



Mineralisatie van koolstof uit urine, feces, en drijfmest van melkkoeien na mengen met zandgrond

H.C. de Boer

Rapport 1415



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Mineralisatie van koolstof uit urine, feces, en drijfmest van melkkoeien 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, maart 2023

Openbaar
Rapport 1415

De Boer, H.C., 2023. *Mineralisatie van koolstof uit urine, feces, en drijfmest van melkkoeien na mengen met zandgrond*. Wageningen Livestock Research, Openbaar Rapport 1415.

Dit rapport is gratis te downloaden op <https://doi.org/10.18174/590650> of op 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 1415

Inhoud

	Samenvatting	5
1	Inleiding	7
2	Materiaal & methoden	8
	2.1 Proefopzet	8
	2.2 Proefuitvoer	8
	2.2.1 Grondverzameling en grondanalyse	8
	2.2.2 Mestverzameling en mestanalyse	8
	2.2.3 Incubatie en respiratiemeting	9
	2.2.4 Berekeningen	9
	2.2.5 Statistische analyse	10
3	Resultaten	11
	3.1 Samenstelling van mest en grond	11
	3.2 Koolstofrespiratie uit grond en mest	12
	3.2.1 Grond	12
	3.2.2 Feces	12
	3.2.3 Urine	14
	3.2.4 Drijfmest	16
	3.2.5 Gescheiden of gezamenlijke toediening van urine en feces	18
	3.3 Overblijvende koolstof	19
	3.3.1 Grond	19
	3.3.2 Feces	19
	3.3.3 Urine	20
	3.3.4 Drijfmest	22
	3.3.5 Gescheiden of gezamenlijke toediening van urine en feces	23
4	Discussie	24
	4.1 Samenstelling van urine, feces, en drijfmest	24
	4.2 Koolstofmineralisatie	24
	4.2.1 Grond	24
	4.2.2 Feces	24
	4.2.3 Urine	25
	4.2.4 Drijfmest	26
	Conclusies	27
	Dankwoord	28
	Literatuur	29

Samenvatting

De ligboxenstal met roostervloer en drijfmestproductie is het dominante huisvestingssysteem in de Nederlandse melkveehouderij. Bij de ontwikkeling van nieuwe stalsystemen is er aandacht voor systemen waarbij urine en feces zoveel mogelijk apart worden gehouden bij de uitscheiding, de opslag, en aanwending op het land. Urine en feces verschillen duidelijk in eigenschappen, wat de vraag oproept wat gescheiden toediening betekent voor de afbraak van organische stof (OS) uit deze meststoffen in de bodem. Om het perspectief van bronscheiding voor OS-management vast te stellen, is er behoefte aan informatie over het gedrag van beide fracties en van mengsel drijfmest na toediening aan de bodem. In laboratoriumonderzoek is eerder waargenomen dat drijfmest de mineralisatie van grond-C (een afgeleide van de afbraak van grond-OS) kan remmen, en ook dat de mineralisatie van drijfmest-C enkele maanden na toediening tot stilstand kan komen. Het apart meten van de C-mineralisatie van urine en feces kan behulpzaam zijn om te achterhalen welke fractie verantwoordelijk is voor deze effecten, en of het mengen van de fracties tot drijfmest een oorzaak is. Er is daarom onderzoek uitgevoerd waarin de C-mineralisatie van urine, feces, en drijfmest apart is gemeten na mengen met grond. Hypothesen waren dat 1) bij toediening van alleen feces de mineralisatie van feces-C niet tot stilstand zou komen, zoals bij drijfmest, maar zou blijven doorgaan; 2) de toediening van alleen urine de mineralisatie van grond-C zou remmen; en 3) toegediende C sneller zou mineraliseren bij gescheiden toediening van urine en feces dan bij gezamenlijke toediening als drijfmest. Deze hypothesen zijn in het laboratorium onderzocht in een incubatieproef (bij 20°C) met herhaalde meting van de CO₂-respiratie na het wel of niet mengen van een zandgrond met (indicatief) 4 ton ha⁻¹ verse urine, 6 ton ha⁻¹ verse feces, of 10 ton ha⁻¹ verse drijfmest, en daarvan een dubbele, drievoudige, of viervoudige dosering. De CO₂-respiratie (C-flux) is gebruikt om de C-mineralisatie tijdens de proefperiode te berekenen.

Uit de resultaten blijkt dat na toediening van verse feces de mineralisatie van feces-C na uiterlijk 112 dagen tot stilstand kwam. Dit wijst erop dat het tot stilstand komen van de C-mineralisatie van drijfmest, enkele maanden na toediening, niet het gevolg hoeft te zijn van het mengen van feces met urine, maar ook veroorzaakt kan worden door de feces. In de eerste weken na toediening van feces was de C-flux hoger bij een hogere gift, maar later werden verschillen kleiner. Aan het einde van de proef, na 168 dagen incubatie, was de C-flux bij de hoogste giften kleiner dan bij de controle met alleen grond, wat wijst op een (beperkte) stimulering van de mineralisatie van grond-C ('priming') eerder tijdens de proefperiode. Aan het einde van de proef was er van de feces-C nog 70 tot 73% over.

Bij toediening van verse urine piekte de mineralisatie van urine-C direct na start van de incubatie en nam daarna snel af. De C-flux was alleen op dag 1 proportioneel hoger bij hogere gift. Vanaf dag 14 was de flux bij toediening van urine lager dan bij de controle, wat betekent dat urine de mineralisatie van grond-C remde, waarschijnlijk als gevolg van het relatief hoge zoutgehalte. Aan het einde van de proef was er als gevolg van een oplopende urinegift naar schatting respectievelijk 25%, 39%, 44%, en 41% minder grond-C gemineraliseerd vergeleken met de controle. Na correctie voor dit remmende effect waren de geschatte overblijvende percentages urine-C bij oplopende gift respectievelijk 7%, 34%, 45%, en 51%. Verwacht wordt dat het remmende effect van urine op de mineralisatie van grond-C onder veldomstandigheden kleiner zal zijn dan in laboratoriumproeven, vanwege een matigend effect van regenval, gewasopname van zouten, en effecten van plaatsing van de urine.

Bij toediening van verse drijfmest piekte de mineralisatie van drijfmest-C meteen na start van de incubatie en nam daarna snel af. De fluxen waren op dag 14 al aanzienlijk afgenomen en vanaf dag 84 lager dan bij de controle. De aan drijfmest toegerekende percentages overblijvende C aan het einde van de proef waren bij oplopende gift respectievelijk 91%, 79%, 81%, en 80%. Gecorrigeerd voor het remmende effect van de urine in de drijfmest waren de geschatte overblijvende percentages drijfmest-C respectievelijk 58%, 53%, 63%, en 67%. Deze gecorrigeerde percentages zijn voor een veldsituatie een meer realistische benadering van de overblijvende C uit rundveedrijfmest. Tot slot bleek de gescheiden toediening van verse urine en verse feces geen wezenlijk andere C-mineralisatie te geven dan de gezamenlijke toediening als verse drijfmest.



