergelijking (vergelijking 5).

## 2.6 Oppervlakte van de mest

De oppervlakte van kruimelige mest is met eenvoudige middelen niet te bepalen. Daarom wordt als mestoppervlakte genomen de oppervlakte van het geprojecteerde oppervlak. We kunnen spreken over bandoppervlakte omdat de mest in een droogtunnel ligt op een aantal banden.

## 2.7 Vochtverlies van mest

Het massaverlies (in kg/s) volgt uit een gewichtsmeting aan mest op 2 verschillende tijdstippen. Een correctie voor het verlies aan drogestof als gevolg van de compostering (biodegradatie van organische stoffen) is niet nodig, omdat deze ongeveer 1,5 %/dag (op basis van droge stof) bedraagt en in vergelijking tot het vochtverlies verwaarloosbaar is bij snelle droging van mest (Kolenbrander 1967). De gegevens over de composteringssnelheid zijn verkregen uit metingen van de kooldioxideproductie van mest (van Beek 1992). Aangenomen wordt dat het massaverlies gelijk is aan het vochtverlies.

## **3 INVLOEDSFACTOREN**

Factoren die de specifieke vochtafgifte beïnvloeden zijn vochtgehalte van de mest, structuur van het oppervlak, laagdikte van de mest, frequentie van omzetten, snelheid van de drooglucht, relatieve vochtigheid en temperatuur van de drooglucht. Bij de bespreking van bovenstaande invloedsfactoren op de specifieke vochtafgifte wordt beoordeeld hoe de verhouding vochtafgifte en dampdrukdeficit in vergelijking 2 verandert. Het uitgangspunt is dat het vochtgehalte van de mest op iedere plaats in de mestlaag ongeveer gelijk is aan het gemiddelde vochtgehalte (Leniger en Beverloo, 1975). Het plaatselijk vochtgehalte aan de oppervlakte is iets lager dan het gemiddelde vochtgehalte zodat vocht stroomt uit de bulk van de mest naar het oppervlak.

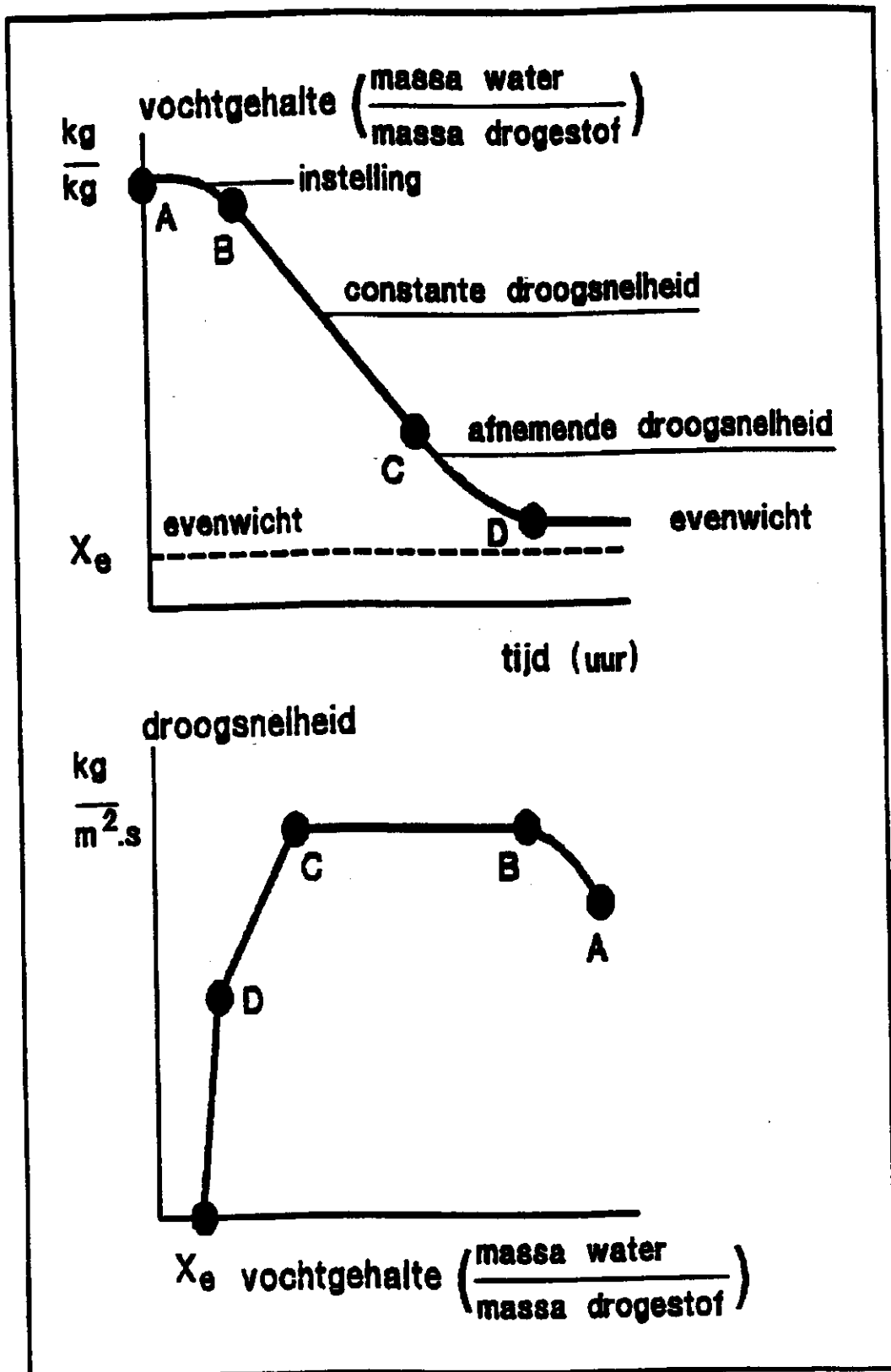
De invloed van bovenstaande factoren op de vochtafgifte van natte mest wordt besproken met de gedachte dat natte mest lijkt op waterige appelmoes. De aanvoer van vocht uit de bulk naar het oppervlak (diffusie) is zo snel dat de vochtafgifte niet geremd wordt door een te geringe verplaatsingssnelheid van vocht in natte mest. Bij drogere mest is het plaatselijk vochtgehalte aan het oppervlak zoveel lager dan het gemiddelde vochtgehalte dat daardoor

de vochtdoorlatende eigenschappen van mest aan het oppervlak sterk afwijken van mest met een hoger vochtgehalte in het centrum. De aanvoer van vocht door diffusie naar het oppervlak van de mestlaag wordt geremd doordat de af te leggen weg voortdurend langer wordt van vochtige mest in het centrum naar het oppervlak. Drogere mest is het best te vergelijken met een cake die van buiten droog is en van binnen vochtig.

