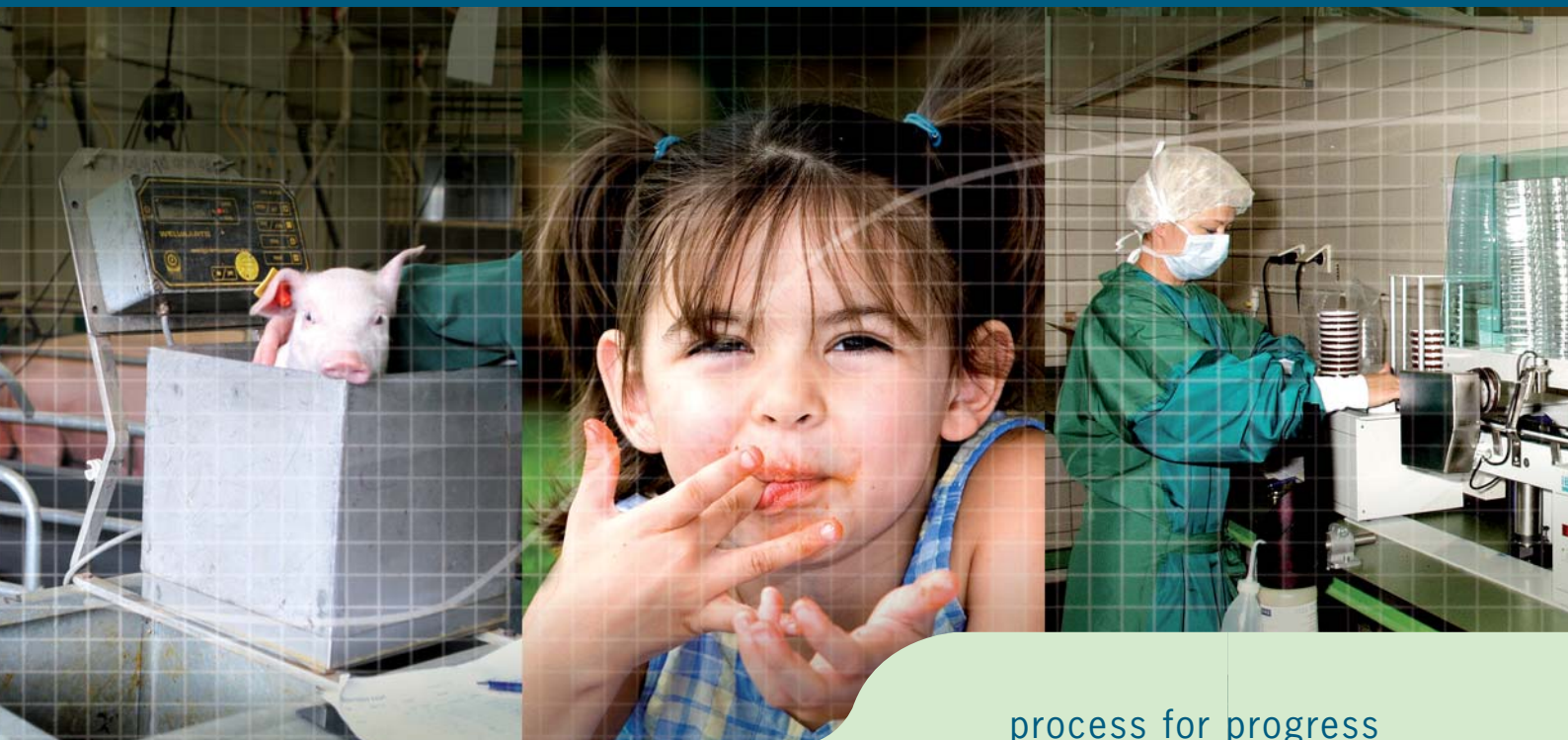


Animal Sciences Group

Kennispartner voor de toekomst



process for progress

Rapport 230

Verdamping uit ligbodems van vrijloopstallen

Oriënterende modelberekeningen

Mei 2009



ANIMAL SCIENCES GROUP
WAGENINGEN UR

Colofon

Uitgever

Animal Sciences Group van Wageningen UR
Postbus 65, 8200 AB Lelystad
Telefoon 0320 - 238238
Fax 0320 - 238050
E-mail Info.veehouderij.ASG@wur.nl
Internet <http://www.asg.wur.nl>

Redactie

Communication Services

Aansprakelijkheid

Animal Sciences Group aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Liability

Animal Sciences Group does not accept any liability for damages, if any, arising from the use of the results of this study or the application of the recommendations.

Losse nummers zijn te verkrijgen via de website.



De certificering volgens ISO 9001 door DNV onderstrept ons kwaliteitsniveau. Op al onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponereerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Abstract

Water evaporation from bedding in freestall dairy cattle houses was modeled. Calculated water evaporations from excreta in composting and non composting beddings were much lower in Holland than in Israel.

Keywords

Evaporation, composting, bedding, dairy cattle, housing, manure

Referaat

ISSN 1570 - 8616

Auteurs

M.C.J. Smits en A.J.A. Aarnink

Titel

Verdamping uit ligbodems van vrijloopstallen; oriënterende modelberekeningen
Rapport 230

Samenvatting

Verdamping vanuit vrijloopstalbodems werd modelmatig benaderd. De berekende verdamping uit uitgescheiden urine- en fecesvocht is veel lager in Nederland dan in Israël.

Trefwoorden:

Verdamping, compostering, strooisel, melkvee, stal, mest



Rapport 230

Verdamping uit ligbodems van vrijloopstallen; oriënterende modelberekeningen

Water evaporation from bedding in dairy cattle
freestall barns
Model approach

M.C.J. Smits
A.J.A. Aarnink

Mei 2009

Voorwoord

De vrijloopstal biedt kansen de duurzaamheid in de melkveehouderij te verbeteren. In een vrijloopstal lopen de melkkoeien vrij rond. De ligruimte is tevens mestopslag. Door het ontbreken van ligboxen biedt de stal veel bewegingsruimte. Afhankelijk van het bodemtype heeft de koe 7 tot 20 m². In ligboxstallen is dit 4 tot 5 m² per koe. De uitdaging is meer ruimte voor de dieren te combineren met minder emissie en betaalbaar. Meer ruimte met zachte bodems kan zorgen voor minder klauwproblemen en meer natuurlijk gedrag. Daarbij kun je denken aan verschillende soorten bodemmateriaal zoals diverse soorten zand, kunststof, compost (houtsnippen met zaagsel), droge mest of grond (klei of veen). In het buitenland zijn ervaringen opgedaan met verschillende bodems. De vraag is wat onder Nederlandse (klimaat)omstandigheden haalbaar is. Daarvoor is in opdracht van Productschap van Zuivel en Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit een haalbaarheidsstudie gedaan. Deze bestaat uit de volgende onderdelen:

- Ervaringen met vrijloopstallen in het buitenland inventariseren
- Economische vergelijking tussen vrijloopstal en ligboxestal
- Laboratoriumproef naar ammoniakemissie
- Verdampingsstudie naar drogen toplaag

Dit rapport betreft de verdampingsstudie. De overige onderdelen zijn in afzonderlijke ASG-rapporten beschreven.

Het perspectief van de vrijloopstal begint bij het vinden van een geschikte bodem. Daarop ligt het accent in deze voorstudies. In het vooruitzicht naar duurzame bedrijfssystemen in de melkveehouderij zijn meer aspecten van belang zoals kwaliteit van de mest in relatie tot bodemvruchtbaarheid, inpassing ruime stallen in het bouwblok en het landschap, emissies van zowel ammoniak als broeikasgassen, diergezondheid & welzijn en werkelijke economie & arbeidsbehoeften. Deze studies zijn oriënterend maar kunnen een startpunt zijn bij het zoeken naar nieuwe duurzame bedrijfssystemen voor de Nederlands (klimaat)omstandigheden.

