

Wageningen UR Livestock Research

Partner in livestock innovations



Rapport 608

**Bodemmaterialen voor vrijloopstallen;
eigenschappen in relatie tot compostering en
gasvormige emissies bij menging met mest en
urine**

Augustus 2012



LIVESTOCK RESEARCH
WAGENINGEN UR

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie in het kader van het beleidsondersteunend onderzoek. Dit onderzoek is mede gefinancierd door Productschap Zuivel.

Colofon

Uitgever

Wageningen UR Livestock Research
Postbus 65, 8200 AB Lelystad
Telefoon 0320 - 238238
Fax 0320 - 238050
E-mail info.livestockresearch@wur.nl
Internet <http://www.livestockresearch.wur.nl>

Redactie

Communication Services

Copyright

© Wageningen UR Livestock Research, onderdeel van Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek, 2011

Overname van de inhoud is toegestaan, mits met duidelijke bronvermelding.

Aansprakelijkheid

Wageningen UR Livestock Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Wageningen UR Livestock Research en Central Veterinary Institute, beiden onderdeel van Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek vormen samen met het Departement Dierwetenschappen van Wageningen University de Animal Sciences Group van Wageningen UR (University & Research centre).

Losse nummers zijn te verkrijgen via de website.



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

Abstract

Chemical characteristics of bedding materials, their composting potential and the related gaseous emissions when mixed with cattle feces and urine were compared.

Keywords

Bedding material, composting, respiration rate, ammonia emission

Referaat

ISSN 1570 - 8616

Auteur(s)

MCJ Smits, K Blanken, S Bokma, P Galama, HJ van Dooren & GL Szanto

Titel

Bodemmaterialen voor vrijloopstallen; eigenschappen in relatie tot compostering en gasvormige emissies bij menging met mest en urine.

Samenvatting

Tussen bodemmaterialen bestaan aanzienlijke verschillen in organische stofgehalten, koolstof- en stikstofgehalten, respiratiesnelheden, temperatuurontwikkelingen en emissies bij compostering met feces en urine van melkkoeien.

Trefwoorden

Vrijloopstalbodem, materialen, compostering, respiratiesnelheid, ammoniakemissie



Rapport 608

Bodemmaterialen voor vrijloopstallen;
eigenschappen in relatie tot compostering en
gasvormige emissies bij menging met
mest en urine

Exploratory study of bedding materials for
freestall animal housing; their composting
potential and gaseous emissions after mixing
with dairy cattle excreta

M.C.J. Smits, K. Blanken, S. Bokma,
P. Galama, H.J. van Dooren en G.L. Szanto

Augustus 2012

Voorwoord

Dit onderzoek is uitgevoerd met financiële bijdragen van het Productschap Zuivel en het Ministerie van Economische zaken, Landbouw en Innovatie.

De vrijloopstal is een stal zonder ligboxen voor melkkoeien, met veel ruimte voor natuurlijk gedrag en zachte bodems, met veel grip voor betere locomotie en klauwgezondheid en met andere, wellicht betere mest. Vanaf 2007 wordt onderzoek gedaan naar de mogelijkheden van dit staltype in Nederland. Laboratoriumexperimenten, haalbaarheidsstudies, pilots op enkele proefbedrijven en eerste ervaringen in de praktijk duiden erop dat onder Nederlandse omstandigheden een composterende vrijloopstalbodem meer voor de hand ligt dan een niet composterende bodem. Eerste ervaringen met compostering in een vrijloopstal van Wageningen UR Livestock Research leerden dat het composteringsproces en de gasvormige emissies moeilijk te beheersen zijn. Voorafgaand aan het onderzoek dat in dit rapport beschreven wordt, is tijdens een workshop van gedachten gewisseld over het beter beheersen van het composteringsproces in vrijloopstallen, het beperken van de emissies van ammoniak en broeikasgassen en de geschiktheid van materialen. Om meer kennis te krijgen over de praktische mogelijkheden is besloten om een screening te doen van diverse materialen en een selectie daarvan in een kleinschalige proefopstelling te vergelijken ten aanzien van composteringsemissies.

De composteringproef is uitgevoerd op het proefbedrijf Zegveld. Tijdens de proef hebben Huib van Wijngaarden (stagiair) en Karel van Houwelingen en Frank Lenssinck (management proefbedrijf Zegveld) assistentie verleend. Speciale dank aan hen voor het trotseren van de kou van de onverwacht ingevallen winter!

Wij hopen dat dit rapport zal bijdragen aan meer inzicht in de mogelijkheden van composterende bodems in vrijloopstallen.

Namens de auteurs

Michel Smits

Samenvatting

Om meer kennis te krijgen over het composteringsproces in vrijloopstalbodems en hoe dit verbeterd en gemanaged kan worden, zijn twee deelonderzoeken uitgevoerd. Om aanwijzingen te krijgen over geschiktheid van materialen voor toepassing in een composterende vrijloopstalbodem zijn in het eerste deelonderzoek eigenschappen van diverse bodemmateriaal bepaald. Daarna zijn in het tweede deelonderzoek 10 composterende bodemvarianten samengesteld en getest in een kleinschalige proefopstelling.

In deelonderzoek 1 is eerst een brede inventarisatie uitgevoerd van mogelijk interessante bodemmateriaal en zijn diverse bodemmateriaal op basis van laboratoriumanalyses nader gekarakteriseerd. Per materiaal is één monster van één batch onderzocht. Naast potentieel goed composteerbare materialen zijn ook potentieel stabiele materialen gekarakteriseerd die als "structuurhoudende basis" in een vrijloopstalbodem zouden kunnen fungeren. Drogestof- en organische stofgehalten, koolstof- en stikstofgehalten en afbraaksnelheden van organische stof (respiratiesnelheden in een Oxitop-test) zijn vastgesteld van diverse composten, paardenmest en vyzelpersmest (geperst uit verse runderdrijfmest), turf, houtafvalproducten (zoals loofhout- en dennenchips, dennenpins, zaagsel en snoeiafval) en voerresten.

In deelonderzoek 2 zijn 8 verschillende compostpakketten samengesteld (rundermest en urine gemengd met de volgende uitgangsmaterialen):

- een pakket met onbehandelde tunnelcompost;
- een belucht en een niet belucht pakket met loofhoutchips;
- een niet belucht pakket met naaldhoutchipsbodem zonder toevoegingen;
- een niet belucht pakket met naaldhoutchipsbodem en turf;
- een niet belucht pakket met naaldhoutchipsbodem en champost;
- een niet belucht pakket met naaldhoutchipsbodem en voerresten;
- een niet belucht pakket met naaldhoutchipsbodem en natuurhooi;

Daarnaast zijn twee pakketten van bemonsterde vrijloopstalbodems in deelonderzoek 2 onderzocht:

- een beluchte, composterende vrijloopstalbodem (melkveehouderij Wiersma);
- een niet beluchte en niet composterende vrijloopstalbodem (melkveehouderij Havermans),

De 10 varianten zijn in een kleinschalige proefopstelling (per variant een kist van ca. 1 m³) vergeleken ten aanzien van chemische samenstelling, composteringskarakteristieken en emissies. Daarbij zijn de temperatuurontwikkeling in het compostpakket, het zuurstofgehalte in het pakket en de ammoniakemissies gemeten.

In de vrijloopstal, vangt de bodem de feces en urine van de koeien op en het bodem-mest mengsel wordt in de stal gecomposteerd. De warmte die vrijkomt tijdens het proces moet de verdamping van vocht uit de toplaag vergroten zodat de bodem voldoende droog blijft voor de dieren. Tegelijkertijd wordt van het composteringsproces ook verwacht dat het lage gasvormige emissies heeft. Vooral het behouden van stikstof in het composterende pakket en het verminderen van ammoniakemissie is belangrijk bij het evalueren van de bodemcompostering.

Uit de resultaten van het eerste deelonderzoek blijkt dat de geteste houtafvalsoorten de meest poreuze en structuurbehoudende materialen zijn. De lage respiratiesnelheden van deze houtafvalsoorten zijn een goede indicatie voor een lange termijn bruikbaarheid in de stal. Rijpe composten hebben lage organische stof gehalten die deze materialen minder geschikt maken voor het meecomposteren. Vooral turf zal - naar verwachting - in de praktijk een sterk ammoniakemissie beperkend effect tonen omdat het pH verlagend werkt. De prijs van turf is het hoogst van alle onderzochte materialen. Daarom is dit materiaal minder geschikt als enkelvoudig bodemmateriaal maar wellicht als toevoegmiddel te gebruiken naast een goedkoper basismateriaal. Andere materialen zoals verse mestsoorten, papierafval en minder rijpe composten toonden vooral lage C/N verhoudingen. Dit maakt ze minder bruikbaar voor emissiebeperking. De porositeit van deze materialen was ook minder goed dan die van de verschillende houtafvalsoorten. In geval van voerresten en andere niet voorbehandelde materialen bestaat de kans dat deze een significant snellere in-situ compostering teweegbrengen, wat ongunstig is voor zowel het inklinkingsproces in het compostbodempakket als voor de emissiefluxen.

Voor een optimaal composterende vrijloopstalbodem moet gestreefd worden naar inhibitie-vrije afbraak met een zo laag mogelijke afbraaksnelheid. Met een droog en poreus materiaal kan dit gedurende een lange tijd zonder veel ammoniakemissie. Een traag maar optimaal proces maakt het

mogelijk dat de geproduceerde ammoniak ingebouwd kan worden door de micro-organismen. Hierbij wordt een lagere ammoniakemissie bereikt dan bij een sneller, niet optimaal proces.

De tweede proef werd uitgevoerd in een schuur met een open front. Lage omgevingstemperaturen en een steeds sterker wordende wind bemoeilijkten het 2^e deelonderzoek. Omdat het proef op kleine schaal werd uitgevoerd, had de lage omgevingstemperatuur waarschijnlijk een grotere invloed op het verloop van de procestemperatuur dan in een vrijloopstal. Tijdens actief beluchten nam de ammoniakemissie in de reactor toe. Waarschijnlijk werd de ammoniak uit het pakket geblazen met de doorstromende lucht. Beluchten moet daarom uit oogpunt van emissies beperkt worden toegepast; slechts als het compostingsproces geremd wordt door onvoldoende zuurstof in het pakket. Periodiek beluchting - korte periode(s) per dag - kunnen wellicht zowel de afbraak als de emissies positief beïnvloeden. Door de hoeveelheid lucht (m³/h) en de lichtsnelheid (m/s) daarbij te beperken kan getracht worden om de ammoniakemissie te minimaliseren. Compostering met passieve beluchting heeft een andere dynamiek. Het vereisten voldoende poreuze bodemstructuur. Een managementmaatregel voor het optimaal houden van de bodem is het omzetten en mengen van de bovenlaag. In de praktijk betekent dit de bovenste 30 cm van de stalbodem. Aanbevolen wordt om te onderzoeken of het zowel technisch als economisch mogelijk is om de diepte van deze bewerkingen te vergroten, zodat ook in de onderlaag van het pakket voldoende aanvoer van zuurstof en afvoer van vocht door passieve beluchting kan plaatsvinden.

Bij de compostvariant met loofhoutchips was er minder warmteontwikkeling dan bij die met naaldhoutchips. Toevoeging van turf aan een mengsel van naaldhoutchips, mest en urine, resulteerde in vergelijking met andere toegevoegde materialen in lagere pH waarden in het compostpakket en een sterkere warmteontwikkeling. Omdat naaldhoutchips en turf ook in een consistent lage emissie van ammoniak resulteerde, wordt verder onderzoek aanbevolen van dit mengsel en van het effect van toevoeging van turf. Bij toevoeging van voerresten werd een significante lachgasemissieflux gemeten. De meetbaarheid van lachgas tijdens dit onderzoek was beperkt. Voor toekomstige metingen is een verfijning van de meetmethode noodzakelijk. De gemeten waarden voorspellen een significante uitstoot van dit broeikasgas op de lange termijn. Omdat het een zeer potent broeikasgas is, wordt het bepalen van lachgasemissies aanbevolen voor alle stalsoorten met mestopslag.

De compostering in vrijloopstalbodems is een zeer dynamisch proces doordat continu vers materiaal wordt toegevoegd en omzettingen in het verse en oudere materiaal met verschillende afbraaksnelheden plaatsvinden. Dit terwijl belangrijke parameters zoals structuur (porositeit), vochtgehalte en temperatuur in het pakket en klimaatcondities in natuurlijk geventileerde stallen ook sterk variëren. De beheersbaarheid van het compostingsproces in een vrijloopstalbodem is geringer dan bij batchgewijze compostering op compostingsbedrijven. Monitoring van de temperatuur en het zuurstofgehalte in het pakket kunnen een 'vinger aan de pols' indicatie geven van het compostingsproces. Gasvormige verliezen die optreden, zullen nader gekwantificeerd moeten worden en gezocht moet worden naar eenvoudige voorspellende parameters (procesparameters en gehalten in de vrijloopstalbodempakketten) en gewenste ranges of complexere modelmatige benaderingen waarmee een vinger aan de pols gehouden kan worden om ongewenste gasvormige verliezen (ammoniak, lachgas etc.) te minimaliseren;

In deze korte proef werd slechts gedurende 8 dagen gemeten. Door verse en gecomposteerde vijzelpersmest toe te voegen werd wel getracht om een situatie te verkrijgen die enigszins vergelijkbaar is met die in een vrijloopstal na ca. 1 maand. Om langere termijn variaties in beeld te krijgen zijn langdurigere proeven gewenst. Bij batchgewijze compostering vinden de grootste ammoniakfluxen plaats in de eerste fase (ca. 1 week) van het compostingsproces. Doordat in vrijloopstallen continu verse urine en feces uitgescheiden worden in het bodempakket zullen de ammoniakemissies niet afnemen zoals bij batchgewijze compostering. Blijvende aandacht voor minimalisatie van gasvormige N-verliezen is daarom noodzakelijk.

Summary

An exploratory study of bedding materials was made (Study part I) and subsequently an experiment with composting in small units with several bedding materials mixed with cattle excreta was made (Study part II). The main aim of this work was to gain more insight in the suitability of materials to be applied in composting bedding areas of freestall houses.

In part I chemical characteristics of different bedding materials and their composting potential were determined. One sample of one batch of each material was collected. Besides easily composting materials also stable materials that may serve as rigid porosity serving structures in the composting freestall bedding were compared. Dry matter and organic matter content, C and N content and degradation rate (respiration rate in an Oxitop test) were measured in several materials: composts, horse manure, screw pressed cattle manure, feed refusals, peat and wood residual products like broad leaved chips, pine wood chips, pine wood pins, pine wood saw dust and loppings.

In part II mixtures were made of bedding materials combined with both old and fresh cattle feces and urine. The mixtures were put in 10 small units (wood board boxes of approx. 1.0 m x 1.0 m x 0.7 m each). Composting process parameters were monitored and gaseous emissions were compared of the 10 mixtures. Temperatures and oxygen contents at several depths within each composting unit were monitored daily during 8 days and ammonia and N₂O emissions were measured on day 4, 7 and 8.

Forced aeration showed higher ammonia emissions in comparison to passive aeration. As it was not clearly reinforced with degradation patterns, it was possibly the result of the flushing effect of the airflow. Aerating should therefore be limited to use if there is a risk that otherwise the composting process would be extensively anaerobic. Short, periodic aeration(s) could probably be a more optimal alternative considering both the degradation rate and the extent of emissions. Passive aeration demonstrates a different dynamics as its efficiency depends on the extent of bed porosity. The control mechanism of passive aeration is the turning and mixing of the compost bed. In practice, this means the top 30 cm of the bedding. In the future, the possibility of turning a larger extent of the bed should be examined. As peat addition also was shown to be important in reducing emission of ammonia, this amendment is also recommended for future research.

The variants with hardwood chips exhibited less heat development than the pine-chips variants. In comparison with other extra materials, addition of peat to a mixture of pine-chips resulted in lower pH values in the compost package and a stronger heat development. Because pine-chips and peat also enabled a consistently low emission of ammonia, this mixture is recommended for further research. When adding feed refusals to pine-chips, a significant nitrous oxide emission flux was measured. The limited measurability of nitrous oxide requires a refinement of the measurement method. It is important to include nitrous oxide measurements in future experiments, because the even seemingly low concentrations may yield significant greenhouse gas emissions and an ultimate N loss over the long term. Because nitrous oxide is a very potent greenhouse gas, determining emissions is recommended for all types of housings with manure storage.

The composting process in freestall beddings is a highly dynamic process because fresh excreta are permanently added and conversion rates within the fresh and older fractions are likely to be different. At the same time parameters such as structure or porosity, water content and temperature in the compost and the climate in the naturally ventilated cattle housings are changing continuously.

The composting process in a freestall bedding is less under control than in a batch composting process of a composting plant. Monitoring of temperature and oxygen content in the compost may serve as simple indicators of the composting process. Gaseous emissions need to be further quantified and their predictability and controllability should be improved.

This composting experiment lasted 8 days only. By adding fresh and composted screw pressed manure it was tried to obtain a starting situation that is more or less similar to a freestall bedding after one month. Longer lasting experiments are required to quantify longer term variations. In batch composting processes the largest ammonia fluxes are found in the initial stage (first week) of the composting process. In free stall composting beddings there is a permanent inflow of fresh excreta and therefore ammonia fluxes will not slow down alike. Environmental impact and fertilizer value of the compost after its application on agricultural are major important issues. Minimising gaseous N losses from composting freestall beddings should therefore be incorporated in farm management.

Inhoudsopgave

Voorwoord

Samenvatting

Summary

1	Inleiding	1
1.1	Composteren in vrijloopstallen	1
1.2	Uitdagingen in het beheer van vrijloopstalbodems	1
1.3	Aanpak	2
2	Meetmethodes en materiaaleigenschappen	3
2.1	Selectie materialen	3
2.2	Methodologie	3
2.2.1	Uitgevoerde analyses	3
2.2.2	Oxitop methodiek voor het bepalen van zuurstofopnamesnelheid vanuit compostmonsters	5
2.2.3	Bepaling van structurele eigenschappen	5
2.2.4	Meetmethoden voor emissies van de composteringsexperimenten (fase 2)	6
3	Resultaten en discussie	8
3.1	Bodemmateriaal-analyse (fase 1)	8
3.1.1	Samenstelling bodemmaterialen	8
3.1.2	Respiratiesnelheden	9
3.1.3	Structurele eigenschappen	10
3.1.4	Beschikbaarheid en prijs	11
3.2	Resultaten en discussie van de composteringsprocessen in fase 2	13
3.2.1	Proefopzet	13
3.2.2	Bijzondere meteorologische omstandigheden tijdens proef	14
3.2.3	Verloop van zuurstofgehalte in de pakketten	18
3.2.4	Samenstelling van compostbed in de loop van het composteringsproces	20
3.2.5	Respiratiesnelheden op basis van Oxitop bepalingen	24
3.2.6	Gasvormige stikstofemissies	24
4	Algemene discussie	26
4.1	Eigenschappen potentiële bodemmaterialen en bodemmengsels	26
4.2	Evaluatie van de composteringsprocessen	26
4.2.1	Verloop van composteringsproces	26
4.2.2	Effect van beluchten	27
4.2.3	Ammoniakemissies	27
5	Conclusies & aanbevelingen	32
6	Referentielijst	34
	Bijlagen	36

1 Inleiding

1.1 Composteren in vrijloopstallen

Vrijloopstallen zijn oorspronkelijk ontwikkeld met een focus op het verbeteren van dierenwelzijn (Galama, 2011). In het vrijloopstal-concept worden de dieren gehouden op natuurlijke bodemmateriële. Dit veelal in een gedeeltelijk open stal ter bevordering van de natuurlijke ventilatie. Doordat de dagelijks geproduceerde mest en urine in het bodemmateriaal wordt opgevangen en daar gedurende een aantal maanden blijft, voltrekt zich een compostingsproces. Naast de kwaliteit van de mest en urine wordt dit proces beïnvloed door de kwaliteit van het bodemmateriaal en het beheer van de stalbodem. Voor het goed functioneren van een vrijloopstalbodem zijn het mengen, aanvullen en vervangen van de bodemmateriële de belangrijkste aangrijpingspunten in het beheer (Shane *et al.*, 2010). Uit onderzoek van Barberg *et al.* (2007) blijkt dat optimaal stalbeheer kan leiden tot het produceren van een compostmateriaal dat geschikt is voor toediening op agrarisch land. Mits adequaat uitgevoerd kan een eventueel post-compostingsproces van het verwijderde bodemmateriaal zelfs een commercieel interessant compostproduct opleveren (Shane *et al.*, 2007). Een dergelijk compostproduct bevat veel organisch gebonden stikstof en weinig ammoniumstikstof en zal daardoor bij mesttoediening slechts een geringe ammoniakemissie veroorzaken. Bovengrondse mesttoediening is in Nederland niet toegestaan. De mogelijkheden en beperkingen van toepassing van vrijloopstalbodempost binnen de Nederlandse wet- en regelgeving zijn cruciaal voor bredere toepassing van deze (compost-)mest. In dit rapport is de focus vooral gericht op de bodemmateriële en het compostingsproces. Emissies bij mesttoediening, bodemvruchtbaarheid en benutting van de nutriënten in de mest door gewassen zullen in vervolgonderzoek geadresseerd moeten worden. Het optimaliseren van het compostingsproces in de vrijloopstal levert meerdere voordelen op. De warmte die ontstaat als gevolg van de microbiële activiteit tijdens het proces, zorgt voor het thermisch verminderen van pathogenen en droogt het bodemmengsel. Een optimaal compostingsproces kan er ook voor zorgen dat er minder gasvormige emissies optreden en dat een groter deel van deze emissies een minder milieubelastende vorm hebben dan bij een niet optimaal compostingsproces (Szanto, 2000). Als resultaat hiervan kunnen meer nutriënten -in het bijzonder stikstof - (in geïmmobiliseerde vormen) in het eindproduct beschikbaar blijven.