### 3.1 Vochtgehalte

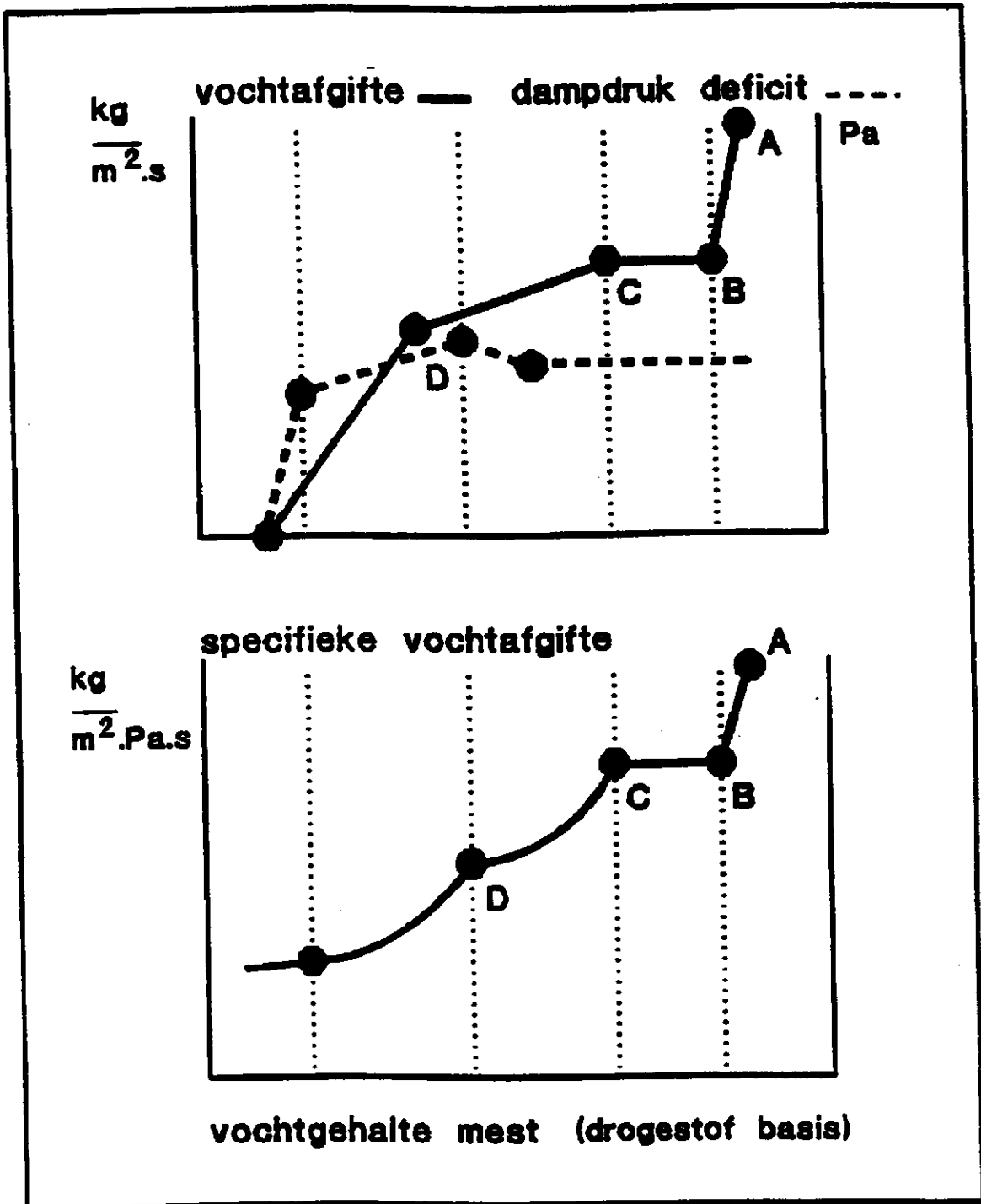
De droging van mest voltrekt zich in drie fasen (Foust 1980): 1 fase instelling, 2 fase van constante droogsnelheid en 3 fase van afnemende droogsnelheid (fig.3). Onmiddellijk na de start van het experiment daalt de temperatuur van de mest tot er evenwicht is tussen de verdampingswarmte van water en de som van toegevoerde warmte (door convectie, geleiding en warmteproductie van de mest door microbiologische activiteit in de mest). Deze instelfase duurt kort, en de vochtafgifte daalt snel in deze fase van het experiment. In de volgende fase is de vochtafgifte min of meer constant, wat er op wijst dat de aanvoer van water uit onderliggende mestlagen zodanig snel is dat het oppervlak van de mest bevochtigd blijft. De fase van constante droogsnelheid is bij organische materialen vrij kort omdat de diffusie meestal sterk gehinderd wordt door de matrix van de vaste stof. De temperatuur van natte mest benadert de natte-bol temperatuur van de drooglucht.

Bij het kritieke vochtgehalte gaat de fase van constante droogsnelheid over in die van de afnemende droogsnelheid. De vochtinhoud van de mest en de diffusiesnelheid is dan niet voldoende om het oppervlak vochtig te houden. Na dit punt gaat de temperatuur van de mest stijgen en de vochtafgifte neemt geleidelijk af. Water en waterdamp diffunderen door de geleidelijk dikker wordende droge mestlagen steeds langzamer naar het mestoppervlak en vandaar naar de drooglucht waardoor de vochtafgifte blijft dalen. Bij lagere vochtigheden daalt het dampdrukdeficit als gevolg van de afname van de wateractiviteit van de mest. De vochtafgifte in het derde deel van deze fase blijkt ook evenredig snel te dalen en de specifieke vochtafgifte van de mest is voor de tweede maal constant over een flink traject. Na verloop van tijd droogt de mest niet verder omdat de wateractiviteit van de mest dan gelijk is aan de relatieve vochtigheid van de drooglucht. De basisvorm van de grafiek voor de specifieke vochtafgifte (fig.4) wordt bepaald door de verhouding van de vochtafgifte en het dampdrukdeficit. Als gevolg van het toenemend deficit halverwege de fase van de afnemende droogsnelheid ontstaat punt D in de figuur, een plateau. Bij lage vochtgehalten van de mest dalen vochtafgifte en deficit beiden lineair waardoor de specifieke vochtafgifte constant is.



Figuur 3

Verband tussen vochtigheid en droogsnelheid bij de droging van leghennennest.



Figuur 4

Gefaseerde relatie voor vochtafgifte, dampdrukdeficit en specifieke vochtafgifte versus de vochtigheid van de mest.

- Fase
- A - B instelling
  - B - C constante droogsnelheid
  - C - D afnemende droogsnelheid
  - D diffusie geremde droogsnelheid

### 3.2 Structuur van het mestoppervlak

Mest ligt op de band van een droogtunnel gladgestreken of in een rulle, kruimelige laag. Bij kruimelige mest is het werkelijk mestoppervlak veel groter dan het bandoppervlak waardoor de vochtafgifte hoger wordt. Door de aanwezigheid van luchtholten tussen de mestkruimels is de weg die de waterdamp moet afleggen naar de luchtstroom boven de mestlaag lang waardoor weer extra weerstand ontstaat en de vochtafgifte lager wordt. Bij gladgestreken mest is de weg naar de luchtstroom zo kort mogelijk en is de aanvoer van water door diffusie in de mest de beperkende factor. Waarschijnlijk veroorzaakt de vergroting van het oppervlak (Foust, 1980) van kruimelige mest een hogere specifieke vochtafgifte.

### 3.3 Laagdikte van de mest

De dikte van de mestlaag is van invloed op de vochtverdeling in de mest. Bij dunne lagen en langzame droging is het vochtgehalte aan het oppervlak van de mest bijna gelijk aan het gemiddelde vochtgehalte van de mest. De afwijking van de werkelijke wateractiviteit aan het mestoppervlak en de berekende uit het gemiddelde vochtgehalte is dan verwaarloosbaar. Bij dikkere mestlagen zal de werkelijke wateractiviteit aan het mestoppervlak lager zijn dan die berekend uit het gemiddelde vochtgehalte van de mest omdat het vochtgehalte van de oppervlakkige mestlagen lager is dan het gemiddelde vochtgehalte. Het effect is dat de vochtafgifte bij dikkere mestlagen lager is omdat het werkelijk dampdrukdeficit kleiner is dan het uit de gemiddelde mestvochtigheid berekende dampdrukdeficit. Bij dikke lagen mest en hoge droogsnelheid kan door diffusie van mestvloeistof het verdampte water aan het mestoppervlak niet op tijd worden aangevuld. Hierdoor ontstaat een min of meer droge oppervlakkige mesthuid die een extra weerstand vormt voor de verdamping. De specifieke vochtafgifte is bij een droog oppervlak omgekeerd evenredig met de dikte van de mestlaag. De specifieke vochtafgifte van natte mest is niet afhankelijk van de laagdikte omdat de vochtafgifte van water, waarmee natte mest vergeleken wordt, niet afhangt van de diepte van het water. In de fase van constante droogsnelheid is de specifieke vochtafgifte niet afhankelijk van de laagdikte omdat het oppervlak vochtig is.

### 3.4 Frequentie van omzetten

De bedoeling van deze bewerking is om: a. de oppervlakte van de mest te vergroten; b. een zo kort mogelijke weg te verschaffen voor de diffusie van water uit de kern van mestkorrels of mestbrokken naar het oppervlak en c. de temperatuur van het mestoppervlak zo hoog mogelijk te houden. Door frequent om te zetten wordt het stationaire temperatuurprofiel in de mestlaag, aan het oppervlak heerst een lage temperatuur en in de diepere lagen een hogere, voortdurend verstoord en de oppervlaktetemperatuur is na een goede menging hoger dan de oorspronkelijke temperatuur. De vochtafgifte neemt toe terwijl het gemeten dampdrukdeficit gelijk blijft. De specifieke vochtafgifte neemt daarom toe bij frequenter omzetten.

### 3.5 Luchtsnelheid

De benodigde verdampingsenergie bij drogen wordt geleverd door convectieve overdracht tussen drooglucht en mest en voor een kleiner deel door de warmteproductie van micro-organismen in de mestlaag. De warmtebalans voor het mestoppervlak waarin de verdamping plaats vindt, resulteert in een relatie tussen de specifieke vochtafgifte en de luchtsnelheid. Voor een wateroppervlak geldt:

$$k = \frac{h (T_l - T_{nb})}{r \Delta p} \quad (9)$$

waarin de warmte-overdracht als functie van de luchtsnelheid (Backstrom 1965) bepaald wordt door:

$$h = 2,3 + 11,6 \sqrt{v} \quad (10)$$

De specifieke vochtafgifte van water neemt toe met toenemende snelheid van de drooglucht over het mestoppervlak (tabel 6 en bijlage: onderscheid tussen vochtafgifte van water en mest). Voor leghennenmest kan een dergelijk effect ook verwacht worden maar in mindere mate omdat de diffusie van water uit de bulk van de mest naar het oppervlak geen gelijke tred houdt met de verdamping. Een verhoging van de luchtsnelheid van 3 m/s naar 10 m/s verdrievoudigt de specifieke vochtafgifte.