Paul Galama
Projectleider bodems voor vrijloopstallen

Samenvatting

In Nederland is belangstelling ontstaan voor nieuwe, boxloze huisvestingsvormen voor melkvee. Deze belangstelling is primair ingegeven door gewenste verbetering op het terrein van diergezondheid en dierenwelzijn. In vrijloopstallen kunnen de koeien vrij bewegen. Er zijn geen ligboxen. Het liggedeelte bestaat uit een grote ruimte voorzien van een zachte, vochtdoorlatende of adsorberende bodem. In de USA worden vrijloopstallen toegepast met een bodem van zaagsel en houtsnippers. Er vindt compostering plaats en met de hierbij vrijkomende warmte wordt vocht verdampt. In Israël gebruikt men droge mest als bedding. De vochttoevoer via feces en urine wordt daar door verdamping afgevoerd.

Om inzicht te krijgen in de praktische haalbaarheid van vrijloopstallen onder Nederlandse klimaatomstandigheden is het van belang in te schatten of de bodems voldoende droog te krijgen zijn. Dit als onderdeel van het project 'Bodems voor vrijloopstallen' voor melkvee. In het project wordt het perspectief onderzocht van verschillende zachte bodems voor de Nederlandse melkveehouderij. De bodems zijn opgebouwd uit zacht, organisch of anorganisch strooiselmateriaal en de door de dieren uitgescheiden mest.

Twee bestaande modellen voor compostering en droging zijn gecombineerd. De bevochtiging met urine en feces is geïntegreerd in de modelbenadering. Vervolgens zijn oriënterende modelberekeningen uitgevoerd om een indruk te krijgen van de verdamping uit ligbodems van vrijloopstallen. Dit bij Nederlandse, Israëlische en Amerikaanse (Minnesota) klimaatomstandigheden en bij 18 versus 9 m² per koe.

De berekende verdamping uit uitgescheiden urine- en fecesvocht in Nederland is veel lager dan in Israël. Een organische bodem met compostering geeft meer verdamping dan een anorganische bodem. De mate van compostering is sterk afhankelijk van de warmteproductie als gevolg van omzetting van organische stof en de warmteafvoer. De warmteafvoer wordt belangrijk beïnvloed door de luchtsnelheid over het bodemoppervlak. Bij een (te) hoge luchtsnelheid zal teveel warmte worden afgevoerd, waardoor het composteringsproces wordt vertraagd. De lagere verdamping bij anorganische bodems kan (gedeeltelijk) gecompenseerd worden door de luchtsnelheid over het bodemoppervlak te verhogen. Om de toplaag droog te houden, kan ook gezocht worden naar een pakket waarin een groot deel van het vocht snel infiltreert; alternatief is dat gedurende kortere of langere perioden van het jaar wordt bijgestrooid met droog (eventueel kunstmatig gedroogd) ligbedmateriaal. Praktijkervaringen in Nederland moeten uitwijzen of door vergroting van het aantal m² per dier, verhoging van de luchtsnelheid met extra ventilatoren, oppervlaktevergroting van de toplaag door cultiveren of een goede drainage van vocht door het ligbodempakket afdoende soelaas kunnen bieden voor koudere en vochtigere weersomstandigheden.

Summary

A model approach to study the drying potential of bedding materials in freestall dairy cow barns under Dutch climate conditions was performed. Water evaporation from bedding in freestall dairy cattle houses was modeled. This was done as part of a feasibility study of freestall barns with different beddings under Dutch meteorological conditions. The beddings are made up of mixtures of soft composting, or non composting materials and animal excreta.

Two available models on composting and drying were combined. The estimated water flux from urine and feces that is excreted on the bedding was integrated in the model approach. Model calculations were performed to compare the order of magnitude of evaporation from the bedding area under Dutch, Israeli and Minnesotan climate conditions and at 18 versus 9 m² of bedding area per animal.

Calculated water evaporations from excreta in composting and non composting beddings were much lower under Dutch weather conditions than under Israeli conditions. The calculated evaporation under cold Minnesotan winter conditions was lower and in hot Minnesotan summer was higher than under Dutch conditions.

The calculated evaporation from a bedding that is composting was higher than from a non composting bedding. The calculated rate of composting was strongly dependent on the heat flux that results from conversion of organic matter and the heat loss from the bedding. The heat flux is strongly influenced by the air velocity above the bedding. High air velocities result in a large heat loss that may slow down or even inhibit the thermophilic composting process. The lower evaporation rate of inorganic beddings may be compensated to some extent by increasing the air velocity above the bedding. To keep the top layer of the bedding sufficiently dry it may also be searched for a bedding with a high fluid infiltrating capacity. By adding fresh bedding material or controlled drying of part of the bedding material outside the barn problems during adverse climate conditions may also be tackled. On farm pilot experiments with bedding materials and management are needed to test whether or not it is possible to keep the top layer of the bedding at an acceptable level of dryness under cold and moist Dutch weather conditions.

Inhoudsopgave

Voorwoord

Samenvatting

Summary

1	Inleiding	1
2	Eerder onderzoek naar verdamping uit stalbodems	2
2.1	Experimentele metingen	2
2.2	Verdamping vanaf een betonnen oppervlak.....	3
2.3	Verdamping in potstallen met groeiend vleesvee.....	3
3	Modelbenadering verdamping uit stalbodems	4
3.1	Vergelijking klimaat in Nederland, Israël en Minnesota	4
3.2	Modelmatige aanpak	4
3.2.1	Globale beschrijving modelaanpak.....	4
3.2.2	Composteringsmodel Cekmecelioglu	6
3.2.3	Verdampingsmodel Gigler	7
3.2.4	Resultaat modelberekeningen	8
4	Discussie	11
5	Conclusies	12
	Literatuur	13

1 Inleiding

In Nederland is belangstelling ontstaan voor nieuwe, boxloze huisvestingsvormen voor melkvee. Deze belangstelling is primair ingegeven door gewenste verbetering op het terrein van diergezondheid en dierenwelzijn. In vrijloopstallen kunnen de koeien vrij bewegen. Er zijn geen ligboxen. Het liggedeelte bestaat uit een grote ruimte voorzien van een zachte, vochtdoorlatende of adsorberende bodem. In de USA worden vrijloopstallen toegepast met een bodem van zaagsel en houtsnippers. Er vindt compostering plaats en met de hierbij vrijkomende warmte wordt het met urine en feces toegevoegde vocht verdampt. In Israël wordt droge mest als bedding gebruikt. De vochttoevoer via feces en urine wordt daar door verdamping afgevoerd. Zowel voor de dierhygiëne als voor het ligcomfort is een voldoende droge bodem belangrijk.

Dit project is een van de voorstudies van het project 'Bodems voor vrijloopstallen' (Galama *et al.*, 2009). Het doel van de voorstudies is het perspectief te bepalen van verschillende bodems voor de Nederlandse melkveehouderij. In een vervolgfase worden enkele perspectiefvolle opties nader getest.

De bodems zijn opgebouwd uit zacht, organisch of anorganisch strooiselmateriaal en de door de dieren uitgescheiden mest. Vrijloopstallen worden elders (o.a. in Israël en Minnesota) al succesvol toegepast. Om inzicht te krijgen in de praktische haalbaarheid onder Nederlandse klimaatomstandigheden is het van belang in te schatten of de bodems voldoende droog te krijgen zijn. Daarom zijn verdampingsberekeningen gemaakt bij verschillende klimaatomstandigheden en bodemoppervlakte per koe. In deze voorstudie wordt zo het perspectief verkend van de bodems onder Nederlandse (klimaat)omstandigheden.