1.2 Uitdagingen in het beheer van vrijloopstalbodems

In een vergelijkend onderzoek met bodems waarin vocht werd geabsorbeerd, gedraineerd of verdampt (met hulp van composting), bleek dat de laatste optie het meest optimaal was om een droge bovenlaag te produceren (Galama, 2011). Toch, zorgt de verdamping ook voor een uitdaging (van Dooren *et al.*, 2011). Met het verdampen van vocht uit de stalbodem, kan tegelijkertijd ook een aanzienlijke hoeveelheid ammoniak vrijkomen. De bodemkwaliteit en het beheer van het proces zullen erop moeten worden gericht dat de ammoniakemissie zo laag mogelijk is. Niet alleen uit milieuoogpunt, maar ook omdat een hogere immobilisatie van ammoniak-stikstof een kwalitatief beter compost-product betekent. In oriënterend laboratoriumonderzoek met bodems van rubbersnippers, zand, bagger en houtzaagsels bleken gesimuleerde urinelozingen op organische bodemmateriële tot lagere ammoniakemissies te leiden dan op anorganische bodemmateriële (Smits *et al.*, 2009). In een pilotstudie met lacterende melkvee werd echter in een vrijloopstal met houtsnippers en zaagsel een hogere ammoniakemissie per koe gemeten dan in een conventionele ligboxenstal (van Dooren *et al.*, 2011). Hoewel de emissie van de vrijloopstal per m² bodem lager was, viel de emissie per koe hoger uit omdat in een vrijloopstal 10-25 m² per dier bevuild wordt, terwijl in ligboxenstallen maar 6-8 m² per dier wordt bevuild.

Daarom zijn de belangrijkste R&D uitdagingen van de vrijloopstal het identificeren van bodemmateriële die een goede beschikbaarheid (en prijs) met emissiearme en goed compostende eigenschappen combineren. Houtzaagsel wordt gezien als een standaard bodemmateriaal dat wordt gebruikt in vrijloopstallen, maar het heeft een redelijk hoge prijs en is niet altijd beschikbaar (Shane *et al.*, 2010). Daarom worden ook alternatieven bestudeerd.

1.3 Aanpak

Op verzoek van de begeleidingscommissie Vrijloopstallen is een nadere verkenning uitgevoerd van geschikte bodemmaterialen, composteringskarakteristieken en mogelijkheden om het bodemmanagement te verbeteren van composterende vrijloopstalbodems.

Dit onderzoek is ook uitgevoerd om bij te dragen aan introductie van de vrijloopstal als officieel erkend staltype in Nederland. Vrijloopstallen moeten voldoen aan hoge eisen die aan de dierhouderij in Nederland gesteld worden. Hierbij gaat het niet alleen om efficiëntie en diervriendelijkheid, maar moet ook worden voldaan aan strenge milieueisen zoals ondermeer beschreven in de Regeling ammoniak en veehouderij (Rav).

Het onderzoek werd uitgevoerd in twee fases. In de eerste fase van het onderzoek werd de toepasbaarheid van alternatieve bodemmaterialen bestudeerd. De focus van deze fase lag op het verkennen van (I) bodemmateriaal-eigenschappen die een belangrijk rol spelen in het verloop van een composteringsproces en (II) bodemmaterialen die betaalbaar en beschikbaar zijn voor de veehouder. Er werd ook gekeken naar de geschiktheid van het bodemmateriaal voor gebruik in vrijloopstallen (voor zowel de dieren als het aerobe afbraakproces). Eigenschappen van ca. 20 potentiële bodemmaterialen worden gerapporteerd in hoofdstuk 2.

Het kerndoel van fase twee was het onderzoeken van de compostering en emissie van een aantal bodemvarianten. Naast de gasvormige emissie van stikstof in de vorm van ammoniak is getracht om ook de emissie van lachgas (een sterk broeikasgas) te meten.

De gebruikte materialen en methoden worden gerapporteerd in hoofdstuk 2. De resultaten en voorlopige discussies van de twee fases worden besproken in hoofdstuk 3. Een algemene discussie wordt weergegeven in hoofdstuk 4, de conclusies van het rapport en de aanbevelingen in hoofdstuk 5.

2 Meetmethodes en materiaaleigenschappen

2.1 Selectie materialen

De voordelen van vrijloopstallen werden kort beschreven in hoofdstuk 1. Voor een bredere toepassing van dit staltype moeten goed beschikbare en zo goedkoop mogelijke bodemmaterialen gevonden worden, die tegelijkertijd ook bijdragen aan een optimaal verloop van een in-situ composteringsproces met beperkte ammoniakemissies. Een goed beddingmateriaal is een droge substantie die niet alleen veel vocht kan absorberen van urine en mest, maar ook goede mechanische sterkte heeft voor het tegenwerken van het inklinkingsproces dat veroorzaakt wordt door lopende en liggende koeien. Het bieden van optimale structurele eigenschappen zorgt in een ideaal bodemmateriaal voor een adequate porositeit en daarmee voor de benodigde beluchting van het composteringsproces (Shane *et al.*, 2010; Szanto *et al.*, 2009; Veeken *et al.*, 2001).

In fase 1 werd een uitgebreide lijst van composteerbare materialen gemaakt. Tijdens een interdisciplinaire workshop over vrijloopstalcompostering werd de keuze aan materialen voorgelegd aan composteringdeskundigen, milieukundigen en dierhuisvestingsspecialisten. De selectie van de experts werd aangescherpt door het projectteam 'Vrijloopstallen' op basis van de geschatte beschikbaarheid en een inschatting van de prijs per m³. De selectie werd verbreed omdat ook werd meegewogen dat bodemmaterialen (compost, voer(rest), mest, turf, houtig materiaal en houtvrije papiersnippers) met zeer uiteenlopende eigenschappen moeten worden onderzocht, zodat er een beter beeld ontstaat over een grote diversiteit van materialen. De geselecteerde materialen en de herkomst van de onderzochte batches is weergegeven in Tabel 1. Bijlage 1 bevat foto's van monsters van een aantal van deze materialen.

2.2 Methodologie

2.2.1 Uitgevoerde analyses

In **fase 1** werden 20 geselecteerde materialen onderzocht op een aantal parameters die van belang zijn voor zowel de bodemeigenschappen in de vrijloopstallen als voor het composteringsproces. Hiertoe werden monsters van circa 10-25 liter aangevoerd. Hieruit werden twee sub-monsters van 1-2 liter gemaakt. In de laboratoria van BLGG (te Oosterbeek) en LEAF (te Wageningen) werden de volgende analyses verricht:

- Respiratiesnelheidsbepalingen (met hulp van de Oxitop-methode),
- DS en OS gehalte (voor het berekenen van per gr DS of per gr OS emissie-gehaltenes),
- C en N gehalte (daaruit volgt C:N verhouding),
- Bulkdichtheid en dichtheid (voor porositeit),

Voor **fase 2** van het composteringsonderzoek, zijn 10 bodemvarianten getest in houten kisten (reactoren) van ca. 1 m³ (ca. 1 m x 1 m x 1 m) met een open bovenkant. Het bemonsteringsschema van de acht dagen durende composteringsproef is te vinden in Tabel 2. De startdatum van het onderzoek was 22 november 2010. De proefopzet (met uitleg reactordesign) en de onderzochte substraatvarianten van de composteringsexperimenten worden in paragraaf 2.4 weergegeven.

Tabel 1 Geselecteerde materialen voor bepaling van chemische eigenschappen in fase 1

Materiaal	Herkomst monster
<i>Compostvarianten</i>	
Composterende bodem (bedding) uit vrijloopstal	melkveehouderij Wiersma
behandelde tunnelcompost (gehygieniseerd)	Attero Deurne
onbehandelde tunnelcompost (niet gehygieniseerd)	Attero Deurne
boxcompost met bacteriën	Orgaworld
boxcompost zonder bacteriën	Orgaworld
halcompost (recrocompost)	Attero
verhitte champost	Agrica bv
onverhitte champost	Agrica bv
<i>Voer/voerresten</i>	
voerrest grasrantsoen	melkveehouderij Waiboerhoeve
voerrest gras/maisrantsoen	melkveehouderij PRC Zegveld
Natuurhooi	natuurgras Drenthe
<i>Mestvarianten</i>	
verse vijzelpersmest	melkveehouderij Prinsen
verse paardenmest	Paardenstal Waiboerhoeve
<i>Turfvarianten</i>	
Turfstrooisel	Naturado
Tuinturf	Naturado
<i>Houtig material</i>	
Dennenchips	WR international
Dennenpins	WR international
klam dennenzaagsel	WR international
Naaldhout chips	Van Doorn, Soest
Loofhoutchips	Van Doorn, Soest
Beukenchips (droog, gezakt)	Goldspan
Loofsnoei (zonder blad)	Verburg strooisels, Stolwijk
Els/wilg loof snoei (met blad)	Verburg strooisels, Stolwijk
<i>Houtvrij material</i>	
papier snippers (houtvrij bedrijfsafval; versneden enveloppen)	Reukema papier, Harderwijk

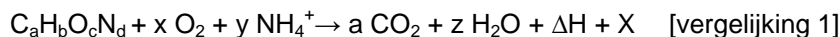
Tabel 2 Tijdbalk van werkzaamheden tijdens deelonderzoek 2

	Reactor vullen	Emissies meten	Reactor bemonsteren	Oxitop metingen	Temperatuur- en zuurstofmetingen	Toevoegen urine en drijfmest
Dag 0	X					
Dag 1			X	X	X	X
Dag 2					X	X
Dag 3					X	X
Dag 4		X	X	X	X	X
Dag 5					X	X
Dag 6					X	X
Dag 7		X	X		X	X
Dag 8		X	(x)		X	

2.2.2 Oxitop methodiek voor het bepalen van zuurstofopnamesnelheid vanuit compostmonsters

De respiratiesnelheid (zuurstofopnamesnelheid) is een maatstaf voor de aerobe afbreekbaarheid van organische stof.

De stabiliteit van een compost (of composteerbaar materiaal) kan gedefinieerd worden als de microbiële afbraaksnelheid van de aanwezige organische stof onder aerobe omstandigheden. Een hogere stabiliteit correspondeert met een lagere afbraaksnelheid. Veeken *et al.* (2003) beschrijft de aerobe afbraak als:



Waarbij

- $C_aH_bO_cN_d$ is een gekwantificeerde algemene samenstelling van organische stof,
- O_2 is het zuurstofverbruik (1,07 kg O_2 per kg afgebroken organische stof),
- ΔH is de warmteproductie (16 MJ/kg OS),
- CO_2 productie (1,47 kg CO_2 /kg OS),
- X is de geproduceerde microbiële stof (kg OS)
- H_2O is de waterproductie (0,6 kg H_2O per kg OS)

De afbraaksnelheid kan worden vastgesteld door één van de parameters zuurstofverbruik, warmteproductie of CO_2 productie te meten. Bij de Oxitop-methode gebeurt dit door het bepalen van de respiratiesnelheid van de compostmonsters met hulp van een Oxitop-meetsysteem. Hierbij wordt het afbreken van de organische monsters berekend op basis van het bepalen van het drukverschil dat ontstaat door het verbruik van zuurstof in de meetflessen (Veeken *et al.*, 2003). De bepaling werd in enkelvoud uitgevoerd. De hoeveelheid monster per bepaling was meestal 50-100 gram. Daarvan werd alleen afgeweken in geval van natuurhooi (16,3 gram) en papiersnippers (33,0 gram), vanwege hun lage dichtheid.

De droge stof en organische stofgehalten van de monsters zijn bepaald volgens de standaard methode: droging van de monsters bij 105°C en verassing bij 550°C.

De geproduceerde CO_2 werd tijdens het proces opgevangen met behulp van natronkalk pellets in de Oxitop-fles. De temperatuur in de flessen werd constant op 20°C gehouden en de testen eindigden zodra de zuurstofopnamesnelheid afnam tot -100 hPa óf na 48 uren.

Voor de berekening van de respiratiesnelheid werd de drukafname van de Oxitop omgerekend naar de zuurstofhoeveelheid. Vervolgens werd de maximale respiratiesnelheid berekend met vergelijking 2.

$$\text{Respiratiesnelheid} = \{ [O_2]_{t_1} - [O_2]_{t_2} \} / [DS] (t_2 - t_1) \quad [\text{vergelijking 2}]$$

Waarbij

- $[O_2]$ is de zuurstofconcentratie (mg O_2 /l) op tijdstip t_1 en t_2 (d)
- $[DS]$ is het droge stofgehalte in de reactor (g/g)

De respiratiesnelheid werd vastgesteld in de eerste tijdsperiode, het stabiliseren van de druk in de flessen, i.e. van 0,1-0,4 dagen. Bij de Oxitop-test met 'voerrest gras/maïsrantsoen' was er in tegenstelling tot bij de andere testen sprake van een toename in de tijd van de respiratiesnelheid.

Deze toename werd bevestigd tijdens een tweede meting van de zuurstofdrukafname met hetzelfde monster. Voor dit monster zijn daarom twee snelheden berekend, zowel de initiële snelheid (tijdsinterval 0,1-0,4 d) als de hogere snelheid gedurende het tijdsinterval 0,6-0,8 dag.

Na toezending aan laboratorium BLGG te Oosterbeek bleek dat slechts een beperkt aantal materialen (alleen monsters met label "compost") door dit laboratorium geanalyseerd konden worden. Daarom zijn de Oxitop-analyses in de overige monsters later in het duplo monster door het laboratorium van LeAF te Wageningen uitgevoerd. In een later stadium bleek dat ook het bepalen van C en N gehalten in enkele materialen niet door het BLGG kon worden gedaan. Daarom ontbreken in enkele gevallen C en N gehalten.

2.2.3 Bepaling van structurele eigenschappen

2.2.3.1 Dichtheid en bulkdichtheid

Structurele eigenschappen zijn van belang als een composteringsproces wordt uitgevoerd zonder geforceerde beluchting en/of als er een grote mate van inzakken van het materiaal te verwachten is. De dichtheid is het gewicht van het materiaal gedeeld door zijn vaste volume; terwijl de bulkdichtheid

wordt gedefinieerd als het partikelgewicht gedeeld door zijn volume. Bulkdichtheid is daarom geen intrinsieke parameter maar wordt medebepaald door de invloed van inklinking. Voor het bepalen van de dichtheid wordt gebruik gemaakt van een pyknometer. Dit apparaat heeft een bekend volume bij een gegeven temperatuur.

De gebruikte procedure voor het bepalen van stofdichtheid met hulp van een pyknometer was:

1. De pyknometer werd leeg gewogen (a).
2. Er werd wat water toegevoegd en gewogen (b).
3. Het materiaal/compost/mest werd toegevoegd en gewogen (c).
4. De pyknometer werd afgevuld met water en gewogen (d).
5. De watertemperatuur werd gemeten en het volume van de pyknometer vastgesteld (f).
6. Het mestvolume is gelijk aan de pyknometer inhoud minus het volume van water in de meter.

Om de bulkdichtheid te bepalen werd gebruik gemaakt van een pot met een grote opening. De bepaling vond plaats in drievoud. De gebruikte procedure voor het bepalen van bulkdichtheid was:

1. De inhoud van de pot (volume=A) is bekend (deze is eerder bepaald met water).
2. De pot werd leeg gewogen (gewicht=B).
3. De pot werd voor een-derde gevuld met materiaal/compost/mest.
4. Daarna liet de laborant deze drie keer stuiteren.
5. De pot werd voor twee-derde met materiaal/compost/mest gevuld.
6. Daarna liet de laborant deze drie keer stuiteren.

2.2.3.2 Porositeit

Porositeit is het volume van de luchtfractie in een monster. Deze luchtfractie van een materiaal kan afgeleid worden uit de dichtheid en de bulkdichtheid (Veeken en Szanto,2001). Voor compostering is van belang dat de gehele massa voldoende poreus is. Door aandrukken of door afbraak van organische stof kan een deel van het pakket dichtslaan. De luchtfractie in volumeprocenten zal dan afnemen. Bij een gegeven volumepercentage lucht kan de verdeling binnen een pakket variëren van zeer gelijkmatig en fijnmazig tot zeer ongelijkmatig. Door op verschillende dieptes in het pakket het zuurstofgehalte (% O₂) te meten, kan indirect een indruk verkregen worden van de porositeit per laag (diepte): bij een geringe porositeit zal het % O₂ sterk afnemen en zal daardoor het aerobe proces worden geremd.

2.2.4 Meetmethoden voor emissies van de composteringsexperimenten (fase 2)

De composteringperiode van de 10 bodemvarianten was acht dagen (zie proefopzet in sectie 4). Van de uitgangsmaterialen die in de kisten werden gebruikt, werden monsters genomen voor chemische analyses en Oxitop-metingen. De temperatuur in het pakket werd gemeten met een temperatuurlans (Foto 1) en het zuurstofgehalte met een bodemzuurstofmeetapparaat. Het bodemzuurstofmeetapparaat bestaat uit een gassonde, een luchtpompsysteem en een O₂-meetcel (Foto 2) en werkt volgens een elektrochemisch principe.