1 Inleiding

In de Nederlandse melkveehouderij is de ligboxenstal met roostervloer en drijfmestproductie het dominante huisvestingssysteem. Drijfmest ontstaat doordat door de koe apart uitgescheiden urine en feces bij elkaar komen op de vloer en in de opslag daaronder. Bij de ontwikkeling van nieuwe stalsystemen is er aandacht voor systemen waarbij urine en feces zoveel mogelijk apart worden gehouden bij de uitscheiding, opslag, en uitrijden op het land. Een hypothese is dat door deze scheiding bij de bron ('bronscheiding'), in combinatie met een passende nabehandeling van beide fracties, de ammoniakemissie uit de mest kan worden verlaagd. Een andere hypothese is dat de urine als kunstmestvervanger kan worden ingezet, en de feces als een breder toepasbare en meer hoogwaardige organische meststof dan drijfmest. Urine en feces verschillen duidelijk in samenstelling en eigenschappen, wat de vraag oproept wat gescheiden toediening betekent voor de afbraak van de organische stof (OS) uit deze producten in de bodem. Is deze afbraak door gescheiden toediening sneller of juist langzamer? Om het perspectief van bronscheiding voor OS-management vast te stellen, is er behoefte aan informatie over het gedrag van beide fracties en van hun mengsel na toediening aan de bodem.

In laboratoriumonderzoek is eerder waargenomen dat dat drijfmest de mineralisatie van grond-C (een afgeleide van de afbraak van grond-OS) kan remmen, en ook dat de mineralisatie van drijfmest-C enkele maanden na toediening tot stilstand kan komen (De Boer et al., 2018; De Boer, 2020; De Boer, 2021). De oorzaak van het tot stilstand komen is onbekend en moet mogelijk worden gezocht in het mengen van de feces met urine. Het remmende effect wordt veroorzaakt door het effect van het relatief hoge zoutgehalte in de urine op de activiteit van micro-organismen in de bodem (De Boer, 2020). Het apart meten van de C-mineralisatie van urine, feces, en drijfmest kan behulpzaam zijn om te vast te stellen welke fractie verantwoordelijk is voor de genoemde effecten. Daarnaast levert apart meten ook waardevolle kengetallen op over C-mineralisatie en hoeveelheden C die op termijn overblijven uit deze producten, informatie die kan worden gebruikt in andere studies.

Er is daarom onderzoek uitgevoerd waarin de C-mineralisatie van urine, feces, en drijfmest apart is gemeten na mengen met grond. Hypothesen waren dat 1) bij toediening van alleen feces de mineralisatie van feces-C niet tot stilstand zou komen, zoals bij drijfmest, maar zou blijven doorgaan; 2) de toediening van alleen urine de mineralisatie van grond-C zou remmen; en 3) toegediende C sneller zou mineraliseren bij gescheiden toediening van urine en feces dan bij gezamenlijke toediening als drijfmest. De opzet, uitvoering, en resultaten van dit onderzoek zijn beschreven in het voorliggende rapport.

2 Materiaal & methoden

2.1 Proefopzet

De hypothesen werden onderzocht in een incubatieproef met herhaalde meting van de CO₂-respiratie na het wel of niet mengen van een zandgrond met verse urine, verse feces, of verse drijfmest (het mengsel van de urine en feces) van melkkoeien, bij een (indicatieve) dosering van 4, 8, 12, of 16 ton ha⁻¹ voor alleen urine; 6, 12, 18, of 24 ton ha⁻¹ voor alleen feces, en 10, 20, 30, of 40 ton ha⁻¹ voor drijfmest. De 13 behandelingen werden herhaald in drie gerandomiseerde blokken, met per blok een toegevoegde blanco behandeling (geen grond, geen meststof), voor 14 experimentele eenheden per blok en 42 in totaal.

2.2 Proefuitvoer

2.2.1 Grondverzameling en grondanalyse

De zandgrond werd op 1 februari 2021 verzameld op een perceel blijvend grasland op esgrond, biologisch beheerd en gelegen op voormalig proefbedrijf Aver Heino (Heino). De grond werd verzameld uit bodemlaag 5-10 cm na het verwijderen en deels uitschudden van de graszode, twee weken opgeslagen bij ca. 8°C, op 15 februari gemengd (betonmolen) en gezeefd (5 mm), een dag aan de lucht gedroogd, bemonsterd, en opgeslagen bij 4°C tot het moment van inzetten van de proef. 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-H₂O, organische stof, C-organisch (Kurmies), N-totaal, P-Al, K-HCl, en CEC.

2.2.2 Mestverzameling en mestanalyse

Urine en feces werden verzameld uit meetstallen op proeffaciliteit Dairy Campus (Leeuwarden). De melkkoeien in deze stallen stonden jaarrond op stal en werden gevoerd met een regulier rantsoen, grotendeels bestaande uit kuilgras (70% van ruwvoer-DS) en snijmaïs (30% van ruwvoer-DS). De urine werd verzameld op 12 januari 2021 uit het opvangvat (IBC, 1000 l) van het in stal 70 aanwezige Hanskamp CowToilet (Hanskamp, Doetinchem). Op het moment van verzamelen bevatte het opvangvat 630 liter, de opgevangen hoeveelheid van vier dagen, en was de urine gemiddeld twee dagen oud. Na mengen van de urine in het vat werd er met een multisampler (lengte 1,8 m, ø 35 mm; Eijkelkamp, Giesbeek) van bovenaf een monster van enkele liters genomen en gemengd in een emmer, en werd daaruit een deelmonster van 0,9 l genomen en ingevroren bij -18°C. Op vrijdag 26 februari werd dit monster ontdooid en daarna bewaard bij 4°C. De feces werden op 28 februari verzameld uit de verse productie van zes koeien in stal 60, meteen na uitscheiding op de stalvloer. Na mengen werd een deelmonster genomen en bewaard bij 4°C. Een ander deel van de gemengde feces werd met urine uit de koeling gemengd tot drijfmest in de verhouding 60 : 40 (w/w), de verhouding waarin urine en feces door de koe worden uitgescheiden. De drie monsters werden daarna bewaard bij 4°C tot het moment van inzet in de proef en de analyse op samenstelling.

Urine, feces, en drijfmest werden op samenstelling geanalyseerd 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); en NH₄-N eveneens met SFA (na extractie met 1 M KCl). Het drogestofgehalte 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 respiratiemeting

De incubatieproef werd uitgevoerd door het laboratorium van de Soil Biology Group (SBL, Wageningen) en ingezet op 1 maart 2021. Glazen flessen (ø 6,9 cm; 575 ml) werden gevuld met alleen zandgrond (300 g op DS-basis) of zandgrond gemengd met urine, feces, of drijfmest (het mengsel van urine en feces) met een indicatieve gift van 4, 8, 12, of 16 ton ha⁻¹ (urine); 6, 12, 18, of 24 ton ha⁻¹ (feces); of 10, 20, 30, en 40 ton ha⁻¹ (drijfmest). Toegediende hoeveelheden per fles waren respectievelijk 1,50 tot 5,98 g voor urine, 2,24 tot 8,97 g voor feces, en 3,74 tot 14,96 g voor drijfmest. De toegediende hoeveelheden op hectareniveau waren omgerekend naar hoeveelheden per fles op basis van het grondoppervlak in de fles, en de grondlaag in de flessen was ca. 5 cm hoog. Aan de mengsels werd gedemineraliseerd water toegediend tot de grond op 60% van de vloiegrens was (321 ml kg⁻¹ droge grond), waarbij werd gecorrigeerd voor water toegediend met de meststof. De concentraties van de meststoffen in het eindmengsel (grond + meststof + toegediend water) varieerden van 0,41% tot 1,67% voor urine, 0,63% tot 2,50% voor feces, en 1,04% tot 4,16% voor drijfmest. Na het vullen werden de flessen gewogen, afgesloten met een prop watten, en gedurende 168 dagen weggezet bij 20°C, in het donker.