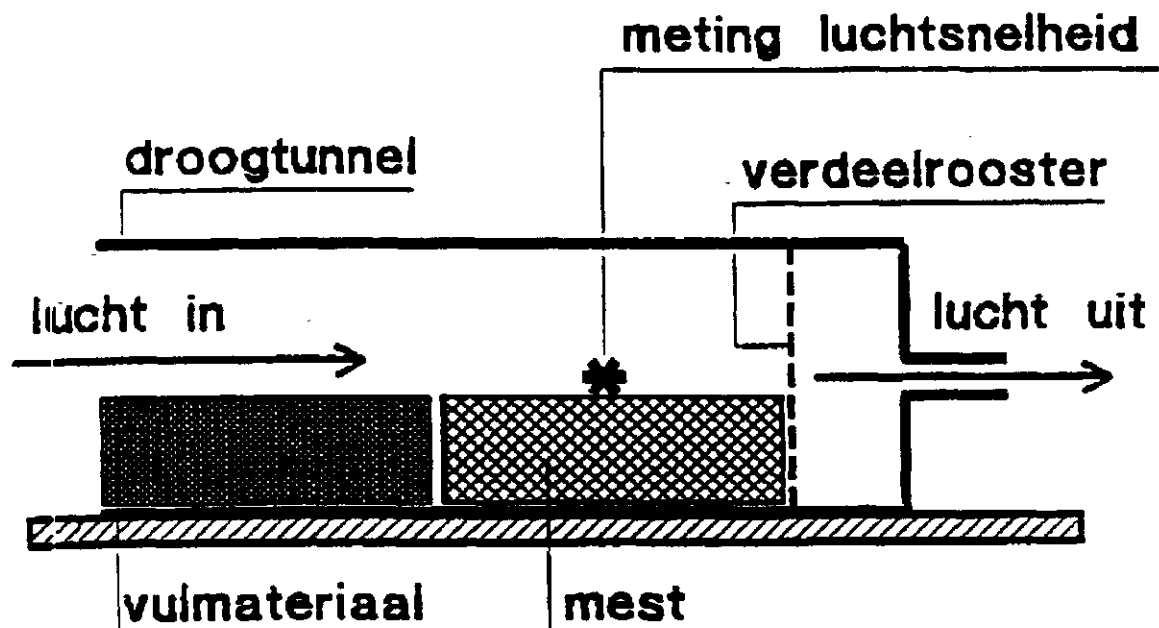
### 3.6 Temperatuur van de drooglucht

Een hogere temperatuur van de drooglucht leidt bij gelijkblijvende waterdampdruk van de drooglucht tot een toename van het dampdrukdeficit en als gevolg daarvan een evenredige toename van de vochtafgifte. Bij een groot dampdrukdeficit kan de aanvoer van vocht door diffusie in de mest achterop raken bij de vochtafgifte waardoor de mest aan het oppervlak een lager vochtgehalte krijgt. Daardoor stijgt de mesttemperatuur en wordt het dampdrukdeficit groter, terwijl de vochtafgifte iets daalt. Verwacht wordt daarom dat bij een lagere temperatuur van de drooglucht de specifieke vochtafgifte iets hoger is.

## **4 MATERIAAL EN METHODE**

### 4.1 Materiaal en meetopstelling

Leghennenmest werd verzameld in een batterijstal waar de leghennen (individueel gehuisveste Witte Leghorn) normaal in productie waren. De verzamelde verse mest, circa 5 kg, werd gehomogeniseerd en verdeeld over zes bakjes van roestvrij staal. De afmeting van een bakje was 20,0 cm bij 14,7 cm, hoogte 4 cm, en het gewicht is ongeveer 420 g. Door toepassing lagen van vulmateriaal (poly-urethaan schuimplastic) werd gezorgd dat bij het begin van een experiment de bovenkant van de mestlaag gelijk was aan de bovenkant van het bakje. Door uitdroging klonk de mest in tijdens het experiment waardoor het oppervlak van de mest steeds verder onder de rand van het bakje zakke. Dit had invloed op het stromingsgedrag van de lucht die over het bakje stroomde (fig. 5). Ieder bakje met mest werd in een mini-droogtunnel geplaatst van 80 cm lengte, 15 cm breedte en 6 cm hoogte. Lucht met constante temperatuur en luchtvochtigheid werd met een centrifugaal-ventilator door de tunnel gezogen. De luchtsnelheid boven de gevulde bakjes kon geregeld worden tussen 20 en 540 cm/s. Met tussenpozen van minimaal 15 min werd het gewicht van de bakjes bepaald met een geijkte, tochtvrij opgestelde elektronische weger met een onnauwkeurigheid van 1 mg. Het begingewicht van de mest in de bakjes varieerde van 200 tot 600 g. De onnauwkeurigheid in de tijd was maximaal 2 min veroorzaakt door iets later of eerder wegen.



Figuur 5 Zijaanzicht van de mini-droogtunnel.

De temperatuur van de drooglucht en de mest werd gemeten met een gecalibreerd thermokoppel-meetsysteem met een onnauwkeurigheid van 0,1 °C. Het dauwpunt van de drooglucht werd gemeten met een geijkte spiegelreflex dauwpuntmeter waarvan de onnauwkeurigheid ook 0,1 °C was. Het vochtgehalte van de mest aan het begin van een experiment werd bepaald met een infrarood-droger. Deze meting werd in triplo herhaald en het gemiddelde van de 2 laagste waarden was het vochtgehalte van de mest. De hoogste waarde wordt genegeerd omdat als gevolg van de meetmethode een systematische fout kan optreden als de mestbrokken die gedroogd worden te groot zijn, waardoor het gemeten vochtgehalte te hoog is. Op ieder meetmoment werden de volgende grootheden gemeten:

1. brutogewicht van het bakje met mest;
2. temperatuur van de mest (als dat mogelijk was bovenin de mestlaag);
3. temperatuur van de drooglucht;
4. dauwpunt van de drooglucht;
5. de tijd.

## 4.2 Berekening van de specifieke vochtafgifte

De onderstaande berekeningen werden voor ieder meetmoment uitgevoerd:

1. de vochtafgifte in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{(m_1 - m_2)}{F \Delta t} \quad (11)$$

2. vochtgehalte in % op natte basis, uit:

$$X_n = \frac{(m_2 - m_{bak} - m_{ds})}{(m_2 - m_{bak})} \times 100 \quad (12)$$

waarbij de massa drogestof in een bakje volgt uit:

$$m_{ds} = (m_0 - m_{bak}) \times \frac{(100 - X_{n0})}{100} \quad (13)$$

3. De wateractiviteit  $aW$

De wateractiviteit van de mest werd berekend met een 6e machts polynoom, vergelijking 3, door substitutie van het vochtgehalte.

4. Verzadigde dampdruk van water bij de mesttemperatuur  $p_s$ .

De gemeten mesttemperatuur werd gesubstitueerd in de Magnus vergelijking (5), waaruit de verzadigde dampdruk van water bij de mesttemperatuur volgt. Voorbeeld: In fig.2 is  $p_s = 2197 \text{ Pa}$  en  $T_{\text{mest}} = 19 \text{ }^\circ\text{C}$ . De evenwichtsdampdruk van de mest hangt af van de wateractiviteit van de mest.

5. De evenwichtsdampdruk van de mest  $p_m$ . Deze grootte werd berekend uit het produkt van wateractiviteit  $aW$  en verzadigde dampdruk van water bij de mesttemperatuur. Voorbeeld:  $p_{\text{mest}} = 2021 \text{ Pa}$  als  $aW = 0,92$ .

6. De dampdruk van de drooglucht  $p_l$ .

Door substitutie van het dauwpunt in vergelijking 5 werd de dampdruk van de drooglucht berekend. Voorbeeld: de dampdruk van de drooglucht is  $p_l = 1583 \text{ Pa}$  omdat het dauwpunt  $T_d = 13,9 \text{ }^\circ\text{C}$ .

7. Dampdrukdeficit  $\Delta p$ .

Het verschil tussen de evenwichtsdampdruk van de mest en de dampdruk van de drooglucht is de drijvende kracht voor de vochtafgifte. Voorbeeld: Het dampdrukdeficit is  $(2021 - 1583) = 438 \text{ Pa}$  (verschil tussen punt D en M in fig. 2).