Foto 1 O₂-meetcel



Foto 2 Temperatuursonde (linksboven in reactor), uitleesunit (midden links op rand reactor) en bodemzuurstofsonde (rechtsonder liggend op de rand van een kist)

Op dag 4, 7 en 8 van de proef werden gedurende circa een half uur ammoniakemissies gemeten met een dynamische meetbox. Hierbij werd buitenlucht aangevoerd en over de kist geleid en vervolgens afgevoerd via een afzuigende ventilator. Gasconcentraties werden gemeten in de aan- en afgevoerde lucht. De hoeveelheid lucht die over de kisten werd geleid werd gemeten met een meetventilator. De emissie werd berekend als de hoeveelheid lucht (m^3/h) vermenigvuldigd met het concentratieverschil tussen afgevoerde en aangevoerde lucht. Een gedetailleerde beschrijving van deze dynamische boxmeetmethode is te vinden in Mosquera Losada *et al.* (2010) en van Dooren *et al.* (2011).



Foto 3 Meetbox opstelling geplaatst op één van de kisten met een compostvariant

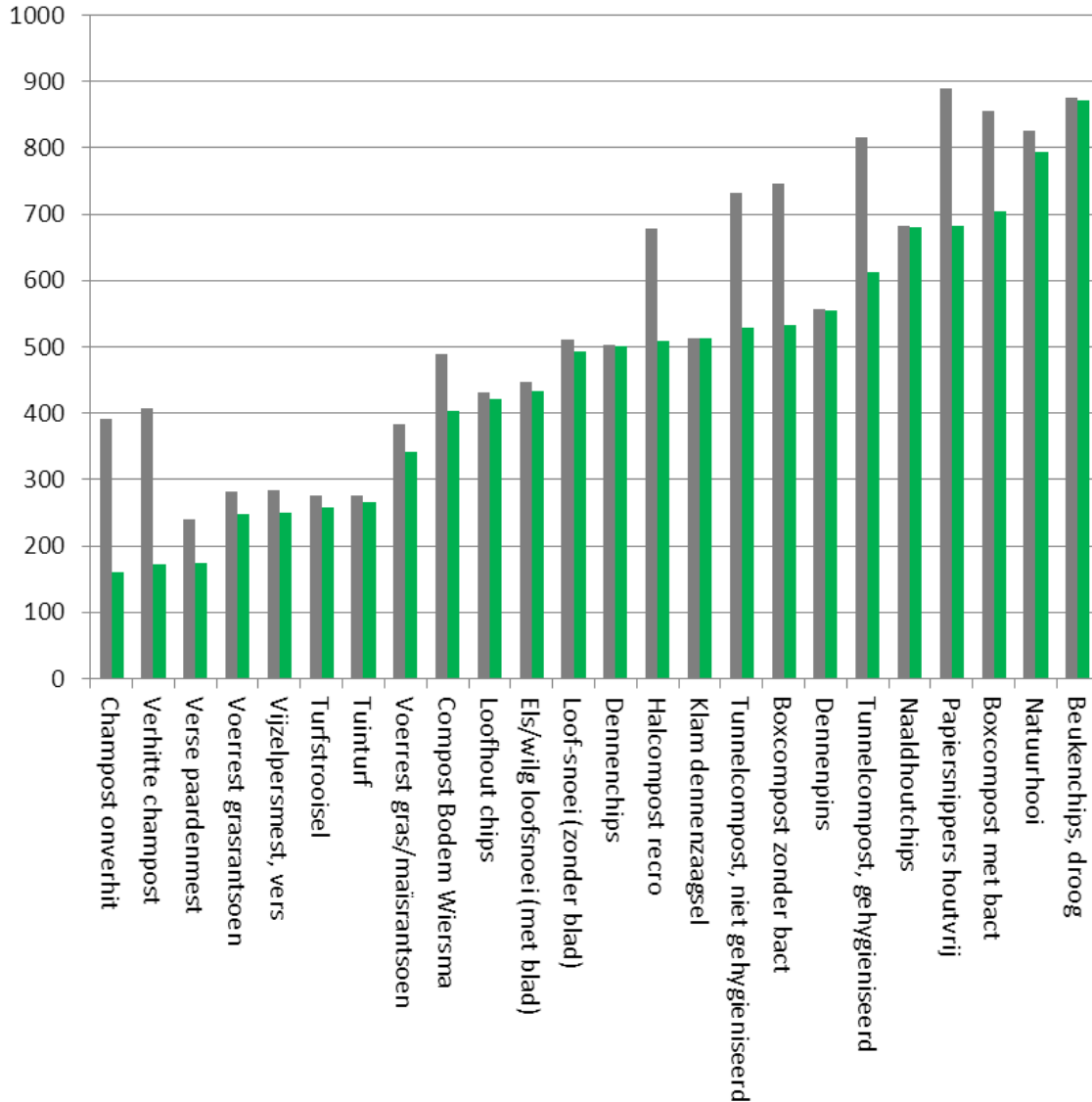
Om emissie van het broeikasgas lachgas (N_2O) te kunnen meten, werd tevens met de meetbox (Foto 3) gedurende 12 of 18 minuten lucht gerecirculeerd in de kisten zodat gasconcentraties in de meetbox en de luchtruimte boven de kist opgehoopt werden (de zogenaamde statische boxmethode). Na 6, 12 en 18 minuten werd een monster van de lucht genomen (met luchtsputjes). In het laboratorium werd de concentratie van CO_2 , CH_4 en N_2O in deze monsters vastgesteld met een gaschromatograaf. Op dag 4 werd slechts een beperkt aantal broeikasgasmonsters verzameld: alleen op 6 en 12 minuten in box 1 t/m 5, box 9 en 10. Op dag 4, 7 en 8 werden verder monsters van het pakket in de kist genomen voor bepaling van de respiratiesnelheid (Oxityp) en voor chemische analyses.

3 Resultaten en discussie

3.1 Bodemmateriaal-analyse (fase 1)

3.1.1 Samenstelling bodemmateriaalen

De gemeten droge stof- en organische stofgehaltenes zijn weergegeven in Figuur 1.



Figuur 1 Gehalte aan organische stof (OS, g/kg in groen) en droge stof (DS, g/kg in grijs) per materiaal, gesorteerd van laag naar hoog OS gehalte.

Champost (zowel verhit als onverhit), verse paardenmest en diverse composten hebben een laag percentage organische stof in vergelijking met de andere materialen. Dit geldt ook voor de droge stof gehaltenes, behalve bij de twee champost soorten. Het lage organische stof gehalte draagt bij aan een trager composteringsproces maar dit gaat waarschijnlijk niet gepaard met veel vastlegging van ammoniak. Dit omdat er simpelweg te weinig beschikbare C is voor micro-organismen om de ammoniak-stikstof in de cellen te bouwen.

Alle bodemmateriaalen in figuur 1 bevatten voldoende droge stof voor een composteringsproces. Door co-composteren met de dagelijks toegevoegde mest en urine zal het droge stof gehalte langzaam afnemen, maar door verdamping kan dat gedeeltelijk of geheel gecompenseerd worden. In dit

verband hebben de diverse houtachtige materialen naar verwachting de langste verblijftijd in de stallen.

De C- en N-gehalten en de C:N verhoudingen zijn weergegeven in Bijlage 2A en 2B. De diverse composten hebben een C:N verhouding variërend van 11,1 tot 12,6. Hoewel structurele en chemische eigenschappen ook een rol spelen in de bruikbaarheid van het bodemmateriaal, zijn deze C:N verhoudingen te laag om optimale bescherming te kunnen bieden tegen ammoniakemissies.

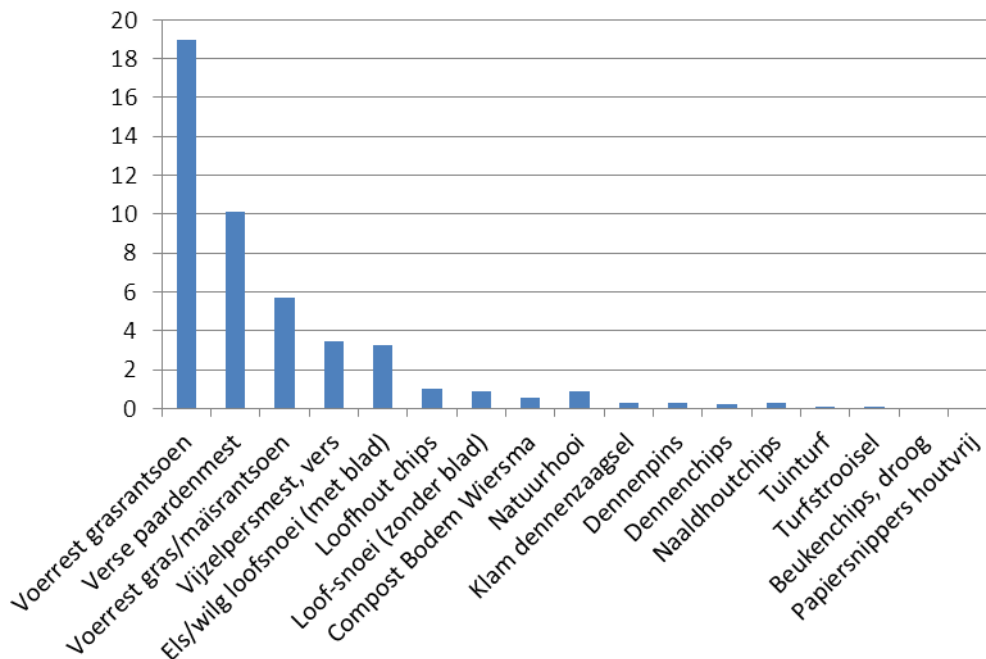
Ammoniakemissie-arme compostering vergt een C:N verhouding groter dan 20:1 (Haug, 1993); de optimale hoogte is rond 25-30 : 1. Voerresten en mesten vertonen weliswaar een iets hogere C:N verhouding, maar zijn nog steeds beneden de optimale range.

De droge stof en organische stof gehalten lijken geen remmende factor te zijn voor gebruik in vrijloopstallen. Hoewel ze als bodemmateriaal ook een goede bijdrage leveren aan het dierenwelzijn (Shane *et al.*, 2010), is het waarschijnlijk dat materialen als voerresten en verse mesten (als uitgangsmateriaal) een beperktere rol kunnen spelen in het optimale verloop van een composteringsproces in vrijloopstallen. Composten en turfsoorten kunnen relatief veel vocht vasthouden (Szanto, 2009). Turf heeft tevens een pH verlagend effect dat bijdraagt aan het beter behouden van ammoniak in de stalbodem. De houtafvalmaterialen vormen een groep die zowel droog als organische stof rijk zijn en met hoge C:N verhoudingen goed bruikbaar zijn in composterende vrijloopstalbodems.

3.1.2 Respiratiesnelheden

In figuur 2 en 3 zijn de resultaten van de Oxitop bepalingen weergegeven. De Oxitop bepalingen voor de materialen in figuur 2 zijn door LeAF te Wageningen uitgevoerd; die voor de compost-monsters in figuur 3 zijn door BLGG te Oosterbeek uitgevoerd.

g O₂/dag _ per kg produkt

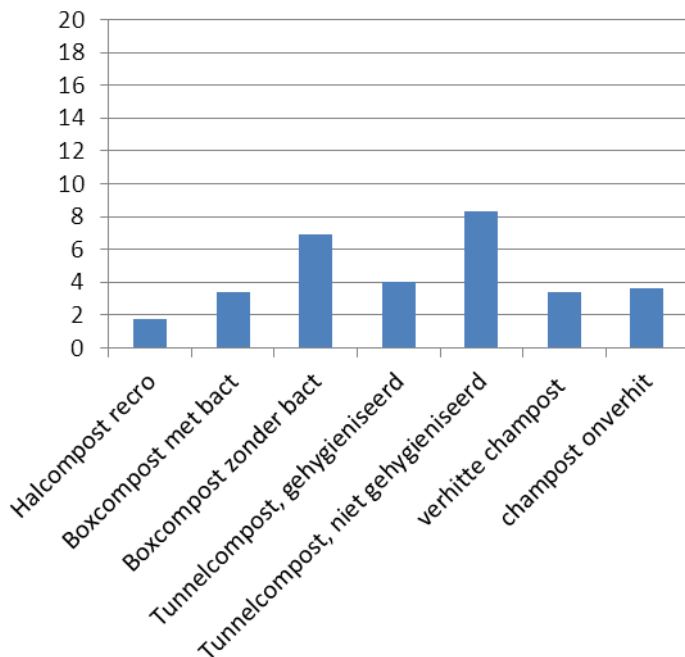


Figuur 2 Respiratiesnelheden van de onderzochte bodemmateriaal volgens de Oxitop meetmethode

Houtafval en turfmaterialen en papierafval vertonen zeer weinig respiratie en lijken daarmee meer geschikt voor een langzamere afbraak en kunnen daarmee langer dienst doen in een droge bodem. Natuurhooi, loofmaterialen en de composterende bodem Wiersma hebben een wat hogere respiratiesnelheid, maar deze materialen bieden nog steeds een significante weerstand tot afbraak. Loof-snoei, mesten en voerresten laten een hogere respiratie-snelheid zien. Opvallend zijn de relatief hoge respiratie-snelheden van enkele van de compostmaterialen (figuur 3). Deze waarden voor box-

en tunnelcomposten en voor champost zijn van dezelfde orde van grootte als die van vijzelpersmest. De hoogte van de waarden en de onderlinge verschillen zijn klein te noemen. Ter vergelijking: vers GFT afval heeft een respiratie-snelheid van 3-10 g O₂/kg/dag en bodems vertonen ca. 2 g O₂/kg/dag (Veeken et al., 2002). Het betekent dat – afgezien van de grasrantsoenresten - alle materialen relatief lage respiratiesnelheden vertonen. Dit is gunstig, omdat een snel afbraakpatroon ook een snelle vermindering van porositeit betekent (Szanto, 2009) en daarmee een snel verslechterende en inklinkende stalbodem.

g O₂/dag _ per kg product



Figuur 3 Respiratiesnelheden van de onderzochte compost-bodemmaterialen volgens de Oxitop meetmethode

De parameters organische stof en respiratie kunnen de geschiktheid van de materialen voor vrijstalbodems niet volledig weergeven. De samenstelling van de organische stof is ook belangrijk. Houtsoorten hebben hoge cellulose en lignine-gehaltenes (dit is niet gemeten in dit onderzoek) en daardoor meer weerstand tegen biologische afbraak. Daarom zijn deze mogelijk na 6 tot 12 maanden verblijf in de stal nog steeds niet verregaand gecompoteerd. Als er veel grove(re) stukken (de lignine-rijke delen) overblijven, zou dat het hergebruik van het compost negatief beïnvloeden. Maar hoewel deze delen compost minder geschikt maken voor gebruik in de tuinbouw of als bodemverbeteraar, vormen zij een belangrijk onderdeel van het behoud van de stalbodem-structuur. Lignine-rijke materialen handhaven de porositeit waarschijnlijk beter en dragen daarmee meer bij aan een (meer) aerob afbraakproces. Op zijn beurt kan dat zorgen dat voor lagere ammoniakemissies in de stal.

3.1.3 Structurele eigenschappen

In tabel 3 zijn de dichtheid en de porositeit (volume % lucht) van de materialen (monsters) weergegeven.

Tabel 3 De dichtheid en porositeit (volume % lucht) van de monsters

Materiaal monster	Dichtheid, kg/l	volume % lucht
Dennenchips	0.802	64.3
Dennenpins	0.816	79.3
Klamdennenzaagsel	0.896	70.6
Bodem Wiersma	0.975	44.9
Verse paardenmest	1.002	57.3
Vijzelpersmest, vers	1.115	66.0
Loof-snoei (zonderblad)	0.647	55.2
Els/wilg loofsnoei (met blad)	0.765	71.3
Naaldhoutchips	0.619	65.3
Papiersnippers houtvrij bedrijfsafval	0.877	97.3
Natuurhooi	0.349	93.8
Loofhoutchips	0.989	61.1
Beukenchips, droog, gezakt	0.925	64.6
Turfstrooisel	0.91	63.2
Tuinturf	1.056	50.8
Voerrest grasrantsoen	0.902	66.3
Voerrest gras/maïsrantsoen	0.788	72.3

Naast het natuurhooi, vertonen alle materialen een relatief hoge dichtheid. Loofsnoeien, voerrest en naaldhout- en dennenchips blijken een dichtheid van 0,6-0,8 kg/l te hebben (zie ook Veeken en Szanto (2002)); de andere materialen hebben een hogere dichtheid (~0.9-1 kg/l). De meest optimale dichtheid is vastgesteld op 0,6-0,8 kg/l voor passief beluchte compostingsprocessen (Veeken en Szanto (2002)). Deze waarden zijn dus optimaal en de grootte van de lucht-fractie (volume%lucht) of de porositeit is in bijna elk geval zeer hoog. Alleen de 'Bodem Wiersma' en de tuin turf materialen lijken meer compact. Dit biedt een goed perspectief voor de in-situ compostering in de stalbodem.

3.1.4 Beschikbaarheid en prijs

Het is niet mogelijk om exacte prijzen te geven voor de potentiële bodemmaterialen. De prijsklasse van de gebruikte materialen is per ton te vinden in Tabel 4. Daaruit blijkt dat voerresten en verse mesten het goedkoopst zijn, gevolgd door de tunnel- en boxcomposten en de champost-materialen. Houtchips en papierafval zijn nog redelijk goedkoop te noemen, terwijl hooi en turfmaterialen veel duurder zijn in gebruik. Dit is niet verrassend aangezien de laatste twee categorieën geen afvalstromen vormen. De beschikbaarheid van deze materialen is moeilijk te definiëren. Naar verwachting is houtafval meer beschikbaar dan bijvoorbeeld turf en sommige compostsoorten. Tunnelcompost, gebaseerd op GFT afval is een uitzondering, omdat het een vrij makkelijk verkrijgbaar en relatief goedkoop bodemmateriaal is. Houthandelbedrijven zijn in vrijwel elke regio te vinden, wat het verkrijgen van houtchips vergemakkelijkt.

Het toepassen van optimale bodemmaterialen is een onderdeel van het verbeteren van de performance van vrijloopstallen. Het beheren van de vrijloopstalbodem beïnvloedt het bodemproces en daarmee de uitstoot van ammoniak en broeikasgassen. In de volgende sectie worden de resultaten en analyse beschreven van het deelonderzoek naar het compostingsvermogen van 10 bodemmengsels.

Tabel 4 Prijsindicatie (€/ton) en beschrijving van de onderzochte bodemmaterialen

Materiaal	€ per ton	Indruk/nadere specificatie
Bodem Wiersma	3 tot 15	Uit composterende vrijloopstalbodem die dagelijks gedurende ca. 1 uur van onderuit wordt belucht via buizen in de vloer onder compostpakket
Tunnelcompost, gehygiëniseerd	3 tot 15	
Tunnelcompost, niet gehygiëniseerd	3 tot 15	
Verhitte champost (verhit tot 70 °C)	3 tot 15	champignonmest (na oogst): paardenmest, stro, gips en kippenmest die voor de champignonteelt is gecomposteerd + champignonresten/mycelium
Champost onverhit	3 tot 15	idem, niet verhit
Voerrest grasrantsoen	0	erg natte partij
Voerrest gras/maisrantsoen	0	oogt minder nat dan voerrest grasrantsoen
Vijzelpersmest, vers	5	uit runderdrijfmest
Verse paardenmest	0	van manege
Natuurhooi	25 – 50	erg droge partij; DS kan in praktijk variëren
Papier snippers houtvrij bedrijfsafval	10 tot 25	zeer uniform; alleen stroken versneden enveloppes (ontinkt); zie foto
Turfstrooisel	46 tot 140	afkomstig uit de bovenste veenlaag, het veen is volgens de leverancier nog weinig verteerd, zie http://nl.wikipedia.org/wiki/Turfstrooisel
Tuinturf	46 tot 140	afkomstig uit de uit de diepst gelegen veenlagen; het veen is volgens de leverancier al in een vergevorderd stadium van vertering
Dennenchips	20 tot 25	zie foto
Dennenpins	10 tot 25	zie foto
Klam dennenzaagsel	10 tot 25	zie foto
Loof-snoei (zonder blad)	10 tot 25	zie foto
Els/wilg loof snoei (met blad)	10 tot 25	zie foto
Naaldhout chips	10 tot 25	nattig, erg heterogeen deels grof, deels takken, deels schors; oogt grof maar voelt toch redelijk zacht
Loofhoutchips	11 tot 25	
beukenchips, droog, gezakt	12 tot 25	homogene kleine chip, "delikates raucharoma"
Boxcompost met bacteriën	3 tot 15	veel fijn as (weinig OS)
Boxcompost zonder bacteriën	3 tot 15	veel fijn as (weinig OS)
Halcompost (recrocompost)	3 tot 15	Fijne GFT compost afgezeefd op 8 mm, met een volumegewicht van ca. 750 kg/m ³ .

