



---

# Mineralisatie van koolstof uit rundveedrijfmest met toenemende ouderdom na mengen met zandgrond

Herman de Boer

Openbaar  
Rapport 1430



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH

---



# Mineralisatie van koolstof uit rundveedrijfmest met toenemende ouderdom na mengen met zandgrond

Herman de Boer

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Livestock Research en gefinancierd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, binnen het KennisBasisproject 'Ontwikkeling van een evaluatiekader voor (de productie van) organische meststoffen' (KB-34-001-002)

Wageningen Livestock Research  
Wageningen, juni 2023

---

Rapport 1430

---

De Boer, H.C., 2023. *Mineralisatie van koolstof uit rundveedrijfmest met toenemende ouderdom na mengen met zandgrond*. Wageningen Livestock Research, Openbaar Rapport 1430.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/632035> of op [www.wur.nl/livestock-research](http://www.wur.nl/livestock-research) (onder Wageningen Livestock Research publicaties).



Dit werk valt onder een Creative Commons Naamsvermelding-Niet Commercieel 4.0 Internationaal-licentie.

© Wageningen Livestock Research, onderdeel van Stichting Wageningen Research, 2023

De gebruiker mag het werk kopiëren, verspreiden en doorgeven en afgeleide werken maken. Materiaal van derden waarvan in het werk gebruik is gemaakt en waarop intellectuele eigendomsrechten berusten, mogen niet zonder voorafgaande toestemming van derden gebruikt worden. De gebruiker dient bij het werk de door de maker of de licentiegever aangegeven naam te vermelden, maar niet zodanig dat de indruk gewekt wordt dat zij daarmee instemmen met het werk van de gebruiker of het gebruik van het werk. De gebruiker mag het werk niet voor commerciële doeleinden gebruiken.

Wageningen 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 Livestock Research is NEN-EN-ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Op al onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Openbaar Wageningen Livestock Research Rapport 1430

---

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Materiaal &amp; methoden</b>	<b>8</b>
	2.1 Proefopzet	8
	2.2 Proefuitvoering	8
	2.2.1 Grondverzameling en grondanalyse	8
	2.2.2 Mestverzameling en mestanalyse	8
	2.2.3 Incubatie en respiratiemetingen	10
	2.2.4 Berekeningen	10
	2.2.5 Statistische analyse	11
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>12</b>
	3.1 Samenstelling grond en mest	12
	3.2 Koolstofrespiratie uit grond en mest	15
	3.2.1 Grond	15
	3.2.2 Drijfmest met toenemende opslagduur	15
	3.2.3 Drijfmest met of zonder spoorelementen	17
	3.2.4 Drijfmest gemengd met zandgrond of zilverzand	18
	3.2.5 Zandgrond met of zonder kaliumcarbonaat	20
	3.3 Overblijvende koolstof	21
	3.3.1 Grond	21
	3.3.2 Drijfmest met toenemende opslagduur	21
	3.3.3 Invloed van vluchtige vetzuren	23
	3.3.4 Drijfmest met of zonder spoorelementen	23
	3.3.5 Drijfmest gemengd met zandgrond of zilverzand	24
	3.3.6 Zandgrond met of zonder kaliumcarbonaat	25
	3.3.7 Aerobe incubatie vergeleken met anaerobe opslag	26
<b>4</b>	<b>Discussie</b>	<b>27</b>
	4.1 Veranderingen in mest tijdens opslag	27
	4.2 Mestouderdom en overblijvende koolstof	27
	4.3 Koolstof in VFA en overblijvende koolstof	27
	4.4 Dissociatie van anorganische koolstof uit mest	28
	4.5 Remming en priming	28
	<b>Conclusies</b>	<b>29</b>
	<b>Dankwoord</b>	<b>30</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>31</b>
	<b>Bijlage</b>	<b>32</b>



---

# Samenvatting

In de Nederlandse melkveehouderij is de ligboxenstal met roostervloer en drijfmestproductie het dominante huisvestingssysteem. Tijdens opslag van drijfmest in de kelder wordt organische stof (OS) in drijfmest onder grotendeels zuurstofloze omstandigheden omgezet en afgebroken, en gaat een deel van de koolstof (C) verloren als koolstofdioxide en methaan. Hoe langer de mest wordt opgeslagen, en hoe ouder de mest daarbij wordt, des te minder OS en C aan de bodem kan worden toegevoegd. Tijdens de opslag neemt niet alleen de hoeveelheid OS af, maar kan ook het gehalte aan vluchtige vetzuren ('volatile fatty acids'; VFA) aanzienlijk toenemen. Een toename in VFA-gehalte kan na toediening van drijfmest de mineralisatie van bodem-C stimuleren, een proces dat bekend staat als 'priming'. Priming kan leiden tot een overschatting van de mineralisatie van drijfmest-C wanneer de extra mineralisatie van grond-C aan de drijfmest wordt toegeschreven, iets dat bij incubatieonderzoek in het laboratorium vaak onvermijdelijk is. Een tegenovergesteld effect, onderschatting van de mineralisatie van drijfmest-C, kan worden veroorzaakt door urine in de drijfmest, die de mineralisatie van grond-C (tijdelijk) kan remmen.

Om de bijdrage van bovenstaande effecten beter in beeld te krijgen, is onderzoek uitgevoerd aan de C-mineralisatie van drijfmest bij een toenemende opslagduur. De hypothese was dat een hoger VFA-gehalte in de mest, bijvoorbeeld als gevolg van langere opslagduur, zou leiden tot meer mineralisatie van grond-C en (ogenschijnlijk) minder overblijvende C uit de mest. Deze hypothese is in het laboratorium onderzocht in een incubatieproef (bij 20°C) met herhaalde meting van de CO<sub>2</sub>-respiratie na het wel of niet mengen van een zandgrond met rundveedrijfmest met een opslagduur die toenam van 0 tot 119 dagen. De C-mineralisatie tijdens de proefperiode werd afgeleid van de CO<sub>2</sub>-respiratie. Rundveedrijfmest met een toenemende ouderdom werd verzameld uit een opslagproef waarin vers verzamelde drijfmest voor een periode van vier maanden werd opgeslagen (bij 17-18°C) en een tot twee keer per week bemonsterd. Aan de proefopzet van de incubatieproef werden drie extra behandelingen toegevoegd: 1) een behandeling waarbij de toediening van drijfmest werd gecombineerd met spoorelementen, om een eventueel effect van een gebrek aan spoorelementen op de C-mineralisatie van de mest vast te stellen; 2) een behandeling met toediening van kaliumcarbonaat aan de zandgrond, om een indicatie te krijgen van de bijdrage van toegediende carbonaten (uit drijfmest) aan de gemeten C-respiratie; en 3) een behandeling met toediening van drijfmest aan mineraal zand in plaats van zandgrond, om de C-mineralisatie uit alleen drijfmest te meten, zonder effecten van de mest op de mineralisatie van grond-C.

Uit de resultaten van de opslagproef blijkt dat tijdens de vier maanden opslag het gehalte OS en C-totaal afnam met respectievelijk 20% en 22%. In dezelfde periode waren er minimale veranderingen in gehalte N-totaal (+2%) en P-totaal (+1%), waaruit blijkt dat er tijdens opslag vrijwel geen N-verlies was (N-gehalte) en dat de mest bij monsternamen goed was gemengd (P-gehalte). Het aandeel NH<sub>4</sub>-N in totaal-N nam tijdens de opslag toe van 40% tot 53%, als gevolg van mineralisatie van organische N. Het VFA-gehalte nam vanaf dag 0 tot dag 77 toe van 2,9 tot 11,3 g VFA kg<sup>-1</sup>, daalde daarna tot 9,3 g VFA kg<sup>-1</sup> op dag 91, en bleef vervolgens stabiel tijdens de rest van de opslagperiode.

Een hoger aandeel VFA-C in drijfmest-C gaf tijdens incubatie niet meer mineralisatie van drijfmest-C. De overblijvende drijfmest-C na toediening aan grond leek vooral te worden bepaald door de hoeveelheid C-mineralisatie tijdens opslag. Dit beeld werd echter vertekent door de remmende invloed van urine in de drijfmest op de mineralisatie van grond-C. Zonder deze remmende invloed, zoals blijkt uit de mineralisatie van drijfmest (met 42 dagen opslag) toegediend aan zilverzand, mineraliseerde er tijdens 74 dagen (aerobe) incubatie 1,9 keer meer C vergeleken met 74 dagen verdere (anaerobe) opslag. Bij oudere mest mineraliseerde er relatief wat minder van de toegediende C dan bij jongere mest, en het percentage overblijvende C was 5 procentpunt lager voor mest die 116 dagen in opslag was geweest vergeleken met mest die 1,5 dag in opslag was geweest. Hierdoor was het initiële verschil in toegediende C van 19%, als gevolg van 114 dagen extra opslag, na zes maanden incubatie afgenomen tot 13% verschil in overblijvende C in de grond.

---

Bij de behandeling met kaliumcarbonaat dissocieerde maximaal 9% van de toegediende makkelijk oplosbare anorganische C, een hoeveelheid die gelijkstond aan gemiddeld 1,0% van met drijfmest toegediende C. Dissociatie van carbonaten uit drijfmest droeg daarmee in deze proef slechts in beperkte mate bij aan de gemeten C-mineralisatie. Tot slot had toediening van sporelementen (B, Mn, Cu, Zn, en Co) in combinatie met Fe(EDTA) vrijwel geen effect op de mineralisatie van drijfmest-C.



---

# 1 Inleiding

In de Nederlandse melkveehouderij is de ligboxenstal met roostervloer en drijfmestproductie het dominante huisvestingssysteem. Tijdens opslag van drijfmest in de kelder onder de vloer wordt organische stof (OS) in drijfmest onder grotendeels zuurstofloze omstandigheden omgezet en afgebroken, en gaat een deel van de koolstof (C) verloren als koolstofdioxide en methaan. Hoe langer de mest wordt opgeslagen, en hoe ouder de mest daarbij wordt, des te minder OS (en C) aan de bodem kan worden toegevoegd. Voor het bepalen van de waarde van drijfmest als OS-bron voor de bodem is het van belang om te weten welk effect opslagduur (veroudering) heeft op de mestsamenstelling en op de afbraak van OS in de bodem.

Tijdens opslag neemt niet alleen de hoeveelheid OS af, maar kan ook het gehalte vluchtige vetzuren ('volatile fatty acids'; VFA) aanzienlijk toenemen. Deze VFA kunnen na toediening aan de bodem, en de overgang van zuurstofarme naar zuurstofrijke omstandigheden, snel afbreken (Kirchmann & Lundvall, 1993) en daarbij de mineralisatie van bodem-C stimuleren, een proces dat bekend staat als 'priming' (Angers et al., 2010; Fangueiro et al., 2007). Priming kan leiden tot een overschatting van de mineralisatie van drijfmest-C wanneer de extra mineralisatie van grond-C aan de drijfmest wordt toegeschreven, iets dat bij incubatieonderzoek in het laboratorium vaak onvermijdelijk is. Uit eerder laboratoriumonderzoek blijkt dat het percentage overblijvende C uit rundveedrijfmest na een half jaar incubatie (grotweg een jaar bij veldtemperatuur) sterk kan variëren, van 35% tot 90% (De Boer, 2013, 2020, 2021, 2023). Percentages overblijvende C uit rundveedrijfmest van 30-40% (o.a. De Boer, 2013) lijken minder realistisch, omdat dit zou betekenen dat de koe een aanzienlijk deel van de makkelijk mineraliseerbare C in het voer niet heeft opgenomen maar met de mest uitgescheiden. Deze lage percentages zijn daarmee mogelijk eerder het gevolg van priming van grond-C. Een relevante vraag is onder welke omstandigheden deze priming optreedt en hoe groot de bijbehorende overschatting is. Omdat bij het ouder worden van de mest het VFA-gehalte kan toenemen, is een andere vraag of bij oudere mest deze overschatting groter is.

Naast stimulering kan de mineralisatie van grond-C ook worden geremd, bijvoorbeeld door de urine in drijfmest, en kan de mineralisatie van drijfmest-C daardoor worden onderschat (De Boer, 2023). In onderzoek van De Boer (2023) varieerde, na correctie voor het remmende effect van de urine, het geschatte percentage overblijvende C van 53% tot 67% in plaats van 80% tot 91%.

Om de bijdrage van bovenstaande effecten beter in beeld te krijgen, is onderzoek uitgevoerd aan de C-mineralisatie van drijfmest bij een toenemende opslagduur. De hypothese was dat een hoger VFA-gehalte in de mest, bijvoorbeeld als gevolg van langere opslagduur, zou leiden tot meer mineralisatie van grond-C en (ogenschijnlijk) minder overblijvende C uit de mest.

---

## 2 Materiaal & methoden

### 2.1 Proefopzet

De hypothese werd onderzocht in een incubatieproef met herhaalde meting van de CO<sub>2</sub>-respiratie na het mengen van een zandgrond met rundveedrijfmest met een toenemende opslagduur c.q. ouderdom. Deze drijfmest was verzameld uit een proef waarbij een partij vers samengestelde drijfmest tot vier maanden lang was opgeslagen. De partij drijfmest werd aan het begin van de opslagperiode iedere drie tot vier dagen bemonsterd, en later iedere zeven dagen, voor de verzameling van in totaal 22 monsters met toenemende opslagduur (RDM1 tot RDM22). Bij de proefopzet van de incubatieproef werden aan deze 22 behandelingen vier referentiebehandelingen toegevoegd: 1) zandgrond zonder toediening van drijfmest; 2) zandgrond met toediening van drijfmest (RDM11) en spoorelementen; 3) zandgrond met toediening van K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> in plaats van drijfmest; en 4) toediening van drijfmest (RDM11) aan zilvertand in plaats van zandgrond.