8. Specifieke vochtafgifte  $k$ .

Uit verhouding van vochtafgifte en het gemiddelde dampdrukdeficit van de huidige en voorlaatste meting volgt de specifieke vochtafgifte.



9. Vochtgehalte op drogestof basis  $X_d$ .

Het vochtgehalte werd per meting berekend met vergelijking 2 en daaruit volgt de vochtigheid  $X_d$  met:

$$X_d = \frac{x_n}{(100 - X_n)} \quad (14)$$

De gemiddelde mestvochtigheid tussen de laatste en voorlaatste meting werd berekend om een grafiek te kunnen uitzetten van de gemiddelde vochtigheid ( $X_d$ ) van de mest en de specifieke vochtafgifte. Voor iedere proef/monster werd een droogkromme opgesteld met de volgende gegevens: 1 tijd vanaf het startmoment, 2 bruto massa op aangegeven tijd, 3 temperatuur van de mest op aangegeven tijd, 4 vochtgehalte op aangegeven tijd, 5 specifieke vochtafgifte voor het afgelopen tijdvak en 6 vochtigheid voor het afgelopen tijdvak. In de legenda staat: 1 ingestelde temperatuur van de lucht, 2 ingestelde dauwpunt en gemiddelde relatieve vochtigheid van de drooglucht, 3 luchtsnelheid in de droogtunnel, 4 vochtgehalte van de mest bij de start van het experiment, 5 tara van het bakje, 6 voorbehandeling van de mest en 7 gegevens over de mest, zoals laagdikte, structuur mestoppervlak, omzetsfrequentie. Deze droogkrommen zijn in een interne mededeling gebundeld. Een voorbeeld wordt in fig. 7 gegeven.

## 5 RESULTATEN

### 5.1 Tabellen

De gemeten droogkrommen zijn in een interne mededeling opgenomen omdat door de grote hoeveelheid waarnemingen dit rapport te omvangrijk zou worden. De interne mededeling is voor belangstellenden op aanvraag beschikbaar. De tabel bij de droogkromme is gebruikt om voor een reeks van vochtgehalten dalend van 70 tot 30 % met stappen van 5 %, de specifieke vochtafgifte van leghennenmest in tabelvorm weer te geven. Tabel 2 geeft een overzicht van alle uitgevoerde metingen bij een luchtsnelheid van ca. 100 cm/s. In tabel 3 is de gemiddelde specifieke vochtafgifte van leghennenmest per behandeling opgenomen. In tabel 4 is de specifieke vochtafgifte opgenomen voor andere luchtsnelheden dan 1 m/s en diverse laagdikten. Deze tabellen en de droogkrommen vormen de basis voor de bespreking van de resultaten.

**TABEL 2**

Gemeten specifieke vochtafgifte in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}) * 10^9$  van leghennenmest. De luchtsnelheid is 1 m/s. De code (1/2 t/m 5/6) correspondeert met de proef/monster-nummering van de droogkrommen in de interne mededeling. Met omzet wordt bedoeld dat op onregelmatige tijdstippen de mest werd gemengd. In latere proeven werd het omzetten nauwkeuriger uitgevoerd.

Omschrijving	Code	Vochtgehalte mest in % (natte basis)								
		70	65	60	55	50	45	40	35	30
glad, 1cm, omzet	1/1	116	90	-	86	70	113	-	-	-
glad, 1cm	1/2	122	90	88	80	-	-	-	31	31
glad, 1cm	1/3	133	102	-	81	60	-	-	36	24
glad, 1cm	2/1	-	81	-	-	40	33	25	-	17
glad, 1cm	2/2	-	82	68	55	35	30	23	-	19
glad, 2cm	2/3	-	68	40	29	22	18	-	-	13
glad, 2cm	2/4	-	70	50	31	27	19	-	12	11
glad, 3cm	2/5	-	53	31	26	-	15	14	-	-
glad, 3cm	2/6	-	46	28	23	19	15	14	-	-
kruim 2cm	120min 3/1		90	-	-	-	-	-	-	-
kruim 2cm	90min 3/2	102	-	100	-	-	-	-	-	-
kruim 2cm	60min 3/3	100	-	100	70	-	-	-	-	-
kruim 2cm	45min 3/4	95	85	100	-	-	-	-	-	-
kruim 2cm	30min 3/5	100	80	-	-	-	-	-	-	-
kruim 2cm	15min 3/6	105	-	117	-	-	-	-	-	-
kruim 2cm	120min 4/6-	-	-	-	105	83	-	-	-	65
kruim 2cm	90min 4/5	-	-	-	103	74	-	-	-	42
kruim 2 cm	60min 4/4	-	-	-	91	68	-	-	-	43
kruim 2cm	45min 4/3	-	-	-	91	85	-	-	-	40
kruim 2cm	30min 4/2	-	-	-	147	83	-	-	-	42
kruim 2cm	15min 4/1	-	-	-	131	76	-	-	-	37
kruim 2cm	60min 5/1	-	119	95	-	-	55	75	60	-
kruim 2cm	60min 5/2	-	131	-	-	-	55	74	59	-
kruim 2cm	60min 5/3	-	120	-	-	-	39	63	57	-
kruim 2cm	5/4	-	58	-	36	24	-	20	-	-
kruim 2cm	5/5	-	62	-	38	23	-	21	-	-
kruim 2cm	5/6	-	62	-	39	23	-	20	-	-

**TABEL 3**

Gemiddelde specifieke vochtafgifte van mest in  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}) * 10^9$ . Samenvatting van tabel 2.

toestand mest	vochtgehalte mest in %									
	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30
glad 1cm omzet	-	124	94	88	82	65	113	-	33	27
glad 1cm	-	-	81	68	55	37	31	24	-	18
glad 2cm	-	-	69	45	30	24	18	-	12	12
glad 3cm	-	-	49	29	24	19	15	14	-	-
kruim 2cm omzet	-	99	103	99	91	78	50	71	59	45
kruim 2cm	-	-	61	-	37	23	-	20	-	-

**TABEL 4**

De gemeten specifieke vochtafgifte van leghennenmest (gladde structuur) bij variërende snelheid van de langstromende drooglucht en 2 laagdikten  $*10^9$ .

mest	lucht- dikte cm	snelheid cm/s	Vochtgehalte mest in %								
			70	65	60	55	50	45	40	35	30
0,5	120		166	92	-	-	70	52	40	-	-
2	110		144	75	65	38	-	-	-	-	-
0,5	65		127	66	-	56	46	-	-	-	27
2	62		87	56	38	-	-	-	-	-	-
0,5	34		91	52	45	39	-	-	30	-	-
2	34		56	43	33	-	-	-	-	-	-
0,5	115		113	90	-	-	72	56	41	-	-
2	106		93	75	60	-	-	-	-	-	-
0,5	330		247	183	145	-	-	-	-	-	60
2	340		211	145	75	48	-	-	-	-	-
0,5	535		281	228	183	-	-	-	-	-	65
2	560		319	115	60	-	-	-	-	-	-

## 5.2 Temperatuur van de mest

De gemeten oppervlaktetemperatuur van de mestlaag is gecontroleerd met de berekening. De warmtedoorgang ( $U$ ) is berekend door substitutie van gegevens voor dikte  $d$  en warmtegeleiding  $\lambda$  van tafelblad, isolatielaag waarop de mest ligt in het bakje en de mest in vergelijking 7. De warmtegeleiding van hout, polystyreenschuim en mest is respectievelijk 0,26, 0,03 (van Hiele 1986) en 0,3 W/(m.K) (Miles 1983). De warmte-overdracht  $h$  wordt geschat op 14 W/(m<sup>2</sup>.K) bij een luchtsnelheid van 1 m/s (zie vergelijking 10, Backstrom 1980). De grenslaag is nog net niet volledig turbulent omdat het Reynolds kental is  $Re = \rho * v * d / \eta = 1,2 * 1 * 0,03 / 18.10^{-6} = 2200$ , waarin  $\rho$  = dichtheid lucht in kg/m<sup>3</sup>,  $v$  = snelheid lucht in m/s,  $d$  = diameter luchtkanaal tunnel in m en  $\eta$  = dynamische viscositeit in kg/(m.s). Bij nog niet volledig turbulente stromingen is de voorspelling van de warmte-overdracht niet erg nauwkeurig.