3.2 Resultaten en discussie van de composteringsprocessen in fase 2

3.2.1 Proefopzet

Na het onderzoeken van de bodemmateriaal-eigenschappen werden er 10 composteringsvarianten samengesteld (Tabel 5). Op basis van de resultaten uit fase 1 kon worden geconcludeerd dat de meeste materialen - ten minste gedeeltelijk - voldeden aan de vooraf gestelde eisen. Sommige materialen excelleren vooral als structurele materialen, terwijl anderen juist kunnen bijdragen aan emissiebeperking. Daarom werden op basis van de resultaten van fase 1 niet alleen de beste materialen uitgekozen, maar ook in de meeste gevallen gecombineerd als bodemvarianten voor fase 2 van het onderzoek. De tien varianten zijn weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5 De 10 varianten in de kisten 1 t/m 10

Kist	Variant	Mest dag 0	Mest en urine dag 1 t/m 7
1 W+b	Composterende vrijloopstalbodem Wiersma (belucht)	Nee	Ja
2 H	Niet composteerende vrijloopstalbodem Havermans	Nee	Ja
3 L	Loofhoutchips	Ja	Ja
4 L+b	Loofhoutchips (belucht)	Ja	Ja
5 N	Naaldhoutchips	Ja	Ja
6 Nt	Naaldhoutchips +turf	Ja	Ja
7 Nc	Naaldhoutchips +champost	Ja	Ja
8 Nv	Naaldhoutchips +voerresten	Ja	Ja
9 Nh	Naaldhoutchips +natuurhooi	Ja	Ja
10 T	onbehandelde Tunnelcompost	Ja	Ja

De composteerende vrijloopstalbodem ('W+b') was afkomstig uit een stal waar verse houtsnippers – in combinatie met de dagelijks toegevoegde mest en urine van melkkoeien – composteerden gedurende meer dan een jaar. Alleen het liggedeelte van de stal was voorzien van deze vrijloopstalbodem. Achter het voerhek was er een roostervloer met een drijfmestkelder. Naar schatting 50 tot 60% van de mest en urine zal op de vrijloopstalbodem terecht gekomen zijn. Het bodemmengsel werd belucht (via gaatjes in de betonnen vloer onder het pakket) gedurende een half uur tot een heel uur per dag. Daarmee werd een versterking van het composteringsproces beoogd. Dit om met de gegenereerde warmte de bovenlaag van de bodem droger te houden (Galama, 2011). Het monster van deze composteerende vrijloopstalbodem werd genomen kort voordat deze bodem uit de stal werd verwijderd, vanwege afnemende temperatuur in het pakket (het materiaal was deels uitgedecomposeerd). De niet composteerende vrijloopstalbodem ('H') bestond uit rijp GFT compostmateriaal, vermengd met de feces en urine van de melkkoeien die permanent op deze bodem verbleven (inclusief voeren op de vrijloopbodem). Bij de bodem H was er geen sprake van een actief bestuurd composteringsproces (Galama, 2011). Uit de stal met bodem H zijn 2 deelmonsters genomen: het onderste, meer aangedrukte gedeelte van het bodempakket is afzonderlijk bemonsterd en aangevoerd en onderin een kist aangebracht; daarbovenop is een monster uit het bovenste deel van het pakket aangebracht. Deze vrijloopstalbodem werd in de stal vooral gedroogd door zonlicht en veel luchtverversing (mede door een kas-dak). De monsters van de twee praktijkbodems werden getest naast een achttal gesimuleerde stalbodems.

Loofhout- en naaldhoutchips presteerden enigszins vergelijkbaar in fase 1 en werden allebei gebruikt in fase 2. Loofhoutchips werden gebruikt voor de varianten 3 en 4 om een verschil tussen het wel of niet-beluchten te kunnen verkennen. De varianten 5 t/m 9 waren naaldhoutchips met of zonder toevoegingen. Het hoofddoel bij deze varianten was het verkennen van combinaties van bodemmateriaal die omzetting bevorderen en wellicht een lage ammoniakemissie hebben. In bijlage 3 zijn de gewogen hoeveelheden materiaal per variant weergegeven. Bij vier varianten naaldhoutchips (kist 6 t/m 9) werden naaldhoutchips tot een hoogte van 64 cm in de kist aangebracht en werden respectievelijk 8 cm turf, 8 cm champost, 8 cm voerresten of 8 cm natuurhooi toegevoegd, zodat in

alle kisten een vulhoogte van 72 cm werd bereikt. Bij de overige kisten werd één uitgangsmateriaal aangebracht tot een hoogte van 72 cm. De tiende variant bestond uit een makkelijk verkrijgbaar (relatief goedkoop) compostmateriaal dat eerder actief werd belucht maar dat geen rijpingsbehandeling onderging.

Tijdens het vullen van de kisten 3 t/m 10 werd het uitgangsmateriaal per kist gemengd met 12,8 kg verse vijzelpersmest, 16,5 kg oude vijzelpersmest (die reeds gecomposteerd had) en 20 kg drijfmest (uit de mestopslag van de ligboxenstal van melkvee). Met de toegevoegde mest werd beoogd om snel een mengverhouding van mest en het beddingmateriaal te krijgen zoals die in een vrijloopstal na ruim een maand zou kunnen zijn.

Bij de varianten 1 en 2 zat al feces en urine in het substraat dankzij het normale verblijf van melkkoeien in de melkveestal. Daarom werd aan deze kisten op dag 0 geen mest toegevoegd. Bij variant 4 werd beoogd om een effect van beluchten vast te stellen ten opzichte van variant 3. De beluchting vond plaats via een pomp (capaciteit ca. 5 m³/h) die met een slang aangesloten werd op een buis met een doorsnede van ca. 5 cm. Die werd in het midden van de reactorbodemplaat aangebracht. Om bij de start een wat kleiner volume koude lucht in het pakket te blazen (en daarmee beperkt warmte uit het pakket te blazen), werd op dag 1 en 2 slechts belucht gedurende respectievelijk 15 en 20 minuten. Daarna werden de kisten 1 en 4 elke dag gedurende een half uur belucht. Deze actieve beluchting vond alleen plaats bij de varianten 1 en 4. De overige kisten werden alleen passief belucht met hulp van dagelijkse omzetting van de toplaag.

Na het starten van het experiment werden enkele reactor-specifieke handelingen uitgevoerd om een zo goed mogelijk simulatie van de vrijloopstal mogelijk te maken. Om de dagelijkse mesttoevoer in de praktijk te simuleren werden mest en urine verzameld in een melkveestal. Na menging en bemonstering werden dagelijks 2 kg drijfmest en 1 kg dagverse urine gedoseerd in iedere kist. Aan de kist met voerrest, werd dagelijks 0,2 kg verse voerrest toegevoegd, gelijkmatig verspreid over het hele oppervlak. De voerrest was afkomstig van het praktijkcentrum Zegveld. De variant met turf werd dagelijks met 0,25 kg turf (=0,625 liter turf) 'toegedekt'. Daarna werd in alle kisten de bovenste laag (ca. 30 cm) omgezet om de verse mest en urine te mengen en om de bodemstructuur te optimaliseren.

Ten slotte, werd de loop- en ligdruk van dieren nagebootst door enkele malen op de toplaag in iedere kist te springen (lichaamsgewicht ca. 80 kg; spronghoogte ca. 25 cm) en om een redelijk egale (vlakke) verdeling in de kist te houden.

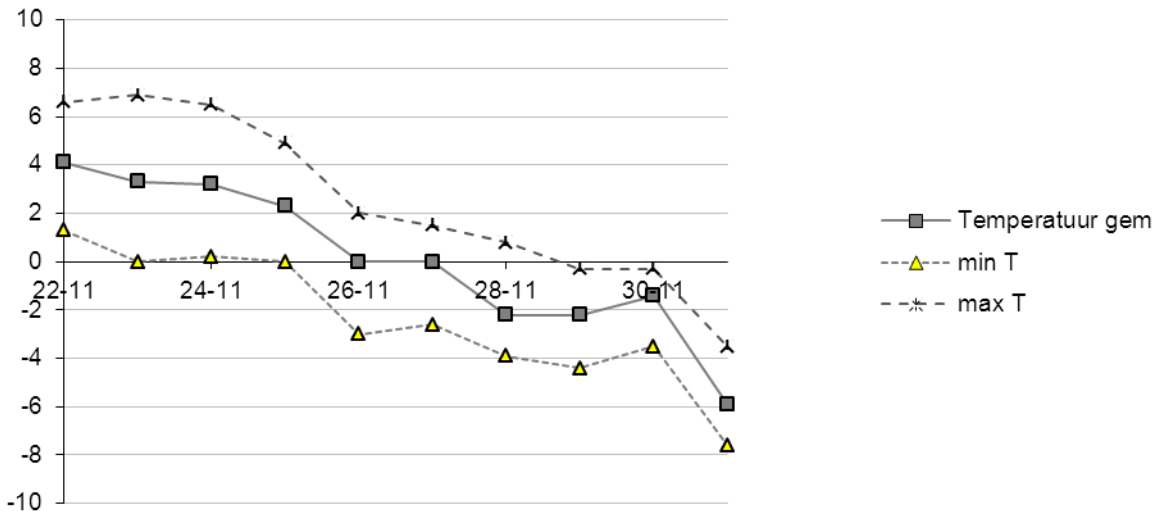
De temperatuur en het zuurstofgehalte werden dagelijks gemeten in iedere box op een diepte van 0, 20 en 40 cm (vanaf de toplaag).

3.2.2 Bijzondere meteorologische omstandigheden tijdens proef

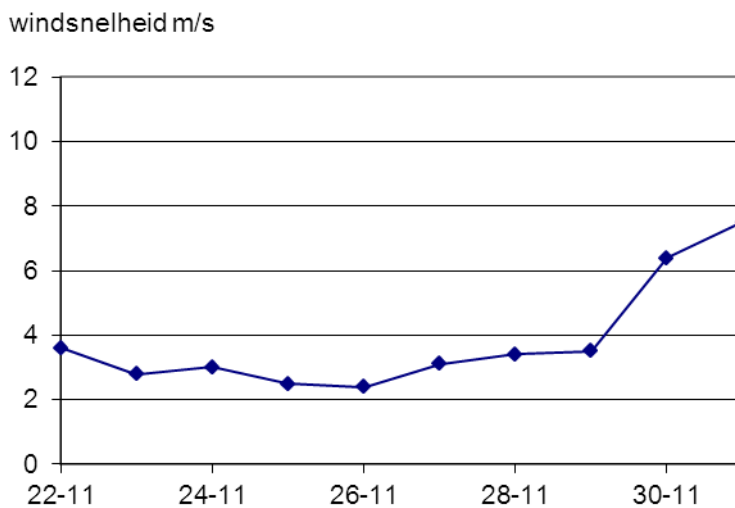
Bij vrijloopstallen wordt veelal gewerkt met zo groot mogelijke luchtinlaat via open zijwanden en open kop en eindgevels ter bevordering van de natuurlijke ventilatie. De statemperaturen zijn gelijk aan of vergelijkbaar met de buitentemperatuur. In de wintermaanden kan onder Nederlandse klimaatomstandigheden de verdamping uit de vrijloopstalbodem onvoldoende zijn (Smits en Aarnink, 2009).

Tijdens fase 2 van het onderzoek was er een vroege inval van de winter. De proef werd uitgevoerd in een schuur met een open front. Hoewel de kisten onder dak waren, bood de open zijkant van de schuur weinig bescherming tegen de lage temperaturen en de wind. Hoewel dit realistische omstandigheden waren voor de Nederlandse vrijloopstallen, zal de geringe omvang van de kisten – in vergelijking tot de grootte van een werkelijke vrijloopstalbodem – gezorgd hebben voor een sterkere beïnvloeding van het koude weer. Onder deze condities moet rekening worden gehouden met een hoge afvoer van warmte en een afnemende biologische activiteit (gradiënt) buiten de kern van het compostbed. Daarnaast moet gemeld worden dat de steeds ongunstiger wordende windrichting (de naar het oosten tot noordoosten draaiende wind blies steeds meer op het open front van de schuur), ook een sterk koelend effect had op de kisten.

Verschillen tussen varianten kunnen deels samenhangen met deze condities. Zo is het mogelijk dat de isolerende werking van toegevoegde materialen en het kunstmatige samendrukken onder deze condities belangrijker zijn dan de afbreekbaarheid van die materialen. Terwijl onder normale (warmere) omstandigheden de afbreekbaarheid wellicht belangrijker is dan de isolerende werking. Het verloop van de buitentemperatuur en de windsnelheid is weergegeven in figuren 4 en 5. Deze gegevens zijn ontleend aan het nabij gelegen KNMI station te Cabauw.



Figuur 4 Verloop van de etmaalgemiddelde buitentemperatuur (Temperatuur gem, oC) en de minimum en maximum temperatuur per etmaal (respectievelijk min T en max T, oC) (KNMI te Cabauw)



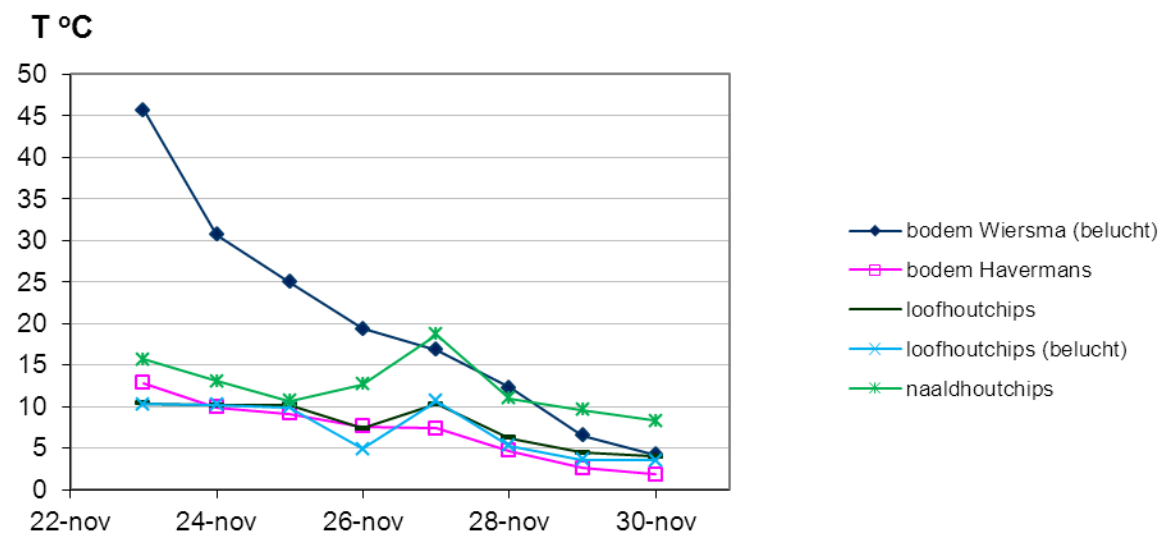
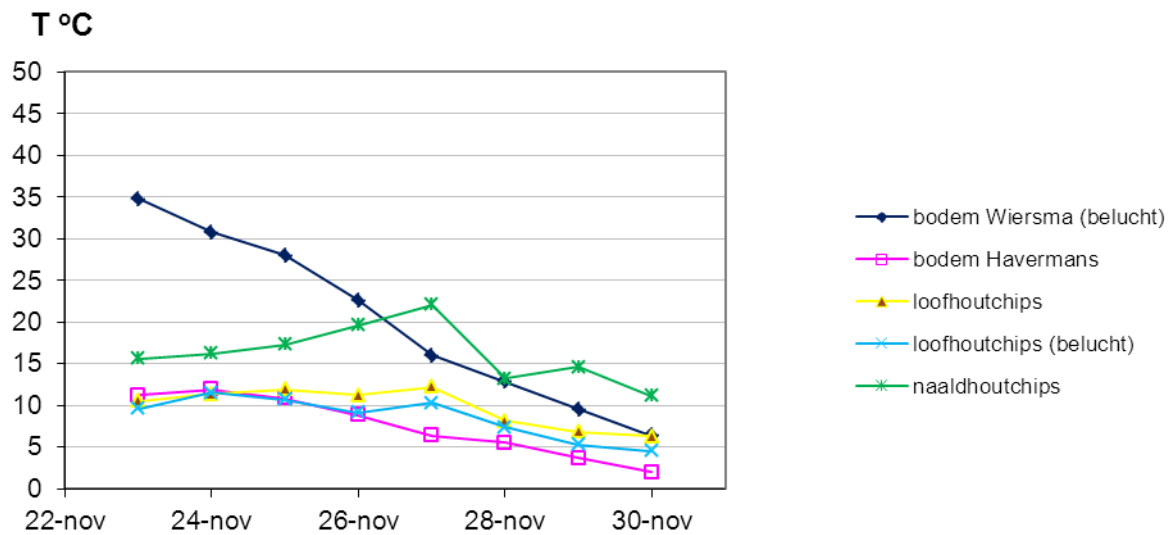
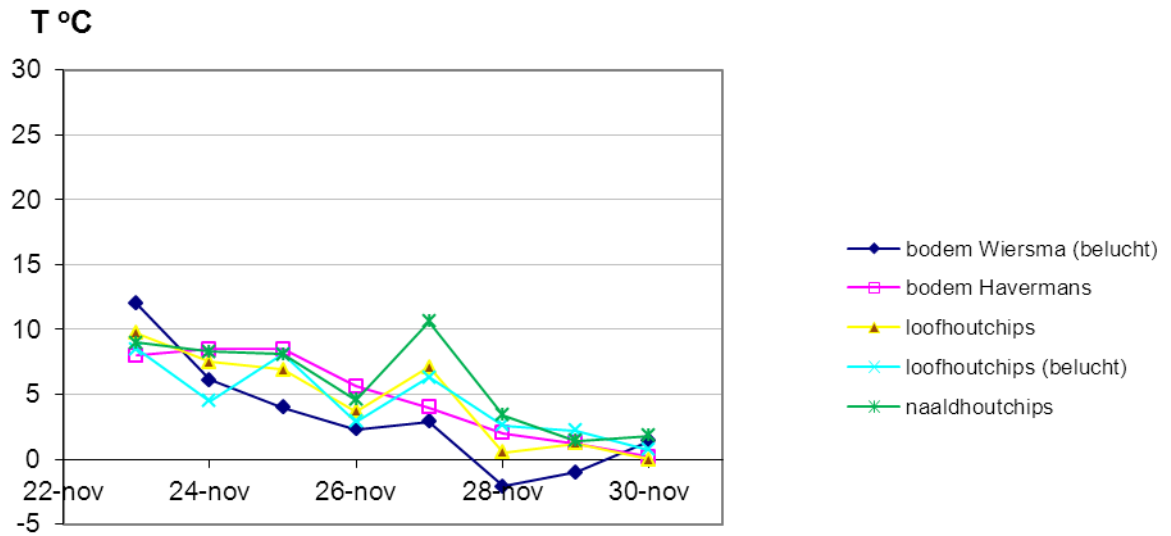
Figuur 5 Verloop van de etmaalgemiddelde windsnelheid, gegevens ontleend aan het nabijgelegen KNMI station Cabauw

Temperatuurverloop in de bodempakketten in de kisten.