Achtergrond

Het droog houden van de toplaag van een bodem in een vrijloopstal kan deels geschieden door het infiltreren van urine in de bodem. Daarnaast kan voldoende verdamping zorgen voor een droge toplaag.

De vraag is in hoeverre verdamping van de verwachte hoeveelheid urine bij verschillende bezettingsgraden en bij verschillende klimaten (Nederland, Israël, Minnesota) haalbaar is; of anders gesteld: hoeveel m² bodem moet er per dier beschikbaar zijn om het gehele jaar een droge bodem te houden of eventueel een deel van het jaar te overbruggen met opgespaard droog bodemmateriaal tijdens bijvoorbeeld de weideperiode.

Aanpak

Eerdere modelmatige studies naar verdamping uit stalbodems zijn kort beschreven in hoofdstuk 2. In paragraaf 3.1 vergelijken we klimaatkarakteristieken van Nederland, Israël en Minnesota (USA) vergeleken. Dit is input voor de modelberekeningen die in paragraaf 3.2 worden beschreven. Een model dat de verdamping uit de stalbodem (bestaand uit organisch of anorganisch materiaal met respectievelijk alle in de stal opgevangen feces of alleen de niet dagelijks verwijderde feces) berekend, is ontwikkeld aan de hand van literatuurstudie van eerder beschreven modellen (paragraaf 3.2.1). Met dit model zijn vervolgens per land berekeningen uitgevoerd, uitgaande van bodems zonder en met compostering (paragraaf 3.2.2). Tenslotte worden in hoofdstuk 4 de resultaten van de modelberekeningen bediscussieerd.

Deze projectactiviteit werd uitgevoerd als onderdeel van het project "Bodems voor vrijloopstallen" en gefinancierd door Productschap Zuivel en het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit.

2 Eerder onderzoek naar verdamping uit stalbodems

2.1 Experimentele metingen

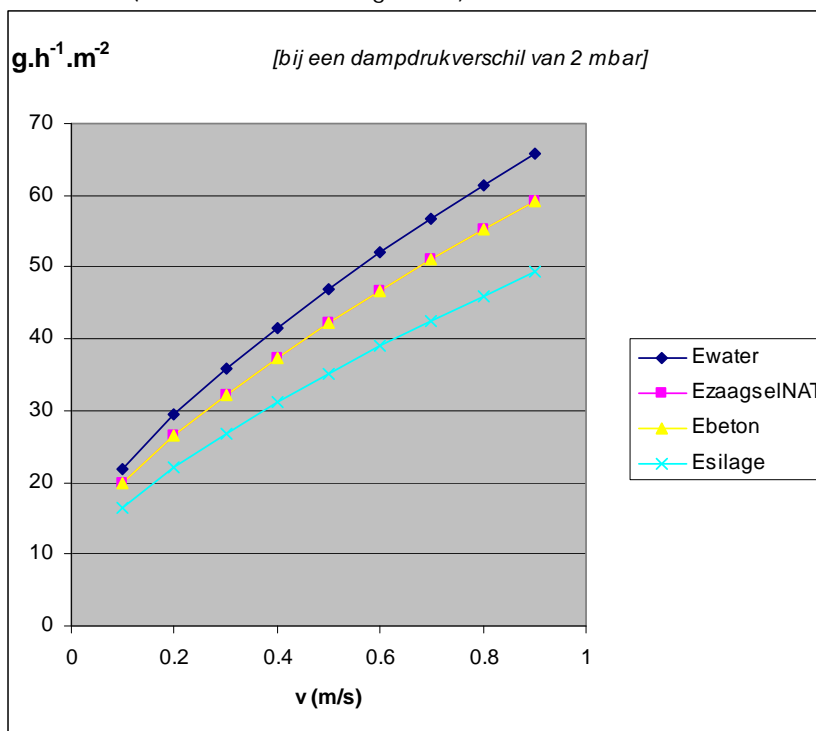
Oekland en Lilleng (1983) hebben experimentele metingen uitgevoerd om de verdamping van natte oppervlakken in stallen te bepalen. Dit bij verschillende vochtige materialen (schotels met vers kuilgras (silage), zaagsel dat met water verzadigd was, nat beton en water) en bij verschillende luchtsnelheden. Er werd gemeten bij een temperatuur van circa 14,6 °C en een RV van 51% in een stalafdeling voor jonge dieren. De verdamping uit nat zaagsel en nat beton was 10% lager dan die uit een schotel met water; de verdamping uit een verse silage (monster) was 25% lager dan die uit een schotel met water.

Tabel 1 Verdamping van water ($\text{g}\cdot\text{m}^2\cdot\text{h}^{-1}$ per mbar dampdrukverschil) uit vochtige materialen bij verschillende luchtsnelheden (v , m/s) volgens een door Oekland en Lilleng (1983) afgeleide relatie

v	Water	Zaagsel*	Beton	Silage
0,05	8,7	7,8	7,8	6,5
0,1	11	9,9	9,9	8,2
0,2	14,7	13,3	13,3	11
0,3	17,9	16,1	16,1	13,4
0,4	20,8	18,7	18,7	15,6
0,5	23,5	21,1	21,1	17,6
0,6	26	23,4	23,4	19,5
0,7	28,4	25,5	25,5	21,3
0,8	30,7	27,6	27,6	23
0,9	32,9	29,6	29,6	24,7

* Het zaagsel was volledig verzadigd met water

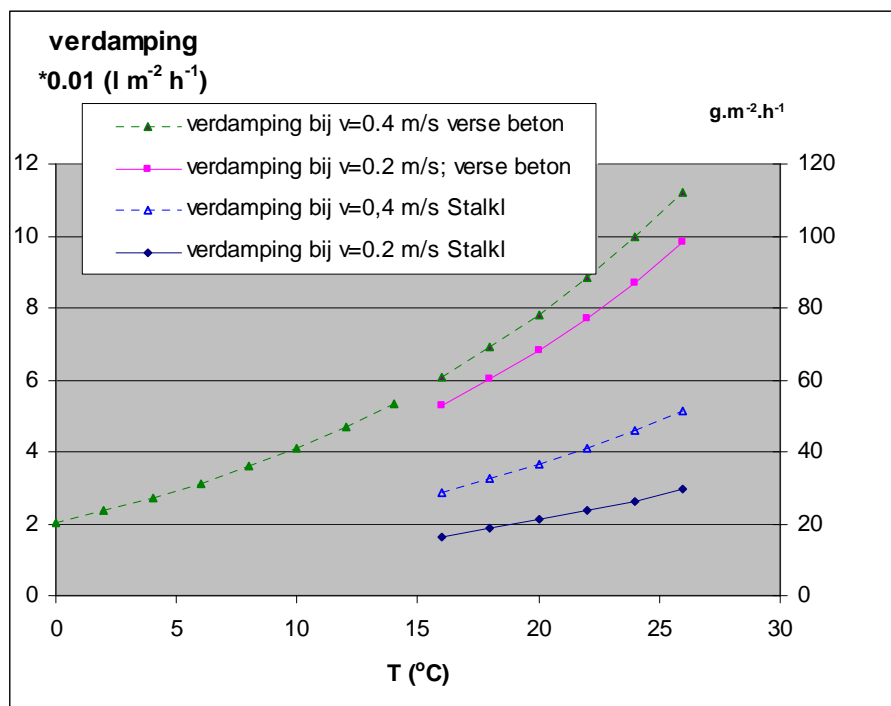
Figuur 1 Relatie tussen luchtsnelheid en verdamping bij een dampdrukverschil van 2 mbar (Bron: Oekland & Lilleng, 2008)



2.2 Verdamping vanaf een betonnen oppervlak

De verdamping uit vers beton direct na het storten volgens een formule uit de betonindustrie en de verdamping vanaf een natte betonnen stalvloer (met verse urineplassen) in een normaal bezette stal zoals eerder berekend volgens het model Stalklimaat (uit een niet gepubliceerd IMAG project) zijn in figuur 2 weergegeven. De fysische beschrijving van de verdamping die in het Stalklimaatmodel is gevolgd, kon niet achterhaald worden; alleen de resultaten van de modelberekeningen werden destijds vastgelegd.