De referentie met alleen zandgrond was bedoeld om de C-mineralisatie uit de zandgrond vast te stellen; de referentie met spoorelementen om een eventueel effect van een gebrek aan spoorelementen op de C-mineralisatie van drijfmest vast te stellen; de referentie met toediening van K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> om een indicatie te krijgen van de bijdrage van carbonaten in drijfmest aan de gemeten C-respiratie; en de referentie met zilvertand om een indicatie te krijgen van de C-mineralisatie uit drijfmest wanneer er geen bijdrage was van de mineralisatie van grond-C.

De 22 behandelingen met toenemende opslagduur en de vier referentiebehandelingen werden herhaald in twee gerandomiseerde blokken, en de vier referentiebehandelingen aanvullend in twee extra gerandomiseerde blokken. Aan ieder blok werd nog een blanco behandeling toegevoegd (geen grond, geen mest) voor een totaal van 64 experimentele eenheden. De behandeling met toediening van RDM11 aan zandgrond had aanvullend ook herhaald moeten worden in de twee extra blokken, om op dezelfde basis te kunnen worden vergeleken met de twee referentiebehandelingen met toediening van RDM11. Dit is abusievelijk niet gebeurd.

### 2.2 Proefuitvoering

#### 2.2.1 Grondverzameling en grondanalyse

De zandgrond werd verzameld op 29 april 2022 op een perceel blijvend grasland van 18 jaar oud, de laatste acht jaar onder biologisch beheer, en in 2022 al ruim een maand regelmatig beweeid. De grond werd op drie verschillende plekken verzameld uit bodemlaag 5-10 cm, na het verwijderen en deels uitschudden van de graszode; opgeslagen bij 4°C; op 9 mei gemengd (betonmolen) en gezeefd (5 mm), 1,5 uur aan de lucht gedroogd, bemonsterd; en vervolgens weer opgeslagen bij 4°C tot het moment van inzetten van de incubatieproef op 16 mei. Het monster werd door het Chemisch-Biologisch Laboratorium Bodem (CBLB, Wageningen) geanalyseerd (Houba et al. 1997) op granulaire samenstelling (fractie klei, silt, zand), pH-KCl, pH-H<sub>2</sub>O, EC, organische stof, C-totaal (elementair), N-totaal (elementair), P-Al, K-HCl, en (onbufferde) CEC.

#### 2.2.2 Mestverzameling en mestanalyse

De partij verse drijfmest werd op 22 december 2021 samengesteld uit verse urine en verse feces die op die dag werden verzameld uit stal 70 (urine) en stal 60 (feces) van proeffaciliteit Dairy Campus (Leeuwarden). De koeien in deze stallen stonden jaarrond op stal en werden gevoerd met een regulier rantsoen, gedomineerd door kuilgras (ca. 70% van de DS) en snijmaïs (ca. 30% van de DS).

---

De urine werd verzameld uit het opvangvat van het Hanskamp CowToilet (Hanskamp, Doetinchem) dat op het moment van verzamelen tenminste 160 liter bevatte, de opgevangen hoeveelheid van ruim een dag. Na mengen werd er een ruime hoeveelheid urine uit het vat gehaald en werd daarvan 11,6 kg gemengd met 18,6 kg verse feces, die meteen na uitscheiden werd verzameld vanaf de doorlaatbare tegelvloer in stal 60 en afkomstig was van acht verschillende koeien. De mengverhouding urine : feces was 38 : 62 (w/w), bij benadering de verhouding waarin urine en feces door de koe worden uitgescheiden.

De partij verse drijfmest werd verdeeld over vier nieuwe en schone emmers van ieder 10 l. Deze werden luchtdicht afgesloten met een deksel en gedurende 119 dagen weggezet. De emmers werden de eerste 11 weken iedere dag ontluicht en daarna eens per week. Eens per 3-4 dagen (eerste maand) of eens per week (laatste drie maanden) werd de drijfmest in de emmers grondig gemengd en werd met mest uit alle emmers een representatief mengmonster van 0,8 liter samengesteld en ingevroren bij -18°C. De omgevingstemperatuur werd rond 17°C gehouden en eens per uur gemeten met een temperatuurlogger (Keytag Kt1Mu, Askey dataloggers, Leiderdorp). De temperatuur tussen twee tijdstippen van bemonstering varieerde van gemiddeld 17,0 tot 17,9°C, en was over de hele opslagperiode gemiddeld 17,4°C. Op zaterdag 14 mei, 39 uur voor het inzetten van de incubatieproef, werden de 22 monsters uit de vriezer gehaald, bij kamertemperatuur ontdooid, en 20 uur bewaard bij 4-6°C tot het moment van gebruik in de incubatieproef. Op maandagochtend 16 mei werden de 22 monsters gemengd en werden deelmonsters (100 g) genomen voor analyse op o.a. vluchtige vetzuren. De deelmonsters werden gekoeld vervoerd naar het betreffende laboratorium en daar om 9 uur in de koeling gezet bij 4°C. De incubatieproef werd ingezet vanaf 10 uur. Hierbij werden de meest verse mesten, RDM1 t/m RDM9, voor gebruik uit de koeling gehaald en na gebruik meteen weer teruggezet. Na het inzetten van de incubatieproef werden alle monsters gekoeld bewaard (4°C) tot het moment van gebruik in de parallelle proef met PLFA-meting (De Boer & Bloem, 2023; proef 3) en de analyse op samenstelling.

De 22 drijfmestmonsters werden door LeAF (Wageningen) geanalyseerd op VFA's, methanol, ethanol, en lactaat. Nadat de 22 monsters op maandagochtend in de koeling waren gezet, werd ieder monster individueel uit de koeling gehaald en werden een aantal deelmonsters genomen. Twee deelmonsters werden, ten behoeve van de meting van VFA's, methanol, en ethanol, gestabiliseerd door centrifugatie en factor twee verdunning van het supernatant met mierenzuur (eindconcentratie mierenzuur was 1,5%). De monsters werden daarna opnieuw gecentrifugeerd, indien nodig verder verdund met 1,5% mierenzuur, en ingevroren bij -20°C. De VFA's (C2 t/m C7), methanol, en ethanol werden op een later tijdstip gemeten met een gaschromatograaf (Agilent 7890B; Agilent, Santa Clara CA, USA) met een detectiegrens van 20 mg l<sup>-1</sup> voor elke component. De VFA's werden in beide deelmonsters gemeten en methanol en ethanol in één deelmonster. Twee andere deelmonsters werden, ten behoeve van de meting van lactaat, gestabiliseerd door centrifugatie en factor twee verdunning van het supernatant met 0,8 g l<sup>-1</sup> CuSO<sub>4</sub>-oplossing. De monsters werden daarna opnieuw gecentrifugeerd, indien nodig verder verdund met CuSO<sub>4</sub>-oplossing, en vervolgens ingevroren bij -20°C. De lactaatanalyse (D-lactaat en L-lactaat) werd op een later tijdstip in beide deelmonsters gemeten met de HPLC (Thermo Dionex Ultimate 3000 RS; Thermo Fisher Scientific, Waltham MA, USA). De detectiegrens was 40 mg l<sup>-1</sup> voor L-lactaat en 400 mg l<sup>-1</sup> voor D-lactaat (vanwege 10x verdunning). L-lactaat werd gemeten in alle 22 monsters en D-lactaat alleen in RDM2 en RDM20. In geen van de monsters was L- of D-lactaat boven de detectiegrens aanwezig.

De 22 drijfmesten werden binnen drie dagen na aanlevering geanalyseerd op chemische samenstelling door het CBLB. In het verse materiaal werden de pH, EC, en redoxpotentiaal gemeten met standaard elektroden bij 20°C (referentie-electrode redoxpotentiaal Ag/AgCl met 3 M KCl); N-totaal en P-totaal met SFA (SAN++, Skalar, Breda) (na destructie van de verse mest met zwavelzuur en salicylzuur, en de toevoeging van selenium en waterstofperoxide, bij een temperatuur van 100°C); K-totaal met ICP-AES (Thermo iCAP 6500 DUO, Thermo Fisher Scientific, Waltham MA, USA) (na de hiervoor beschreven destructie); S-totaal met ICP-AES (na destructie van de verse mest met salpeterzuur en zoutzuur in een destructiemagnetron); en N<sub>t</sub>, N-NH<sub>4</sub>, en N-NO<sub>3</sub> met SFA na extractie met 0,01 M CaCl<sub>2</sub>. De gemeten redoxpotentiaal (E<sub>m</sub>) werd omgerekend naar de waarde voor de standaard waterstofelectrode (E<sub>h</sub>) volgens de formule  $E_h = E_m + E_{ref}$ , met voor de gebruikte referentie-electrode (E<sub>ref</sub>) een waarde van +211 mV bij de temperatuur van 20°C. Het drogestofgehalte van de mest werd bepaald door 24 uur drogen bij 105°C en het organische stofgehalte door gedroogde mest (70°C) drie uur te gloeien bij 550°C. Gehalten C-totaal en C-organisch werden gemeten met een CN analyzer (FlashSmart, Thermo Fisher Scientific) na malen van gedroogde mest (70°C) op 50 µm.

---

Voorafgaande aan de bepaling van C-organisch werd het gemalen materiaal gefumigeerd met zoutzuur (HCl) om carbonaten te verwijderen (Walther et al., 2010). De monsters stonden na inzetten een nacht over en werden de volgende dag na opnieuw drogen (60°C, tenminste vier uur) gemeten met de CN analyzer.

### 2.2.3 Incubatie en respiratiemetingen

De incubatieproef werd op 16 mei 2022 ingezet door het laboratorium van de Soil Biology Group (SBL, Wageningen). Glazen flessen (ø 6,9 cm; 575 ml) werden gevuld met alleen zandgrond (300 g op DS-basis), zandgrond gemengd met drijfmest, zandgrond gemengd met drijfmest en spoorelementen (referentie), zandgrond gemengd met K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (referentie), of zilverzand gemengd met drijfmest (referentie). Voor de twee referentiebehandelingen met toediening van drijfmest werd drijfmest gebruikt die 42 dagen in opslag was geweest (RDM11). De toegediende hoeveelheid drijfmest was steeds 11,1 g fles<sup>-1</sup>, de toegediende hoeveelheid K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> was 884 mg fles<sup>-1</sup>, en bij de referentiebehandeling met spoorelementen werd 0,5 ml stockoplossing spoorelementen toegediend (0,25 mg B, 0,25 mg Mn, 0,01 mg Cu, 0,03 mg Zn, en 0,01 mg Co) en 0,5 ml FeEDTA (2,66 mg Fe). Aan de mengsels van grond en drijfmest werd gedemineraliseerd water toegediend tot de grond op 60% van de vloiegrens was (377 ml kg<sup>-1</sup> droge grond). Hierbij werd gecorrigeerd voor vocht toegediend met de meststoffen. Concentraties drijfmest in het eindmengsel (grond + meststof + toegediend water) waren 3,0% voor zandgrond gemengd met drijfmest en 3,1% voor zilverzand gemengd met drijfmest. Na het vullen was de grondlaag in de flessen ca. 5 cm hoog. De flessen werden gewogen, afgesloten met een prop watten, en gedurende 168 dagen weggezet bij 20°C, in het donker.

Tijdens de incubatieperiode werd de CO<sub>2</sub>-respiratie in de flessen regelmatig gemeten met een Innova 1412 foto-akoestische gasmonitor, 1, 3, 7, 14, 28, 56, 84, 112, 140, en 168 dagen na het inzetten. Op ieder tijdstip werden de flessen voor een periode afgesloten, zodat zich een hoeveelheid gerespireerde CO<sub>2</sub> in de fles kon verzamelen. Aan het einde van deze accumulatieperiode werd de CO<sub>2</sub>-concentratie in iedere fles gemeten. Deze concentraties werden gecorrigeerd voor de CO<sub>2</sub>-concentratie in de omgevingslucht op het moment van het sluiten van de flessen, zoals gemeten in de blanco flessen. De accumulatieperiode werd tijdens de proef verlengd, van 1 uur bij de eerste meting tot 24 uur bij de laatste meting, om de CO<sub>2</sub>-concentratie tussen de 1000 en 10.000 ppm te houden. De ondergrens werd gehanteerd om voldoende onderscheidend vermogen te houden met de achtergrondconcentratie, en de bovengrens om rond het midden van de kalibratielijnt uit te komen (de gasmonitor was gekalibreerd tot 20.000 ppm). Na iedere meting werden de flessen gewogen en werd gedemineraliseerd water toegevoegd om het oorspronkelijke vochtgehalte in de flessen te herstellen. Na de laatste meting werd het luchtvolume in de flessen gravimetrisch bepaald.