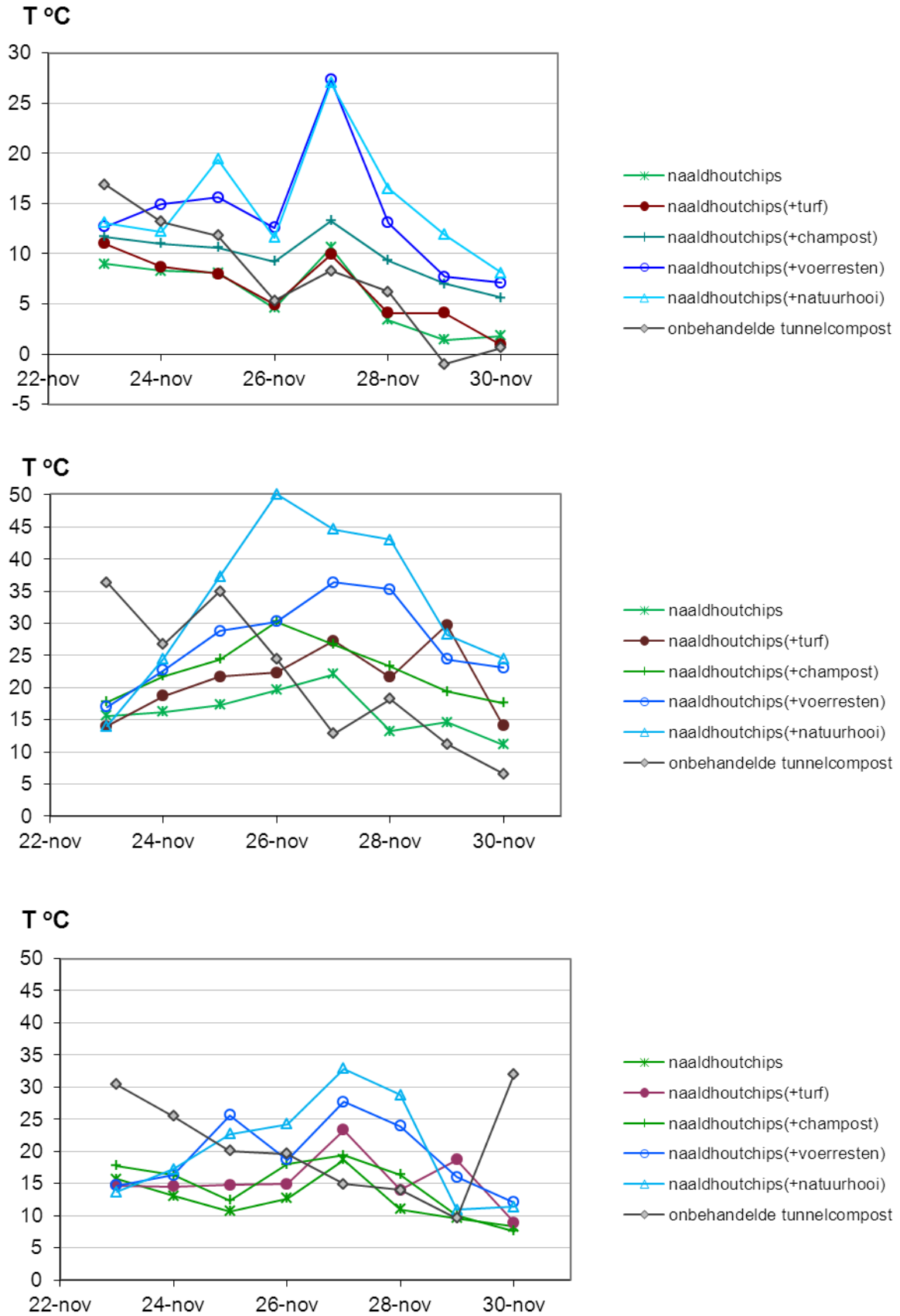
Per variant is het temperatuurverloop op een diepte van 0, 20 en 40 cm in het pakket weergegeven in figuur 6 en 7. De resultaten van de 10 kisten zijn verdeeld over 2 figuren weergegeven om de afzonderlijke kisten goed in de grafieken te kunnen onderscheiden.

De resultaten aan de buitenkant van de compostpakketten (op 0 cm) geven vergelijkbare temperaturen als de omgeving. Vooral de laatste dagen dalen deze waarden, in reactie op de omgevingstemperatuur en de sterker wordende wind (die toen direct richting de kisten blies). In geval van de vrijlooptalbodems W+b en H, de loofhoutchips en de naaldhoutchips varianten zijn zelfs de compostkern-temperaturen relatieve laag. Dit heeft wellicht te maken met een beperkt compostingsproces. Maar zelfs zonder een efficiënt afbraakproces, zorgt de geproduceerde warmte voor hogere temperaturen dan die van de omgeving. Bij gebrek aan veel afbrekende organische stof blijft de warmteproductie laag. De overige reactoren tonen een ander beeld. De pakketten met naaldhoutmengsels hebben zowel een hogere temperatuur aan de buitenkant als een thermofiele kern. De tunnelcompost-variant is de enige in deze groep waar de temperatuur niet stijgt tot dag 7. Vanaf de dag dat de wind sterk toeneemt, verliezen de reactoren een deel van hun warmte. Een

anomalie hierin is de laatste waarde voor de tunnelcompost bij 40°C. Deze waarde is niet waarschijnlijk, en is mogelijk het effect van een 'hotspot' binnen het heterogene compostbed.



Figuur 6 Per bodemvariant, het temperatuurverloop aan het oppervlak (bovenste grafiek), op een diepte van 20 cm (midden) en op een diepte van 40 cm (onderste grafiek)



Figuur 7 Per bodemvariant, het temperatuurverloop aan het oppervlak (bovenste grafiek), op een diepte van 20 cm (midden) en op een diepte van 40 cm (onderste grafiek)

In de tabellen 6 en 7 is per pakket de gemiddelde temperatuurverandering in graden Celsius per dag weergegeven op een diepte van respectievelijk 20 en 40 cm.

Tabel 6 Per pakket, op een diepte van 20 cm, de gemiddelde temperatuurverandering in graden Celsius per dag, in de periode van 23/11 tot 26/11 en van 26/11 tot 29/11

	T verandering (°C / dag)	
	23/11-26/11	26/11-29/11
bodem Wiersma (belucht)	-4.1	-4.4
bodem Havermans	-0.8	-1.7
Loofhoutchips	0.2	-1.5
loofhoutchips (belucht)	-0.2	-1.3
Naaldhoutchips	1.3	-1.7
naaldhoutchips(+turf)	2.8	2.5
naaldhoutchips(+champost)	4.2	-3.6
naaldhoutchips(+voerresten)	4.4	-2.0
naaldhoutchips(+natuurhooi)	12.0	-7.3
onbehandelde tunnelcompost	-4.0	-4.4

Tabel 7 Per pakket, op een diepte van 40 cm, de gemiddelde temperatuurverandering in graden Celsius per dag, in de perioden van 23/11 tot 26/11; en van 26/11 tot 29/11

	T verandering (°C / dag)	
	23/11-26/11	26/11-29/11
bodem Wiersma (belucht)	-8.8	-4.3
bodem Havermans	-1.7	-1.7
Loofhoutchips	-1.0	-1.0
loofhoutchips (belucht)	-1.8	-0.4
Naaldhoutchips	-1.0	-1.0
naaldhoutchips(+turf)	0.1	1.3
naaldhoutchips(+champost)	0.1	-2.6
naaldhoutchips(+voerresten)	1.3	-0.9
naaldhoutchips(+natuurhooi)	3.5	-4.4
onbehandelde tunnelcompost	-3.6	-3.3

De bodem van Wiersma heeft aanvankelijk de hoogste temperatuur; de temperatuurdaling per dag is tijdens de proef in dit pakket het grootst. Het pakket met het onbehandelde tunnelcompost heeft aanvankelijk de op één na hoogste temperatuur; in dit pakket neemt de temperatuur ook sterk af. Een temperatuurdaling impliceert dat de warmteafvoer uit het pakket groter is dan de warmteproductie in het pakket. De pakketten met naaldhoutchips hebben bij aanvang geen hoge temperatuur; de eerste dagen van de proef stijgt de temperatuur in deze pakketten (dus is er meer warmteproductie dan warmteafvoer in deze pakketten). Daarna neemt de temperatuur in deze pakketten ook af. Vooral de pakketten waaraan turf, champost, voerresten of natuurhooi is toegevoegd, vertonen aanvankelijk een temperatuurstijging.

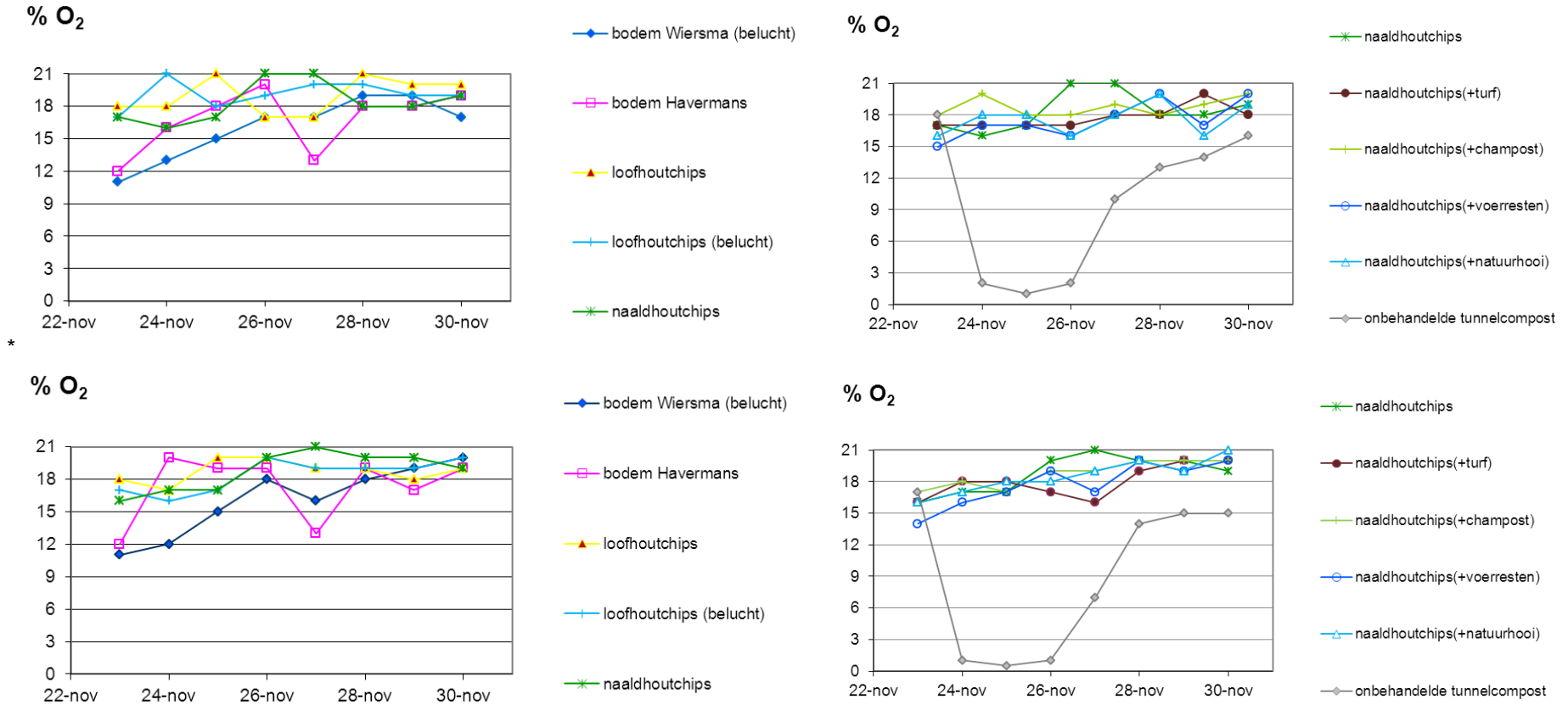
3.2.3 Verloop van zuurstofgehalte in de pakketten

Per variant is het verloop van het zuurstofgehalte op een diepte van 20 en 40 cm in het pakket weergegeven in figuur 8. Het normale zuurstofgehalte in de buitenlucht is 21%.

Bij een sterk verlaagd zuurstofgehalte in een pakket kunnen aerobe processen (zoals compostering) geremd worden en wordt het bed door anaerobe processen gedomineerd.

De bodempakketten van Havermans en Wiersma hadden aanvankelijk een wat lager zuurstofgehalte dan de andere bodempakketten. Bij de bodem van Wiersma nam het zuurstofgehalte in de volgende dagen van de proef geleidelijk toe. Omdat de zuurstofconcentratie nooit onder de 10% daalt, is dit niet significant limiterend voor het composteringsproces (Rudrum, 2005).

In de kist met onbehandeld tunnelcompost is het zuurstofgehalte wel limiterend geweest voor het proces. Het gebruik van zuurstof binnen het compostbed geeft aan dat er aerobe afbraak plaatsvond. Desondanks bleef de te verwachte temperatuurstijging uit. Mogelijk is het effect van een zodanig inklinkend compostbed dat de porositeit sterk verminderde. De gelimiteerd beschikbaar zuurstof in de poriën is dan snel gebruikt door de micro-organismen en de compacte omgeving beperkte de toevoer van verse lucht. De daling van de temperatuur is mogelijk te wijten aan de sterkte en richting van de wind.



Figuur 8 Per bodemvariant, verloop van het zuurstofgehalte (% O₂) op een diepte van 20 cm (grafieken bovenste rij) en 40 cm (grafieken onderste rij)

3.2.4 Samenstelling van compostbed in de loop van het composteringsproces

Aan de kisten 3 t/m 10 is op dag 1 een vaste hoeveelheid (gewichtsbasis) drijfmest en vijzelpersmest toegevoegd en gemengd. Verschillen in gehalten zullen dus vooral door een verschillend N-gehalte in het uitgangsmateriaal (voordat mest toegevoegd was) en daarnaast door een verschillend gewicht van het uitgangsmateriaal (bij vulling op volumebasis) veroorzaakt zijn. Daar het uitgangsmateriaal op volumebasis aan de kisten is toegevoegd tot een gelijk vulniveau in alle kisten, weerspiegelen verschillen in waarden (tabellen 8-10) bij aanvang tussen de kisten 3 t/m 10 deels dus ook verschillen in soortelijk gewicht van het uitgangsmateriaal.

Het oorspronkelijke totaal stikstofgehalte was het hoogst in de twee composteringsbodems en in de tunnelcompost-variant. In geval van de twee compostbodems (W+b en H) kan er weinig verandering geobserveerd worden. Dit is mogelijk beïnvloed door de lage porositeitswaarden (zie in Bijlage 7 de figuur met volume % lucht). De tunnelcompost variant vertoont een toename van stikstof evenals de naaldhoutchips+turf variant. Onder voorbehoud dat er een goede bemonstering en analyse van het heterogene materiaal plaatsvond, duidt dit er in beide gevallen op dat er significante afbraak plaatsvond met geringe emissies. Het afbreken van organische stof en de daarmee gepaard gaande verdamping kan het aanwezige stikstofgehalte vergroten. Dit is natuurlijk alleen het geval als de geproduceerde ammoniak niet geëmitteerd wordt. De eerder besproken zuurstofgehalten duiden er op dat relatief veel zuurstof kon worden geconsumeerd. Omdat dit minder zeker is in geval van het tunnelcompost, is deze bevinding twijfelachtig. De andere varianten vertonen minimale veranderingen in de stikstofgehalten, waarschijnlijk in overeenstemming met de beperkte organische stof omzet. De koolstofveranderingen zijn gering te noemen. Dit komt omdat koolstof het meest voorkomende element is van de organische stof. Zeker bij lage procestemperaturen vertoont de omzetting van lange C-ketens daarom weinig verandering. Koolstof is vrijwel nooit een limiterende factor voor biologische omzettingen. Dit betekent dat C:N verhoudingen vooral veranderen op basis van de toename of afname van stikstof. Dit impliceert dat C:N verhoudingen bij hoge N verliezen toenemen.

De C:N verhouding van de drijfmest die bij aanvang werd gemengd door de verschillende pakketten (20 kg drijfmest per pakket) was lager dan op de daarna volgende dagen (per pakket werd 2 kg/dag toegevoegd, zie bijlage 4): de eerste dag was de C:N verhouding 8,0 daarna tussen 12,4 en 13,9. Bij de mengsel-varianten vertonen de compostbodems en de tunnelcompost de laagste C:N gehalten. Bij de houtafval varianten vertonen alle varianten, behalve de naaldhoutchips+turf combinatie, een vergelijkbare trend: een toename van C:N gehalte. Dit in samenhang met het afnemen van het stikstofgehalte zoals hierboven uitgelegd. De turf-variant is van de onderzochte mengsels mogelijk het meest optimale mengsel voor het (tijdelijk) immobiliseren van ammoniak in het compostbed. Dit in verband met de lage pH waarde en goede buffercapaciteit van turf. De pH waarden van de champost en voerresten zijn optimaal te noemen (Tabel 8), de andere varianten vertonen pH waarden die de ammoniak-ammonium balans richting ammoniak verplaatsen en daarmee ammoniakemissie stimuleren. Deze pH waarden gaan in een conventioneel compacteringsproces snel omlaag, en in dit experiment was dat waarschijnlijk ook gebeurt als de afbraakprocessen grotere activiteit hadden vertoond. Bij een snellere afbraak worden meer vetzuren geproduceerd wat een pH verlagend effect heeft.

Ondanks de relatief beperkte omzetting door compostering, is er een duidelijke ammoniumaccumulatie gedurende het experiment. Terwijl oorspronkelijke ammoniumgehalten in de pakketten rond of onder 0,01 g $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /kg lagen, eindigde het experiment met waarden rond 0,1 g $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /kg na 8 dagen. De 2 loofhoutchips-varianten en de naaldhoutchips variant zonder toevoeging zijn uitzonderingen hierop; bij deze varianten veranderde er weinig in de ammoniumconcentratie.