Figuur 2 De verdamping uit vers beton direct na het storten volgens een formule uit de betonindustrie en de verdamping vanaf een natte betonnen stalvloer (met verse urineplassen) in een normaal bezette stal zoals eerder berekend met het model Stalklimaat. Resultaten zijn weergegeven bij een luchtsnelheid van 0,2 m/s en 0,4 m/s.



In vers gestort beton vinden nog chemische reacties plaats waarbij warmte vrijkomt hierdoor kan de verdamping uit verse beton hoger zijn dan vanuit een urineplas op een betonnen stalvloer.

De berekende niveaus volgens Stalklimaat in figuur 2 (eenheid: cl/m^2) bij circa 16 °C zijn qua orde van grootte redelijk vergelijkbaar met (maar iets lager dan) die van Oekland en Lilleng in figuur 1 (eenheid: g/m^2) bij circa 14,6 °C en een windsnelheid van 0,2 en 0,4 m/s.

2.3 Verdamping in potstallen met groeiend vleesvee

Door Jeppson *et al.* (2000) zijn verdamping in een winterseizoen (november – mei) in Zweden gerapporteerd in een stal met jong vleesvee (dierdichtheid variërend van 27 tot 101 kg/m^2).

Staltemperaturen varieerden van circa 0 tot circa 20 °C. RV varieerde van 75 tot 95%. De verdamping in het strobedden varieerde van 109 tot 160 $\text{g.m}^2.\text{h}^{-1}$.

Op een dichte mestvloer varieerde de verdamping tussen 73 en 110 $\text{g.m}^2.\text{h}^{-1}$.

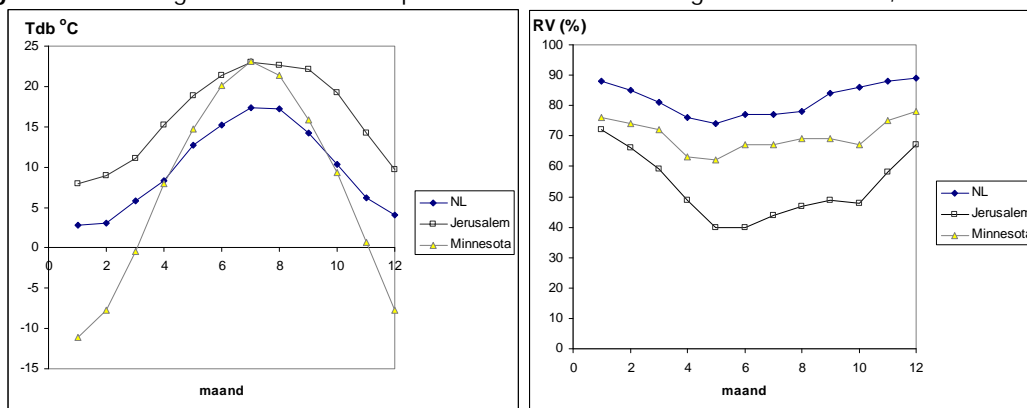
De metingen werden uitgevoerd met een geventileerde box van 0,25 m^2 (kamer van 0,1 m^3) en een geforceerde ventilatie van ongeveer 75 m^3/h . De box was qua opzet vergelijkbaar was met de dynamische box (versie 2007/2008) voor emissiemetingen van ASG.

3 Modelbenadering verdamping uit stalbodems

3.1 Vergelijking klimaat in Nederland, Israël en Minnesota

In Nederland (De Bilt) zijn de drogebol temperaturen 5,2 tot 6,4 graden lager dan in Israël (Jeruzalem). In Minnesota (landklimaat) zijn de temperaturen 's zomers hoger, maar 's winters lager dan in Nederland (zeeklimaat). De relatieve vochtigheid is in Nederland structureel hoger dan in Minnesota en die is weer hoger dan in Israël (Jeruzalem).

Figuur 3 Maandgemiddelden van temperatuur en relatieve vochtigheid in Nederland, Israël en Minnesota



Uit figuur 3 kunnen we afleiden dat de weerscondities voor verdamping in Nederland moeilijker zijn dan in Israël en dat de weerscondities voor verdamping in Minnesota 's zomers makkelijker, maar 's winters waarschijnlijk moeilijker zijn dan in Nederland.

3.2 Modelmatige aanpak

3.2.1 Globale beschrijving modelaanpak

Voor de verdampingsberekeningen is gebruik gemaakt van een modelbenadering. Dit door integratie van rekenregels uit:

1 Een compostingsmodel (Cekmecelioglu, 2005)

Dit model beschrijft vooral de warmtestromen in detail en de daaruit volgende temperatuur in de kern en aan de rand van een composthoop. Het gaat hierbij vooral om de warmteontwikkeling door biologische afbraak en warmteverliezen door convectie, conductie, straling en verdamping. De temperatuur van de toplaag is medebepalend voor de verdamping. Bij anorganische bodems is er vrijwel geen warmteontwikkeling door compostering behalve van een geringe hoeveelheid organische stof in feces. De verdamping is door Cekmecelioglu (2005) eenvoudig benaderd. Aangezien verdamping voor het onderhavige project erg belangrijk is, is gezocht naar een betere modelbenadering van de verdamping. Voor de verdamping zijn de warmtestromen en resulterende temperatuur van het bodempakket (zoals die volgen uit het compostingsmodel) belangrijke inputs.

2 Een drogingsmodel dat de verdamping in detail beschrijft

Dit model werd oorspronkelijk ontwikkeld door Gigler *et al.* (2000 voor de natuurlijke droging van fijn gehakselde wilgentakken door verdamping. Droging van wilgenchips is relevant voor toepassing als biomassa in een energiecentrale en is vanuit dat oogpunt uitvoerig bestudeerd door Gigler *et al.*, (1990). Omdat de rekenregels uitgaan van algemene fysische principes en wetmatigheden is in dit model ook voor andere drogende (bio)massa zoals stalbodempakketten bruikbaar. Het model van Gigler is gecombineerd met het hiervoor beschreven compostingsmodel en geschikt gemaakt voor berekeningen aan organische en anorganische vrijloopstalbodempakketten.

Gigler *et al.* maken een onderscheid tussen de initiële fase waarin de beschikbaarheid van water aan de buitenzijde van de wilgenchips niet beperkend is voor verdamping en een latere fase waarin dat wel beperkend is en waarbij dan de wateroverdracht vanuit de kern van de wilgenchips naar de buitenzijde berekend moet worden. Voor het onderhavige project is alleen de initiële fase uit de modelbenadering van Gigler overgenomen aangezien er een continue aanvoer van verse urine is en we uitgaan van strooiselmateriaal waarbij het water niet (zoals bij gehakselde wilgentakken) deels 'opgesloten' zit in een kern omgeven door houtige cellen.

3 Een benadering van de dagelijkse aanvoer en verdeling van urine en feces in het vrijloopstalgedeelte met de zachte bodem.

De modellen van Cekmecelioglu *et al.* en Gigler *et al.* gaan uit van een composthoop en een gestapelde hoeveelheid wilgenchips. Daarin treden door compostering afbraak van DS en verdamping op. In een vrijloopstal wordt dagelijks verse urine en feces uitgescheiden. Dit gebeurt min of meer willekeurig verspreid over een deel van de totale oppervlakte. Om de verdeling van urine en feces te simuleren (en daarmee de overlap in de tijd tussen afzonderlijke bevulde oppervlakten), is in het model een random generator opgenomen.