### 2.2.4 Berekeningen

De CO<sub>2</sub>-emissie uit de flessen werd gebruikt als vertegenwoordiger van de C-mineralisatie en de OS-afbraak. Per fles werd berekend hoeveel C er bij de start van de proef aanwezig was in grond en meststof. Vervolgens werd per meettijdstip de bruto C-flux uit iedere fles berekend, op basis van de begin- en eindconcentratie CO<sub>2</sub>, met aanname van een molair volume (V<sub>m</sub>) van 24,04 L mol<sup>-1</sup>. De bruto C-fluxen van de flessen met toediening van meststof werden, binnen ieder blok, gecorrigeerd voor de C-flux van de flessen met alleen grond, door deze flux in mindering te brengen. Door deze correctie werd een verschil in flux toegerekend aan de meststof, en wanneer de meststof een effect had op de mineralisatie van grond-C werd dit effect toegerekend aan de meststof. Omdat het C-gehalte van de mest tijdens opslag afnam, werd er met langer opgeslagen mest minder C toegediend. De gecorrigeerde (netto) C-fluxen werden daarom per behandeling gestandaardiseerd door deze te delen door de hoeveelheid met mest toegediende C.

De hoeveelheid C die tussen de meettijdstippen met respiratie ontweek, werd per fles berekend door integratie van de C-flux over de tijd, waarbij de C-flux tussen opeenvolgende tijdstippen lineair werd geïnterpoleerd. Vervolgens werd berekend hoeveel C er per meettijdstip nog over was. Tenslotte werd de overblijvende C uitgedrukt als percentage van de oorspronkelijk aanwezige hoeveelheid C in grond of meststof (100% op dag 0).

---

De 22 drijfmesten waren bij de chemische analyse (CBLB) in enkelvoud geanalyseerd. Om het effect van een toevallige meetfout op de analysewaarden te verkleinen, is bij een aantal parameters niet de meetwaarde per bemonsteringstijdstip (aantal dagen opslagduur) gegeven, maar het gemiddelde van de laatste twee meetwaarden, voor het gemiddelde van de laatste twee bemonsteringstijdstippen. Door het middelen wordt niet de C-flux bij een opslag voor bv. 0, 3, 7, en 14 dagen weergegeven, maar bij een opslag voor 1,5, 5,5, en 10,5 dagen. Voor het eerste tijdstip ( $t = 0$  dagen) werd steeds de originele waarde gebruikt.

Bij de drijfmest met 42 dagen opslag (RDM11) werd een vergelijking gemaakt tussen de relatieve C-mineralisatie tijdens (anaerobe) opslag tussen dag 42 en dag 119, en de relatieve C-mineralisatie tijdens (aerobe) incubatie van deze mest voor een vergelijkbare periode. Hierbij werden de resultaten van de behandeling met toediening van RDM11 aan zilverzand gebruikt, omdat bij deze behandeling de drijfmest geen effect op de mineralisatie van grond-C kon hebben.

### 2.2.5 Statistische analyse

Relaties tussen de opslagduur van de mest en een aantal mesteigenschappen werden statistisch geanalyseerd met behulp van de procedure voor polynome regressie in Genstat. Het initieel getoetste model was:  $Y = a + bx + cx^2$ , met  $Y$  de mesteigenschap,  $x$  de opslagduur van de mest in dagen,  $a$  de constante,  $b$  de lineaire coëfficiënt, en  $c$  de kwadratische coëfficiënt. Wanneer de kwadratische coëfficiënt niet significant was ( $P > 0,05$ ), werd de lineaire variant van het model getoetst. Bij mesteigenschappen N-totaal en P-totaal werden de waarden van mestmonsters RDM2 en RDM3 beoordeeld als uitschieters en niet in de analyse meegenomen. De relatie tussen de opslagduur van de mest en het VFA-gehalte tijdens de eerste 77 dagen werd benaderd met behulp van een exponentiële curve met asymptoot.

Percentages overblijvende C werden per dataset geanalyseerd met de procedure voor variantieanalyse in statistisch pakket Genstat (Genstat, 19<sup>e</sup> editie; VSNi, Hemel Hempstead, UK). Treatment Structure was 'Behandeling \* Meettijdstip' en Block Structure was 'Blok'. Toepassing van deze procedure gaf een iets te optimistische toetsing van verschillen (bij gebruik van data van opeenvolgende meettijdstippen), omdat er geen rekening mee werd gehouden dat er steeds aan dezelfde experimentele eenheden (flessen) werd gemeten. De resultaten konden niet worden geanalyseerd met de REML-procedure voor herhaalde waarneming, omdat hierbij het wiskundige algoritme meestal niet convergeerde. De statistische analyses werden uitgevoerd voor de data van alle 22 opslagbehandelingen (twee herhalingen; alleen data van dag 168); voor de behandeling zandgrond met toediening van RDM11 en zandgrond met toediening van RDM11 en spoorelementen (beide behandelingen in twee herhalingen; alle meettijdstippen); voor de behandeling zandgrond met  $K_2CO_3$  en de behandeling zandgrond zonder  $K_2CO_3$  (beide behandelingen in vier herhalingen; alle meettijdstippen); en voor de behandeling zandgrond met RDM11 en spoorelementen en behandeling zilverzand met RDM11 (beide behandelingen in vier herhalingen; alle meettijdstippen).

# 3 Resultaten

## 3.1 Samenstelling grond en mest

### Samenstelling zandgrond

De samenstelling van de gebruikte zandgrond is gegeven in Tabel 1.

**Tabel 1** Samenstelling van de zandgrond gebruikt in de incubatieproef, verzameld uit bodemlaag 5-10 cm van een graslandperceel. Gehalten zijn uitgedrukt op basis van drogen bij 40°C; minerale fracties op basis van drogen bij 105°C.

Parameter	Eenheid	Waarde
Klei	%	5
Silt	%	9
Zand	%	74
pH-KCl	-	4,8
pH-H <sub>2</sub> O	-	5,8
OS	%	7,6
C-totaal	g C kg <sup>-1</sup>	37,5
N-totaal	g N kg <sup>-1</sup>	2,8
P-Al	mg P kg <sup>-1</sup>	133
K-HCl	mg K kg <sup>-1</sup>	142
EC	μS cm <sup>-1</sup>	102
CEC	cmol+ kg <sup>-1</sup>	7,2

### Samenstelling verse drijfmest

De verse drijfmest, bemonsterd bij start van de opslagproef, had een relatief hoge pH, een relatief hoog aandeel OS in de DS, een laag gehalte VFA, een laag gehalte NH<sub>4</sub>-N en aandeel NH<sub>4</sub>-N in totaal-N, en een relatief hoge C : N verhouding (Tabel 2).

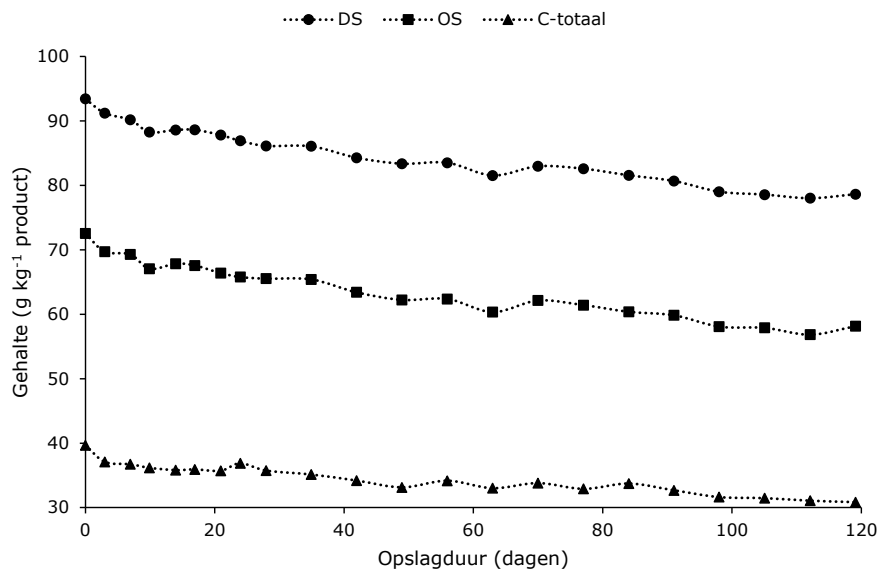
**Tabel 2** Samenstelling van de verse rundveedrijfmest (RDM1).

Parameter	Eenheid	Waarde
pH	-	7,8
EC	mS cm <sup>-1</sup>	18
Redoxpotentiaal E <sub>m</sub> (E <sub>h</sub> , 20°C) <sup>1)</sup>	mV	-173 (38)
Drogestof	g kg <sup>-1</sup> vers	93
Organische stof	g kg <sup>-1</sup> vers	73
C-totaal	g kg <sup>-1</sup> vers	39,7
C-organisch	g kg <sup>-1</sup> vers	33,8
VFA <sup>2)</sup>	g kg <sup>-1</sup> vers	2,9
N-totaal	g kg <sup>-1</sup> vers	4,02
N-NH <sub>4</sub>	g kg <sup>-1</sup> vers	1,17
C : N	-	9,9
P-totaal	g kg <sup>-1</sup> vers	0,65
K-totaal	g kg <sup>-1</sup> vers	5,5
S-totaal	g kg <sup>-1</sup> vers	0,60

<sup>1)</sup> E<sub>m</sub> is de gemeten waarde bij de gebruikte referentie-elektrode, E<sub>h</sub> is E<sub>m</sub> gecorrigeerd naar standaard waterstofelektrode;

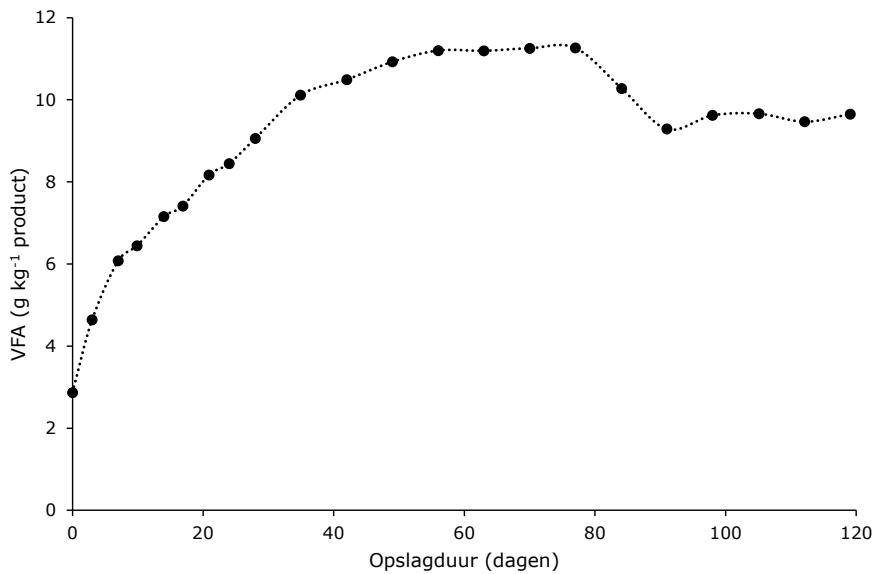
<sup>2)</sup> Vluchtige vetzuren, C2 t/m C7

Tijdens de vier maanden durende opslagperiode namen het gehalte DS, OS, en C-totaal in de mest duidelijk af (Fig. 1, Tabel 3). Uit polynome regressie bleek dat de afname in het gehalte DS en OS kon worden beschreven door een kwadratische relatie, met een daling in gefitte waarde van DS van 91,4 tot 78,5 g kg<sup>-1</sup> mest (P < 0,001; R<sup>2</sup><sub>adj.</sub> = 96%) en een daling in gefitte waarde van OS van 70,4 tot 57,8 g kg<sup>-1</sup> mest (P < 0,001; R<sup>2</sup><sub>adj.</sub> = 95%), over de opslagperiode van 119 dagen. De afname in het gehalte C-totaal over deze periode kon worden beschreven met een lineaire relatie, met een afname in gefitte waarde van 37,3 tot 30,7 g kg<sup>-1</sup> mest (P < 0,001; R<sup>2</sup><sub>adj.</sub> = 88%). Het gehalte N- en P-totaal nam tijdens opslag licht toe. De toename in N-en P-gehalte kon worden beschreven met een lineaire relatie, met voor N een toename in gefit gehalte van 4,06 tot 4,16 g kg<sup>-1</sup> (P = 0,03; R<sup>2</sup><sub>adj.</sub> = 19%) en voor P een toename in gefit gehalte van 0,65 tot 0,66 g kg<sup>-1</sup> (P = 0,09; R<sup>2</sup><sub>adj.</sub> = 10%). Het K-gehalte nam tijdens opslag licht af. Deze afname kon worden beschreven met een lineaire relatie, met een afname in gefit K-gehalte van 5,5 tot 5,4 g kg<sup>-1</sup> (P = 0,01; R<sup>2</sup><sub>adj.</sub> = 24%).