Tabel 8 Karakteristieken van de uitgangsmaterialen - Concentraties van stikstof, kalium, ammonium, droge stof, as (niet-afbreekbare fractie), koolstof, dichtheid, porositeit (volume % lucht), C:N verhouding, organische stof, ammonium-stikstof fractie van initieel beschikbare totaal stikstof en K:N verhouding

Uitgangsmateriaal	DS g/kg	OS g/kg	OS %DS	As g/kg	Dichtheid kg/l	V _{lucht} %	N _{totaal} g/kg	NH ₄ ⁺ -N g/kg	NH ₄ ⁺ -N /N _{totaal} %	C _{totaal} g/kg	K _{totaal} g/kg	C:N	K:N
Vrijloopstalbodembodem Wiersma	510	394	77.2	116	1.104	49.1	14.7	0.144	1.0	211	28.4	14.3	1.9
Havermans bovenlaag	546	92	16.8	454	1.381	33.2	5.03	0.07	1.4	80.1	6.57	15.9	1.3
Havermans onderlaag	625	99	15.8	526	1.449	39.1	5.62	0.10	1.7	83.2	7.24	14.8	1.3
Turf	338	321	94.9	17.3	0.944	64.5	4.00	0.05	1.4	172	0.92	43.0	0.2
Tunnelcompost	653	215	32.9	438	1.428	61.5	9.19	0.20	2.2	117	11.1	12.7	1.2
Chips loofhout	434	431	99.3	3.0	0.874	62.6	0.528	< 0.05		199	0.44	377.0	0.8
Chips naaldhout	456	452	99.1	4.0	0.964	61.7	0.779	< 0.05		235	0.26	301.9	0.3
Champost	342	167	48.9	175	0.904	47.5	7.38	0.42	5.7	149	7.96	20.2	1.1
Voerresten	386	326	84.3	60.5	0.834	83.6	13.0	1.29	10.0	183	9.53	14.1	0.7
Natuurhooi	950	901	94.8	49.6	0.387	92.6	12.3	0.45	3.6	369	5.95	30.0	0.5
Vijzelpersmest vers	275	225	81.8	50.1	1.101	59.5	4.10	1.17	28.5	118	13.3	28.9	3.2
Vijzelpersmest oud	315	237	75.0	78.8	1.094	57.0	8.34	0.07	0.8	125	29.1	14.9	3.5
Toegevoegde drijfmest	90.5	67.7	74.8	22.8			4.93	2.46	49.8	39.3	6.76	8.0	1.4

Tabel 9 Karakteristieken van de inhoud per kist op dag 1 nadat mest en urine zijn toegevoegd, op basis van chemische analyses

Bak	Datum	pH	N _{totaal} g/kg	K _{totaal} g/kg	NH ₄ ⁺ -N g/kg	C _{totaal} g/kg	Dichtheid kg/l	V _{lucht} %	C:N	NH ₄ ⁺ -N:N _{totaal} %
1 W+b	23-11-2010	7.8	13.9	13.6	0.027	216	0.908	28.2	16	0.19
2 H	23-11-2010	8.8	4.82	6.89	0.025	73.3	1.388	29.0	15	0.52
3 L	23-11-2010	8.2	1.87	1.99	0.004	166	0.962	46.8	89	0.23
4 L+b	23-11-2010	8.6	2.37	3.03	0.003	150	1.010	45.9	63	0.11
5 N	23-11-2010	7.9	1.60	1.48	0.001	206	0.982	48.4	129	0.09
6 Nt	23-11-2010	5.7	1.60	0.88	0.001	198	0.904	42.8	124	0.09
7 Nc	23-11-2010	7.4	4.76	4.75	0.011	142	0.978	42.7	30	0.24
8 Nv	23-11-2010	6.4	5.61	4.62	0.55	189	0.925	57.8	34	9.89
9 Nh	23-11-2010	8.0	2.05	1.39	0.010	190	0.967	56.2	93	0.48
10 T	23-11-2010	8.6	5.74	3.93	0.031	71.1	1.283	17.6	12	0.55

Tabel 10 Karakteristieken van de inhoud per kist op dag 4 en dag 7

Bak	Datum	pH	N _{totaal} g/kg	K _{totaal} g/kg	NH ₄ ⁺ -N g/kg	C _{totaal} g/kg	Dichtheid kg/l	V _{lucht} %	C:N	NH ₄ ⁺ -N:N _{totaal} %
1 W+b	26-11	Nb	14.3	13.5	0.097	210	0.900	30.0	15	0.68
2 H	26-11	Nb	4.69	6.68	0.011	58.9	1.400	29.7	13	0.24
3 L	26-11	Nb	1.41	1.67	0.001	156	0.896	40.8	111	0.07
4 L+b	26-11	Nb	1.35	1.54	0.001	190	0.948	46.1	141	0.07
5 N	26-11	Nb	1.40	1.29	0.005	211	0.956	47.4	150	0.35
6 Nt	26-11	Nb	1.74	1.52	0.003	183	0.996	43.9	105	0.15
7 Nc	26-11	Nb	2.24	2.31	0.004	189	0.975	46.0	84	0.18
8 Nv	26-11	Nb	2.07	2.09	0.003	195	0.979	47.1	94	0.14
9 Nh	26-11	Nb	2.20	2.15	0.149	176	1.021	46.8	80	6.8
10 T	26-11	Nb	8.70	6.40	0.448	100	1.224	37.2	11	5.1
1 W+b	29-11	8.2	14.2	11.6	0.149	207	0.930	28.4	15	1.05
2 H	29-11	8.0	5.02	6.99	0.168	68.0	1.386	26.0	14	3.35
3 L	29-11	8.0	1.84	2.19	0.007	165	0.973	42.0	90	0.39
4 L+b	29-11	7.8	1.29	1.83	0.003	184	0.937	44.3	142	0.26
5 N	29-11	7.7	1.35	1.61	0.003	208	1.007	50.4	154	0.22
6 Nt	29-11	7.9	3.18	2.27	0.264	173	1.045	44.8	54	8.3
7 Nc	29-11	7.8	2.26	2.40	0.152	183	0.999	45.3	81	6.7
8 Nv	29-11	7.3	2.68	2.77	0.254	199	0.931	46.2	74	9.5
9 Nh	29-11	7.8	1.90	1.95	0.115	190	1.009	46.9	100	6.0
10 T	29-11	8.7	8.03	6.58	0.503	100	1.230	32.4	12	6.3

Nb: niet beschikbaar

3.2.5 Respiratiesnelheden op basis van Oxitop bepalingen

De Oxitop-bepalingen bij aanvang van het onderzoek werden niet beïnvloed door de winterse omstandigheden. Relatief lage waarden werden gevonden (0,5-5 g O₂/kg), behalve bij de mengsels met voerresten en met natuurhooi (Bijlage 5). De samenstelling van deze twee toevoegingen laten zien (zie tabellen in Bijlage 6) dat deze naast tunnelcompost het meest actief zijn. De berekende C:N verhoudingen bevestigen, dat er in de korte tijd relatief veel is afgebroken (relatief: vergeleken met de andere reactoren). Dit is begrijpelijk, omdat deze twee mengsels veel instabiele organische stof bevatten.

Bij de voerrest en de natuurhooi variant neemt de respiratiesnelheid sterk af na drie dagen, bij de andere monsters werd of een stagnatie (loofhoutchips varianten en naaldhoutchips + turf mengsel) of een lichte toename van activiteit geconstateerd (Bijlage 5 en 6). De sterke afname van respiratie bij voerresten en natuurhooi geeft aan dat deze varianten aanzienlijke fracties makkelijk afbreekbare organische stof hebben. Met hulp van langdurigere proeven zou het mogelijk zijn om te bepalen of de makkelijk afbreekbare fractie inderdaad binnen drie dagen afgebroken is. In dat geval kunnen deze toevoegingen de ammoniakemissies en de snelheid van de omzetting op langere termijn niet significant beïnvloeden. Op basis van de meetresultaten, lijkt het naaldhout-turf mengsel de meest waarschijnlijke kandidaat voor een optimaal composteerende vrijloopstalbodem vanwege de lage respiratiesnelheid en het gunstige effect op de pH ontwikkeling.

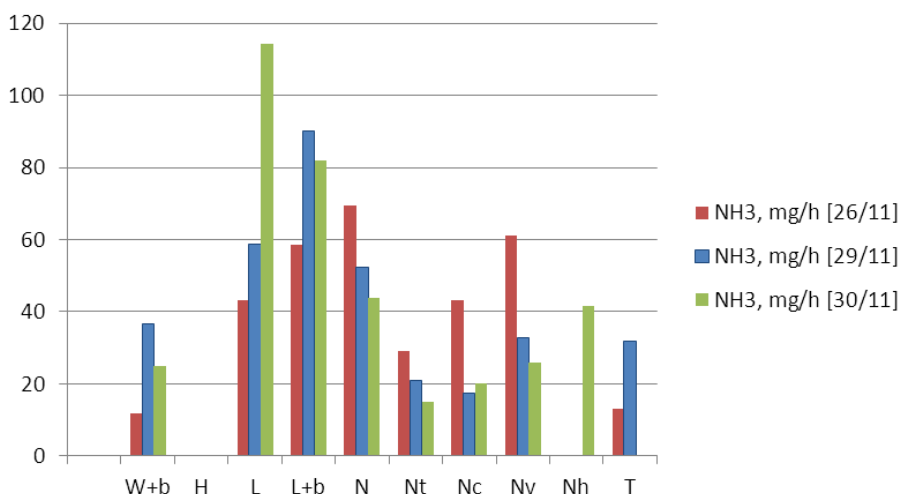
Aangetekend moet worden dat het moeilijk is om de trends te interpreteren. Hoewel Oxitop metingen gebruik maken van geoptimaliseerde condities voor de afbraak, waren de gemeten respiratiesnelheden en de veranderingen in de tijd gering. Door de heterogeniteit van de mengsels, kunnen geen verregaande conclusies worden getrokken op basis van deze metingen. Bij langere termijn composteeringsonderzoeken kunnen de veranderingen groter en veel beter interpreteerbaar zijn. Daarom wordt aanbevolen om gebruik te blijven maken van de Oxitop analyses.

3.2.6 Gasvormige stikstofemissies

3.2.6.1 Ammoniakemissies

De met de dynamische meetbox gemeten ammoniakemissies zijn weergegeven in figuur 9. Bij zeer hoge concentraties van andere gassen kon geen ammoniakflux vastgesteld worden omdat het buiten het meetbereik van het apparaat was. Dit was het geval bij de Havermans variant (kist 2) op alle meetdagen en bij de variant met naaldhoutchips en hooi (kist 9) op 26/11 en 29/11.

In de meeste gevallen nemen de gemeten ammoniakemissies af in de tijd: van 29/11 ten opzichte van 26/11 en van 30/11 ten opzichte van 29/11. Dit sluit aan bij de afkoeling van de kisten en de afname van de afbraaksnelheid in de kisten. De gemeten ammoniakemissie van variant 3 (loofhoutchips) neemt echter sterk toe. Kisten 1 en 4 laten ook stijgingen zien en variant 9 toont een plotselinge toename in ammoniakemissies.



Figuur 9 De ammoniakemissies van de tien varianten op dagen 4, 7 en 8 van het proces
NB: Het betreft hier voor alle bakken emissiemetingen zonder beluchting.

Toevoeging van turf (variant 6, met dagelijks een beperkte aanvulling van turf)) laat ten opzichte van hetzelfde mengsel zonder turf (variant 5: naaldhoutchips + excreta) een fors lagere ammoniakemissie zien. Ook bij toevoeging van champignonmest (kist 7) en voerresten (kist 8, met dagelijks een beperkte aanvulling van voerresten) is de ammoniakemissie lager dan van hetzelfde mengsel zonder de toevoegingen (kist 5). Bij toevoeging van hooi (kist 9) was de emissie op 30/11 vergelijkbaar met die van kist 5; op 26/11 en 29/11 kon de ammoniakemissie van kist 9 niet goed vastgesteld worden. In vergelijking met conventionele composteringsprocessen en andere metingen in vrijloopstallen (van Dooren *et al.*, 2011) zijn de gemeten ammoniakemissies laag.

3.2.6.2 Lachgasemissies

De lachgasemissies werden gemeten in een gesloten systeem (Tabel 11). Dit werd geregeld door de luchtslang van de uitgang te verbinden aan de ingang van de box. De lachgas-concentraties werden dan gemeten in luchtmonsters met hulp van spuitjes. Uit de resultaten bleek dat in veel gevallen geen meetbare accumulatie van lachgas plaatsvond. In een aantal gevallen nam de concentratie van lachgas licht af tijdens het metingen. Dit is niet te verklaren door het omzetsproces en is mogelijk het effect van lekkage uit het systeem. Het bevestigt wel dat lachgasemissie zeer moeilijk meetbaar is. Ondanks zijn geringe concentraties is lachgas wel een van de meest potentiële broeikasgassen en zijn globale impact is vergelijkbaar met die van kooldioxide en methaan (Mosier and Kroeze, 2000). Daarom wordt aanbevolen om in toekomstig onderzoek aandacht te blijven besteden aan het meten van N₂O emissies.

Tabel 11 Per variant de gemeten lachgasemissie (mg N₂O-N m⁻² h⁻¹) op 26/11, 29/11 en 30/11

Variant	26/11	29/11	30/11
1	<x	<x	<x
2	<x	<x	<x
3	Nb	<x	<x
4	Nb	<x	<x
5	Nb	0.9	<x
6	<x	<x	<x
7	2.4	<x	<x
8	1.8	4.3	3.6
9	<x	1.5	0.5
10	0.8	0.7	Nb

Nb: niet beschikbaar; <x: de lachgasflux kon bij de toegepaste meetmethode niet goed vastgesteld worden of viel binnen de meetfout van het systeem (<0,5 mg N₂O-N m⁻² h⁻¹)

Bij box 8 werden de meest consistente meetresultaten gevonden: hier werden op alle meetdagen significante N₂O fluxen gemeten. Uitgedrukt als percentage van de aanwezige stikstof lijkt de lachgasemissie in box 8 laag: de hoogste gemeten waarde 4,3 mg N₂O-N m⁻² h⁻¹ komt overeen met ca. 0,015% van de aanwezige N per dag. Lachgas komt voor bij composttemperaturen onder 40 °C. Als dit gemeten maximale percentage voor het hele jaar zou worden aangenomen, komt dat overeen met een lachgas emissie van 365 x 0,015%= ca. 5,5 % van de aanwezige N per jaar. Deze schatting houdt geen rekening met variaties door diverse factoren en is dus wel erg grof.

4 Algemene discussie

4.1 Eigenschappen potentiële bodemmaterialen en bodemmengsels

De meest cruciale eigenschap van in-situ vrijloopstal-compostering is dat het proces op een zodanig snelheid moet gebeuren, dat het een optimale vochtafvoer mogelijk maakt. De onderzochte uitgangsmaterialen verschillen in afbraaksnelheid (respiratiesnelheid op basis van Oxitop-test) en structurele parameters. Bij de samenstelling van een vrijloopstalbodem kan hier rekening mee worden gehouden. Naast de initiële afbraaksnelheid is van belang hoe persistent de afbraak is. Als een materiaal weinig organische stof bevat zal de bijdrage aan de compostering snel afnemen tenzij regelmatig vers strooisel materiaal wordt toegevoegd of er via de feces voldoende aanvoer van organische stof is. Maar als er voornamelijk mest composteert, dan treedt hoogstwaarschijnlijk ook een hoge ammoniakemissie op.

Langzaam of niet afbreekbare houtachtige materialen kunnen een nuttige bouwstof van een compostbodem zijn. Deze materialen kunnen een (semi-)permanente grove structuur bieden die de porositeit in het compostpakket ten goede komt. Snel afbreekbare materialen kunnen de porositeit van het pakket verminderen. Als de verdamping vermindert, dan kan het geaccumuleerde vocht een probleem vormen.

In dit onderzoek is gebruik gemaakt van één batch mest van één bedrijf. Tussen en binnen mestsoorten kunnen aanzienlijke verschillen bestaan in afbreekbaarheid en andere eigenschappen. Ook de kwaliteit van sommige bodemmaterialen kan sterk fluctueren. Bij papier en natuurhooi is dat minder te verwachten, maar eigenschappen van composten en houtafval kunnen variëren. Daarnaast kunnen de condities waaronder aangeleverde partijen opgeslagen worden variëren. Bij aanvoer van materiaal dat elders al werd opgeslagen kan de makkelijk afbreekbare organische stof ook al geleidelijk zijn verminderd. Dit is een aandachtspunt voor de manager van het stalsysteem. De materialen en eigenschappen zoals ze hier gerapporteerd zijn, kunnen gebruikt worden als aanzet voor een database van materialen en hun eigenschappen voor composterende vrijloopstalbodems. Deze database kan aangevuld worden met nieuwe materialen en met analysegegevens van meerdere batches. Dan is het mogelijk de bandbreedtes in parameters ook in de database tonen.

Als er geen post-composteringsproces (rijping na de stal) plaatsvindt en een matige compostkwaliteit afdoende is, dan zijn houtafvalsoorten de meest geschikte materialen omdat zij op zeer lange termijn veel structuur behouden. Minder stabiele materialen toevoegen versnelt het composteringsproces, maar veroorzaakt een snellere vermindering van de structuur. Voor het beperken van ammoniakemissies wordt aangeraden om met turf en rijpe composten te werken. Het succes van turf is te danken aan de lage pH en de hoge CEC (cation exchange capacity) waarde. Dit zorgt voor een goede vocht vasthoudendheid in vergelijking met andere bodemsoorten. Gedroogde veenbagger is wellicht een aantrekkelijk alternatief omdat het vergelijkbare effecten vertoont als turf (Smits et al., 2009). Bij veenbagger moet er wel rekening gehouden worden met mogelijk hoge zand(as)gehaltes. Op basis van de gerapporteerde proefresultaten wordt aanbevolen om mengsels van verschillende materialen te gebruiken in plaats van één bodemmateriaal.

4.2 Evaluatie van de composteringsprocessen

4.2.1 Verloop van composteringsproces

De resultaten van de proef werden mede bepaald door de koude-inval (winterse omstandigheden). Voor de chemische eigenschappen en de Oxitop bepalingen (respiratiesnelheid gemeten bij 20 °C) in monsters die bij de start van de proef (op 23/11) genomen zijn, spelen de koude omstandigheden geen rol. Die resultaten kunnen los van de omstandigheden geïnterpreteerd worden. De chemische eigenschappen en respiratiesnelheden alsook de gasvormige emissies die na de start gemeten zijn, kunnen door de winterse omstandigheden zijn beïnvloed. De dalende temperaturen in vrijwel alle pakketten duiden erop dat de warmte afvoer de warmteproductie overtrof. Bij sommige varianten was de aanvankelijke temperatuur in het pakket hoog en waarschijnlijk mede daardoor de temperatuurdaling veel groter dan bij andere pakketten. In andere pakketten steeg de temperatuur aanvankelijk, maar daalde deze weer in de laatste dagen, dankzij de weeromstandigheden. Ten slotte waren er pakketten met een lage temperatuur bij aanvang waarin de temperatuur steeds daalde. Deze verschillen in temperatuurontwikkeling geven aan dat warmteverliezen (of behoud van warmte) en gevoeligheid voor hogere luchtsnelheden sterk verschilden per variant. De ranking van de varianten

voor de verschillende gemeten parameters zou onder mildere omstandigheden kunnen afwijken van wat hier is vastgesteld.

In tabel 13 zijn de meest opvallende parameterwaarden per pakket samengevat. Het hoge C/N gehalte van turf is veelbelovend voor het beperken van ammoniakemissies. Gedroogde veenbagger met een hoog aandeel veen en een laag aandeel zand heeft waarschijnlijk een vergelijkbaar effect als turf. In eerder onderzoek van Smits et al. (2009) werd een lage ammoniakemissie bij toepassing van veenbagger gevonden in een kleinschalige laboratoriumproef. De afbraaksnelheden zijn hoog bij de Havermans variant en de variant waar voerresten of natuurhooi werd toegevoegd aan naaldhoutchips. Bij optimale temperaturomstandigheden zullen deze varianten waarschijnlijk minder geschikt zijn voor compostering gedurende een langere stalperiode dan materialen met een langzamere afbraaksnelheid. De onderzochte bodemvariant van Havermans was overigens ook niet bedoeld om te composteren.

4.2.2 Effect van beluchten

Het effect van beluchting was klein. De actief beluchtte varianten 1 en 4 vertonen wel hogere ammoniakemissies dan de passief beluchtte varianten. Het meest cruciale theoretische verschil tussen actief en passief beluchtte vrijstalbodems is dat alleen actieve beluchting zuurstoftoevoer voor het hele compostbed garandeert. De passieve beluchting via het omzetten en mengen van het compostbed was (conform het praktische gebruik) beperkt tot de bovenlaag (tot ca. 30 cm). Bij variant 1 en 4 werd tijdens de emissiemetingen eerst zonder en daarna met beluchten gemeten; de verhouding tussen de gemeten emissies met en zonder beluchten is weergegeven in tabel 12.