Hierbij is aangenomen dat per koe dagelijks 30 kg urine, 36 kg feces water en circa 6 kg feces drogestof worden geproduceerd. Aangenomen is dat de helft hiervan in het liggedeelte terecht komt, de andere helft op de mestgang achter voerhek en bij de melkstal/melkrobot. Verder is aangenomen dat verdamping plaats zal vinden op de plekken waar urine of feces terechtkomen. Urine wordt daarbij verdeeld over vijf lozingen met een oppervlakte van 0,7 m², feces over vijf defecaties van 0,07 m².

Kanttekening

De hier uitgewerkte modelbenadering is voor bodempakketten in vrijloopstallen nog niet gevalideerd en validatie op enkele cruciale punten is wel zeer wenselijk. De hierna gepresenteerde rekenresultaten kunnen we dus niet als absolute waarden opvatten, maar ze geven wel een indicatie over de relatieve effecten van invloedsfactoren zoals hogere luchtsnelheid, temperatuur e.d. Ook verschillen tussen landen kunnen met deze kanttekening verkend worden.

De meest cruciale modelparameters die nog gevalideerd dienen te worden zijn de composteringssnelheid, de porositeit (in relatie tot verdamping) en de hoeveelheid vocht die in de toplaag blijft 'hangen' (fractie die niet infiltreert naar diepere lagen van het pakket).

Vertaalslag buitenklimaat naar stalklimaat

Meteorologische gegevens van Nederland, Israël en Minnesota hebben betrekking op het buitenklimaat. Door expert judgement zijn deze gegevens vertaald naar stalklimaatgegevens. Met name de vertaalslag van windsnelheid naar luchtsnelheid direct boven de ligbodem levert onzekerheden op. In een windprofiel neemt de luchtsnelheid sterk af naarmate het maaiveld niveau dichterbij wordt benaderd. In een stal bevinden zich bovendien veel obstakels zoals een voerhek, eventueel een muur tussen mestgang en liggedeelte, waterbakken, krachtvoerboxen, melkstal en de dieren zelf. Dit soort obstakels remt de luchtsnelheid.

De luchtsnelheid is mede afhankelijk van het verschil in temperatuur tussen buitenlucht en stallucht: koudere lucht zal in sterkere mate naar beneden stromen dan warme lucht. Als de ligbodem verdiept (beneden maaiveld) in de stal is aangebracht, kan dit lokaal tot hogere luchtsnelheden leiden.

Het is duidelijk dat de luchtsnelheid binnen de stal sterk varieert in ruimte en tijd. Nabij de buitenzijde van de stal waar de wind op staat zal de luchtsnelheid in het algemeen hoger zijn dan op een afstand van 10 meter van deze buitenzijde. In het model is de gemiddelde luchtsnelheid een invoergegeven. Dit betreft dus een expertschatting van de gemiddelde luchtsnelheid boven het bodempakket als geheel.

Integratie modellen

Door de modellen van Gigler en Cekmecelioglu te combineren en de dagelijkse toevoer van urine en mestproductie (water en drogestof) toe te voegen, werd een integrale berekeningswijze ontwikkeld in Matlab. Daarbij is de netto verandering van de hoeveelheid water en DS in het ligbed berekend, afhankelijk van klimaatgegevens en de resulterende composteringstemperatuur. Als de omgevingscondities of eigenschappen van het ligbedmateriaal de compostering sterk remmen of verhinderen, berekent het model alleen de verdamping door massaoverdracht ten gevolge van kleine temperatuur- en dampdrukverschillen tussen de toplaag van de ligbodem en de aangrenzende luchtlaag berekenen.

Output berekeningen

Het model levert de volgende output:

- kerntemperatuur van het pakket, en temperatuur van de toplaag
- warmtestromen (composteringswarmte, conductie, convectie, straling, verdamping)
- dampdrukverschil
- water aanvoer via feces en urine per m², verdamping per m² en watervorming uit biologische afbraak per m²

In eerste instantie is het doel van de berekeningen om een indruk te krijgen van de verdamping uit de toplaag. Daarnaast kan de output nuttig zijn om te traceren of interpreteren waar de eventuele oorzaak van een te lage verdamping gezocht moet worden; dit kan bijvoorbeeld te maken hebben met een grote warmteverliesstroom of een te sterke daling van de oppervlakte temperatuur.

Doorgerekende varianten Nederland versus Israël versus Minnesota

Met het geïntegreerde model zijn vergelijkende berekeningen uitgevoerd met klimaatgegevens van de drie landen voor de volgende situaties:

- composterend versus niet-composterend pakket
 - luchtsnelheid aan oppervlakte (m/s): 0,08; 0,32; 1,28 en 5,12
 - voor Nederland versus Minnesota versus Israël, op basis van de maandgemiddelde van temperatuur en relatieve vochtigheid (weersgegevens) voor de maanden januari, maart, mei, juli, september, november
- In de berekeningen is steeds uitgegaan van een ligbedoppervlakte per dier van 9 m².

Doorgerekend effect oppervlakte per dier

Aanvullend zijn berekeningen uitgevoerd voor de Nederlandse weersgegevens bij een verdubbeling van de vrijloopstalbodemp oppervlakte tot 18 m² per dier (NL), met en zonder compostering, bij windsnelheden van 0,08 en 0,32 m/s. Dit ter vergelijking met de resultaten bij 9 m²/dier vrijloopstalbodemp.

3.2.2 Composteringsmodel Cekmecelioglu

Hierna beschrijven we kort de belangrijkste elementen uit het composteringsmodel. Voor een complete beschrijving verwijzen we naar Cekmecelioglu et al (2005). In plaats van 'composterende massa' kan 'het ligbodempakket' gelezen worden. De mate waarin compostering plaatsvindt volgt uit de modelberekeningen en kan variëren van vrijwel geen compostering tot veel compostering bij hoge temperatuur.

Afbraaksnelheid

De verandering van de composterende massa door biologische afbraak werd beschreven door een zogenaamde eerste orde kinetische vergelijking:

$$dM_c = -k (M_c - M_e) dt \quad (1)$$

Waarbij	M _c :	totale droge massa compost (kg DS)
	dM _c :	verandering in M _c (kg/dag)
	M _e :	totale niet biologisch afbreekbare massa (kg DS)
	k:	compostering reactiesnelheidsconstante (-)
	dt:	verandering in tijd (per dag)

hierbij is k gedefinieerd als functie van de composttemperatuur:

$$k = x_1 [1.066^{(T-20)} - 1.21^{(T-60)}] \quad (2)$$

Waarbij	T:	temperatuur composthoop
	x ₁ :	effectiviteit van de compostering

Energiebalans

Om de warmte in- en uitstromen te schatten en de daaruit voortvloeiende composttemperaturen werd de verdeling over energiestromen berekend. Dit volgens de theoretische verbanden voor warmteproductie door bacteriologische activiteit, lees: door afbraak van organische stof (Q_{gen}), convectie (Q_{conv}), straling (Q_{rad}), conductie (Q_{cond}) en verdamping (Q_{evap}).

$$(M_c c_c + M_w c_w) dT/dt = Q_{gen} - Q_{conv} - Q_{cond} - Q_{rad} - Q_{evap} \quad (3)$$

Waarbij c_c : specifieke warmte van compost ($J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)
 c_w : specifieke warmte van water ($J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)
 M_w : massa water in compost (kg)
 dT : verandering van de composttemperatuur

Voor de berekening van Q_{gen} , Q_{conv} , Q_{cond} en Q_{rad} wordt verwezen naar Cekmecelioglu et al (2005). Q_{evap} werd niet geschat volgens Cekmecelioglu, maar volgens de meer uitgewerkte verdampingsbeschrijving van Gigler *et al.* (zie paragraaf 3.2.3).