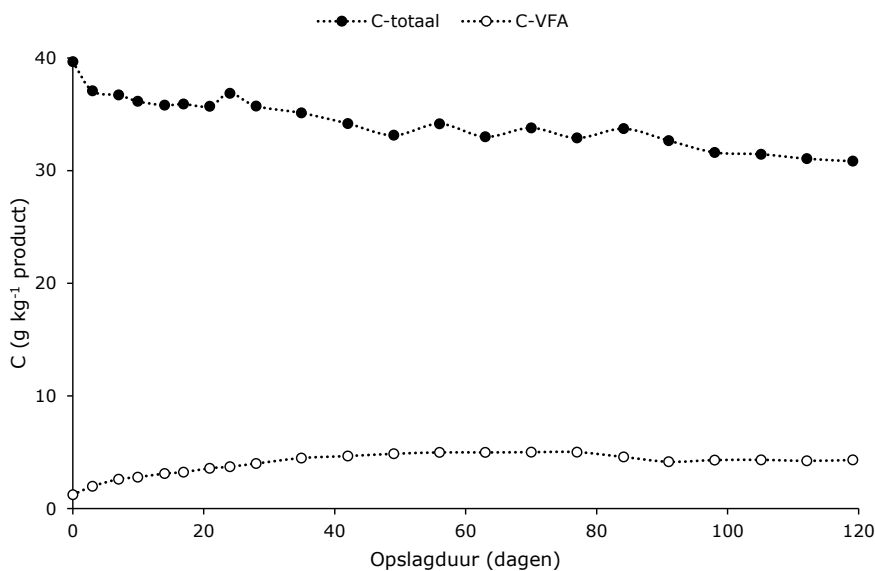
**Figuur 1** Verandering van het gehalte drogestof (DS), organische stof (OS), en C-totaal bij toenemende opslagduur van een partij verse rundveedrijfmest.

Het gehalte VFA nam tijdens opslag toe van 2,9 g kg<sup>-1</sup> mest op dag 1 tot een hoogste waarde van 11,3 g kg<sup>-1</sup> op dag 77, daalde tot 9,3 g kg<sup>-1</sup> op dag 91, en bleef vervolgens vrijwel stabiel tot aan het einde van de opslag (Fig. 2; Tabel 3). De toename van het VFA-gehalte tijdens de eerste 77 dagen opslag kon worden beschreven door een exponentiële curve met asymptoot, als:  $11,72 - 8,40 * 0,9573^{(\text{dagen opslag})}$  ( $P < 0,001$ ;  $R^2_{\text{adj.}} = 99\%$ ).



**Figuur 2** Verandering van het gehalte vluchtige vetzuren (VFA) bij toenemende opslagduur van een partij verse rundveedrijfmest.

Het gehalte VFA-C nam toe van 1,2 g kg<sup>-1</sup> mest bij start tot een maximum van 5,0 g kg<sup>-1</sup> na 77 dagen opslag (Fig. 3). Het aandeel VFA-C in totale mest-C nam toe van 3% bij start tot een maximum van 15% na 77 dagen, en nam daarna licht af tot 14% aan het einde van de opslag.



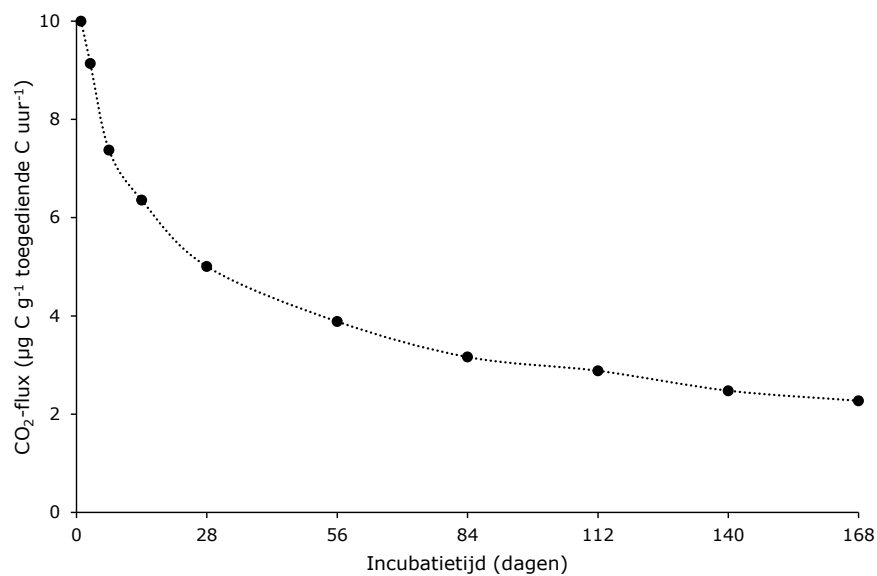
**Figuur 3** Verandering van het gehalte C-totaal en C in vluchtige vetzuren (VFA) bij toenemende opslagduur van een partij verse rundveedrijfmest.



## 3.2 Koolstofrespiratie uit grond en mest

### 3.2.1 Grond

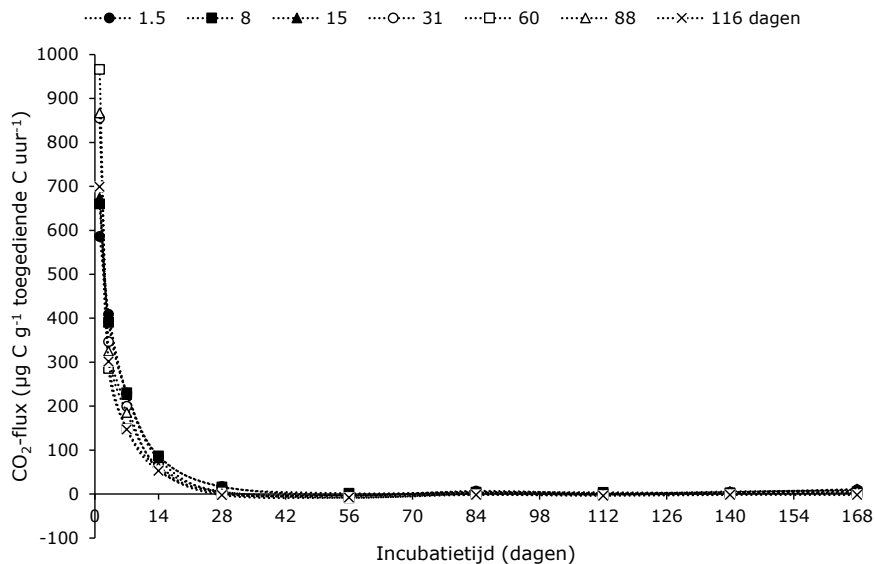
Bij incubatie van alleen de zandgrond piekte de CO<sub>2</sub>-flux aan het begin van de proefperiode en daalde daarna tot het einde (Fig. 4).



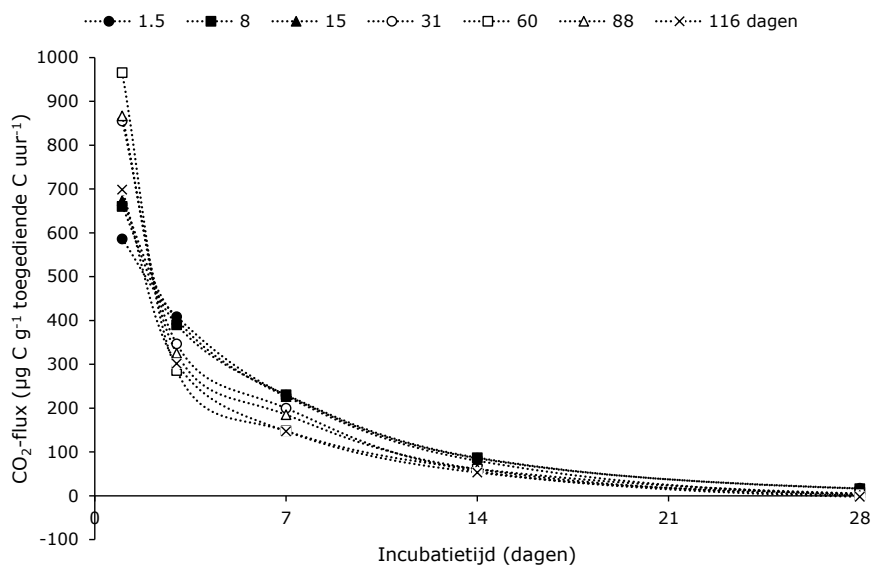
**Figuur 4** Verandering van de CO<sub>2</sub>-flux uit de zandgrond tijdens incubatie.

### 3.2.2 Drijfmest met toenemende opslagduur

De netto (gestandaardiseerde) C-flux piekte bij alle toegediende drijfmesten direct na inzet van de incubatieproef en nam daarna snel af (Fig. 5).

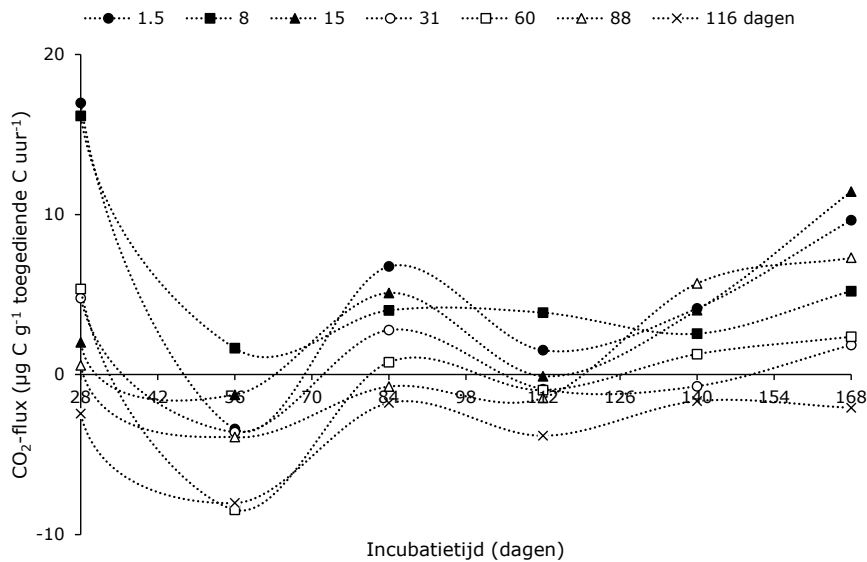


**Figuur 5** Verandering van de CO<sub>2</sub>-flux na het mengen van rundveedrijfmest met toenemende opslagduur met een zandgrond, met de flux uitgedrukt per g toegediende mest-C en na aftrek van de bijdrage van de grond-C.



**Figuur 6** Verandering van de CO<sub>2</sub>-flux na het mengen van rundveedrijfmest met toenemende opslagduur met een zandgrond, met de flux uitgedrukt per g toegediende mest-C en na aftrek van de bijdrage van de grond-C, detailweergave voor de eerste 28 dagen incubatie.

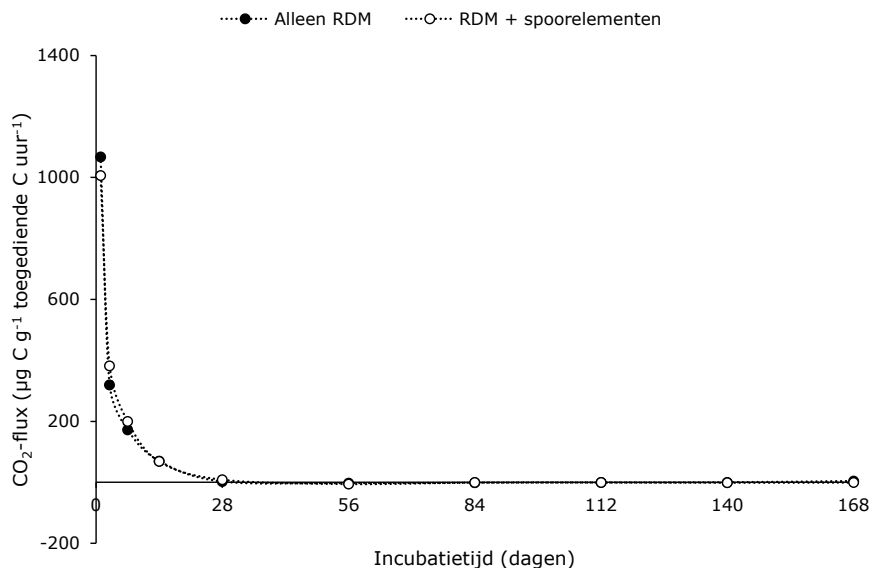
De C-flux bij drijfmest met kortdurende opslag (t/m 15 dagen) was meestal hoger dan bij drijfmesten met langer durende opslag, en bij een aantal behandelingen werd de C-flux na dag 28 negatief (Fig. 6, Fig. 7). Bij mest met een opslagduur van 116 dagen bleef de flux negatief tot aan het einde van de balansperiode, terwijl bij andere behandelingen de flux weer positief werd. De netto C-flux, gemiddeld over de laatste 140 dagen incubatie, was bij toenemende opslagduur van de mest respectievelijk 6, 6, 4, 1, 0, 1, en -3 µg C g<sup>-1</sup> toegediende C uur<sup>-1</sup>, en was daarmee gemiddeld lager bij langere opslag.