Voorbeeld: De gemeten vochtafgifte bij een van de experimenten met natte mest was  $1,18.10^{-6} / 0,029 = 4,07.10^{-5}$  kg/(m<sup>2</sup>.s) bij een mestlaagdikte van 2 cm en een isolatiedikte van 0,5 cm. De gemeten mesttemperatuur was 14,8 °C terwijl de berekende oppervlakte-temperatuur van de mest (vergelijking 6) 15,1 °C is. De berekende temperatuur is iets afwijkend van de gemeten temperatuur, maar voldoende in de buurt om te veronderstellen dat vergelijking 6 bruikbaar is om de mesttemperatuur te schatten. De gemiddelde afwijking tussen gemeten en berekende oppervlakte temperatuur was 0,3 °C voor natte mest en 0,7 °C voor mest met een gemiddeld vochtgehalte lager dan 50 %. Uit de tabel in de meetbladen blijkt dat de mesttemperatuur bij aanvang van de proef in korte tijd daalt tot even boven de natteboltemperatuur van de drooglucht. Naarmate de droging vordert loopt de temperatuur, zoals verwacht wordt, langzaam op.

## 5.3 Vochtgehalte van de mest

De drie droogfasen zijn in de droogkromme herkenbaar. De instelfase is erg kort en duidelijk, de fase van de constante droogsnelheid is niet altijd aanwezig en ook kort. Ze gaat over in de fase van de afnemende droogsnelheid zodat vaststelling van een kritiek vochtgehalte van de leghennenmest niet goed mogelijk is. Uit cijfers blijkt dat het kritiek vochtgehalte van leghennenmest ligt tussen 65 en 50 %. De specifieke vochtafgifte neemt onmiddellijk na de start van de proef af. Dit wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van vrij water aan het mestoppervlak. Dit water verdampt met maximale snelheid waardoor de vochtafgifte bijzonder hoog is. De daling van de specifieke vochtafgifte wordt versterkt door de daling van de temperatuur aan het oppervlak van de mest, als gevolg van de verdampingswarmte, en de daarmee gepaard gaande daling van het dampdrukdeficit. Als het temperatuurprofiel in de mest zich snel instelt, is het dampdrukdeficit constant en zal de droogsnelheid van natte mest ook constant zijn. Uit de experimenten blijkt dat binnen 30 min een stationaire toestand is bereikt, wat snel is in vergelijking tot de duur van het droogexperiment.

De instelfase gaat dan over in de fase van constante droogsnelheid. Uit de droogkrommen blijkt dat er vaak een korte fase van constante specifieke vochtafgifte aan te wijzen is bij hoge mestvochtigheid. In die fase is het dampdrukdeficit en de vochtafgifte constant zodat een horizontale lijn in de droogkromme aanwezig is. In het eerste deel van de fase van de afnemende droogsnelheid neemt het dampdrukdeficit toe omdat de oppervlaktetemperatuur van de mest langzaam oploopt terwijl de vochtafgifte gelijktijdig vermindert. De lijn voor de specifieke vochtafgifte daalt dan. In deze fase droogt een steeds groter deel van het mestoppervlak uit en verkleurt de mest. Zodra het mestoppervlak helemaal droog is gevallen daalt de vochtafgifte sterk terwijl het dampdrukdeficit geleidelijk blijft stijgen. De specifieke vochtaf-

gifte daalt daardoor extra en dit overgangspunt is in de meeste droogkrommen duidelijk aanwezig bij een mestvochtigheid van  $X_d = 0,4$  kg/kg. De vorm van de droogkrommen is in overeenstemming met de theorie. Dit is het begin van het tweede deel van de fase van de afnemende droogsnelheid.

#### 5.4 Structuur van het mestoppervlak

Een glad oppervlak heeft dezelfde specifieke vochtafgifte als een kruimelig oppervlak (zie tabel 3, glad 2 cm en kruim 2 cm). Alhoewel het niet mogelijk is de vergroting van de oppervlakte door verkruimelen te meten is een vergroting met een factor 2 realistisch. Als de vochtafgifte rechtevenredig is met het mestoppervlak dan is de meting onverklaarbaar. De invloed van de structuur van het oppervlak op de gemiddelde dikte van de luchtgrenslaag, en daarmee op de stof- en warmte-overdracht, heft kennelijk het effect van de vergroting van de mestoppervlakte op.

#### 5.5 Laagdikte van de mest

De specifieke vochtafgifte heeft een duidelijk verband met de laagdikte en het vochtgehalte van de mest (tabel 3 en fig.6). De specifieke vochtafgifte is te beschrijven met een vergelijking waarin de constante  $c_0$  voorkomt, het vochtgehalte  $X_n$  (in %) en de laagdikte  $d$  (in cm):

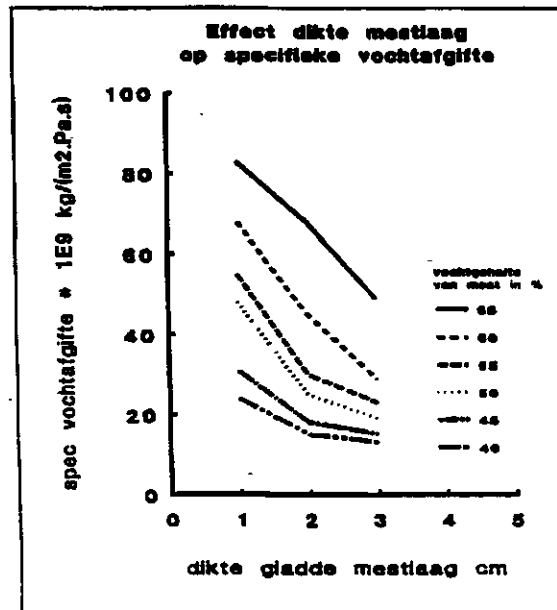
$$k = c_0 \times \left( \frac{X_n - 16}{d + 0,03} + 19 \right) \quad (15)$$

De constante  $c_0$  is afhankelijk van de bewerking van de mest (tabel 5). De getallen in de bovenstaande vergelijking zijn met de simplex-methode (Walmsley 1981) bepaald. Bij deze methode wordt gezocht naar een minimum van de som van de kwadraatverschillen tussen gemeten en met vergelijking 15 berekende specifieke vochtafgifte, door de getallen vanaf een beginschatting bij te stellen tot het minimum bereikt is.

**TABEL 5**

Waarde van de parameter  $c_0$  is afhankelijk van de bewerking die de mest krijgt.

Bewerking	$c_0$
glad, niet omzetten	1,0
glad, met omzetten	1,3
kruim, niet omzetten	1,0
kruim, met omzetten	2,2



Figuur 6 Effect van laagdikte en vochtgehalte op de specifieke vochtafgifte van leghennenmest.

### 5.6 Frequentie van omzetten

De omzetsfrequentie, 120 min. vergeleken met 60 min. beïnvloedt de specifieke vochtafgifte niet (tabel 2, proef 3 en 4). De specifieke vochtafgifte is even groot bij omzetting iedere 15 min. en iedere 90 min. Het verhogend effect van de oppervlakte vergroting van de mest wordt kennelijk teniet gedaan door de vergroting van de diffusieweerstand van de lucht tussen de kruimels. Regelmatig omzetten vergeleken met nooit omzetten (tabel 2, proef 5/1 t/m 5/6) verdubbelt de specifieke vochtafgifte.

### 5.7 Luchtsnelheid

Bij de vergelijking tussen de theoretische specifieke vochtafgifte van water en de gemeten specifieke vochtafgifte van leghennenmest (tabel 6) valt op dat bij luchtsnelheden beneden 100 cm/s de relatieve verschillen groot zijn, want de indexen in tabel 6 zijn niet gelijk. Vanaf luchtsnelheid 100 cm/s is de invloed van de luchtsnelheid op de specifieke vochtafgifte verhoudingsgewijs gelijk. Verwonderlijk is dat de berekende specifieke vochtafgifte van water zo goed overeenkomt met die van gladde leghennenmest. Een verklaring kan zijn dat de schatting van de warmte-overdracht (vergelijking 10) te laag is. Enkele onderzoekers, bijvoorbeeld Pham (1987) en Cleland (1985), kwamen tot de conclusie dat de warmte-overdrachten, gepubliceerd in veel geciteerde handboeken, te laag zijn. De berekende specifieke vochtafgifte voor water is dan hoger dan van natte mest wat in overeenstemming is met de verwachting.

**TABEL 6**

De berekende specifieke vochtafgifte van water in vergelijking met de gemeten specifieke vochtafgifte van mest (tabel 4, proef 8/1, dikte mestlaag 0,5 cm). Index = 1 bij luchtsnelheid 1 m/s.

Luchtsnelheid m/s	Specifieke vochtafgifte			
	zuiver water		leghennenmest	
	kg/(m <sup>2</sup> .Pa.s)	index	kg/(m <sup>2</sup> .Pa.s)	index
0,3	60.10 <sup>-9</sup>	0,71	30.10 <sup>-9</sup>	0,36
0,6	70	0,83	62	0,76
1,0	84	1,0	84	1,0
3,0	151	1,8	170	2,0
5,0	218	2,6	220	2,6
10,0	304	4,5	-	-

#### 5.8 Temperatuur van de drooglucht

De specifieke vochtafgifte bij 20 °C is 30 % kleiner dan bij 30 °C. Dit is niet in overeenstemming met de theorie. Een afdoende verklaring hiervoor is niet gevonden.