3.2.3 Verdampingsmodel Gigler

Hierna worden de belangrijkste elementen uit het drogingmodel kort beschreven. Voor een complete beschrijving verwijzen we naar Gigler *et al.* (2000). De massaflux van water uit het materiaal naar de lucht (ϕ_m , $kg.m^{-2}.s^{-1}$) werd door een diffusievergelijking beschreven als:

$$\phi_m = k \times (\rho_{a_i} - \rho_{a_b}); \quad (kg/s) \quad (4)$$

Waarbij k : massa overdrachtscoëfficiënt (m/s)
 ρ_{a_i} : watergehalte in de lucht aan het oppervlak van het materiaal (kg/m^3)
 ρ_{a_b} : watergehalte in de omgevingslucht, afgeleid uit een gemodelleerd Mollier diagram (kg/m^3)

De massaoverdrachtscoëfficiënt (k) werd beschreven als functie van de porositeit (poros), en de parameters in de formule van k als functie van andere variabelen, zoals hieronder weergegeven:

$$k = Sh \times 3 \times Dw \times (1-\text{poros}) / (2 \times 2 \times L \times \text{poros}) \quad (\text{Beek } et al., 1999) \quad (5)$$

Waarbij Sh : Sherwood getal (dimensieloos); zie formule 6
 Dw : diffusiviteit van water in lucht (m^2/s); zie formule 9
 L : lengte van bodemdeeltje in bodempakket (m)
 poros : porositeit (dimensieloos); zie formule 10

$$Sh = 1.86 \times Re^{0.33} \times Sc^{0.33} \times (L/B)^{-0.33} \quad (6)$$

Waarbij Re : Reynolds getal (dimensieloos); zie formule 7
 Sc : Schmidt getal (dimensieloos); zie formule 8
 B : breedte van deeltjes in bodempakket (m)

$$Re = v(i) \times \rho_a \times B / \eta \quad (7)$$

Waarbij $v(i)$: luchtsnelheid (m/s)
 ρ_a : dichtheid van lucht (kg/m^3)
 B : breedte van deeltjes in bodempakket (m)
 η : dynamische viscositeit van lucht ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)

$$Sc = \eta / (\rho_a \times Dw) \quad (8)$$

Waarbij Sc : Schmidt getal (zonder eenheid)
 η : dynamische viscositeit van lucht ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)

$$Dw = 0.22e^{-4} \quad (9)$$

$$\text{poros} = \rho_b / \rho_g \quad (10)$$

Waarbij ρ_b : bulkdichtheid (water, drogestof en lucht) van ligbedmateriaal inclusief mest (kg/m^3)
 ρ_g : dichtheid van ligbedmateriaal inclusief mest (kg/m^3)

3.2.4 Resultaat modelberekeningen

In figuur 4 zijn de resultaten van de berekeningen voor de te vergelijken landen en luchtsnelheden weergegeven. Voor composterende en niet composterende pakketten worden de resultaten per land in afzonderlijke grafieken weergegeven. Per grafiek is eerst een jaar met de laagste luchtsnelheid doorgerekend, vervolgens een jaar met een factor 4 hogere luchtsnelheid enz.

Jaar	1	2	3	4
Luchtsnelheid, m/s	0,08	0,32	1,28	5,12
Maand	1,3,5,7,9,11	1,3,5,7,9,11	1,3,5,7,9,11	1,3,5,7,9,11

Per oneven maand van het jaar werd gerekend met de temperatuur en relatieve vochtigheid per land zoals beschreven in paragraaf 3.1.

Effecten luchtsnelheid

Uit de modelberekeningen blijkt dat hoge luchtsnelheden gepaard gaan met een toename van de verdamping. Tegelijkertijd neemt dan het warmteverlies door convectie sterk toe alsook de warmte onttrekking door verdamping. Hierdoor kan de temperatuur van het (compost)bed sterk dalen. Een lagere oppervlaktetemperatuur werkt weer remmend op de verdamping. Tevens kan dit de compostering remmen of bij lage winterse temperaturen zelfs lam leggen.

Effect compostering

Door compostering neemt de verdamping vanuit de toplaag sterk toe. De gelijktijdige afbraak van droge stof in de kern van het pakket gaat echter gepaard met het vrijkomen van een aanzienlijke hoeveelheid water in de kern van het pakket. Om dit gevormde water af te voeren is een goede drainage naar beneden noodzakelijk aangezien in de meeste gevallen het transport van dit gevormde water naar de toplaag waarschijnlijk te traag verloopt of de verdamping daar te beperkt is om het voldoende snel te kunnen verdampen.

NL versus Israël versus Minnesota

Uit de berekeningen blijkt dat in Nederland zonder compostering alleen bij zeer hoge luchtsnelheden in de stal (orde van grootte 5 m/s) alle urine en fecesvocht door verdamping kan worden afgevoerd. Deze zeer hoge luchtsnelheden kunnen alleen met zeer krachtige ventilatoren behaald worden en kunnen tegelijkertijd tot tochtproblemen leiden. Door een anorganisch (niet compostierend) bodempakket te ontwikkelen met een goede of een snelle drainage van een groot deel van de dagelijks uitgescheiden hoeveelheid urine en feceswater, kan de beperkte verdamping onder Nederlandse klimaatomstandigheden wellicht het hoofd geboden worden. Volgens de resultaten van de berekeningen kan bij compostering (organisch pakket) onder Nederlandse klimaatomstandigheden een deel van het jaar (zomerse temperaturen) wel de dagelijkse vochttoevoer volledig verdampt worden. Kunstmatige verhoging van de luchtsnelheid kan in de winter tot problemen leiden omdat de warmteverliezen dan zo kunnen toenemen dat het composteringsproces erdoor verhinderd wordt.

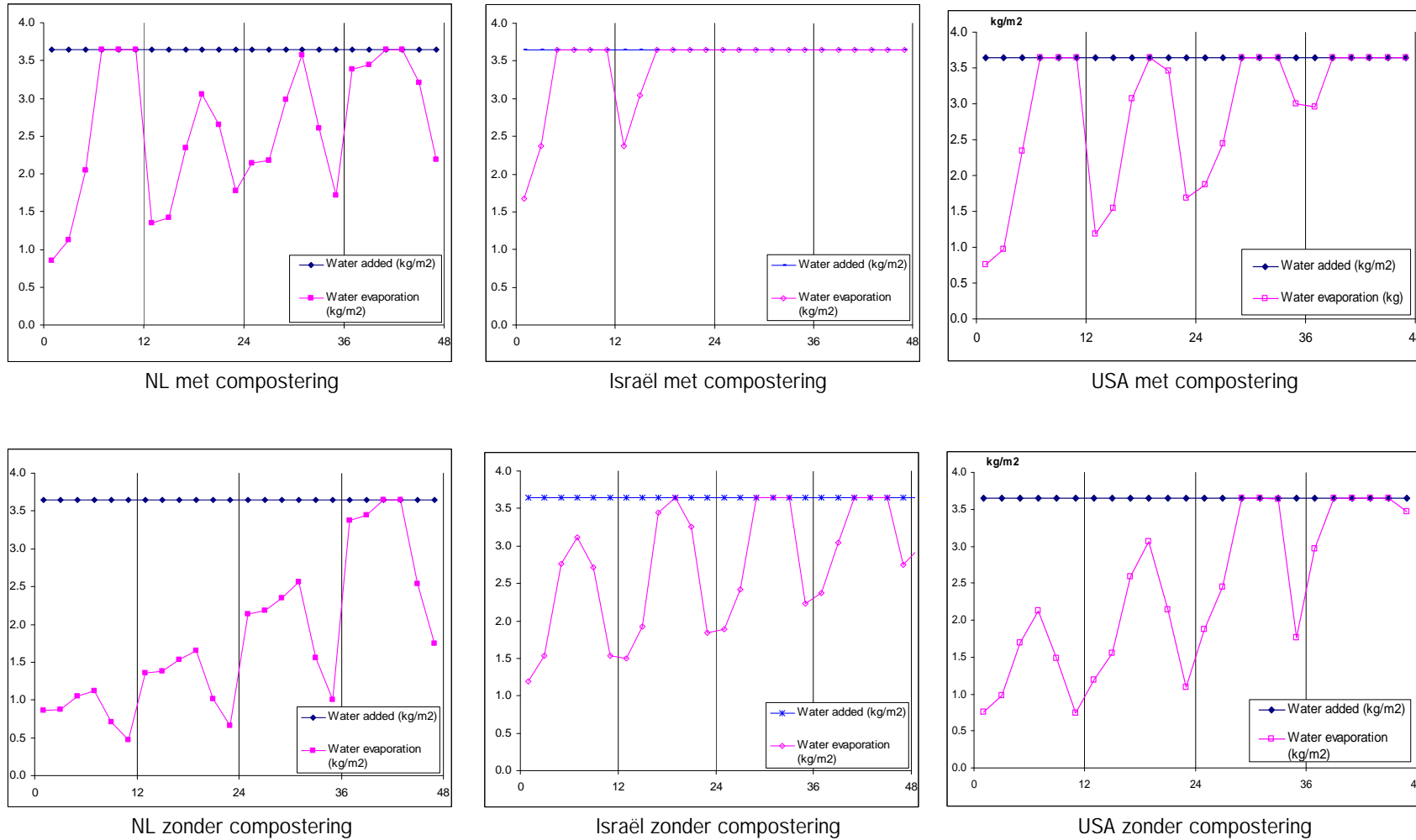
In Israël is met compostering in de meeste doorgerekende situaties voldoende verdamping mogelijk en zonder compostering wordt ook veel meer vocht verdampt dan in Nederland. Bij lage luchtsnelheden zou de verdamping volgens de modelberekeningen in Israël nog wel onvoldoende kunnen zijn.