Tijdens de incubatieperiode werd de CO₂-respiratie in de flessen 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 CO₂ in de fles kon verzamelen. Aan het einde van deze accumulatieperiode werd de CO₂-concentratie in iedere fles gemeten. Deze concentraties werden gecorrigeerd voor de CO₂-concentratie in de omgevingslucht op het moment van het sluiten van de flessen, zoals gemeten in de lege flessen (blanco behandeling). De accumulatieperiode werd tijdens de proef verlengd, van 1 uur bij de eerste meting tot 24 uur bij de laatste meting, om de CO₂-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 te herstellen. Na de laatste meting werd het luchtvolume in de flessen gravimetrisch bepaald.

Bij de voorbereiding van de meting op 15 maart, op dag 14, is een serie flessen kapot gevallen. Hierdoor missen na de meting op dag 7 de resultaten van twee herhalingen bij de behandelingen 'drijfmest 10 ton ha⁻¹' en 'feces 6 ton ha⁻¹', en de resultaten van één herhaling bij de rest van de behandelingen.

2.2.4 Berekeningen

Bij het mengen van urine met feces of grond kan in de urine nog aanwezige ureum worden omgezet in ammonium. Hierbij wordt anorganische C gevormd, waardoor het uiteindelijke gehalte anorganische C dat wordt toegediend met urine hoger kan zijn dan verwacht op basis van het gehalte op het moment van analyseren. Het extra gehalte anorganische C als gevolg van de omzetting van ureum werd berekend op basis van het berekende gehalte ureum-N in de urine (paragraaf 3.1) en met behulp van de chemische reactieformules voor ureumhydrolyse (zie bv. Sigurdarson et al., 2018).

De CO₂-emissie uit de flessen werd gebruikt als representant voor 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 C-flux uit iedere fles berekend, op basis van de begin- en eindconcentratie CO₂, met aanname van een molair volume (V_m) van 24,04 L mol⁻¹. De 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. Hierdoor werd het verschil in flux toegerekend aan de toegediende meststof. Wanneer een meststof een effect heeft op de mineralisatie van grond-C, dan wordt dit effect toegerekend aan de meststof, en kan de berekende C-mineralisatie afwijken van de mineralisatie van C uit de meststof zelf.

De hoeveelheid C die met respiratie tussen de meettijdstippen 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).

Bij de toediening van urine was de bruto C-flux (grond + urine) negatief vanaf dag 14 en stabiliseerde deze vanaf dag 28. De stabiele negatieve C-flux werd geïnterpreteerd als een remmend effect van de toediening van urine op de mineralisatie van grond-C. Er werd aangenomen dat dit effect de hele incubatieperiode aanwezig was, ook tussen dag 1 en 14. Uit de stabilisatie vanaf dag 28 werd afgeleid dat er vanaf dat moment geen urine-C meer mineraliseerde. Het remmende effect van urine op de mineralisatie van grond-C, ofwel de hoeveelheid C die minder uit grond-C mineraliseerde als gevolg van toediening van urine, werd geschat door per gift de negatieve C-flux tussen dag 28 en dag 168 te middelen en dit gemiddelde toe te passen op de hele proefperiode. De C-flux van alleen urine-C werd per gift geschat door bij de fluxen op dag 1, 3, 7, en 14 de gewogen gemiddelde negatieve flux tussen dag 28 en dag 168 op te tellen en de C-flux vanaf dag 28 op 0 te zetten. Vervolgens werd met behulp van deze gecorrigeerde fluxen de hoeveelheid overblijvende C uit alleen urine berekend.

Bij drijfmest werd de hoeveelheid overblijvende C ook gecorrigeerd voor het remmende effect van het urine-aandeel op de mineralisatie van grond-C, door per drijfmestgift de C-flux per meettijdstip te verhogen met de gemiddelde negatieve C-flux tijdens de stabiele periode van de bijbehorende urinegift. Vervolgens werd de hoeveelheid overblijvende C opnieuw berekend.

Het effect van gescheiden toediening van urine en feces werd vergeleken met de gezamenlijke toediening als drijfmest door de bruto C-flux (drijfmest + grond) bij de gift van 20 ton drijfmest te vergelijken met de opgetelde bruto C-flux van de gift van 16 ton urine en 24 ton feces, vermenigvuldigd met factor 0,5. Bij deze vergelijking waren de concentraties van urine en feces in de grond gelijk bij zowel gescheiden als gezamenlijke toediening. Met de factor werd gecorrigeerd voor de dubbele gift van urine, feces, en grond. Dezelfde vergelijking, na correctie, werd ook gemaakt tussen de gift van 10 ton drijfmest en de gift van 8 ton urine en 12 ton feces. Met behulp van de gecorrigeerde bruto fluxen werd tenslotte de hoeveelheid overblijvende C bij gescheiden toediening berekend.

2.2.5 Statistische analyse

Verschillen in bruto C-flux en percentages overblijvende C uit een meststof werden voor urine, feces, en drijfmest afzonderlijk geanalyseerd met de procedure voor Residual Mixed Likelihood (REML) in statistisch pakket Genstat (Genstat, 19e editie; VSNI, Hemel Hempstead, UK). Treatment Structure was 'Gift * Meetdag' en Block Structure was 'Blok'. Toepassing van deze procedure gaf een iets te optimistische toetsing van verschillen, omdat er geen rekening mee werd gehouden dat er steeds aan dezelfde experimentele eenheden werd gemeten. De resultaten konden echter niet geanalyseerd worden met de REML-procedure voor herhaalde waarneming, omdat hierbij het wiskundige algoritme niet convergeerde. Alle data werden voorafgaande aan de statistische analyse getransformeerd met de natuurlijke logaritme (LN), omdat bij een aantal parameters het niveau van het residu afhankelijk was van het niveau van de 'fitted values'.

Ten behoeve van een statistische toetsing van verschillen in bruto C-flux tussen gescheiden en gezamenlijke toediening van 10 of 20 ton drijfmest werd een REML-analyse uitgevoerd met de data van de behandelingen met een gift van 0, 10, en 20 ton drijfmest. De LSD van deze analyse werd gebruikt voor toetsing van paarsgewijze verschillen tussen gescheiden en gezamenlijke toediening. Ten behoeve van de statistische toetsing van verschillen in percentage overblijvende C tussen gescheiden en gezamenlijke toediening werd de LSD gebruikt uit de eerdere analyse van percentages overblijvende C na toediening van drijfmest. Verschillen werden aangeduid als 'significant' bij $P < 0,05$, tenzij anders aangegeven.