## **6 FORMULE VOOR DE SCHATTING VAN DE SPECIFIEKE VOCHTAFGIFTE**

Een schatting van de specifieke vochtafgifte van leghennenmest is mogelijk door vergelijking 5, waarmee het effect van de laagdikte en het vochtgehalte van de mest beschreven wordt, en vergelijking 10, waarmee het effect van de luchtsnelheid benaderd wordt, samen te nemen. De formule bestaat uit drie factoren waarin respectievelijk de structuur van het oppervlak, de luchtsnelheid [m/s] en vochtgehalte op natte basis [%] gecombineerd met laagdikte [hier in cm] opgenomen zijn:

$$k = c_0 (0,148 + 0,863 \sqrt{v}) \left( \frac{X_n - 16}{d + 0,03} + 21 \right) \times 10^{-9} \quad (16)$$

Bij nauwkeurige berekeningen moet de gemeten specifieke vochtafgifte uit de meetbladen afgelezen worden. De proefomstandigheden zijn zodanig gevarieerd dat het mogelijk moet zijn een set gemeten specifieke vochtafgiften te vinden die past bij het probleem dat opgelost moet worden. Vergelijking 16 is niet bruikbaar bij lage luchtsnelheden, mest met veel vrij water aan het oppervlak, en bij een te gevarieerde structuur. Voor 70 % van de gemeten specifieke vochtafgiften is de vergelijking juist.

## BIJLAGEN

### Foutenvoortplanting

De meetfout van de specifieke vochtafgifte wordt weergegeven door de variatiecoëfficiënt (standaardafwijking als % van het gemiddelde) en de maximale meetfout (de grootst mogelijke afwijking ten opzichte van de meetwaarde naar boven en beneden). Bij veel experimenten met biologisch materiaal is de variatiecoëfficiënt 20 % of lager. In onze experimenten werd gestreefd naar een variatiecoëfficiënt van 10 % of minder. Het gevolg voor de maximale meetfout van dit streven wordt duidelijk in het volgende voorbeeld. Stel de gemeten waarde van de specifieke vochtafgifte is  $100 \cdot 10^{-9}$  kg/(m<sup>2</sup>.Pa.s). Tabel 7 geeft aan hoe groot de kans is dat de werkelijke waarde tussen de aangegeven grenzen ligt bij een variatiecoëfficiënt van 10 %. Als de gemeten waarde  $100 \cdot 10^{-9}$  is, dan zal 1 op de 20 keer (5 %) de werkelijke waarde kleiner zijn dan  $80 \cdot 10^{-9}$  of groter zijn dan  $120 \cdot 10^{-9}$ . Dit zijn onnauwkeurigheden van +/- 20 % van de meetwaarde.

**TABEL 7**

Kans dat de werkelijke specifieke vochtafgifte in het aangegeven domein ligt bij een variatiecoëfficiënt van 10 % en een gemeten specifieke vochtafgifte van  $100 \cdot 10^{-9}$ .

Werkelijke waarde		Kans
laagste	hoogste	%
90	... $110 \cdot 10^{-9}$	70
85	... $115 \cdot 10^{-9}$	87
80	... $120 \cdot 10^{-9}$	95

De bepaling van de standaardafwijking voor de meetfout van de specifieke vochtafgifte is op de volgende wijze gebeurd:

1. Berekening van de specifieke vochtafgifte met at random gekozen waarden voor de 8 onafhankelijke grootheden waaruit de specifieke vochtafgifte berekend wordt.
2. Herhaling van deze berekening, 1000 keer.
3. Bepaling van het gemiddelde en de standaardafwijking van de berekende specifieke vochtafgifte.

Voor ieder van de 8 onafhankelijke grootheden is de maximale meetfout, dat is de maximale afwijking naar boven en naar beneden ten opzichte van de meting bepaald. De kans op het maken van een maximale meetfout is gering, terwijl de kans dat de meetwaarde vlak bij het gemiddelde van de "ware meetwaarde" ligt, groot is. Aangenomen wordt dat meetfouten normaal verdeeld zijn (Sieben, 1960) en dat de maximale meetfout gelijk is aan  $3 \cdot$  de standaardafwijking (tabel 9). Uit de opgave van de fabrikant en uit eigen waarnemingen is de maximale meetfout van de gemeten grootheid vastgesteld.

1. De maximale meetfout van de Mettler elektronische weegschaal PM460, zoals opgegeven door de fabrikant, is 2 mg. Door een niet volledig tochtvrije opstelling van de weegschaal en de snelle verandering van het gewicht door de voortgaande verdamping is de maximale meetfout geschat op 25 mg, maximaal 2,5 % van het mestgewicht. Dit is weinig in vergelijking tot het gewichtsverlies van de mest tussen 2 metingen.



2. De meting van lengte en breedte van het mestbakje heeft een spreiding van 2 mm omdat de meetlineaal op 1 mm nauwkeurig kan worden afgelezen. Deze meting draagt niet veel bij aan de uiteindelijke onnauwkeurigheid.
3. Alhoewel de tijdmeting op enkele seconden nauwkeurig is, moet rekening gehouden worden met een aanzienlijke meetfout omdat de handelingen om een mestbakje te wegen ongeveer 20 s duren en er 6 mestbakjes gewogen moeten worden. Voor alle bakjes wordt eenzelfde meettijd opgeschreven zodat de maximale meetfout 1 min is. Bij minder dan 15 min tussen de opeenvolgende gewichtsmetingen bij grote omzetsfrequentie wordt de onnauwkeurigheid groter dan gewenst.
4. Het vochtgehalte van de mest wordt aan het begin van de droogproef gemeten met een infrarood-droger waarvan de meetfout afhangt van de monstervoorbereiding (verkleining tot kleine mestdeeltjes), de ingestelde temperatuur en de ingestelde afbreektijd. Uit ervaring is gebleken dat een maximale meetfout van 3 % aanwezig is. De berekening van het vochtgehalte van de mest als de proef eenmaal begonnen is, hangt alleen af van het vochtverlies en daarmee van de nauwkeurigheid van de gewichtsmeting. Deze is zeer nauwkeurig en de maximale meetfout van het vochtgehalte is dan 3 %.
5. De temperatuurmeting van de mest heeft een meetfout van 0,1 °C. Gemeten is dat in het verticale vlak grote temperatuurverschillen optreden. Dit is te verwachten en te voorspellen met vergelijking 14. Aan het oppervlak heerst de laagste temperatuur, maar het is niet mogelijk met een thermokoppel de oppervlakte temperatuur te meten. Daarom wordt de temperatuur vlak onder het oppervlak gemeten, die op basis van berekening in onze opstelling maximaal 0,3 °C te hoog is. In het horizontale vlak, vlak onder het mestoppervlak, is een temperatuurverschil waargenomen van maximaal 0,8 °C. Tijdens experiment 6 (luchtsnelheid 30 cm/s, vochtgehalte van de mest 65 %) zijn de volgende temperaturen gemeten van de mest vlak onder het oppervlak voor en achterin het bakje: 17,2-16,7, 17,4-16,6 en 17,4-16,8 °C. Voorin is de temperatuur altijd hoger dan achterin. Dit wordt veroorzaakt door verschil in vochtgehalte. De mest aan de benedenstroomse zijde (achterin) is vochtiger dan aan de plaatselijk veranderende warmte- en stofoverdracht. Aan de bovenstroomse zijde van het bakje is de overdracht het grootst. Op basis van deze metingen is de maximale meetfout van de temperatuur op 0,5 °C geschat; de insteekdiepte van het thermokoppel in de mest is iedere keer weer verschillend en de plaats van insteek in het bakje is van invloed op de temperatuur. In de bovenste laag van de mest zijn de temperatuurverschillen groot zodat met een grote meetfout rekening gehouden moet worden.
6. De dauwpuntmeter heeft een meetfout van 0,1 °C. Door kleine storingen in de regeling van het klimaat in de meetruimte is de werkelijke meetfout geschat op 0,25 °C.

**TABEL 8**

Spreiding van de meetwaarde voor de 8 grootheden waaruit de specifieke vochtafgifte berekend wordt.