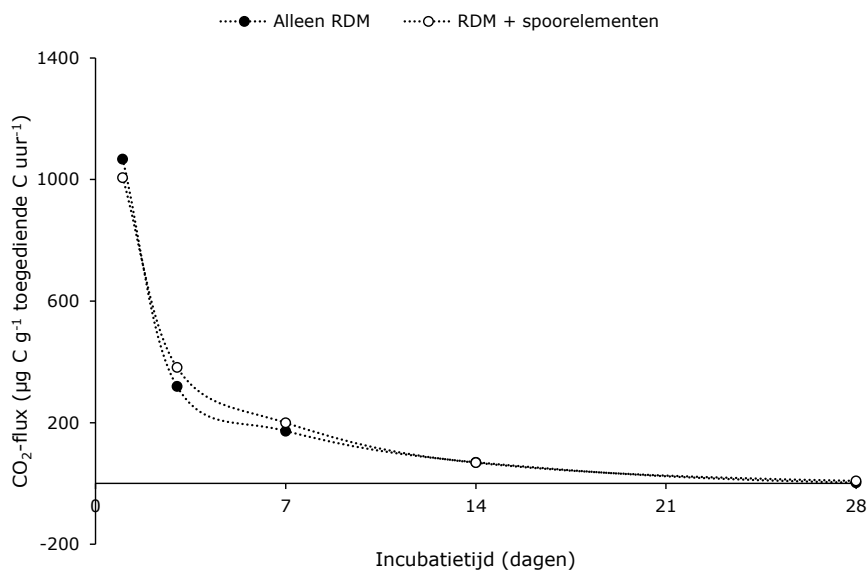
**Figuur 7** Verandering van de CO<sub>2</sub>-flux na het mengen van rundveedrijfmest met toenemende opslagduur met een zandgrond, met de flux uitgedrukt per g toegediende mest-C en na aftrek van de bijdrage van de grond-C, detailweergave voor de laatste 140 dagen incubatie.

### 3.2.3 Drijfmest met of zonder spoorelementen

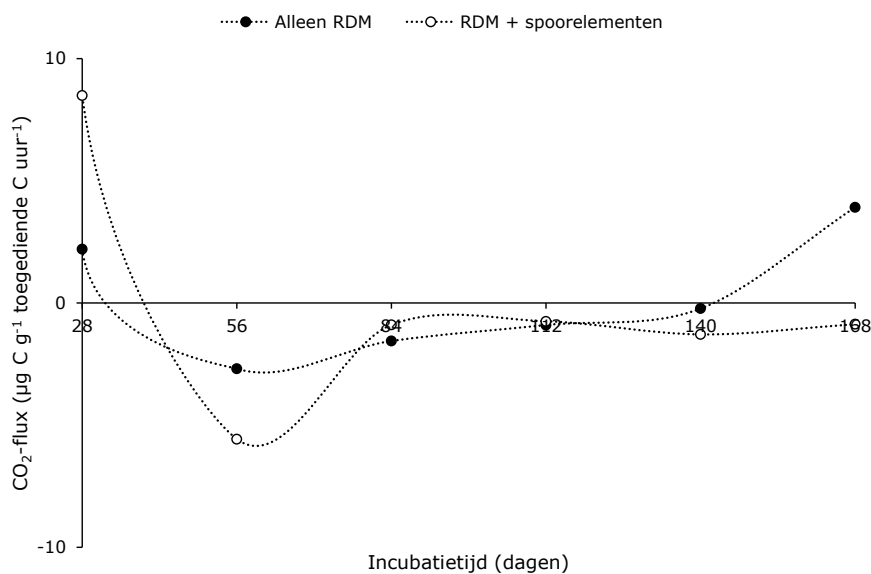
Bij het mengen van drijfmest met zandgrond gaf de extra toediening van spoorelementen op een aantal tijdstippen kleine verschillen in netto C-flux (Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10). Uit deze kleine verschillen kan niet worden geconcludeerd dat de C-mineralisatie van drijfmest wezenlijk anders verliep als gevolg van de toediening van spoorelementen. NB: de data van beide behandelingen zijn weergegeven als gemiddelde van twee in plaats van vier herhalingen, omdat de behandeling met het mengen van zandgrond met alleen drijfmest (RDM11) abusievelijk twee keer in plaats van vier keer was herhaald.



**Figuur 8** Verandering van de CO<sub>2</sub>-flux na het mengen van een zandgrond met rundveedrijfmest (RDM) met of zonder toediening van spoorelementen, met de flux uitgedrukt per g toegediende mest-C en na aftrek van de bijdrage van de grond-C.



**Figuur 9** Verandering van de CO<sub>2</sub>-flux na het mengen van een zandgrond met rundveedrijfmest (RDM) met of zonder toediening van spoorelementen, met de flux uitgedrukt per g toegediende mest-C en na aftrek van de bijdrage van de grond-C, detailweergave voor de eerste 28 dagen incubatie.

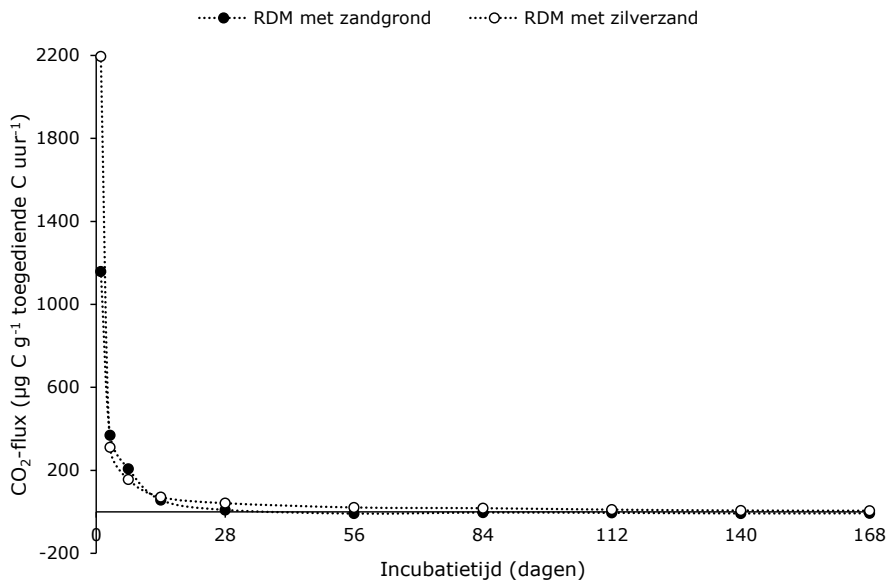


**Figuur 10** Verandering van de CO<sub>2</sub>-flux na het mengen van een zandgrond met rundveedrijfmest (RDM) met of zonder toediening van spoorelementen, met de flux uitgedrukt per g toegediende mest-C en na aftrek van de bijdrage van de grond-C, detailweergave voor de laatste 140 dagen incubatie.

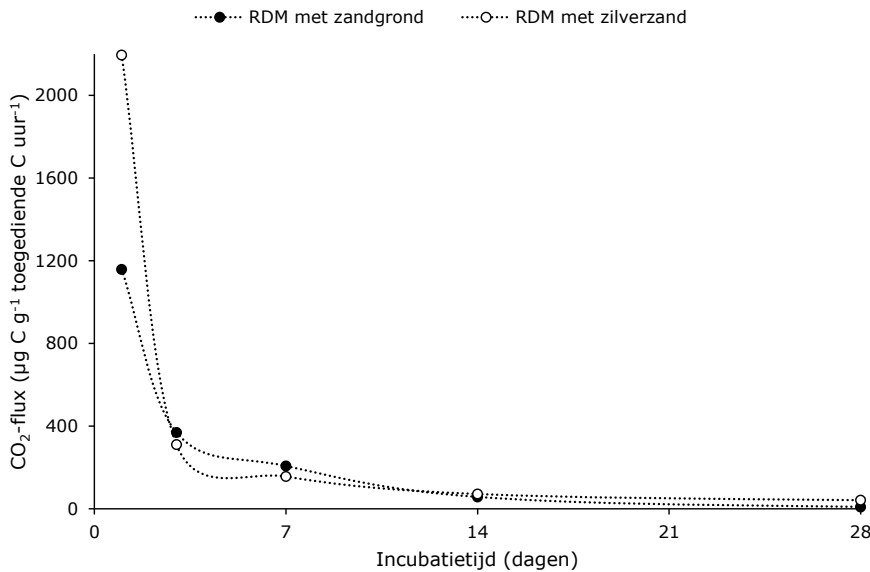
### 3.2.4 Drijfmest gemengd met zandgrond of zilverzand

Na mengen van drijfmest met zilverzand was de netto C-flux uit drijfmest op dag 1 duidelijk hoger dan na mengen met zandgrond, verschilde de flux vrijwel niet t/m dag 14, en was deze daarna tot het einde van de incubatieperiode hoger (Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13). De C-flux uit drijfmest was bij mengen met zilverzand tot aan het einde van de incubatie positief, maar was bij het mengen met zandgrond negatief vanaf dag 56.

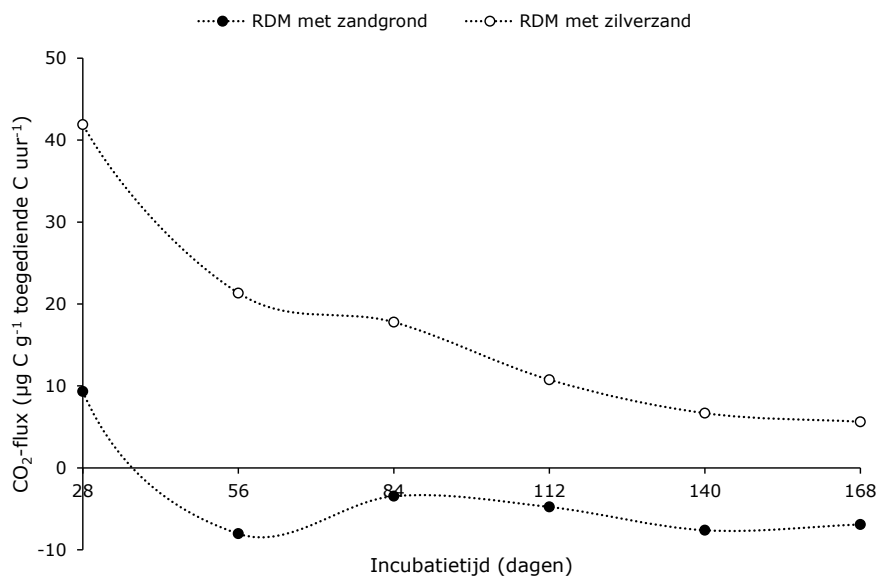
NB: bij de behandeling met zandgrond werd behandeling RDM11 + spoorelementen gebruikt in plaats van behandeling RDM11, omdat de eerste behandeling vier keer in plaats van twee keer was herhaald, en er verder geen wezenlijke verschillen in C-flux tussen beide behandelingen waren (zie boven).



**Figuur 11** Verandering van de CO<sub>2</sub>-flux na het mengen van een rundveedrijfmest (RDM) met een zandgrond of met (mineraal) zilverzand, met de flux uitgedrukt per g toegediende mest-C en na aftrek van de bijdrage van de grond-C.



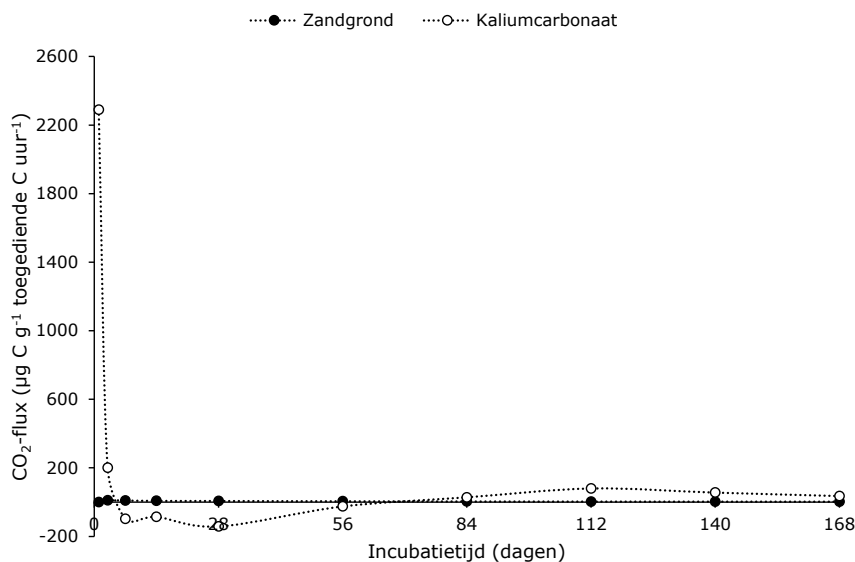
**Figuur 12** Verandering van de CO<sub>2</sub>-flux na het mengen van een rundveedrijfmest (RDM) met een zandgrond of met (mineraal) zilverzand, met de flux uitgedrukt per g toegediende mest-C en na aftrek van de bijdrage van de grond-C, detailweergave voor de eerste 28 dagen incubatie.



**Figuur 13** Verandering van de CO<sub>2</sub>-flux na het mengen van een rundveedrijfmest (RDM) met een zandgrond of met (mineraal) zilverzand, met de flux uitgedrukt per g toegediende mest-C en na aftrek van de bijdrage van de grond-C, detailweergave voor de laatste 140 dagen incubatie.

### 3.2.5 Zandgrond met of zonder kaliumcarbonaat

De hoogste netto C-flux uit toegevoegde kaliumcarbonaat werd gerealiseerd direct na start van de incubatie (Fig. 14). Tussen dag 7 en dag 56 was de C-flux negatief, en tussen dag 84 en dag 168 weer positief.