3 Resultaten

3.1 Samenstelling van mest en grond

De samenstelling van de gebruikte meststoffen en de zandgrond is gegeven in respectievelijk Tabel 1 en Tabel 2. De verse urine had een veel hogere pH en EC (~zoutgehalte) dan de verse feces, maar veel lagere gehalten drogestof, organische stof, C-totaal, en C-organisch (Tabel 1). Het aandeel C-organisch in C-totaal was bij urine aanzienlijk lager dan bij feces. Het N-gehalte, en vooral het K-gehalte, was in urine hoger dan in feces. De urine bevatte vrijwel geen P en de feces vrijwel geen NH₄-N, ofwel alle N in de feces was aanwezig in organische vorm. De gehalten drogestof, organische stof, C-totaal, N-totaal, P-totaal, en K-totaal in de verse drijfmest kwamen goed overeen met de gehalten die op basis van de 40 : 60 mengverhouding (urine : feces, w/w) zouden worden verwacht. De EC was echter duidelijk lager en het NH₄-N-gehalte duidelijk hoger dan verwacht op basis van de 40% bijdrage van de urine. De reden voor het hogere NH₄-N-gehalte is dat in de urine een deel van de N nog als (organisch) ureum aanwezig was, en deze ureum pas na het mengen met feces werd omgezet naar NH₄. Omdat de feces geen NH₄-N bevatte, kon op basis van het gehalte NH₄-N in de drijfmest en de mengverhouding van urine : feces het gehalte minerale N (incl. ureum) in de urine worden berekend op: $(1,99 / 0,38) = 5,23 \text{ g kg}^{-1}$, het aandeel minerale N in N-totaal in urine op $(5,23 / 6,75 * 100\%) = 77\%$, en het aandeel organische N in N-totaal in urine op $(100\% - 77\%) = 23\%$. Het gehalte ureum-N in urine, dat op het moment van analyseren nog niet was omgezet tot NH₄-N, werd berekend op: $(5,23 - 2,78) = 2,45 \text{ g N kg}^{-1}$, of 47% van N-mineraal en 36% van N-totaal.

In de urine was het gehalte anorganische C op het moment van analyseren 36% van de totale C, maar hierbij was nog niet alle ureum omgezet in ammonium, een proces waarbij anorganische C wordt gevormd. Op basis van het eerder berekende gehalte ureum-N in de urine werd berekend dat bij volledige omzetting van deze ureum het gehalte anorganische C zou zijn toegenomen tot $3,02 \text{ g C kg}^{-1}$, ofwel 54% van het totale C-gehalte in de urine.

Tabel 1 Samenstelling van de verse urine, feces, en drijfmest van melkkoeien zoals gebruikt in de incubatieproef.

Parameter	Eenheid	Type			
		Urine	Feces	Drijfmest	Urine : feces ¹⁾
pH	-	9,0	6,6	7,7	46 : 54
EC	mS cm ⁻¹	45	7	16	25 : 75
Redox (E _h , 20°C)	mV	43	131	69	- ²⁾
Drogestof	g kg ⁻¹ vers	43	135	95	43 : 57
Organische stof	g kg ⁻¹ vers	17	113	75	40 : 60
C-totaal	g kg ⁻¹ vers	5,6	60,0	38,5	40 : 60
C-organisch	g kg ⁻¹ vers	3,6	51,9 ³⁾	32,1	41 : 59
N-totaal	mg kg ⁻¹ vers	6753	4409	5302	38 : 62
NH ₄ -N	mg kg ⁻¹ vers	2777	1	1988	72 : 28
C-totaal : N-totaal	-	0,8	13,6	7,3	-
P-totaal	mg kg ⁻¹ vers	8	880	576	35 : 65
K-totaal	mg kg ⁻¹ vers	10523	641	4350	38 : 62

¹⁾ Verhouding van de bijdrage van de meetwaarde van urine en de meetwaarde van de feces aan de meetwaarde van een parameter in de drijfmest; ²⁾ niet berekend; ³⁾ gehalte berekend op basis van verhouding van gehalten in urine en drijfmest, in urine na volledige omzetting van ureum tot ammonium. De oorspronkelijke meetwaarde was te laag, waarschijnlijk als gevolg van een meetfout.

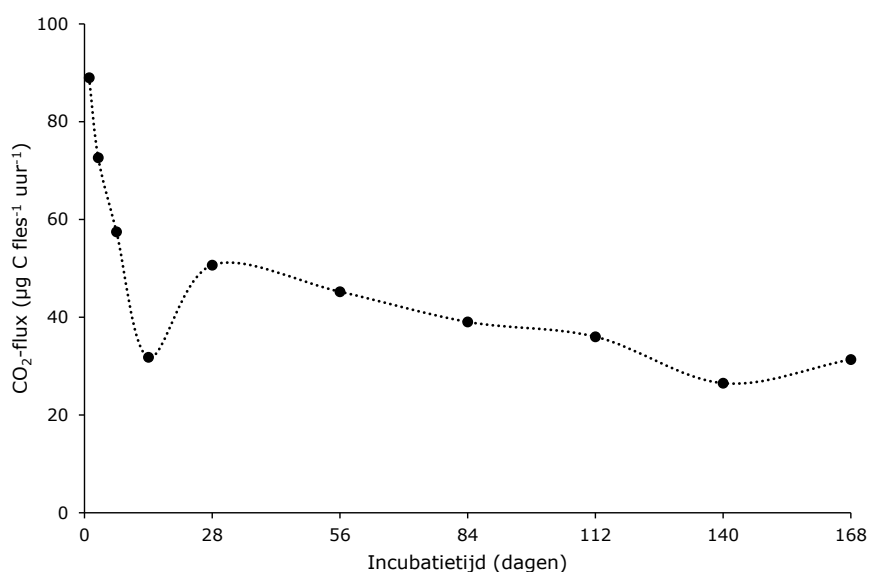
Tabel 2 Samenstelling van de zandgrond gebruikt in de incubatieproef, verzameld uit bodemlaag 5-10 cm van een graslandperceel. Gehalten zijn uitgedrukt op basis van drogen bij 40°C; minerale fracties op basis van drogen bij 105°C.