Groetheid	Max. meetfout	Gebruikte meetapparaat
massa bakje	0,025 g	Mettler elektronische
afmeting bakje	2 mm	meetlineaal
tijd	1 min	digitale klok
vochtgehalte	3 %	Mettler droger LP16
temperatuur	0,5 °C	thermokoppel + isoblok + Datataker 200
dauwpunt	0,25°C	Michell 3000 koude-spiegel-reflex

Van iedere groetheid (massa, lengte, temperatuur, enz.) wordt een meetwaarde berekend met behulp van een random getallengenerator, de gemiddelde waarde en de maximale meetfout, die  $3 \cdot$  standaardafwijking is (zie tabel 8). De randomgetallengenerator levert een getal tussen 0 en 1 en is de kans  $p$  bij een cumulatieve normale verdeling. De verwachtingswaarde  $\xi$ , die bij de kans  $p$  past, volgt uit (Abramowitz 1965):

$$\xi = -t + \frac{a_0 + a_1 t}{1 + b_1 t + b_2 t^2} \quad (17)$$

$$\text{met } t = \left(\ln \frac{1}{p^2}\right)^{0,5} \quad \text{bij } p \leq 0,5 \quad (18)$$

De constanten zijn  $a_0 = 2,30753$ ,  $a_1 = 0,27061$ ,  $b_1 = 0,99229$  en  $b_2 = 0,04481$ . Als  $p > 0,5$  dan wordt het probleem gespiegeld door te stellen dat  $p = 1-p$  en  $\xi = -\xi$ . De toevallige meetwaarde  $x$  volgt nu uit de maximale meetfout  $s$  en het gemiddelde  $\mu$  (Kleijnen, 1988):

$$x = \mu + \frac{\xi \times s}{3} \quad (19)$$

Hieronder volgt de berekening van de standaardafwijking en de variatie coëfficiënt van de specifieke vochtafgifte voor een reële meting. In tabel 9 is de gemiddelde waarde en de spreiding voor de 8 grootheden opgegeven. De standaardafwijking is dan  $5,4 \cdot 10^{-9}$  kg/(m<sup>2</sup>.Pa.s) en de specifieke vochtafgifte  $111,2 \cdot 10^{-9}$  kg/(m<sup>2</sup>.Pa.s). Met een waarschijnlijkheid van 95 % ligt de werkelijke specifieke vochtafgifte tussen 100,4 en  $122,0 \cdot 10^{-9}$  kg/(m<sup>2</sup>.Pa.s).

**TABEL 9**

Foutenanalyse bij de meting van de specifieke vochtafgifte onder normale meetomstandigheden. De spreiding is 2 \* de maximale fout of 6 \* de standaardafwijking.

INGEVOERDE WAARDEN VOOR DE BEREKENING VAN DE FOUT

Omschrijving	Gemiddelde	Spreiding	Eenheid
1e bruto gewicht	600,00	0,05	g
2e bruto gewicht mest + bakje	597,00	0,05	g
lengte bakje	20,0	0,2	cm
breedte bakje	14,7	0,2	cm
tijd tussen meting	30,0	2,0	min
vochtgehalte mest	65,0	6,0	%
mesttemperatuur	16,0	1,0	°C
dauwpunt drooglucht	9,6	0,5	°C

FOUT IN SPECIFIEKE VOCHTAFGIFTE

ware specifieke vochtafgifte (spreidingen 0)	= 111,2.10 <sup>-9</sup>	kg/(m <sup>2</sup> .Pa.s)
standaardafwijking	= 5,4.10 <sup>-9</sup>	"
gemiddelde specifieke vochtafgifte	= 111,1.10 <sup>-9</sup>	"
variatiecoëfficiënt	= 4,8	%
maximale meetfout (3 * standaardafwijking)	= 14,5	%

De variatiecoëfficiënt is groter dan 10 %, de grens die we getrokken hebben, in de volgende gevallen:

1. Bij een vochtgehalte van de mest kleiner dan 20 %. De wateractiviteit van de mest daalt dan sterk en de fout in de berekening van het dampdrukdeficit wordt groot. Ook de bepaling van de mesttemperatuur is bij droge mest niet eenvoudig omdat plaatselijke verschillen in vochtgehalte, zichtbaar door kleurverschillen, aanwezig zijn. Mest met een hoger vochtgehalte heeft een lagere temperatuur en daardoor wordt de toevallige keuze van de meetplaats beslissend.
2. Bij meettijden korter dan 15 min. Dit wordt veroorzaakt door de relatief langdurige verstoring van de meetomstandigheden en de wijze waarop het meettijdstip werd bepaald.
3. Bij een te lange tijd tussen 2 metingen. Als het vochtgehalte van de mest tussen 2 opeenvolgende metingen te veel is veranderd, dan levert de gebruikte berekeningswijze een te hoge specifieke vochtafgifte op. Een meting om de 3 uur is optimaal, maar deze regelmaat is onder normale arbeidsomstandigheden niet realiseerbaar. Automatisering van de gewichtsmeting is geen oplossing.
4. Bij een meetfout van de mesttemperatuur groter dan 1 °C. Aan deze eis is alleen te voldoen als het aanbrengen van de temperatuurvoelers snel en op de juiste plaats geschiedt.

### Onderscheid tussen vochtafgifte van water en mest

In de literatuur wordt als de drijvende kracht voor de vochtafgifte ook waterdampconcentratie ( $C$  in  $\text{kg}/\text{m}^3$ ) gebruikt in plaats van waterdampdruk ( $p$  in Pa) (Foust 1980). De constante in de droogvergelijking voor een vochtig oppervlak is dan de stofoverdracht  $B$ :

$$-\frac{\Delta w}{\Delta t} = B \times F \times (C_m - C_l) \quad (20)$$

In dit rapport wordt een analoge vergelijking gebruikt:

$$-\frac{\Delta w}{\Delta t} = k \times F \times (p_m - p_l) \quad (21)$$

$$C = 7,38710^{-6} \times p \quad \text{bij } 20^\circ \text{ C} \quad (22)$$

De concentratie is vervangen door dampdruk. Wij maken gebruik van vergelijking 18 omdat daarmee meer ervaring is opgebouwd en een goede aansluiting aanwezig is met het werk van Fockens (1972). De relatie, af te leiden uit de algemene gaswet, tussen concentratie en dampdruk voor water is:

$$k = 7,387.10^{-6} \times B = 7,4.10^{-6} \frac{h}{(c_l d_l)} \quad (23)$$

en dus:

$$\frac{h}{B} = (c_l d_l) \quad (24)$$

want tussen de warmte en stofoverdracht bij een verdampend wateroppervlak bestaat het volgende verband (Loncin 1988):

Voor een luchtsnelheid  $v = 1$  m/s over een waterlaag is de warmte-overdracht volgens vergelijking 10,  $h = 14$  W/( $\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ) (Backstrom, 1965). De stofoverdrachtscoefficient is volgens vergelijking 24:  $B = 0,0113$  m/s ( $c_l = 1005$  J/( $\text{kg} \cdot \text{K}$ ) en  $d_l = 1,23$   $\text{kg}/\text{m}^3$ ). De specifieke vochtafgifte van een wateroppervlak is  $k = 84.10^{-9}$   $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$ . De gemeten specifieke vochtafgifte van natte mest is gelijk aan de berekende voor water.

### Keuze tussen vochtafgifte en dampstroomdichtheid

Wetenschappelijk is de term specifieke dampstroomdichtheid beter. Een stroom heeft de eenheid  $\text{kg}/\text{s}$ . Een stroomdichtheid is een stroom door een oppervlakte en heeft de eenheid  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ . Specifiek heeft betrekking op de dampstroomdichtheid per eenheid van drijvende kracht, het verschil in waterdampdruk tussen mest en drooglucht in Pa, zodat de eenheid is  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$ . In dit rapport wordt de term specifieke vochtafgifte gebruikt omdat het woord vochtafgifte een nauwere associatie met een droogproces heeft, en korter is dan specifieke dampstroomdichtheid.