In Minnesota is volgens de modelberekeningen in de warme zomermaanden bij compostering voldoende verdamping mogelijk en in de koude wintermaanden slechts een beperkte hoeveelheid verdamping. Compostering lijkt hier in de zeer koude wintermaanden moeilijk. Zonder compostering is in de zomermaanden de berekende verdamping in Minnesota wat hoger dan in Nederland en in de winter op een vergelijkbaar laag niveau.

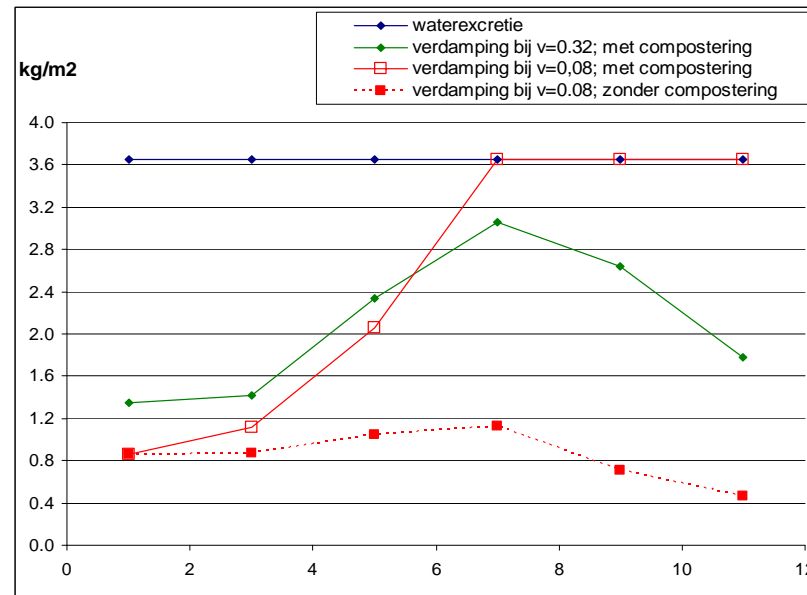
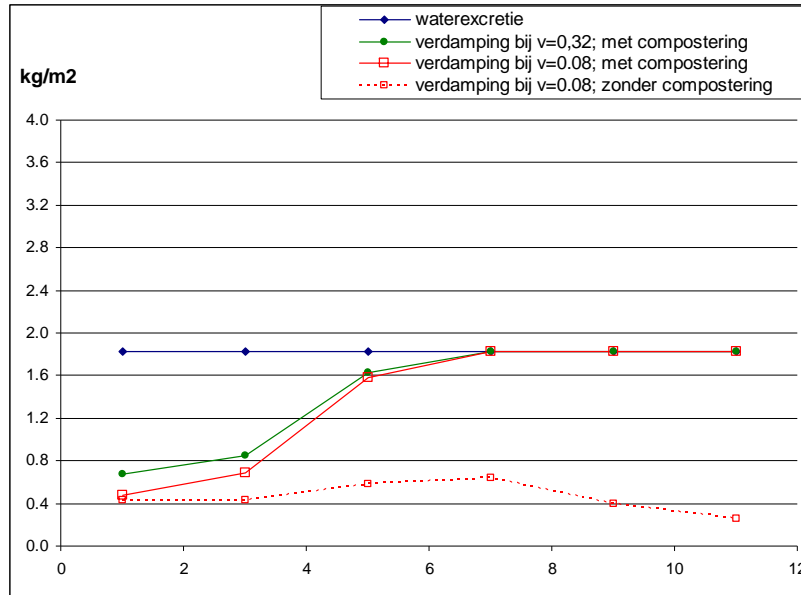
9 versus 18 m² per koe

Vergroting van de oppervlakte per dier geeft gemiddeld over de totale beschikbare oppervlakte wel een lagere hoeveelheid urine en feceswater per m² en dus ook gemiddeld een geringere verdampingsbehoefte per m². Het gaat er echter ook om dat op de plaatsen waar een verse plas geloosd wordt (waarmee ongeacht de totaal beschikbare oppervlakte per keer steeds ca. 0,7 m² zal 'vernatten') voldoende snel verdamping optreedt, zodat de dieren niet bevuild raken en de melkhygiëne in orde blijft. Waarschijnlijk mijden de dieren bij het gaan liggen de natte plekken in het ligbed slechts in beperkte mate. Een goede drainage blijft dus ook bij een grotere oppervlakte per dier cruciaal. Bij een oppervlakte van 18 m² per koe is de compostering minder gevoelig voor een hogere luchtsnelheid: uit figuur 5 blijkt dat de verdamping bij een hogere luchtsnelheid van 0,32 m/s dan niet afneemt terwijl dit bij een oppervlakte van 9 m² per koe wel afneemt.

Figuur 4 Berekende verdamping (per dag, kg/m²) met in opeenvolgende jaarcyclusen een luchtsnelheid van respectievelijk 0,08 m/s (0-12 mnd); 0,32 m/s (12-24 mnd); 1,28 m/s (24-36 mnd) en 5,12 m/s (36-48 mnd). Per land is per jaarcyclus voor de oneven maanden de maandgemiddelde temperatuur en relatieve vochtigheid in de berekeningen verwerkt.