Parameter	Eenheid	Waarde
Klei	%	2
Silt	%	4
Zand	%	87
pH-KCl	-	5,5
pH-H ₂ O	-	6,6
OS	%	5,4
C-organisch	g C kg ⁻¹	29
C in OS	%	54
N-totaal	g N kg ⁻¹	2,2
C : N	-	13
P-Al	mg P kg ⁻¹	141
K-HCl	mg K kg ⁻¹	119
CEC	cmol+ kg ⁻¹	9,0

3.2 Koolstofrespiratie uit grond en mest

3.2.1 Grond

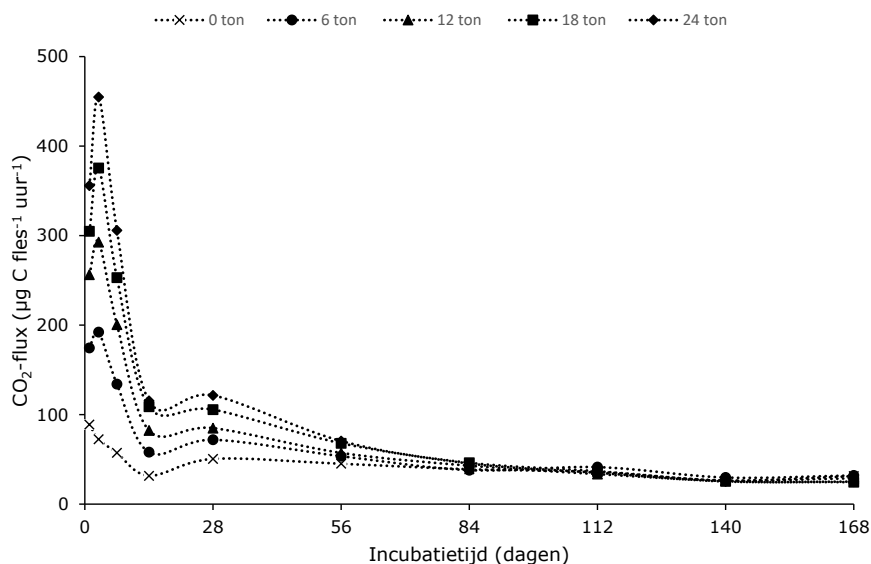
Bij incubatie van alleen zandgrond piekte de C-flux op dag 1, daalde tot dag 14, piekte opnieuw op een lager niveau op dag 28, daalde tot dag 140, en piekte mogelijk opnieuw op dag 168 (Fig. 1).



Figuur 1 Verandering van de CO₂-flux tijdens incubatie van de gebruikte zandgrond.

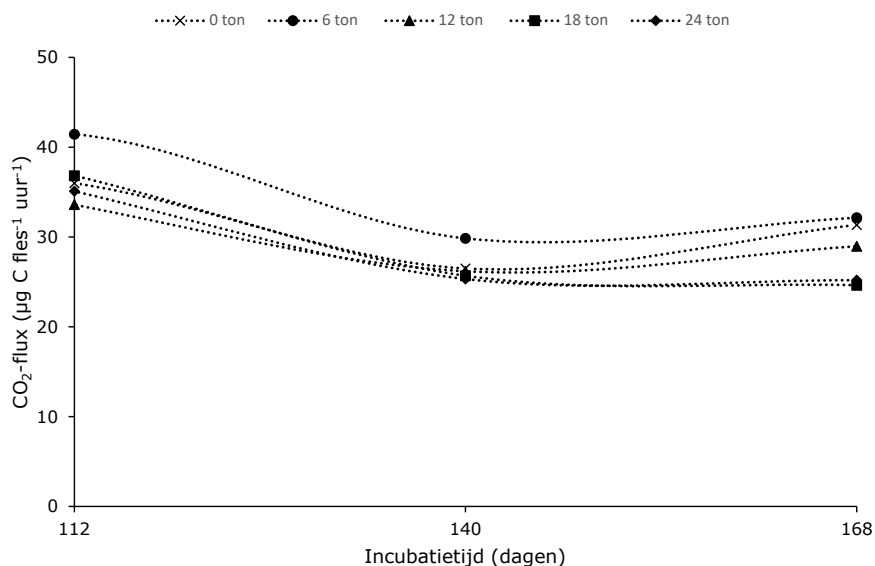
3.2.2 Feces

Na toediening van feces piekte de bruto C-flux (grond + feces) bij alle giften op dag 3 en nam daarna af tot het einde van de proefperiode (Fig. 2). In het begin van de proefperiode was de flux hoger bij een hogere gift, maar later werden deze verschillen steeds kleiner. Op dag 84 waren de fluxen minimaal en vanaf dag 112 was er vrijwel geen flux meer uit de toegediende feces vergeleken met de flux uit alleen de grond (Fig. 3).



Figuur 2 Verandering van de CO₂-flux tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 0, 6, 12, 18, of 24 ton ha⁻¹ feces van melkkoeien.

REML-analyse gaf een significant effect van gift, afhankelijk van meetdag ($P < 0,001$). Vergeleken met een gift van 0 ton was bij 6 ton de C-flux significant hoger t/m dag 28, bij 12 ton t/m dag 56, en bij 18 en 24 ton t/m dag 84. Daarnaast was bij 18 en 24 ton de C-flux op dag 168 significant lager dan bij 0 ton (Fig. 3). Vergeleken met een gift van 6 ton was bij 12 ton de C-flux t/m dag 28 significant hoger, en bij 18 of 24 ton t/m dag 84. Daarnaast was bij 18 en 24 ton de C-flux op dag 168 significant lager dan bij 6 ton. Vergeleken met een gift van 12 ton was bij 18 ton de C-flux t/m dag 84 significant hoger, en bij 24 ton t/m dag 56. Daarnaast was bij 18 ton de C-flux op dag 168 significant lager dan bij 12 ton. Vergeleken met 18 ton was bij 24 ton de C-flux t/m dag 7 significant hoger.

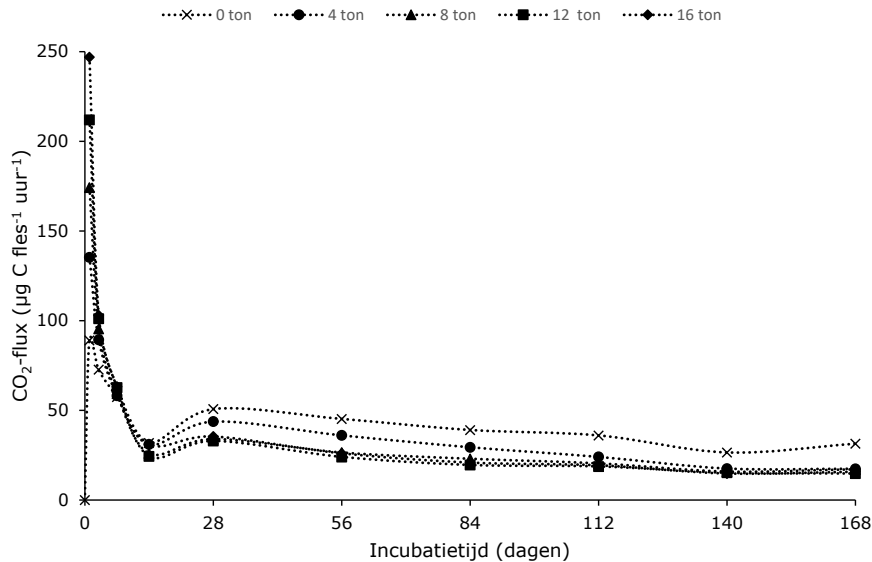


Figuur 3 Verandering van de CO₂-flux tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 0, 6, 12, 18, of 24 ton ha⁻¹ feces van melkkoeien, detailweergave voor dag 112 t/m dag 168.