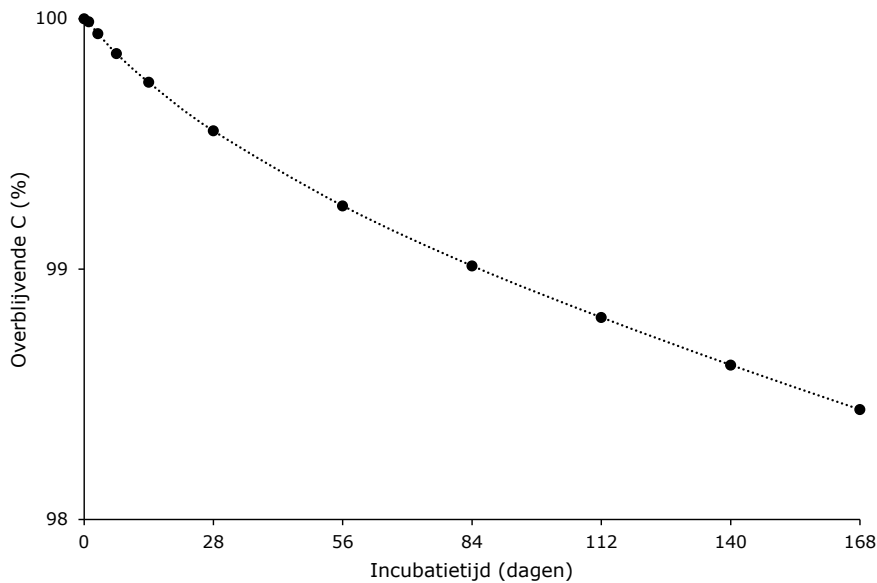


**Figuur 14** Verandering van de CO<sub>2</sub>-flux na het wel of niet mengen van een zandgrond met kaliumcarbonaat, uitgedrukt per g toegediende C en bij de behandeling met kaliumcarbonaat na aftrek van de bijdrage van de grond-C.

## 3.3 Overblijvende koolstof

### 3.3.1 Grond

De hoeveelheid overblijvende C in alleen zandgrond, zonder toediening van mest, nam tijdens de incubatieperiode af met 176 mg C of 1,6% (Fig. 15).

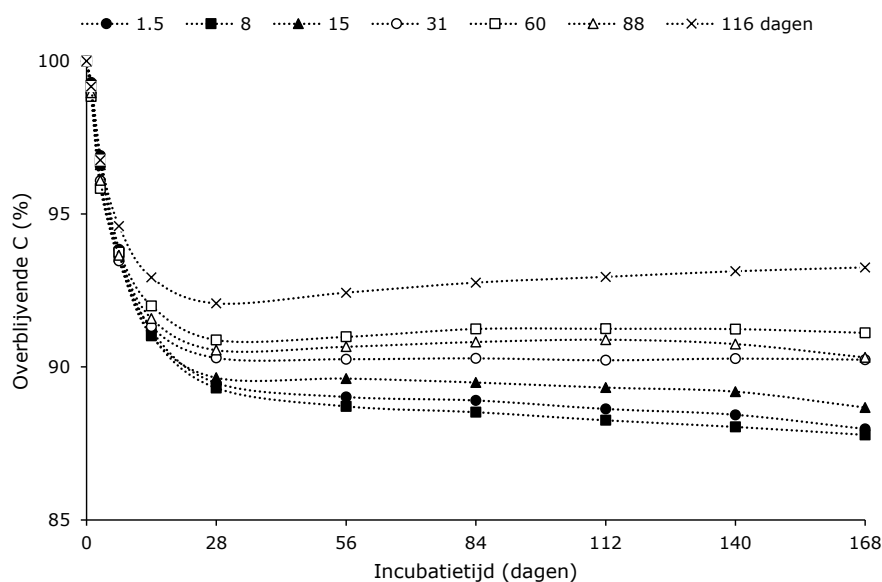


**Figuur 15** Verandering van de overblijvende C tijdens incubatie van alleen de zandgrond ( $n = 4$ ).

### 3.3.2 Drijfmest met toenemende opslagduur

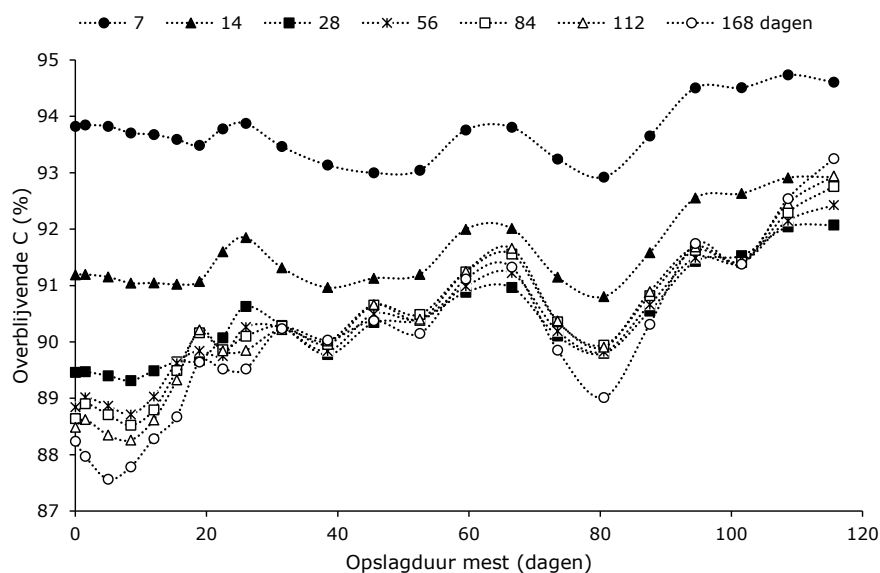
Het grootste deel van de C-mineralisatie uit drijfmest vond plaats in de eerste 28 dagen incubatie (Fig. 16) (weergegeven is een selectie uit de opslagbehandelingen). Bij de relatief verse mest, met een opslagduur tot 15 dagen, ging de C-mineralisatie na dag 28 door, zij het op een laag niveau. Bij mest met een opslagduur van 31 dagen mineraliseerde er na dag 28 netto vrijwel geen C meer, en bij de mest met een opslagduur van 116 dagen nam het percentage overblijvende mest-C na dag 28 licht toe tot aan het einde van de incubatie. Bij mest met een opslagduur van 60 of 88 dagen nam het percentage overblijvende C licht toe vanaf dag 28 en vanaf dag 112 weer (licht) af. Aan het einde van de incubatie, op dag 168, varieerde het percentage overblijvende mest-C van 88% bij een opslagduur van 1,5 dagen tot 93% bij een opslagduur van 116 dagen. Daarmee mineraliseerde er op hoofdlijn relatief minder C uit oude mest vergeleken met verse mest.

Variantieanalyse van de percentages overblijvende C op dag 168 gaf een neiging tot een significant effect van opslagduur ( $P = 0,06$ ). Bij paarsgewijze toetsing tussen behandelingen waren verschillen significant bij een verschil groter dan 3,7 procentpunt.



**Figuur 16** Verandering van de overblijvende C uit rundveedrijfmest met toenemende opslagduur (selectie uit de opslagbehandelingen) na mengen met zandgrond, na aftrek van de bijdrage van de grond-C.

Bij weergave van het percentage overblijvende C in relatie tot opslagduur van de mest, met gebruik van alle opslagbehandelingen, blijkt ook dat het percentage overblijvende C toenam bij langere opslag (Fig. 17). Na 28 dagen incubatie waren de verschillen in overblijvende C als gevolg van verschil in opslagduur relatief klein. Opvallend is de afwisseling tussen afname en toename van overblijvende C bij toenemende opslagduur, vooral de grote afname in overblijvende C bij een opslagduur van 67 t/m 95 dagen. Hierdoor was op de langere termijn, op dag 168, het percentage overblijvende C bij een opslagduur van 81 dagen (89%) vergelijkbaar met het percentage bij een opslagduur van 15 t/m 26 dagen.

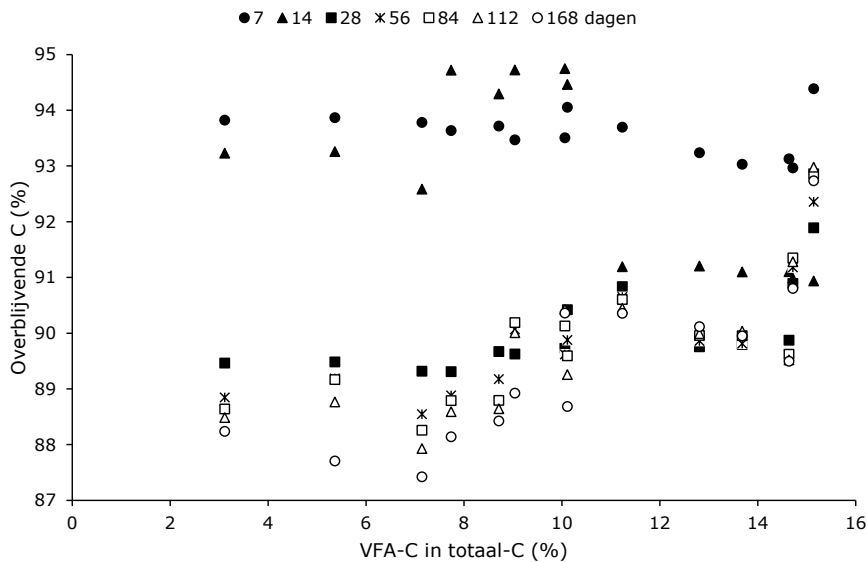


**Figuur 17** Overblijvende C uit een rundveedrijfmest met toenemende opslagduur, na mengen met zandgrond en incubatie voor 7, 14, 28, 56, 84, 112, en 168 dagen. Resultaten na aftrek van de bijdrage van de grond-C.



### 3.3.3 Invloed van vluchtige vetzuren

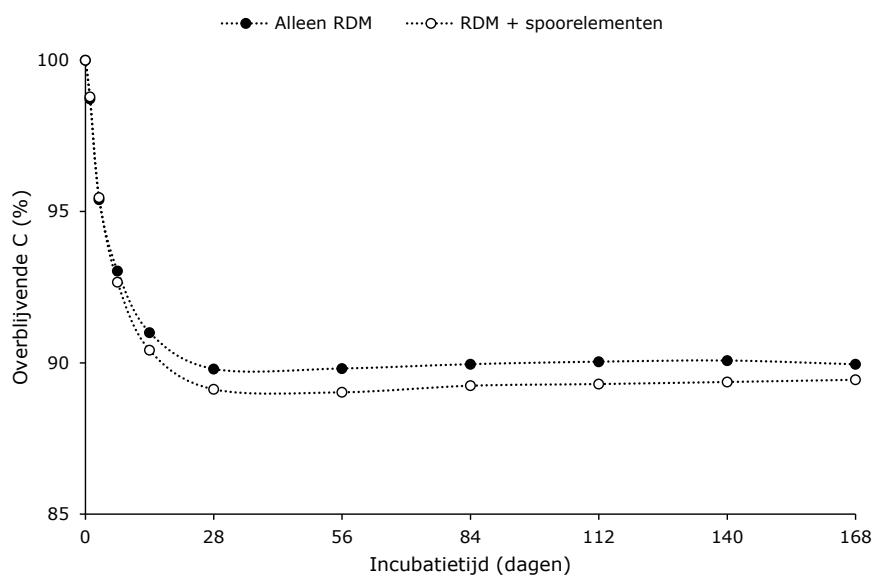
Bij een groter aandeel VFA-C in totale mest-C mineraliseerde er minder C uit drijfmest (Fig. 18) (data van de eerste 63 dagen opslag). Lineaire regressie, met duur van de incubatieperiode als groepsfactor, gaf een positieve relatie over alle incubatieperiodes heen ( $P < 0,001$ ;  $R^2_{\text{adj.}} = 82\%$ ). Bij toetsing van de regressiecoëfficiënten van de incubatieperiodes bleken deze significant te zijn vanaf een incubatieperiode van 28 dagen ( $P < 0,05$ ). NB: opslagduur van de mest en percentage VFA-C in totale mest-C waren gestrengeld, met een hoger percentage VFA-C in totale mest-C bij langere opslag ( $P < 0,001$ ;  $R^2_{\text{adj.}} = 99\%$ ; opslagduur t/m 63 dagen).



**Figuur 18** Relatie tussen aandeel VFA-C in totaal-C in rundveedrijfmest en percentage overblijvende C uit rundveedrijfmest na mengen met zandgrond en incubatie voor 7, 14, 28, 56, 84, 112, en 168 dagen. Resultaten na aftrek van de bijdrage van de grond-C.