Tabel 12 Ammoniakemissie van variant 1 en 4. De emissie zonder beluchten is op 100% gesteld

	Bak 1	Bak 4	Bak 3: Bak 4
	belucht : niet belucht	belucht : niet belucht	niet belucht
26/11	225	156	74
29/11	119	125	65
30/11	83	125	140

Door het beluchten van het pakket neemt de gemeten ammoniakemissie in bak 1 en 4 aanvankelijk (op 26/11) sterk toe ten opzichte van de emissie die direct daaraan voorafgaand werd gemeten zonder beluchten. De ammoniakemissie van bak 3 die niet belucht werd, was op 26/11 en 29/11 lager dan die van bak 4 die dezelfde inhoud had; op 30/11 was de ammoniakemissie van bak 3 echter hoger.

Dit toont aan dat hoewel de niveaus redelijk laag waren, het effect van beluchting goed merkbaar is. De afnemende ammoniakemissie wijst erop dat er aanvankelijk een redelijke hoeveelheid ammoniak in het compostbed aanwezig was. Dit wordt bevestigd door tabel 9 en 10 (met de samenstellingen). Omdat het hier over een niet-continue geforceerde beluchtingsmethode gaat, is het mogelijk dat de zuurstof leverende rol van de beluchting belangrijker is dan het verwijderen van vrije (in het pakket opgehoopte) ammoniak. De geleverde zuurstof kan de vorming van lachgas beperken en de korte dagelijkse periode (≤ 30 minuten) met een lage beluchtingssnelheid is mogelijk maar beperkt 'schadelijk' voor het verminderen van de stikstofvoorraad. Ook zal de afbraaksnelheid naar verwachting niet heel sterk toenemen en zal daardoor de deeltjesgrootte en porositeit niet veel sneller afnemen. Als de afbraak wel sterk zou toenemen zou het pakket regelmatig verversen moeten worden en het verminderen van porositeit.

4.2.3 Ammoniakemissies

Bij batch-compostering vinden de grootste ammoniakfluxen plaats in de eerste fase (ca. 1 week) van het composteringsproces. Doordat in vrijloopstallen continu verse mest en urine wordt uitgescheiden en 'toegevoegd' aan het bodempakket, zullen de ammoniakemissies meer verspreid plaatsvinden en nooit zo afnemen als bij een batch afbraakproces.

Volgens Szanto (2009) zijn de pH en temperatuur de belangrijkste factoren die het ammonium – ammoniak evenwicht richting ammoniak kunnen sturen. Met het stijgen van temperatuur neemt de ammoniakconcentratie in de poreuze deeltjes toe met een factor tien per 20 °C (bij gelijke pH waardes). Omdat bij hogere temperaturen meer verdamping en mogelijk meer natuurlijke convectie

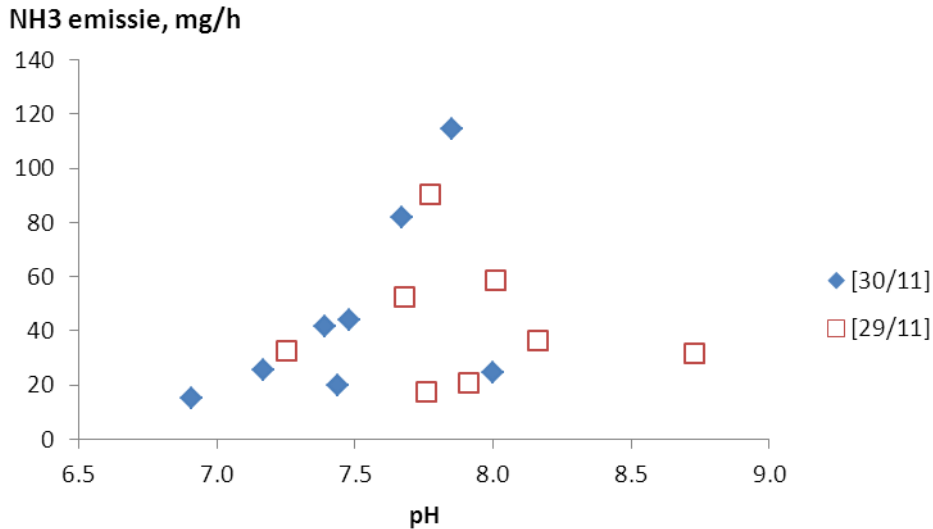
plaatsvindt, wordt dan veel meer ammoniak uit de compostbodem getransporteerd dan bij een proces met lagere temperaturen.

Tijdens de proef ging een hoge pH niet steeds gepaard met een hoge ammoniakemissie. Bij passief beluchte compostprocessen is het mogelijk dat de ammoniak in de vloeibare fase nog grotendeels ingebouwd is door de micro-organismen. Bij een hoge pH kunnen de ammoniumvoorraad of andere factoren in het pakket beperkend geweest zijn voor de vormings- en vervluchtigingsprocessen.

Tabel 13 Trends van procesparameters per variant

variant	T ontwikkeling	CO ₂ productie (meetbox)	O ₂ -gehalte in pakket	Afbraaksnelheid (oxitop)	C:N verhouding	porositeit
bodem Wiersma (belucht)	sterkste daling	<i>Laagste</i>	aanvankelijk laag	<i>zeer laag</i>		1 na laagste vol%lucht
bodem Havermans	1 na laagste T daalt tot bijna 0 na 7 dagen	hoog tov T verloop; wel consistent met oxitop	aanvankelijk laag	vrij hoog	1 na laagste C:N verhouding*	
loofhoutchips		<i>Lag</i>				
loofhoutchips (belucht)		<i>Lag</i>				
naaldhoutchips		<i>Medium</i>			erg hoog	
naaldhoutchips +turf		<i>Medium</i>			1 na hoogste	
naaldhoutchips +champost		<i>Medium</i>				
naaldhoutchips +voerresten	1 na sterkste stijging; na 5 dagen snelle daling	<i>aanv 1 na hoogste</i>		hoogste ->M		hoogste vol% lucht
naaldhoutchips +natuurhooi	sterkste stijging; na 5 dagen snelle daling	<i>aanv hoogste</i>		hoogste ->M		1 na hoogste vol% lucht
onbehandelde tunnelcompost	laagste T tot < 0 op dag 6	<i>aanv hoog itt parameters</i>	Limitierend		laagste C:N verhouding*	laagste vol% lucht

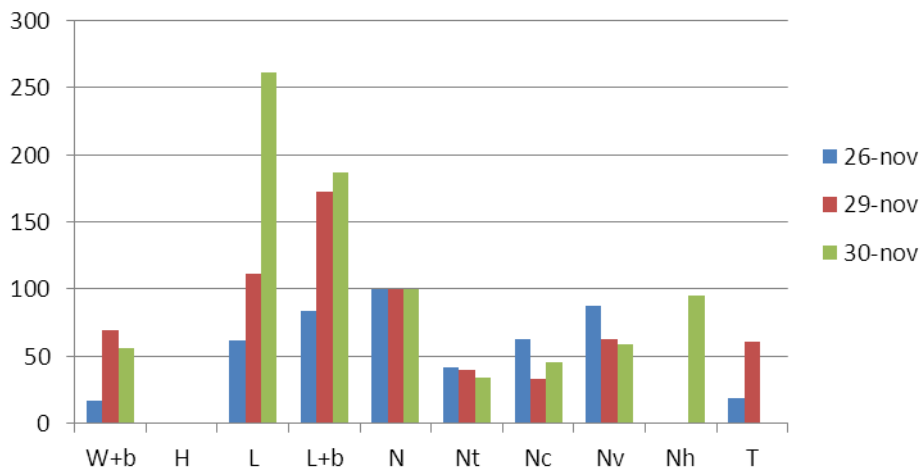
*tevens laag OS gehalte



Figuur 10 PH en gemeten ammoniakemissie van het compostpakket op 29/11 en 30/11

Conform de theorie stimuleren de hogere pH waarden de emissie van ammoniak. Ammoniakemissie is een proces gebaseerd op twee evenwichten (Szanto, 2009). De hydrolyserende organische stof produceert ammonium dat opgeslagen wordt in de vloeibare fractie van de composthoop. Het is in evenwicht met opgeloste ammoniak op basis van pH en temperatuur. Een hogere temperatuur en/of een hogere pH duwt het evenwicht in richting van ammoniakdominantie. Het belang hiervan is dat ammoniak snel vervluchtigt. Of dat gebeurt wordt bepaald door een tweede equilibrium. Dit bestaat tussen gasvormige en vloeibare ammoniak. Beluchting heeft een cruciale invloed op de partiële druk van ammoniak in de gasfase. Als beluchting ammoniak verwijdert vanuit het gas fase van de composthoop, zorgt dit dat de ammoniak vanuit de vloeibare fractie makkelijker overgaat in de gasfase en vervluchtigt. Figuur 4.1 geeft een goed beeld van het eerste deel van dit proces. Het is duidelijk te zien dat de hogere pH waarden geassocieerd zijn met hogere ammoniakemissies.

NH₃ emissie % t.o.v. kist 5



Figuur 11 Ammoniakemissie als percentage van de emissie van variant 5 op dezelfde datum. De emissies van N (kist met naaldhout) zijn ter vergelijking per datum op 100% gesteld.

Bij batch compostering van varkensmest zorgt een optimale C:N verhouding voor een lage ammoniak uitstoot in vergelijking tot een niet geoptimaliseerd compostbed (Szanto, 2009). Een optimale C:N verhouding bij mestcompostering is rond 25-40 (Rynk & Richard, 2001). Bij een C:N verhouding onder de 20 is er onvoldoende koolstof om het leeuwendeel van de ammoniumstikstof vast te houden in het

compostbed (via microbiële omzetting en nitrificatie) en bij een C:N verhouding boven de 40 is het gebrek aan stikstof beperkend voor de efficiënte omzetting van het organisch materiaal. Daarbij is het van belang dat niet alle koolstof maar alleen de biologisch beschikbare C telt, zoals gerapporteerd door Kayhanian en Tchobanoglous (1992) en Lopez-Real en Batista (1996). De koolstofverbindingen in houtachtige materialen zijn grotendeels vastgelegd door lignine dat in hoge mate bestand is tegen biologische afbraak. Mathur *et al.* (1990) bevestigt dat mest met daaraan toegevoegde C-rijke turf/veen met goede structureigenschappen (luchtigheid bevorderend) tot een sterke afname van de ammoniakvervluchting tijdens het composteringsproces leidde. In ons onderzoek vonden we dat de compostvariant met turf een lage initiële pH had en dat de pH lager bleef dan van de andere varianten. In het compostpakket met turf zou naast de vergrootte C-beschikbaarheid ook de lagere pH de lagere ammoniakemissie kunnen verklaren.

Vrijloopstallen met composterende bodems kunnen gezien worden als voor emissie en omzetting van organische stof geoptimaliseerde potstallen. Doordat er meer afbraak wordt teweeggebracht in een composterende vrijloopstalbodem, zal er waarschijnlijk meer emissie plaatsvinden dan in een potstalbodem. Hoewel het waarschijnlijk is dat ammoniakemissies vergelijkbaar of hoger uitvallen dan die van potstallen met stro, biedt de grotere mate van conversie die in vrijloopstallen mogelijk is goede perspectieven om hoge(re) emissies te voorkomen in volgende stappen (bijv. buitenopslag of gebruik op land) van de mestketen.

5 Conclusies & aanbevelingen

In de eerste fase van het onderzoek werd de geschiktheid van potentiële bodemmaterialen voor een composterende vrijloopstalbodems verkend. In de tweede fase werden tien bodemmengsels samengesteld en gecomposteerd om een beter begrip van emissie- en omzetkarakteristieken te verkrijgen.

Alle onderzochte materialen blijken deels geschikt te zijn vanuit het oogpunt van compostering. De houtafval-soorten zijn de meest geschikte materialen voor composterende vrijloopstalbodems. Dit komt omdat deze een goede porositeit en structuur bieden en naar verwachting het langste kunnen functioneren in de stal. De waarschijnlijk hoge cellulose en lignine inhoud zorgen voor de optimale (en langdurige) mechanische sterkte die de inklinking van de bodem vertraagt. De onderzochte houtchips zijn ook relatief goedkoop en goed beschikbaar.

Sommige materialen, zoals de turf, composten en verse voerresten en mesten, hebben een beperktere relevantie als basis voor de bodems, maar zijn zeker aan te raden als toevoeging bij houtafval bodems. Dit geldt vooral voor turf en rijpe compostsoorten die goede pH-bufferende en vochtopnemende eigenschappen hebben.

Er moet rekening worden gehouden met een variabele kwaliteit van bodemmaterialen. De samenstelling, aerobe activiteit en porositeit van de aangeleverde materialen kunnen in de praktijk fluctueren. Hiermee moet bij het managen van de stalbodems rekening worden gehouden.

In fase twee van het onderzoek werden tien bodemmengsels onderworpen aan een kort (acht dagen durende) compostingsonderzoek. Omzetting van organische stof, veranderingen in droge stof en nutriëntengehaltes en de porositeit werden onderzocht alsook de activiteit van het proces en de omvang van de geëmitteerde ammoniak en lachgas. Een lage omgevingstemperatuur en een hoge windsnelheid verlaagden de omzettingssnelheid in de compostingsprocessen. Hoewel de gemeten temperaturen wel vaker voorkomen in de praktijk, kan de korte duur van het onderzoek geleid hebben tot minder genuanceerde verschillen tussen de varianten.

Door actief beluchten nam de ammoniakemissie toe, waarschijnlijk wordt ammoniak letterlijk uit het pakket geblazen ofwel weggevoerd met de doorstromende lucht. Beluchten moet daarom uit oogpunt van emissies beperkt worden toegepast, alleen als het compostingsproces geremd wordt door onvoldoende zuurstof in het pakket. Periodieke beluchting - korte periode(s) per dag - kunnen zowel de afbraak als de emissies beïnvloeden. Compostering met passieve beluchting heeft een andere dynamiek. Dit vereist een voldoende poreuze bedstructuur. Een beheersmaatregel voor het optimaal houden van de bodem is het omzetten en mengen van de bovenlaag. In de praktijk betekent dit de bovenste 30 cm van de stalbodems. Aanbevolen wordt om te onderzoeken of het mogelijk is (zowel technisch als economisch) om de bewerkingsdiepte te vergroten.

Bij de compostvariant met loofhoutchips was er minder warmteontwikkeling dan bij die met naaldhoutchips; aangezien het hier slechts om een batch van beide varianten gaat kan deze bevinding niet gegeneraliseerd worden. Toevoeging van turf aan een mengsel van naaldhoutchips, mest en urine van melkkoeien resulteerde in een lagere pH in het compostpakket, een sterkere warmteontwikkeling (hogere T in pakket) en een lagere ammoniakemissie dan hetzelfde mengsel zonder de turf. Vanwege de gunstige effecten wordt geadviseerd om het nut van turf als toevoegingsmateriaal verder te onderzoeken. Toevoeging van champost, voerresten of hooi aan het mengsel van naaldhoutchips, mest en urine resulteerde – in mindere mate dan bij turf - ook in een meer gunstige temperatuurontwikkeling dan zonder deze toevoegingen.

Een belangrijk signaal is dat bij de minder stabiele voerresten significante lachgasemissiefluxen werden gemeten. Lachgasemissies moeten een aandachtspunt blijven bij toekomstige onderzoeken, omdat ogenschijnlijk geringe emissies per dag toch een significant broeikasgaseffect kunnen betekenen op de lange termijn. Het nauwkeurig meten van lachgasemissies vereist een verfijning van de meetmethode.

De compostering in vrijloopstalbodems is een zeer dynamisch proces doordat continue vers materiaal wordt toegevoegd en omzettingen in het verse en oudere materiaal met verschillende afbraaksnelheden plaatsvinden. Daarom is monitoring van temperatuur en O₂ gehalte in het pakket aan te raden in de praktijk.

Vrijloopstallen bieden een interessante combinatie van afval- en mestcompostering, maken een interessante nutriënten-kringloop mogelijk en verhogen de kans op optimaal dierenwelzijn in de stal.

Belangrijke uitdaging is om de emissies op een laag niveau beheersbaar te maken. Wellicht kan dit op termijn door de meest gevoelige materiaal- en procesparameters te identificeren en die bij bodems in de praktijk te kwantificeren. Belangrijke emissiebeperkende substraatfactoren zijn het verzorgen van een lage pH in de bodem en het toevoegen van C-rijke bodemstoffen. Dit is mogelijk met turf en andere (mogelijk houtachtige) materialen. De meest cruciale procesfactor voor emissiebeperking is het behouden van een poreuze bodem met voldoende zuurstof. Dit kan gerealiseerd worden met beperkte, actieve beluchting van de bodem en/of het gebruik van een bodemmateriaal met veel mechanische sterkte.

Het onderzoeken van de meest geschikte materialen op biopolymeersamentelling en verder onderzoek naar de combinatie van (naald)houtchips en turf wordt aanbevolen. Ook lange termijn composteringsonderzoek(en) met focus op het effect van het proces op de inklinking, de gerelateerde luchttoevoer en emissies wordt aanbevolen. Diepgaander onderzoek naar de effecten van periodieke actieve beluchting en de mogelijkheid van dieper mengen/omzetten bij passief beluchting is eveneens raadzaam. Tenslotte wordt vergelijkend onderzoek naar ammoniak- en lachgasemissies uit stal én opslag van ligboxen-, pot- en vrijloopstallen geadviseerd.

Praktische aanbevelingen

Op basis van het gerapporteerde onderzoek en eerder composteringsonderzoek zijn factoren die het composteringsproces verbeteren en factoren die de ammoniakemissie beperken samengevat:

Factoren die composteringsproces verbeteren	Hoe
Voldoende zuurstof in bodem	sterk poreus bodemmateriaal gebruiken, en/of toplaag één of twee maal daags bewerken, en/of (beperkt) actief beluchten
Poreuze bodem	Ligninerijk materiaal, bijvoorbeeld houtafvalsoorten
Factoren die emissie beperken	Hoe
Lage pH bodem	Toevoegen van turf, evt. veenrijke bagger
Voldoende binding door hoge C:N	Koolstofrijke materialen

Op basis van het hier gerapporteerde onderzoek en eerder composteringsonderzoek kunnen we voor compostierende vrijloopstalbodems de volgende aanbevelingen doen:

- Kies bij aanvang een stabiel, poreus uitgangsmateriaal dat niet snel inklinkt als basis (grove structuur);
- Houtafvalmaterialen hebben een hoge cellulose en lignine inhoud die zorgen voor goede, langdurige mechanische sterkte en die inklinking van de bodem vertraagt;
- Voeg eventueel een beperkte hoeveelheid sneller afbreekbaar (maar niet te nat) materiaal toe bij de opstart;
- Overweeg een dagelijkse dosering van turf, veenrijke bagger of ander materiaal dat C-rijk, vocht absorberend en poreus is en pH verlagend geeft;
- Zorg voor een goede passieve beluchting of een minimale actieve beluchting;
- Door veel te ventileren kan meer vocht afgevoerd worden uit het pakket; daarbij kan echter ook te veel warmte afgevoerd worden waardoor het pakket afkoelt en de verdamping afneemt;
- Gehalten van geleverde materialen kunnen sterk variëren; laat geleverde partijen analyseren en vraag garanties van de leverancier;
- De feces en urineproductie van melkkoeien (hoeveelheid en gehalten) zijn afhankelijk van het rantsoen en de daarmee aangevoerde hoeveelheid vocht, stikstof, koolstof en andere nutriënten kunnen het composteringsproces beïnvloeden;
- De oppervlakte per koe en het gebruik van strooisel moet afgestemd worden op de verdamping en hygiëne. Als er te weinig oppervlakte per koe beschikbaar is, zal er teveel vocht uit urine en feces in het bodempakket ophopen en vernat de bodem, tenzij er veel wordt bijgestrooid;
- Door regelmatig de temperatuur en het O₂ gehalte in het pakket te meten (eventueel met sensoren) kan een vinger aan de pols gehouden worden en zo nodig bijgestuurd worden.