3.2.3 Urine

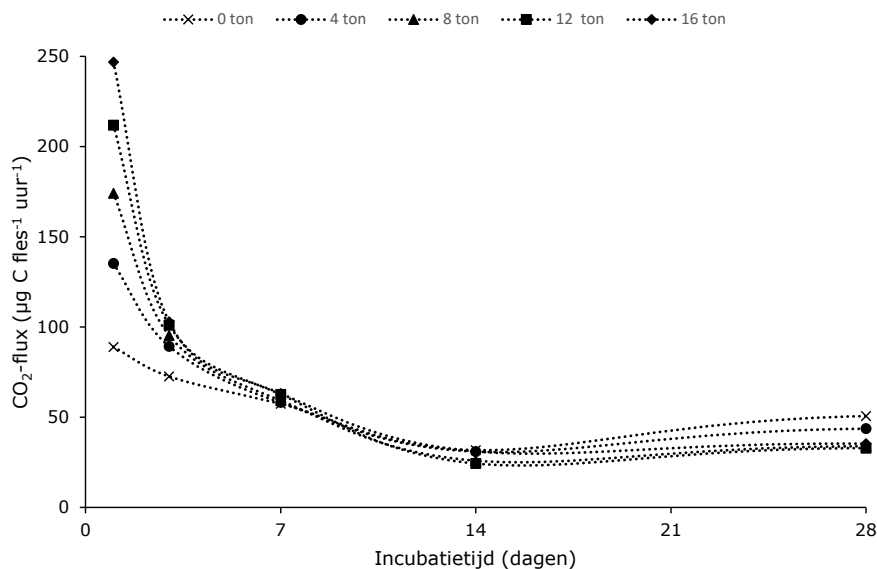
Flux zonder correctie voor remmend effect van urine op mineralisatie van grond-C

Bij alle urinegiftten piekte de bruto C-flux direct na start van de incubatie en nam daarna snel af (Fig. 4). Het verschil in flux tussen behandelingen met urine en de behandeling met alleen grond was minimaal bij meting op dag 7, negatief op dag 14 voor alle giftten behalve 4 ton, en negatief voor alle giftten vanaf dag 28 (Fig. 4, Fig. 5). De flux was alleen op dag 1 proportioneel hoger bij hogere urinegift.



Figuur 4 Verandering van de CO₂-flux tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 0, 4, 8, 12 en 16 ton ha⁻¹ urine van melkkoeien.

REML-analyse gaf een significant effect van urinegift, afhankelijk van meetdag ($P < 0,001$). Vergeleken met een gift van 0 ton was bij alle giftten de C-flux significant hoger op dag 1 en 3, bij 8 en 12 ton significant lager op dag 14, en bij alle giftten significant lager vanaf dag 28.

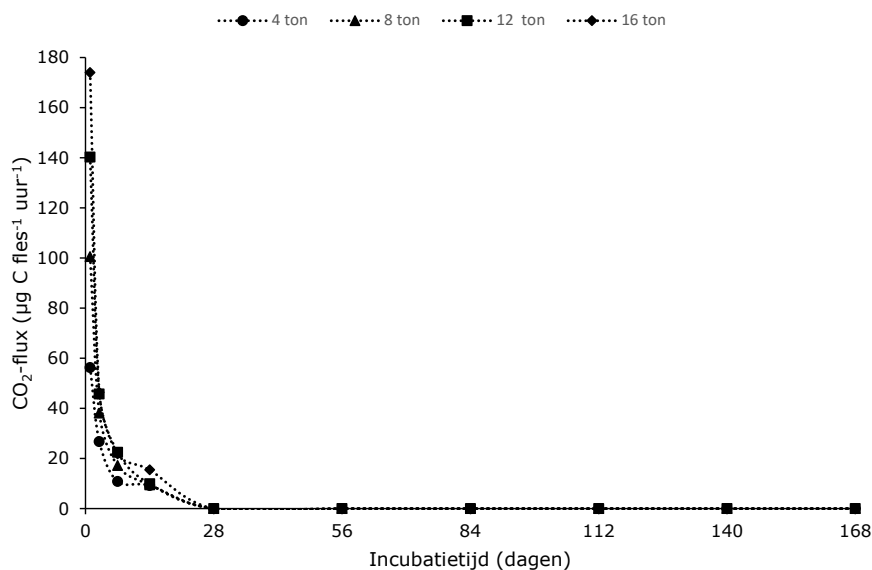


Figuur 5 Verandering van de CO₂-flux tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 0, 4, 8, 12 en 16 ton ha⁻¹ urine van melkkoeien, detailweergave voor de eerste 28 dagen.

Vergeleken met een gift van 4 ton was bij 8 ton de C-flux significant hoger op dag 1, en bij 12 en 16 ton op dag 1 en 3. Bij 8 ton was de flux significant lager vanaf dag 14 t/m dag 84, bij 12 ton vanaf dag 14 t/m dag 168, en bij 16 ton vanaf dag 28 t/m dag 140. Vergeleken met een gift van 8 ton was bij 12 en 16 ton de flux significant hoger op dag 1, en bij 12 ton ook op dag 3. Bij 12 ton was de flux significant lager vanaf dag 14, maar bij 16 ton niet. Vergeleken met een gift van 12 ton was bij 16 ton de C-flux significant hoger op dag 1 en dag 14, en was er op de rest van de meetdagen geen significant verschil.

Flux na correctie voor remmend effect van urine op mineralisatie van grond-C

Het remmende effect van de toediening van urine op mineralisatie van grond-C was vanaf dag 28 t/m dag 168, de periode waarin dit effect stabiel was, voor de oplopende giften respectievelijk gemiddeld -10, -15, -17, en -16 $\mu\text{g C fles}^{-1} \text{ uur}^{-1}$. De netto C-flux (na aftrek van de mineralisatie van grond-C), tussen dag 1 en dag 28 gecorrigeerd voor deze waarden, en vanaf dag 28 op 0 gezet, resteerde in de geschatte C-flux uit alleen urine-C zoals weergegeven in Fig. 6.

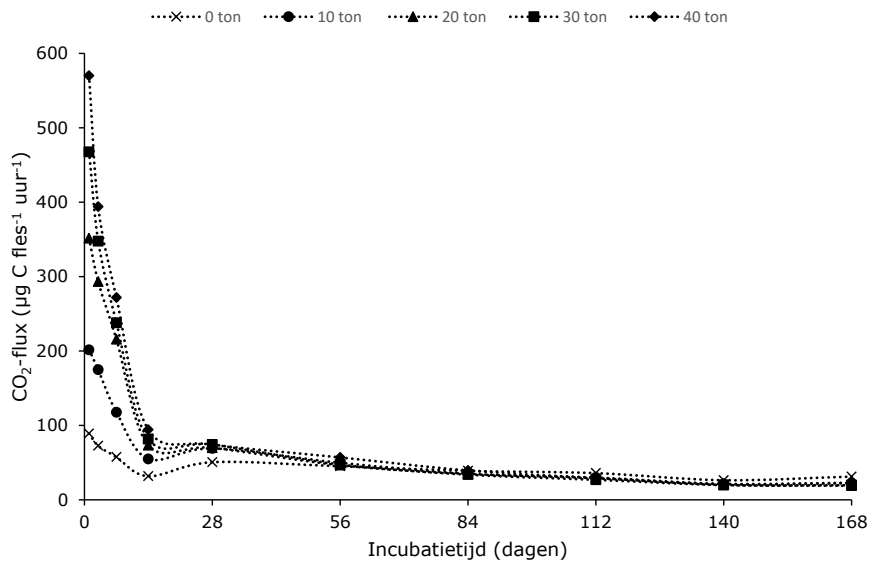


Figuur 6 Verandering van de CO_2 -flux tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 0, 4, 8, 12 en 16 ton ha^{-1} urine van melkkoeien, gecorrigeerd voor het remmende effect van urine op de mineralisatie van grond-C, en na aftrek van de mineralisatie van grond-C (bij de controle).