### 3.3.4 Drijfmest met of zonder spoorelementen

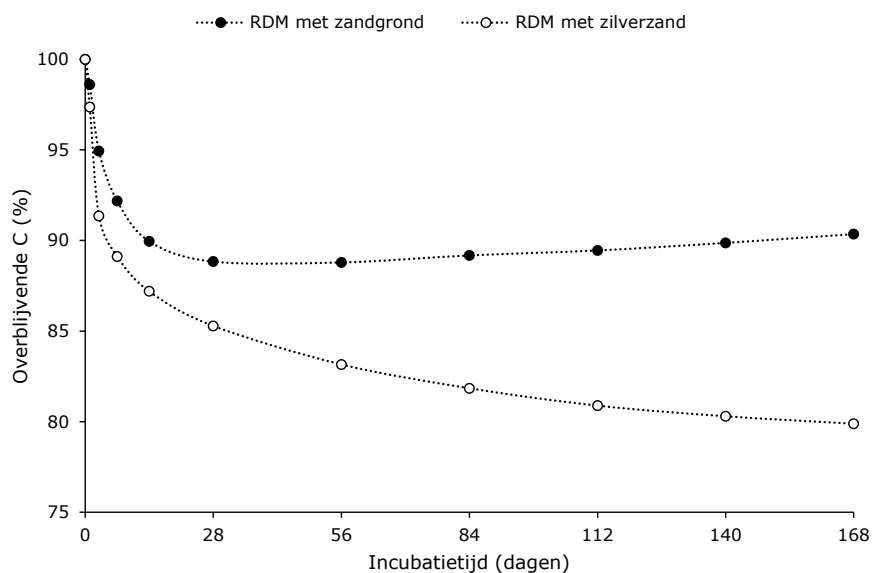
Als gevolg van de toevoeging van spoorelementen nam het percentage overblijvende C uit drijfmest iets sneller af tussen dag 7 en dag 28 (Fig. 19). Het ontstane verschil bleef daarna grotendeels in stand. Variantieanalyse gaf een significant hoofdeffect van behandeling ( $P = 0,05$ ), met een lagere percentage overblijvende mest-C bij toevoeging van spoorelementen. Aan het einde van de incubatie, op dag 168, was het percentage overblijvende mest-C bij toevoeging van spoorelementen (89,4%) licht lager dan zonder toevoeging (90,0%).



**Figuur 19** Verandering van de overblijvende C uit rundveedrijfmest (RDM) na mengen met zandgrond, met of zonder toevoeging van spoorelementen, na aftrek van de bijdrage van de grond-C.

### 3.3.5 Drijfmest gemengd met zandgrond of zilverzand

Na mengen met zilverzand mineraliseerde er aanzienlijk meer C uit de drijfmest dan na mengen met zandgrond (Fig. 20). Bij mengen met zandgrond nam het percentage overblijvende C na dag 28 licht toe tot aan het einde van de incubatie, terwijl bij mengen met zilverzand de overblijvende C bleef afnemen. Variantieanalyse gaf een significant effect van behandeling, afhankelijk van meettijdstip ( $P < 0,001$ ), met significante verschillen tussen de twee behandelingen vanaf dag 3.

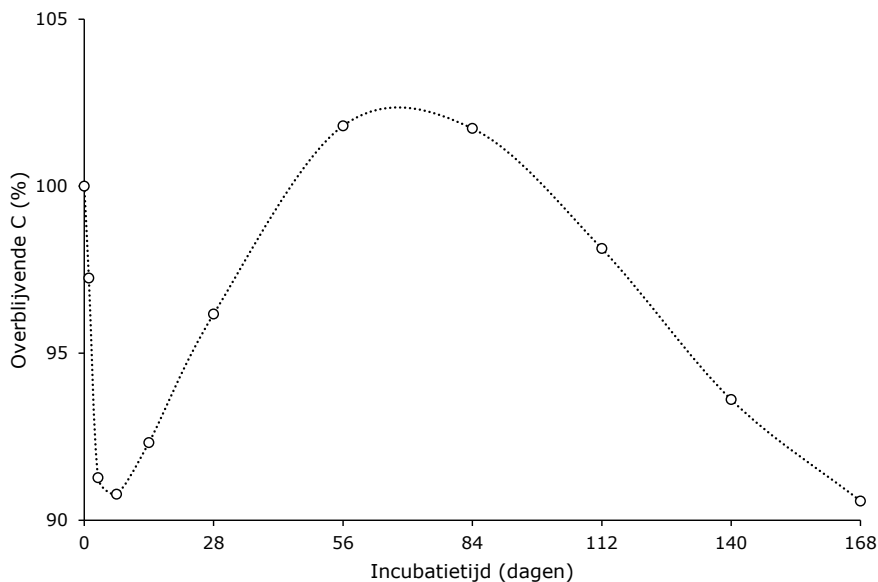


**Figuur 20** Verandering van de overblijvende C uit rundveedrijfmest (RDM) na mengen met zandgrond of zilverzand, na aftrek van de bijdrage van de grond-C.

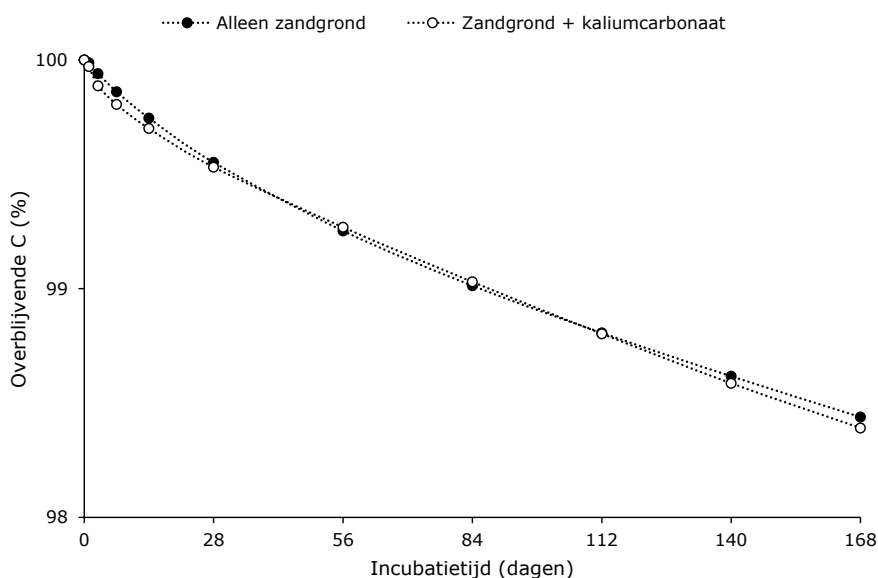
Op dag 168 was daarmee het percentage overblijvende mest-C bij mengen met zilverzand (80%) significant lager dan bij mengen met zandgrond (90%). NB: vanwege de kleine verschillen tussen RDM met en zonder toevoeging van spoorelementen (Fig. 19) zijn hier de resultaten van de behandeling met toevoeging van spoorelementen gebruikt, omdat deze behandeling vier keer in plaats van twee keer herhaald was.

### 3.3.6 Zandgrond met of zonder kaliumcarbonaat

Het percentage overblijvende C uit kaliumcarbonaat nam de eerste 7 dagen af tot 91%, nam daarna toe tot 102% van de toegediende hoeveelheid tussen dag 56 en 84, en nam daarna af tot 91% aan het einde van de incubatie (Fig. 21). De toename tussen dag 7 en dag 56 is het gevolg van de aftrek van de gemineraliseerde C bij alleen zandgrond, die blijkbaar in deze periode lager was dan bij zandgrond met toegevoegde kaliumcarbonaat. Tijdens de incubatieperiode ontweek maximaal 9% van de met kaliumcarbonaat toegediende anorganische C. Variantieanalyse van het percentage overblijvende C uit alleen zandgrond of zandgrond gemengd met kaliumcarbonaat gaf een significant effect van behandeling, afhankelijk van meettijdstip ( $P < 0,01$ ), met een lager percentage overblijvende C uit zandgrond met kaliumcarbonaat op dag 3, 7, 14, 140, en 168 (Fig. 22).



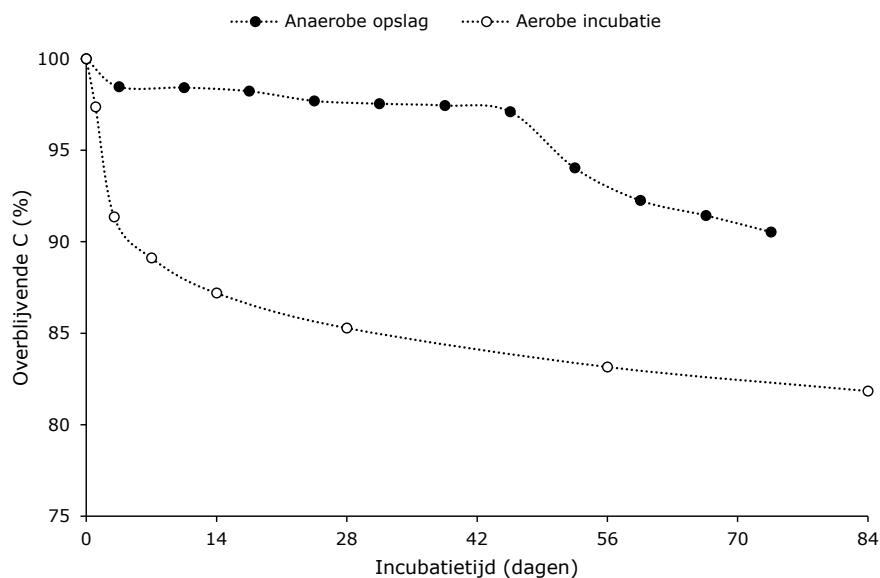
**Figuur 21** Verandering van de overblijvende C uit kaliumcarbonaat gemengd met zandgrond, na aftrek van de bijdrage van de grond-C.



**Figuur 22** Verandering van de overblijvende C uit alleen zandgrond of zandgrond gemengd met kaliumcarbonaat.

### 3.3.7 Aerobe incubatie vergeleken met anaerobe opslag

Het percentage overblijvende C uit drijfmest die na 42 dagen opslag aerob werd geïncubeerd, was na 74 dagen incubatie meer afgenomen (-18%) (geschat op basis van lineaire interpolatie tussen dag 70 en dag 84) dan het C-gehalte tijdens 74 dagen verdere opslag (-9,5%) (Fig. 23). Daarmee mineraliseerde er in deze periode 187% meer C bij aerobe incubatie vergeleken met anaerobe opslag.



**Figuur 23** Verandering van de overblijvende C uit drijfmest tijdens (anaerobe) opslag of (aerobe) incubatie na mengen met zilverzand, bij beide varianten nadat de mest 42 dagen in opslag was geweest. Bij de variant 'anaerobe opslag' zijn de weergegeven waarden steeds de gemiddelden van de laatste twee waarden op zowel de x-as als de y-as.

---

## 4 Discussie

### 4.1 Veranderingen in mest tijdens opslag

Tijdens de vier maanden opslag van de vers verzamelde drijfmest daalde het gehalte OS (-20%) en C-totaal (-22%) wat minder dan verwacht, gezien de relatief hoge temperatuur en de lengte van de opslagduur. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat door een goede vertering en relatief hoog aandeel graskuil in het rantsoen er minder makkelijk afbreekbare OS door de koeien werd uitgescheiden. Tijdens opslag was er een minimale toename van gehalte N-totaal (+2%) en P-totaal (+1%), mogelijk als gevolg van vochtverlies. Het gehalte K-totaal nam daarentegen licht af (-2%), wat kan wijzen op een geringe neerslag van K in de vorm van zouten. De verwaarloosbare veranderingen in P-gehalte tijdens opslag geven aan dat de mest bij monsternamen goed was gemengd. De lichte toename van het N-gehalte geeft aan dat er tijdens de opslag geen N-verlies was, wat verklaard wordt uit het feit dat de mest afgesloten werd bewaard (vrijwel geen N-verlies door NH<sub>3</sub>-emissie) en eens per week werd geroerd (vrijwel geen N-verlies als gevolg van denitrificatie). Het aandeel NH<sub>4</sub>-N in totaal-N nam vanaf dag 3 t/m dag 119 toe van 40% tot 53%, een toename die verklaard wordt uit mineralisatie van organische N tot NH<sub>4</sub>-N. Het aandeel NH<sub>4</sub>-N op dag 0 (29%) werd bij deze vergelijking niet meegenomen, omdat er op dat moment ook nog ureum uit urine in de pas samengestelde drijfmest aanwezig was. Deze ureum was naar verwachting na drie dagen opslag volledig omgezet tot NH<sub>4</sub>-N. Het gehalte VFA in de mest nam geleidelijk toe tot dag 77 en nam daarna plotseling af. Omdat uit de minimale verandering van het P-gehalte blijkt dat de mest goed gemengd was, en de afname in VFA-gehalte blijvend was, is deze afname mogelijk het gevolg geweest van afbraak van een deel van de eerder gevormde VFA.

### 4.2 Mestouderdom en overblijvende koolstof

Bij oudere mest mineraliseerde er relatief wat minder van de toegediende C dan bij jongere mest, en het percentage overblijvende C was 5 procentpunt lager voor mest die 116 dagen in opslag was geweest vergeleken met mest die 1,5 dag in opslag was geweest (paragraaf 3.3.2). Hierdoor was het initiële verschil in toegediende C van 19%, als gevolg van 114 dagen extra opslag, na zes maanden incubatie afgenomen tot 13% verschil in overblijvende C in de grond. In het voorliggende onderzoek werd de overblijvende C uit drijfmest daarmee ogenschijnlijk vooral bepaald door de C-mineralisatie tijdens opslag. Dit beeld wordt echter vertekent door de remmende invloed van urine in de drijfmest op de mineralisatie van grond-C. Zonder deze remmende invloed, zoals blijkt uit de mineralisatie van RDM11 toegediend aan zilverzand, mineraliseerde er 1,9 keer meer mest-C tijdens 74 dagen incubatie vergeleken met 74 dagen verdere opslag (Fig. 23). Dit wijst erop dat zonder het effect van urine de drijfmest onder aerobe omstandigheden aanzienlijk sneller afbraak dan onder anaerobe omstandigheden, iets dat ook zou worden verwacht.