6 Referentielijst

- Barberg, A.E., Endres, M.I., Janni, K.A., 2007.** Compost Dairy Barns in Minnesota: A Descriptive Study. *Applied Engineering in Agriculture*. Vol. 23(2): 231-238.
- Dooren, H.J.C. van, Galama, P., Smits, M.C.J., Ouweltjes, W., Driehuis, F. en S. Bokma, 2011.** Bodems voor vrijloopstallen. Praktijkexperimenten op 3 proefbedrijven. Wageningen UR Livestock Research rapport 411, in druk.
- Galama, P., 2011.** Perspectief vrijloopstallen melkvee. Boek 16, Wageningen UR Livestock Research, Wageningen, the Netherlands.
- Haug, R.T., 1993.** The practical handbook of compost engineering. Lewis Publishers, USA, 717 pp.
- Kayhanian, M. & Tchobanoglous, G., 1992.** Computation of C/N ratios for various organic fractions. *Biocycle* 33 (5): p 58-60
- Lopez-Real, J. & Baptista, M., 1996.** A preliminary comparative study of three manure composting systems and their influence on process parameters and methane emissions. *Compost Science and Utilization* 4 (3): p 71-82.
- Mathur, S. P., N. K. Patni, Levesque, M. P., 1990.** Static pile, passive aeration composting of manure slurries using peat as a bulking agent. *Biological Wastes* 34 (4): p323-333
- Mosier, A., Kroeze, C., 2000.** Potential impact on the global atmospheric N₂O budget of the increased nitrogen input required to meet future global food demands. *Chemosphere - Global Change Science*, Vol. 2(3-4), p465-473.
- Mosquera Losada, J., Kasper, G.J., Blanken, K., Dousma, F., Aarnink, A.J.A., 2010.** Ontwikkeling snelle meetmethode ter bepaling van ammoniakemissiereductie van vloergebonden maatregelen. Wageningen UR Livestock Research rapport 291
- Rudrum, D., 2005.** Innovations in composting pig manure. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands. 170 pp.
- Rynk, R. & Richard, T. L., 2001.** Commercial compost production systems. In: *Compost Utilization in Horticultural Cropping Systems*, p 51-93. JG Press Inc, USA.
- Shane, E.M., Endres, M.I., Russelle, M.P., Rosen, C.J., Johnson, D.G., 2007.** Compost: A Potential Value-Added Product for Daily Operations? *Applied Engineering in Agriculture*. Vol. 27(2):225-233.
- Shane, E.M., Endres, M.I., Janni, K.A., 2010.** Alternative Bedding Materials for Compost Bedded Pack Barns in Minnesota: A Descriptive Study. *Applied Engineering in Agriculture*. Vol. 26(3): 465-473.
- Smits, M.C.J. en A.J.A. Aarnink, 2009.** Verdamping uit ligbodems voor vrijloopstallen: oriënterende modelberekeningen, Rapport 230, Animal Sciences Group, Lelystad, 13 p.
- Smits, M.C.J., F. Dousma, G.C.C. Kupers, K. Blanken, 2009.** Oriënterend laboratoriumonderzoek naar ammoniakemissie uit bodempakketten voor vrijloopstallen, Rapport 231, Animal Sciences Group, Lelystad, 18 p.
- Szántó, G., 2000.** Passively Aerated Composting of Pig Manure-Straw Mixture From Organic Farming: Effect of Heap Turning. Dept of Environmental Technology. Wageningen University, p73.
- Szántó, G., 2009.** NH₃ dynamics in composting. Assessment of the integration of composting in manure management chains. PhD thesis, Wageningen University, Wageningen, the Netherlands, 140 pp.

Veeken, A., Szántó, G., 2001. Extensieve compostering van geitenpotstalmest van biologisch dynamisch landbouwbedrijf 'Gerbrandastate'. Dept of Environmental Technology - Wageningen University, p27.

Veeken, A., Adani, F., Nierop, K., De Jager, A., Hamelers, B., 2001. Degradation of biomacromolecules during high-rate composting of wheat straw-amended feces. Journal of Environmental Quality 30, p1675-1684.

Veeken, A., Szántó, G. 2002. Extensieve compostering van varkensmest uit de biologische varkenshouderij op bedrijfsniveau. Dept of Environmental Technology, Wageningen University and Researchcentre: p52.

Veeken A.H.M., Wilde de V., Hamelers H.V.M., Moolenaar S.W. and Postma R. 2003. Oxitop Measuring System for Standardised Determination of the Respiration Rate and N-Mineralisation Rate of Organic Matter in Waste Material, Compost and Soil, Wageningen University & NMI, 13 pp.
[http://www.blgg.nl/sites/nmi/nl/nmi.nsf/dx/Oxitop.pdf/\\$file/Oxitop.pdf](http://www.blgg.nl/sites/nmi/nl/nmi.nsf/dx/Oxitop.pdf/$file/Oxitop.pdf)

Bijlagen

Bijlage 1 Foto's van diverse bodemmaterialen in monsterzakken.



Beukenchips en dennenchips



Dennenpins en klam dennenzaagsel



Boxcompost bact en loofsnoei zonder blad



Els/wilg loofsnoei (met blad) en loofhoutchips



Papiersnippers

Bijlage 2A Karakteristieke eigenschappen van de gebruikte compostmaterialen, inclusief de respiratiesnelheden op basis van droge en organische stof gehalten (Gesorteerd van lage naar hoge respiratiesnelheden)

Monster	DS	OS	Respiratiesnelheid	Respiratiesnelheid			C:N verhouding	As
	(g/kg)	(g/kg)	(mg O ₂ /g DS/d)	(mg O ₂ /g OS/d)	N, g/kg ds	C, g/kg ds		g/kg
Halcompost recro	679	170	0.9	3.5	13.7	152.3	11.1	509
Boxcompost met bact	856	152	0.9	4.8	8.4	95.6	11.4	704
Boxcompost zonder bact	746	214	3.7	13.1	11.1	135.2	12.2	532
Tunnelcompost, gehygieenseerd	816	203	1.6	6.5	10.8	120.8	11.2	613
Tunnelcompost, niet gehygieenseerd	732	203	4.4	15.7	12.7	154.2	12.1	529
Verhitte champost	407	236	11.4	19.7	24.5	307.6	12.6	171
Champost onverhit	392	232	13.5	22.7	25	310.2	12.4	160

Oxitop bepalingen door
BLGG, Oosterbeek

C- en N- gehalte bepaald door
BLGG, Oosterbeek

Bijlage 2B Karakteristieke eigenschappen van de gebruikte bodemmaterialen, inclusief de respiratiesnelheden op basis van droge en organische stof gehalten (Gesorteerd van hoge naar lage respiratiesnelheden)

Categorie	Monster	DS		OS		Respiratiesnelheid		Respiratiesnelheid		N, g/kg ds	C, g/kg ds	C:N verhouding	As g/kg
		(g/kg)		(g/kg)		(mg O ₂ /g DS/d)		(mg O ₂ /g OS/d)					
Voerrest	Voerrest grasrantsoen	281 ± 8		248 ± 6		67.6		76.6		27.5	442.6	16.1	33
Mest	Verse paardenmest	239 ± 3		175 ± 13		42.3		57.8		13.2	141.6	10.7	64
Voerrest	Voerrest gras/maïsrantsoen	383 ± 9		342 ± 9		9.1*	20.6**	10.1*	23.1**	26.3	445.1	16.9	41
Mest	Vijzelpersmest, vers	284 ± 0.6		249 ± 0.5		12.1		13.8		17.6	440.5	25.0	35
Hout	Els/wilg loofsnoei (met blad)	448 ± 2		433 ± 1		7.3		7.6		Nb	Nb	nb	15
Hout	Loofhoutchips	432 ± 9		421 ± 12		2.4		2.4		nb	Nb	(377)	11
Hout	Loof-snoei (zonderblad)	510 ± 5		492 ± 3		1.7		1.8		Nb	Nb	Nb	18
Compost	Compost Bodem Wiersma	489 ± 8		404 ± 11		1.1		1.3		Nb	nb	(14.3)	85
Voer	Natuurhooi	826 ± 12		793 ± 6		1		1.1		14	462	33.0	33
Hout	Klamdennenzaagsel	513 ± 1		512 ± 1		0.5		0.5		< 1.1	503.8	>458	1
Hout	Dennenpins	556 ± 4		555 ± 4		0.5		0.5		1.4	499.2	357	1
Hout	Dennenchips	502 ± 37		501 ± 37		0.4		0.4		Nb	Nb	Nb	1
Hout	Naaldhoutchips	683 ± 28		680 ± 28		0.4		0.4		nb	Nb	(302)	3
Turf	Tuinturf	275 ± 2		265 ± 2		0.2		0.2		13.4	556	41.5	10
Turf	Turfstrooisel	276 ± 3		258 ± 8		0.1		0.1		10	496.7	49.7	18
Hout	Beukenchips, droog, gezakt	875 ± 0.1		871 ± 0.1		0		0		nb	Nb	Nb	4
Papier	Papiersnippers houtvrij	889 ± 2		683 ± 3		0		0		nb	nb	Nb	206

Oxitop bepalingen uitgevoerd door
LEAF, Wageningen

C- en N- gehalte bepaald
door BLGG, Oosterbeek

Bijlage 3 Hoeveelheden van de diverse materialen per compostvariant

Nr.	VARIANT	Vulhoogte in kist	Gewicht uitgangsmateriaal	Turf	Champost	Voerresten	Natuurhooi	Gewicht uitgangsmateriaal inclusief extra stof (8 cm)	Verse vijzelpers mest	Oude vijzelpersmest	Drijfmest	Water (toegeegd bij 20 °C)
		cm	kg	cm	cm	cm	cm	kg	kg	kg	kg	kg
1	Bodem Wiersma (belucht)	72	513	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	Bodem Havermans	72	840	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	Loofhoutchips	72	393	0	0	0	0	0	12.8	16.5	20	0
4	Loofhoutchips (belucht)	72	378	0	0	0	0	0	12.8	16.5	20	0
5	Naaldhoutchips	72	402	0	0	0	0	0	12.8	16.5	20	0
6	Naaldhoutchips(+turf)	64	371	8*	0	0	0	415	12.8	16.5	20	0
7	Naaldhoutchips(+champost)	64	368	0	8*	0	0	410	12.8	16.5	20	0
8	Naaldhoutchips(+voerresten)	64	369	0	0	8*	0	388	12.8	16.5	20	0
9	Naaldhoutchips(+natuurhooi)	64	365	0	0	0	8*	369	12.8	16.5	20	20
10	Onbehandelde tunnelcompost	72	521	0	0	0	0	0	12.8	16.5	20	30

Bijlage 4A Eigenschappen van de dagelijks toegevoegde drijfmest op basis van chemische monster-analyses

Toevoeging op	Totaal-N g/kg	Totaal-K g/kg	Ammonium-N g/kg	Droge stof g/kg	Ruw as g/kg	Totaal-C g/kg	C:N	OS g/kg	OS %DS	Ammonium-N %N _{totaal}	K:N*
22-11-2010**	4.93	6.76	2.46	90.5	22.8	39.3	8.0	67.7	74.8	49.8	1.4
23-11-2010	4.60	2.72	0.680	118	17.2	56.9	12.4	100.6	85.4	14.8	0.6
24-11-2010	5.00	1.79	0.427	130	17.1	62.3	12.5	112.7	86.8	8.5	0.4
25-11-2010	4.88	1.37	0.328	135	16.5	68.0	13.9	118.8	87.8	6.7	0.3
26-11-2010	5.11	1.43	0.425	133	15.4	68.1	13.3	117.4	88.4	8.3	0.3
27-11-2010	5.15	2.80	0.513	138	19.4	66.6	12.9	118.5	85.9	10.0	0.5
28-11-2010	5.59	4.43	1.26	141	23.3	64.7	11.6	117.3	83.4	22.5	0.8
29-11-2010	4.91	1.96	0.434	126	17.5	61.5	12.5	108.8	86.2	8.8	0.4
Gemiddeld	5.02	2.91	0.81	126.4	18.7	60.9	12.1	107.7	84.8	16.2	0.58

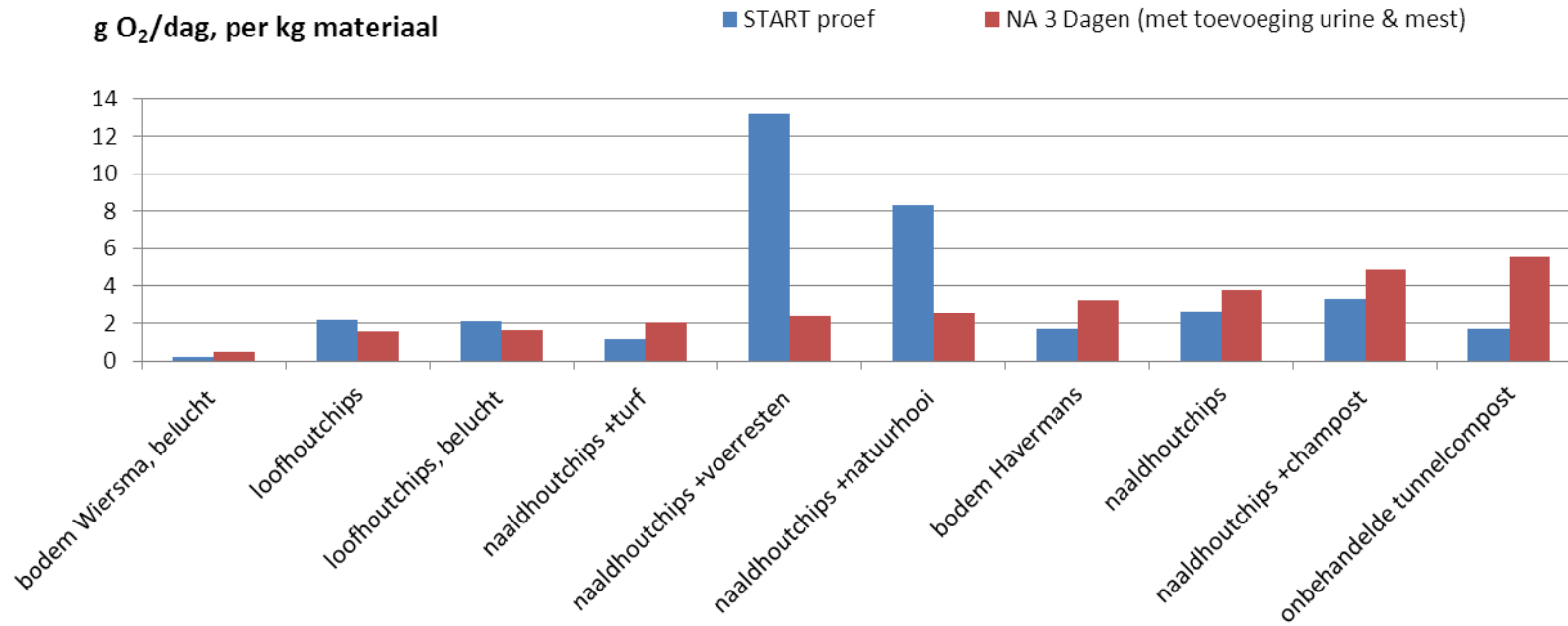
* K:N is het kalium:stikstof verhouding; kalium wordt normaliter 85-95% verteerd en de overmaat wordt via de urine uitgescheiden; een ruimere K:N verhouding kan er mede op duiden dat er relatief veel urine in de drijfmest zit.

** Op 22/11 was de toegevoegde drijfmest dunner (minder droge stof, meer water) en dit bevatte meer ammonium en minder organische stof dan in de navolgende dagen; waarschijnlijk was er meer urine en minder feces in de toegevoegde drijfmest op 22/11.

Bijlage 4B Eigenschappen van de dagelijks toegevoegde urine op basis van chemische monster-analyses

Datum	Totaal-N g/kg	Ammonium-N g/kg	Droge stof g/kg	As g/kg	Totaal-K g/kg
23-11-2010	6.83	0.0402	50.0	26.9	11.3
24-11-2010	6.98	0.0594	49.8	26.8	10.2
25-11-2010	7.05	0.0408	52.4	29.8	12.3
26-11-2010	6.86	0.0443	52.0	28.2	11.7
27-11-2010	6.81	0.0749	50.5	28.0	11.4
28-11-2010	6.38	0.0492	45.1	26.6	11.6
29-11-2010	7.30	0.155	52.5	28.1	11.4
Gemiddeld	6.89	0.07	50.3	27.8	11.4

Bijlage 5 De respiratiesnelheid van de verschillende bodemvarianten (Oxitop-methode) op 23/11 (dag 1) en 26/11 (dag 4 van de proef)



Bijlage 6 Droge en organische stof gehalten en zuurstofverbruik volgens Oxitop bepaling bij aanvang (boven) en op dag 3 (onder) van het experiment

	DS	(g/kg)	OS	(g/kg)	(mgO ₂ /gDS/d)	(mgO ₂ /gOS/d)	Ranking
Bodem Wiersma, belucht	514 ±	3	418 ±	5	0.5	0.6	10
Bodem Havermans	569 ±	1	147 ±	4	3	11.7	3
Loofhoutchips & mest	373 ±	11	358 ±	11	5.8	6.1	7/8
Loofhoutchips & mest, belucht	355 ±	13	343 ±	13	5.9	6.1	7/8
Naaldhoutchips & mest	415 ±	2	404 ±	0	6.3	6.5	6
Naaldhoutchips & mest +turf	395 ±	8	382 ±	5	2.9	3	9
Naaldhoutchips & mest +champost	383 ±	3	295 ±	4	8.8	11.3	5
Naaldhoutchips & mest +voerresten	426 ±	2	397 ±	4	31	33.2	1
Naaldhoutchips & mest +natuurhooi	346 ±	0	333 ±	0	23.9	24.9	2
Onbehandelde Tunnelcompost & mest	456 ±	13	149 ±	3	3.7	11.4	4

Bodemvariant	DS	(g/kg)	OS	(g/kg)	(mgO ₂ /gDS/d)	(mgO ₂ /gOS/d)
Bodem Wiersma, belucht	489 ±	4	361 ±	2	0.9	1.3
Bodem Havermans	585 ±	6	147 ±	1	8.3	33
Loofhoutchips	391 ±	12	380 ±	13	4	4.1
Loofhoutchips, belucht	403 ±	15	395 ±	15	4	4.1
Naaldhoutchips	418 ±	1	409 ±	0	9.1	9.3
Naaldhoutchips +turf*	381 ±	1	370 ±	1	5.4	5.6
Naaldhoutchips +champost	402 ±	9	383 ±	10	12.2	12.8
Naaldhoutchips +voerresten*	407 ±	7	393 ±	9	5.8	6
Naaldhoutchips +natuurhooi	353 ±	5	338 ±	5	7.2	7.6
Onbehandelde Tunnelcompost	619 ±	14	217 ±	9	8.9	25.5

Variante 6&8 kregen turf of voerrest dagelijks toegevoegd; ** 1^{ste} waarde: Snelheid in de tijdsperiode 0.02-0.07 dag; ** 2^{de} waarde: Snelheid in de tijdsperiode 0.20-0.40 dag

Bijlage 7 Verloop van de N, C, en C:N-gehalten en de porositeit tijdens het loop van de composteringsproces per kist