3.2.4 Drijfmest

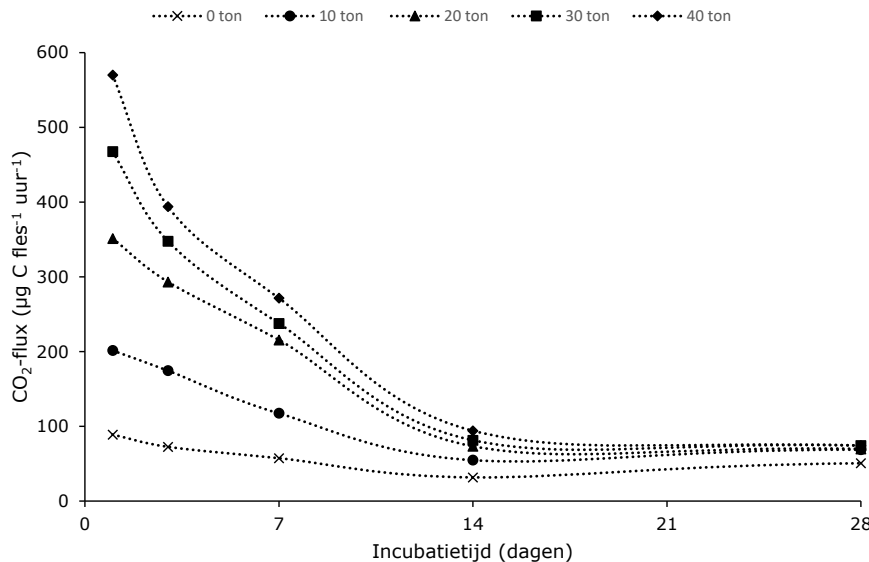
Flux zonder correctie voor remmend effect van urine in drijfmest op mineralisatie van grond-C

Bij alle drijfmestgiftten piekte de bruto C-flux meteen na start van de incubatie en nam daarna snel af volgens een grotendeels lineair patroon (Fig. 7, Fig. 8).



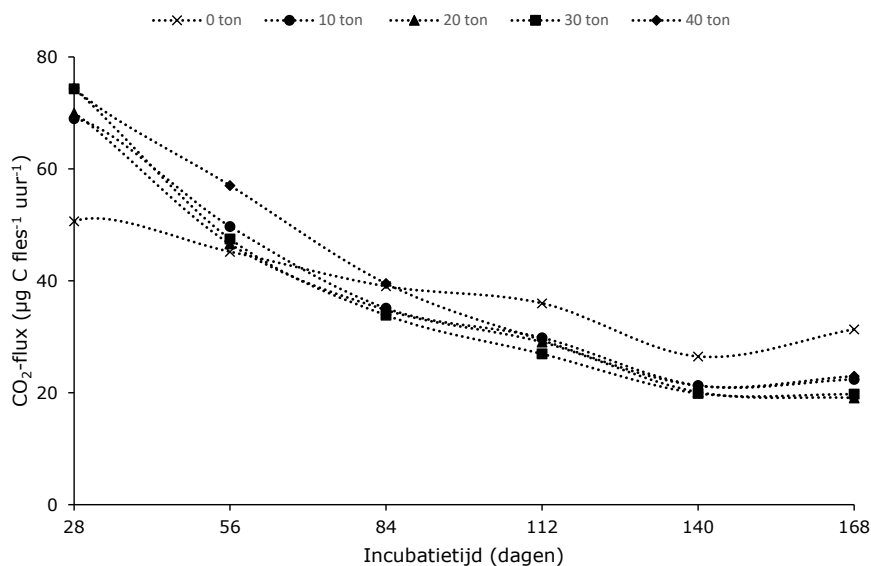
Figuur 7 *Verandering van de CO₂-flux tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 0, 10, 20, 30, of 40 ton ha⁻¹ drijfmest van melkkoeien.*

De fluxen waren op dag 14 al aanzienlijk afgenomen en na dag 28 waren verschillen klein. Vanaf dag 84 was de C-flux bij drijfmestgift (ogenschijnlijk) lager dan bij de controle met alleen grond. De flux was op dag 14 proportioneel hoger bij een hogere gift, en daarna t/m dag 14 alleen bij een gift van 10 of 20 ton (Fig. 8).



Figuur 8 *Verandering van de CO₂-flux tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 0, 10, 20, 30, of 40 ton ha⁻¹ drijfmest van melkkoeien, detailweergave voor de eerste 28 dagen.*

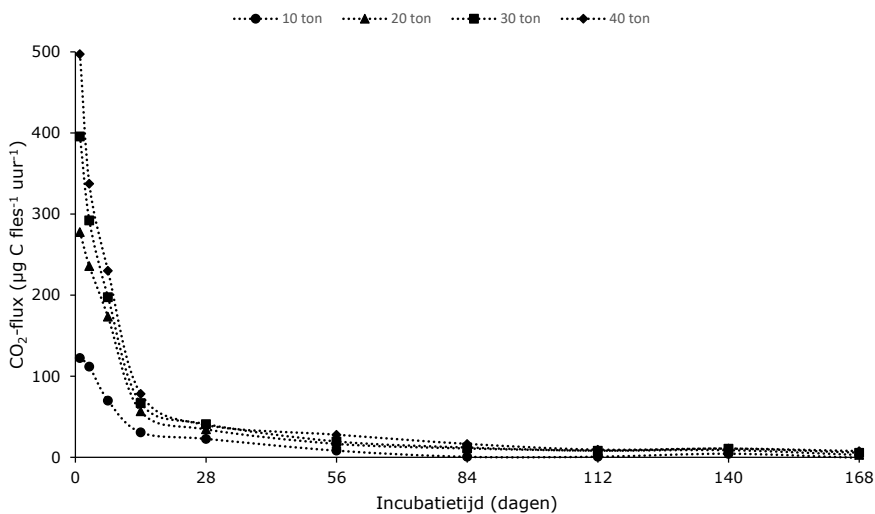
REML-analyse gaf een significant effect van drijfmestgift, afhankelijk van meetdag ($P < 0,001$). Vergelijken met de controle was bij alle giftten de flux t/m dag 28 significant hoger (bij 40 ton t/m dag 56), en vanaf dag 112 significant lager (Fig. 9). Vergelijken met een gift van 10 ton was bij 20, 30, en 40 ton de flux t/m dag 14 significant hoger. Vergelijken met een gift van 20 ton was bij 30 en 40 ton de flux t/m dag 28 significant hoger, en bij 30 ton vanaf dag 112 significant lager. Vergelijken met een gift van 30 ton was bij 40 ton de flux de hele incubatieperiode significant hoger, behalve op dag 28, 112, en 140.