### 4.3 Koolstof in VFA en overblijvende koolstof

Een hoger aandeel VFA-C in drijfmest-C gaf tijdens incubatie niet meer mineralisatie van drijfmest-C. De achterliggende hypothese, dat een hoger aandeel VFA tot meer C-mineralisatie kan leiden, wordt daarmee verworpen. De toename in VFA was mogelijk niet zozeer het gevolg van een omzetting van moeilijk naar makkelijk afbreekbare C, maar van omzetting van de ene makkelijk afbreekbare C-bron in de andere. In dat geval ligt het voor de hand dat de C-mineralisatie bij een hoger VFA-gehalte niet toenam.

Tijdens de incubatieproef mineraliseerde er tussen dag 28 en dag 168 minder C wanneer het aandeel VFA-C in drijfmest-C hoger was (Fig. 18). Dit effect wordt mogelijk veroorzaakt doordat bij langere opslagduur niet alleen het aandeel VFA in drijfmest-C toenam, maar er ook meer C-mineraliseerde, waardoor tijdens incubatie er relatief minder C kon mineraliseren.

---

## 4.4 Dissociatie van anorganische koolstof uit mest

Een deel van de gemeten C-respiratie in incubatieproeven kan het gevolg zijn van dissociatie van anorganische C uit de mest, waardoor kan worden onderschat hoeveel organische C na toediening van mest in de grond achterblijft. In de voorliggende proef geeft de behandeling met toediening van goed oplosbare anorganische C in de vorm van kaliumcarbonaat een indicatie hoe groot deze bijdrage kan zijn. Uit de resultaten blijkt dat er tijdens de proefperiode niet meer dan 9% van de toegediende anorganische C via dissociatie ontweek. Uit de 22 mestanalyses blijkt dat 6 tot 15% (gem. 11%) van de C in drijfmest anorganisch was (Tabel 3). Met deze resultaten kan worden berekend dat er mogelijk 0,6% tot 1,3% (gem. 1,0%) van de totale C als CO<sub>2</sub> uit drijfmest dissocieerde en bijdroeg aan de gemeten C-respiratie. De hoeveelheid anorganische C toegediend met kaliumcarbonaat (0,07 g C fles<sup>-1</sup>) was 1,9 keer groter dan de gemiddelde hoeveelheid toegediend met drijfmest. Mogelijk heeft dit een effect gehad op de relatieve dissociatie van de anorganische C.

## 4.5 Remming en priming

Door de C-mineralisatie van de drijfmest gemengd met zandgrond te vergelijken met de C-mineralisatie van de drijfmest gemengd met zilversand, wordt inzicht verkregen in het (netto) effect van remming en priming op de C-mineralisatie uit deze mest, omdat bij gebruik van zilversand de invloed van mest op de mineralisatie van grond-C wordt uitgesloten. Overblijvende percentages C waren voor drijfmest gemengd met zandgrond of zilversand respectievelijk 90% en 80%, waaruit kan worden geconcludeerd dat als gevolg van de invloed van de mest op mineralisatie van grond-C er (ogenschijnlijk) gemiddeld 10% minder van de mest-C mineraliseerde. Het overblijvende percentage mest-C van 80% is nog steeds relatief hoog, vergeleken met eerdere schattingen van overblijvende percentages van 60 tot 70% (De Boer, 2023). Dit verschil wordt voor een klein deel veroorzaakt doordat in de andere studie er verse drijfmest was gebruikt, terwijl in de voorliggende studie de gebruikte drijfmest 42 dagen in opslag was geweest bij een relatief hoge temperatuur, waardoor er relatief wat minder van de toegediende C mineraliseerde. Verschillen in het rantsoen van de koeien die de mest produceerden kunnen een groter effect hebben gehad.

Om in incubatieproeven een zo goed mogelijke schatting te krijgen van hoeveel C er werkelijk mineraliseert uit organische mest, welk effect de mest heeft op de mineralisatie van grond-C, en hoeveel anorganische C er uit de mest dissocieert, is het aan te bevelen om bij incubatieproeven tenminste twee referenties te laten meelopen: een referentie waarbij de mest wordt gemengd met mineraal zand (zonder C) en een referentie waarbij een representatieve hoeveelheid makkelijk oplosbare carbonaat aan de gebruikte zandgrond wordt toegediend. Door vergelijking van de resultaten van de behandelingen met de referenties wordt meer inzicht verkregen hoe de C-mineralisatie tot stand komt, en kan er een nauwkeurigere schatting van overblijvende C uit mest worden gemaakt.

---

# Conclusies

- Een hoger aandeel VFA-C in drijfmest-C gaf niet meer mineralisatie van drijfmest-C na mengen met grond. Er werd daarmee geen bewijs gevonden voor de hypothese dat een hoger aandeel VFA de C-mineralisatie stimuleert;
- Bij oudere mest mineraliseerde er relatief wat minder van de toegediende C dan bij jongere mest, en het percentage overblijvende C was 5 procentpunt lager voor mest die 116 dagen in opslag was geweest vergeleken met mest die 1,5 dag in opslag was geweest;
- De overblijvende C uit drijfmest leek in belangrijke mate te worden bepaald door C-mineralisatie tijdens opslag. Dit beeld werd echter vertekend door de remmende invloed van urine in de drijfmest op de mineralisatie van grond-C, een effect dat aan drijfmest-C wordt toegerekend. Zonder deze remmende invloed, zoals blijkt uit de mineralisatie van drijfmest toegediend aan zilverzand, mineraliseerde er 1,9 keer meer C tijdens 74 dagen aerobe incubatie vergeleken met 74 dagen anaerobe opslag;
- Dissociatie van carbonaten uit drijfmest droeg in deze proef in beperkte mate bij aan de gemeten C-mineralisatie. Bij de behandeling met toegevoegde kaliumcarbonaat dissocieerde maximaal 9% van de toegediende anorganische C, gemiddeld 1,0% van de met drijfmest toegediende C;
- Toediening van spoorelementen (B, Mn, Cu, Zn, en Co) en van Fe had geen effect op de C-mineralisatie van drijfmest en een tekort aan deze spoorelementen was in de voorliggende proef geen oorzaak van de relatief geringe C-mineralisatie uit drijfmest.

---

# Dankwoord

Ik dank melkveehouder Meindert Wiersma voor de mogelijkheid om grond van een van zijn graspercelen te verzamelen, en Willeke van Tintelen en Tamas Salanki (beiden Soil Biology Group) voor het uitvoeren van de incubatieproef. Het onderzoek in dit rapport werd gefinancierd uit het KennisBasisproject 'Ontwikkeling van een evaluatiekader voor (de productie van) organische meststoffen' (KB-34-010-002).



---

# Literatuur

- Angers DA, Chantigny MH, MacDonald JD, Rochette P, Côté D (2010) Differential retention of carbon, nitrogen and phosphorus in grassland soil profiles with long-term manure application. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 86:225-229.
- De Boer HC (2013) On farm development of bedded-pack dairy barns in the Netherlands - Nutrient balances and manure quality of bedding material. Report 709, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- De Boer HC (2020) Afbreeksnelheid van organische stof uit rundveedrijfmest: effecten van dosering, zoutgehalte en herkomst mest en grond. Rapport 1231, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- De Boer HC (2021) Afbreeksnelheid van organische stof uit runderdrijfmest toegediend aan grond: effecten van vochtgehalte in de grond en drogen van de grond. Rapport 1346, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- De Boer HC (2023) Mineralisatie van koolstof uit urine, feces, en drijfmest van melkkoeien na mengen met zandgrond. Rapport 1415, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- De Boer HC, Bloem J (2023) Verandering in microbiële samenstelling van zandgrond na mengen met urine, feces, of drijfmest van melkkoeien. Rapport 1413, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- Fangueiro D, Chadwick D, Dixon L, Bol R (2007) Quantification of priming and CO<sub>2</sub> emission sources following the application of different slurry particle size fractions to a grassland soil. *Soil Biology & Biochemistry* 39:2608-2620.
- Houba VJG, Van der Lee JJ, Novozamsky I (1997) Soil and plant analysis. Part 1: Soil analysis procedures, Department of Soil Quality, Wageningen University.
- Kirchmann H, Lundvall A (1993) Relationship between N immobilization and volatile fatty acids in soil after application of pig and cattle slurry. *Biology and Fertility of Soils*:161-164.
- Walther L, Graf U, Kammer A, Luster J, Pezzotta D, Zimmermann S, Hagedorn F (2010) Determination of organic and inorganic carbon,  $\delta^{13}\text{C}$ , and nitrogen in soils containing carbonates after acid fumigation with HCl. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 173:207-216.

# Bijlage

**Tabel 3** Samenstelling van de gebruikte rundveedrijfmest bij toenemende opslagduur, uitgedrukt in g kg<sup>-1</sup> product, behalve pH (-), EC (mS cm<sup>-1</sup>), en E<sub>m</sub> (mV).

Mestcode	Dagen opslag	pH	EC	E <sub>m</sub> <sup>1)</sup>	DS	OS	N-tot	N-NH <sub>4</sub>	DON	C-tot.	C-org.	VFA	C-VFA	P-tot.	K-tot.	S-tot.
RDM1	0	7,8	17,5	-173	93	73	4,02	1,17	1,03	39,7	33,8	2,87	1,24	0,65	5,5	0,60
RDM2	3	7,4	20,1	-187	91	70	3,78	1,51	0,85	37,1	32,7	4,64	1,99	0,63	5,5	0,59
RDM3	7	7,3	18,4	-227	90	69	3,85	1,61	0,75	36,7	33,5	6,08	2,62	0,62	5,4	0,58
RDM4	10	7,3	19,7	-227	88	67	4,09	1,68	0,70	36,2	33,2	6,45	2,80	0,65	5,4	0,59
RDM5	14	7,3	21,7	-224	89	68	4,08	1,70	0,67	35,8	31,4	7,15	3,12	0,65	5,5	0,58
RDM6	17	7,3	21,2	-240	89	68	4,15	1,80	0,67	35,9	31,4	7,41	3,25	0,66	5,5	0,57
RDM7	21	7,3	20,7	-252	88	66	4,05	1,73	0,66	35,7	31,4	8,17	3,59	0,65	5,5	0,56
RDM8	24	7,4	21,0	-230	87	66	3,98	1,80	0,70	36,9	32,2	8,45	3,73	0,64	5,5	0,56
RDM9	28	7,4	21,1	-207	86	66	4,06	1,79	0,67	35,7	30,8	9,06	4,01	0,64	5,5	0,54
RDM10	35	7,3	20,6	-240	86	65	4,09	1,86	0,68	35,1	31,7	10,1	4,50	0,66	5,5	0,53
RDM11	42	7,3	21,3	-239	84	63	4,11	1,87	0,68	34,2	30,7	10,5	4,68	0,66	5,5	0,52
RDM12	49	7,3	21,0	-230	83	62	4,22	1,89	0,63	33,1	29,0	10,9	4,88	0,66	5,4	0,50
RDM13	56	7,2	21,7	-207	84	62	4,06	1,98	0,62	34,2	30,4	11,2	5,00	0,64	5,4	0,50
RDM14	63	7,3	21,3	-243	82	60	4,13	1,98	0,68	33,0	29,5	11,2	5,00	0,66	5,5	0,48
RDM15	70	7,2	21,8	-249	83	62	4,13	1,96	0,65	33,8	23,6	11,3	5,02	0,66	5,5	0,47
RDM16	77	7,3	21,6	-254	83	61	4,19	2,78	0,81	32,9	29,1	11,3	5,03	0,65	5,4	0,47
RDM17	84	7,3	22,0	-230	82	60	4,07	2,08	0,65	33,7	29,5	10,3	4,60	0,65	5,3	0,47
RDM18	91	7,4	22,0	-256	81	60	4,20	2,03	0,70	33,6	30,9	9,29	4,17	0,67	5,4	0,47
RDM19	98	7,5	21,8	-259	79	58	4,13	1,45	1,08	31,6	29,6	9,62	4,32	0,66	5,4	0,45
RDM20	105	7,5	21,7	-258	79	58	4,10	2,10	0,63	31,5	27,9	9,66	4,34	0,66	5,5	0,44
RDM21	112	7,4	22,2	-257	78	57	4,16	2,14	0,66	31,1	28,6	9,46	4,25	0,66	5,3	0,44
RDM22	119	7,4	22,3	-228	79	58	4,11	2,16	0,66	31,3	28,6	9,65	4,33	0,66	5,4	0,44

<sup>1)</sup> Redoxpotentiaal



To explore  
the potential  
of nature to  
improve the  
quality of life



---

Wageningen Livestock Research  
Postbus 338  
6700 AH Wageningen  
T 0317 48 39 53  
E [info.livestockresearch@wur.nl](mailto:info.livestockresearch@wur.nl)  
[www.wur.nl/livestock-research](http://www.wur.nl/livestock-research)

---

Wageningen Livestock Research ontwikkelt kennis voor een zorgvuldige en renderende veehouderij, vertaalt deze naar praktijkgerichte oplossingen en innovaties, en zorgt voor doorstroming van deze kennis. Onze wetenschappelijke kennis op het gebied van veehouderijsystemen en van voeding, genetica, welzijn en milieu-impact van landbouwhuisdieren integreren we, samen met onze klanten, tot veehouderijconcepten voor de 21e eeuw.

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen 9 gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research en Wageningen University hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