Figuur 5 *Links:* Waterexcretie en berekende verdamping (kg/m²) bij een vrijloopbodemp oppervlakte van **18 m²/koe** met en zonder compostering
Rechts: Idem bij een vrijloopbodemp oppervlakte van **9 m²/koe** met en zonder compostering



4 Discussie

Beperkingen modelbenadering

De modelresultaten worden hier ter onderlinge vergelijking gepresenteerd. Aangezien het geïntegreerde model nog niet gevalideerd is met metingen aan stalbodems is voorzichtigheid geboden. In het model zijn begrenzings opgelegd aan de maximale verdamping. Maximaal kan de dagelijks aangevoerde hoeveelheid verdampen. In werkelijkheid kan meer water verdampen als van voorgaande dagen nog water resteert. Deze begrenzing is om pragmatische redenen ingebouwd. In de figuren in paragraaf 3.2.4 kan de blauwe lijn dus overstegen worden. Voor diverse parameters zijn waarden aangenomen om de eigenschappen van een bodem in een vrijloopstal te benaderen. De meest cruciale modelparameters die nog gevalideerd dienen te worden zijn: de composteringssnelheid, de porositeit (in relatie tot verdamping) en de hoeveelheid vocht die in de toplaag blijft 'hangen' (fractie die niet infiltreert naar diepere lagen van het pakket).

Vergelijking met eerdere studies

De in deze studie berekende verdamping onder Nederlandse klimaatsomstandigheden in bodempakketten met compostering waren qua orde van grootte vergelijkbaar, maar wel iets lager dan de waarden die Jeppson et al. (2000) in een strobed onder Zweedse klimaatsomstandigheden heeft gemeten. Mogelijk was de warmteontwikkeling in het stropakket hoger dan in het gemodelleerde bodempakket. De waarden die eerder met het Stalklimaatmodel werden berekend voor verdamping van een natte betonnen stalvloer en de waarden die Oekland en Lilleng (1983) in laboratoriumproeven hebben gemeten waren qua orde van grootte vergelijkbaar met die van het hier gemodelleerde stalbodempakket zonder compostering.

Droge toplaag verkrijgen

Dagelijks wordt op het bodempakket een hoeveelheid water aangevoerd met de urine en feces die in het vrijloopgedeelte uitgescheiden worden. Aangenomen kan worden dat deze hoeveelheid water vanuit de toplaag volledig kan verdampen en dat dan de maximale verdamping bereikt is. In werkelijkheid kan een deel van de uitgescheiden urine en het feceswater snel door de toplaag in het bodempakket infiltreren zodanig dat dit niet meer voor verdamping beschikbaar is, maar dan ook niet meer bijdraagt aan de vernatting van de toplaag. Met andere woorden: daar waar uit de modelberekeningen blijkt dat slechts een fractie van de dagelijkse wateraanvoer per m² bodempakket kan verdampen vanuit de toplaag, zal het restant van die wateraanvoer ofwel door de toplaag heen moeten zakken, ofwel zal voor dit restant een hoeveelheid droog bodemmateriaal moeten worden toegevoegd om een voldoende droge toplaag te behouden. Dit droge materiaal kan aangekocht worden (zaagsel, stro, e.d.) maar het is ook mogelijk dat buiten de stal een buffer wordt aangelegd van eerder in de stal gedroogd materiaal (zomermaanden) of dat materiaal uit de stal verder gedroogd wordt buiten de stal onder meer gecontroleerde omstandigheden. Bijvoorbeeld onder een tunnelkas van folie met extra luchtbeweging en eventueel reiniging van de gevormde gassen.

Gasvormige emissies

In dit rapport is uitsluitend aandacht besteed aan verdamping van vocht. Andere, niet gewenste gasvormige emissies kunnen in stalbodems toenemen en vragen dan ook bijzondere aandacht in het vervolgonderzoek. Door hoge luchtsnelheden en/of door hoge temperaturen in het bodempakket en aan de toplaag kan de ammoniakemissie sterk toenemen. Tenzij veel urine niet in de toplaag blijft hangen en in het pakket gebonden wordt. Ook bestaat een risico dat er veel broeikasgassen gevormd worden; de ontwikkeling van methaan en lachgas kan in de tijd variëren afhankelijk van veranderingen in de samenstelling en eventuele laagvorming in het pakket. Door droging van mestdeeltjes en eventueel ander strooiselmateriaal en door hoge luchtsnelheden zou de fijnstofemissie vanaf de bodem van een vrijloopstal (analoog aan strooiselsystemen in pluimveestallen) toe kunnen nemen.

Belang van jaarrond semipraktijkonderzoek

Gedurende het jaar veranderen niet alleen klimaatsomstandigheden. Het bodempakket wordt ook beïnvloed door dierbewegingen en eventuele bewerkingen. Het bodempakket kan na verloop van tijd geheel of gedeeltelijk dichtslibben. Behalve problemen door ophoping van water (urine en feces) kan dit gepaard gaan met hogere gasvormige emissies, maar ook bevulling van dieren, melkhygiëne, e.d. zijn dan in de risicozone. Het is dus belangrijk om in de hierna geplande semipraktijkproef een jaarrond beeld te verkrijgen van hoe de vrijloopstalbodempakket functioneert.

5 Conclusies

- Het Nederlandse klimaat is voor droging van urine en feces in vrijloopstalbodems minder gunstig dan het Israëlische. Uit de modelberekeningen blijkt dat de verdamping bij een normaal verloop van luchttemperatuur, RV en luchtsnelheid onvoldoende is om een neutrale vochtbalans in de vrijloopstalbodem te krijgen.
- Ondersteuning van de verdamping met warmte uit omzettingsprocessen in de ligbodem (compostering) biedt onder Nederlandse omstandigheden meer perspectief. Om een goede conditie van het ligbed te waarborgen zijn wellicht aanvullende maatregelen noodzakelijk, zoals een groter bedoppervlak per dier en het bijstrooien van droog materiaal.
- De mate van compostering is sterk afhankelijk van de warmteproductie als gevolg van omzetting van organische stof en de warmteafvoer. De warmteafvoer wordt in belangrijke mate bepaald door de luchtsnelheid over het bodemoppervlak. Bij een (te) hoge luchtsnelheid zal teveel warmte worden afgevoerd, waardoor het composteringsproces wordt geremd.
- De lagere verdamping bij niet-composterende bodems kan (gedeeltelijk) gecompenseerd worden door de luchtsnelheid over het bodemoppervlak te verhogen
- Om de toplaag droog te houden kan, naast compostering en verdamping, ook gezocht worden naar een pakket waarin een groot deel van het vocht snel infiltreert en eventueel via drains wordt afgevoerd, zodat per saldo minder vocht verdampt hoeft te worden.

Literatuur

- Cekmecelioglu, D., H. Heinemann, A. Demirci, R. E. Graves (2005). Modeling of compost temperature and inactivation of Salmonella and E. Coli during windrow food waste composting. Transactions of the ASAE. Vol. 48(2): 849-858
- Galama, 2009. Rapport over vrijloopstallen in voorbereiding
- Gigler, J. K., W. K. P. van Loon, Seres, I., Meerdink, G., Coumans, W.J. (2000). Drying Characteristics of Willow Chips and Stems. Journal of Agricultural Engineering Research 77 (4): 391-400.
- Gigler, J. K., W. K. P. van Loon, van den Berg, J.V., Sonneveld, C., Meerdink, G. (2000). Natural wind drying of willow stems. Biomass and Bioenergy 19 (3): 153-163.
- Jeppsson, K. H. (1999). Volatilization of Ammonia in Deep-litter Systems with Different Bedding Materials for Young Cattle. Journal of Agricultural Engineering Research 73 (1): 49-57.
- Jeppsson, K. H. (2000). Carbon Dioxide Emission and Water Evaporation from Deep Litter Systems. Journal of Agricultural Engineering Research 77 (4): 429-440.
- Oekland, H. L., H. Lilleng (1983). An investigation of vapor production from wet surfaces in animal rooms. IBT-rapport (nr. 191), 34 pp.
- Beek, W.J., K.M.K. Muttzall, J. W. Heuven (1999). Transport phenomena. Chichester, [Eng.] : Wiley, 329 pp.
- Van Ginkel, J. T., P.A.C. Raats and J.A. van Haneghem (1999). Bulk density and porosity distributions in a compost pile. Netherlands Journal of Agricultural Science 47: 105-121.