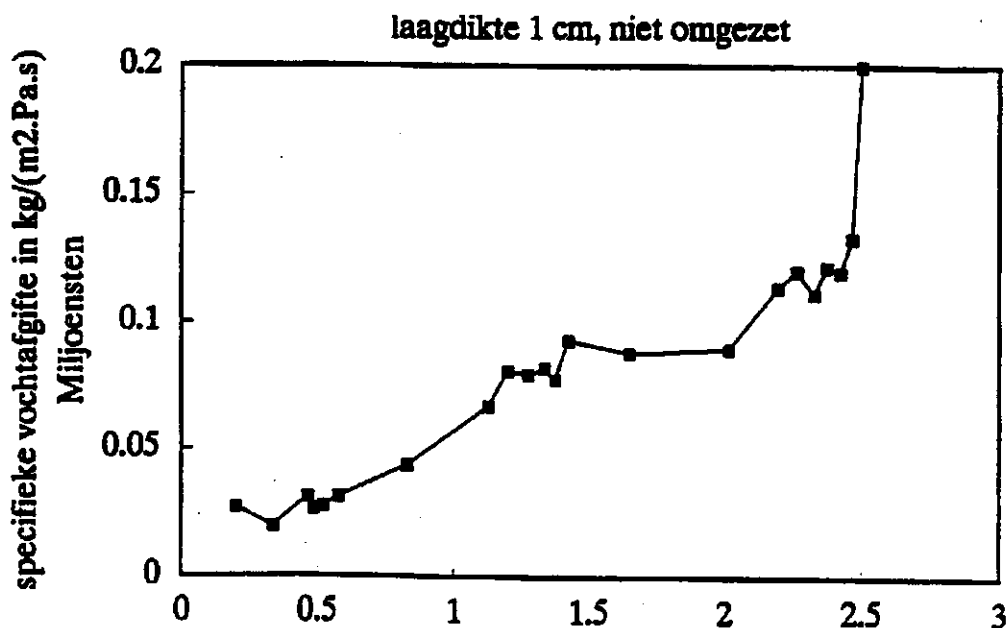
GEGEVENS OMGEVOER  
 temperatuur : 19.4 oC  
 luchtsnelheid : 1.01 m/s  
 relatieve vochtigheid: 53%

GEGEVENS MEST  
 nestoppervlak: 0.029 m<sup>2</sup>  
 bewerking : glad afgestroken  
 laagdikte : 1 cm  
 vochtgehalte : 71.6%

tarra : 407.2 g  
 droge stof : 84.4 g  
 omzetfrequentie : niet omgezet

**METINGEN**

tijd	bruto massa	X (nb)	T mest	specifieke vochtgiftes	X (db)
dag	gram	%	oC	kg/(m <sup>2</sup> .Pa.s)	water/ds
0.00	704.4	71.6	19.4	-	
0.02	700.8	71.3	14.6	1.999E-07	2.500
0.04	698.4	71.0	14.6	1.534E-07	2.464
0.09	693.8	70.5	14.6	1.200E-07	2.423
0.12	690.0	70.2	14.6	1.222E-07	2.373
0.16	686.0	69.7	14.6	1.116E-07	2.327
0.23	679.6	69.0	14.6	1.206E-07	2.265
0.28	674.3	68.4	14.7	1.140E-07	2.197
0.53	650.5	65.3	15.4	8.963E-08	2.018
0.93	614.1	59.2	15.4	8.791E-08	1.649
0.98	609.1	58.2	15.4	9.297E-08	1.421
1.02	606.1	57.6	15.2	7.752E-08	1.374
1.07	602.3	56.7	15.4	8.206E-08	1.334
1.14	596.1	55.3	15.3	7.959E-08	1.274
1.23	589.6	53.7	15.4	8.092E-08	1.198
1.30	584.1	52.3	15.6	6.700E-08	1.127
1.95	544.1	38.3	17.0	4.370E-08	0.828
2.11	537.1	35.0	17.2	3.130E-08	0.579
2.19	533.8	33.3	17.2	2.754E-08	0.519
2.26	531.3	32.0	17.2	2.658E-08	0.484



**Vochtgehalte (X) op basis van drogestof (db)**

Figuur 7 Voorbeeld van een droogkromme

## LITERATUUR

- 1 Abramowitz M en Stegun I.A. (1970) Handbook of mathematical functions. Dover Publ., New York. p. 933.
- 2 Backstrom E.H. en Emblik E. (1965) Kaltetechnik. Braun, Karlsruhe, p. 352.
- 3 Beek G.van (1990) Berechnung der Ammoniak-Emission aus Geflügelhaltungen. In: Ammoniak in der Umwelt, Symposium Braunschweig, VDI en KTBL, p.39.1-39.10.
- 4 Beek G.van en Beeking F.F.E.(1992) Carbon dioxide emission of litter in poultry houses. Proceedings WPSA congres, vol. 2, p.277-281.
- 5 Bruin S. (1969) Calculation of temperatur and moisture distribution during contact drying of a sheet of moist material. Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 12, p. 45-59.
- 6 Cleland A.C. (1985) Experimental verification of a mathematical model for simulation of industrial refrigeration plants. Int.J.Froid, vol.8, p.275-281
- 7 Coumans W.J. en Luyben K.Ch.A.M. (1988) Evaluation and prediction of experimental drying krommes of slabs. In: S. Bruin, Preconcentration and drying of food materials. Process Technology Proceedings 5, Elsevier.
- 8 Fockens F.H. en Meffert H.F.Th (1972) Biophysical Properties of Horticultural Products as Related to Loss of Moisture during Cooling Down. J.Sci. Fd. Agric., vol. 23, p. 285-298
- 9 Foust A.S. e.a. (1980) Principles of unit operations. Wiley, New York, 2e editie, p.456-464
- 10 Hiele van, e.a. (1986) Handboek voor de koudetechniek. Noordervloet, Zeist, p. 397-398
- 11 Kolenbrander G.J. en Lande Cremer L.C.N. de la (1967) Stalmest en gier. Veenman, Wageningen. p.44
- 12 Kleijnen J.P.C., van Groenendaal W.J.H. (1988) Simulatie: technieken en toepassingen. Academic Service, p.56.
- 13 Knobbout J.A. (1973) Verzadigde dampdruk van water in SI-eenheden. Koeltechniek 66, nr.1, p.4-7.
- 14 Leniger H.A. en Beverloo W.A. (1975) Food process engineering. Reidel, Dordrecht, p. 102.
- 15 Loncin M. (1988) Activity of water and its importance in preconcentration and drying of foods. In: S. Bruin, Preconcentration and drying of food materials. Process Technology Proceedings 5, Elsevier.
- 16 Miles C.A., van Beek G. en Veerkamp C.H. (1983) Calculation of thermophysical properties of foods. In: Jowitt R., e.a.. Physical properties of foods. Applied science publ, Londen.
- 17 Pham Q.T., Willix J. (1987) Heat transfer coefficients in air-blast freezing of rows of cartons, XVII Int. Congr. Refrigeration, Wenen, p.350-357
- 18 Sieben J.W. en de Munck H.A. (1965) Toegepaste statistiek A. DUM, Delft, p.47.
- 19 Threlkeld J.L. (1970) Thermal Environmental Engineering. Prentice-Hall, New Jersey. p.437.
- 20 Walmsley D.A. (1981) The simplex method for minimisation of a general function. Crowthorne, TRRL.
- 21 Weast R.C. (1968) Handbook of Chemistry and Physics. CRC, Cleveland. p. A-168.
- 22 Weerdhof A.M.van der (1991) Vergelijking van systemen voor het drogen van leghennenmest. IKB publikatie nr. 20, afdeling pluimveehouderij, Ede.

## SYMBOLLEN EN EENHEDEN

symbool	eenheid	grootheid
$a$	-	constante
$aW$	-	wateractiviteit
$b$	-	constante
$B$	m/s	stofoverdracht
$c$	J/(kg.K)	soortelijke warmte = lucht m = mest
$c_0$	-	constante
$C$	kg/m <sup>3</sup>	concentratie
$d$	m	dikte materiaal ta = tafel is = isolatie me = mest
$\Delta m$	kg	vochtverlies
$\Delta p$	Pa	dampdrukdeficit
$ds$	kg	massa drogestof
$\Delta t$	s	tijdstap
$dw$	kg	kleine verandering massa water
$dX$	-	kleine verandering vochtgehalte
$F$	m <sup>2</sup>	oppervlakte
$h$	W/(m <sup>2</sup> .K)	convectieve warmte-overdracht
$L$	W/(m.K)	warmtegeleiding
$m_{bak}$	kg	massa van bakje (= tarra)
$m_{ds}$	kg	massa drogestof in bakje op meettijdstip
$m_0$	kg	startmassa mest + bakje
$m_1$	kg	massa van mest + bakje op voorgaande tijdstip
$m_2$	kg	massa van mest + bakje op meettijdstip
$p$	Pa	dampdruk l = drooglucht m = mest s = verzadigd
$p$	-	kans
$q$	-	discriminant
$r$	J/kg	verdampingswarmte
$s$	-	standaardafwijking
$t_1$	s	tijd op voorgaande meetmoment
$t_2$	s	tijd op meetmoment
$T$	°C	temperatuur l = drooglucht nb = nattebol
$T_{opp}$	°C	temperatuur aan oppervlak
$U$	W/(m <sup>2</sup> .K)	warmtedoorgang
$v$	m/s	snelheid
$w$	kg/(m <sup>2</sup> .s)	vochtafgifte
$X$	%	vochtgehalte
$X_d$	kg/kg	vochtigheid
$X_n$	%	vochtgehalte op basis van natte mest
$X_{n0}$	%	start vochtgehalte mest
$\lambda$	kg/(m <sup>2</sup> .Pa.s)	specifieke vochtafgifte
$\varphi$	%	relatieve vochtigheid
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	dichtheid
$\mu$	-	gemiddelde
$\xi$	-	statistische grootheid