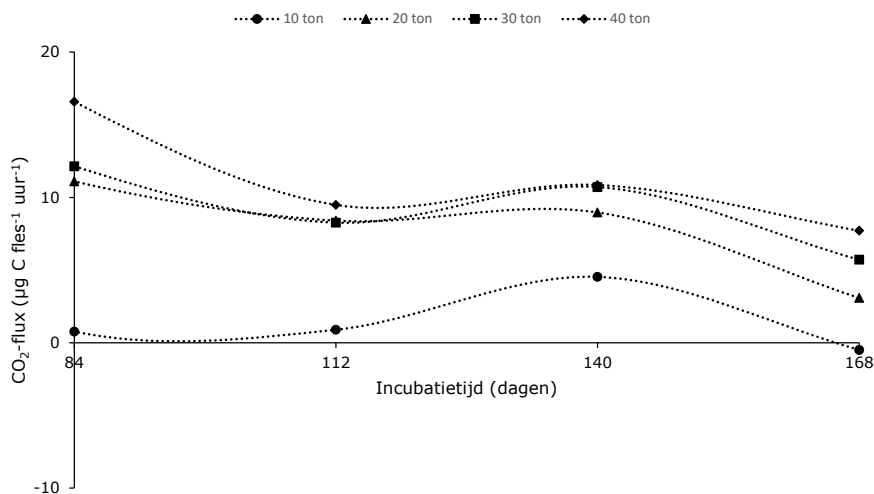
Figuur 9 Verandering van de CO₂-flux tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 0, 10, 20, 30, of 40 ton ha⁻¹ drijfmest van melkkoeien, detailweergave voor de laatste 140 dagen.

Na correctie voor remmend effect van urine in drijfmest op mineralisatie van grond-C

Als gevolg van de correctie voor het remmende effect van urine in de drijfmest op de mineralisatie van grond-C waren de netto C-fluxen 10 tot 17 µg fles⁻¹ uur⁻¹ hoger. De netto flux uit drijfmest-C, na aftrek van de mineralisatie van grond-C (bij de controle), bleef hierdoor positief tot aan het einde van de incubatieperiode, zij het op een erg laag niveau (Fig. 10, Fig. 11).



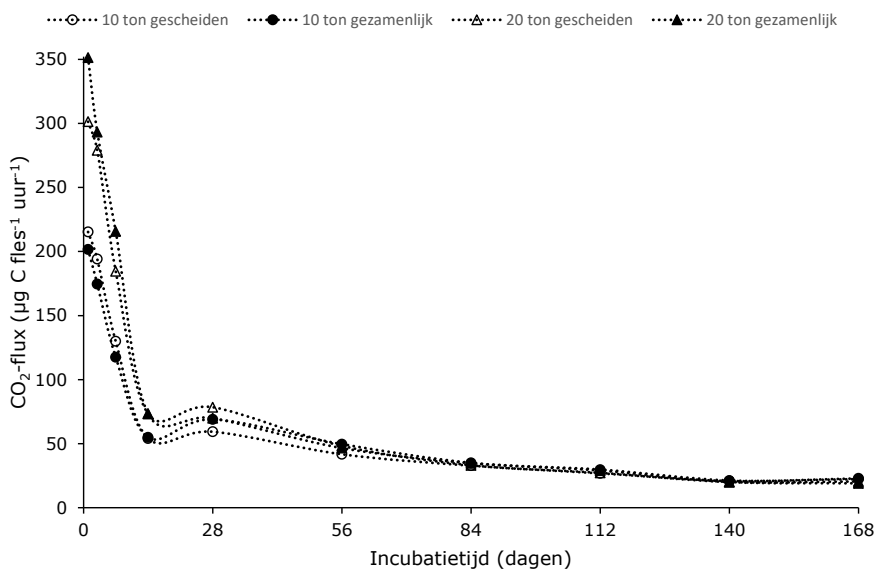
Figuur 10 Verandering van de CO₂-flux tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 0, 10, 20, 30, of 40 ton ha⁻¹ drijfmest van melkkoeien, gecorrigeerd voor het remmende effect van urine op de mineralisatie van grond-C, en na aftrek van de mineralisatie van grond-C (bij de controle).



Figuur 11 Verandering van de CO₂-flux tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 0, 10, 20, 30, of 40 ton ha⁻¹ drijfmest van melkkoeien, gecorrigeerd voor het remmende effect van urine op de mineralisatie van grond-C, en na aftrek van de mineralisatie van grond-C (bij de controle), detailweergave voor de laatste 84 dagen.

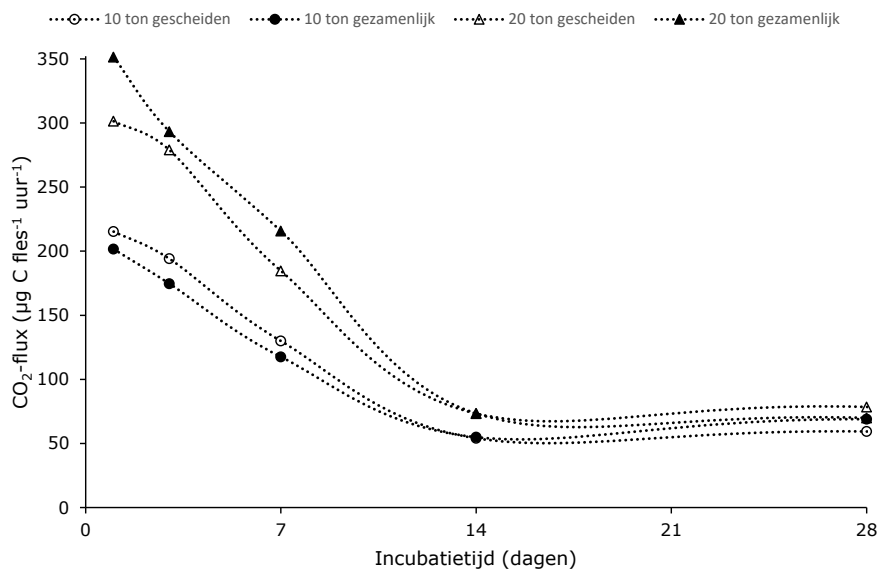
3.2.5 Gescheiden of gezamenlijke toediening van urine en feces

Bij gescheiden toediening van urine en feces was de bruto C-flux in de eerste week van de incubatieperiode wat hoger bij een gift van 10 ton, en lager bij een gift van 20 ton, vergeleken met gezamenlijke toediening (Fig. 12, Fig. 13). Daarna waren verschillen tussen gescheiden en gezamenlijke toediening klein of afwezig.



Figuur 12 Verandering van de CO₂-flux tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 10 of 20 ton ha⁻¹ drijfmest van melkkoeien, en van de (opgetelde) CO₂-flux bij apart mengen en incuberen van de achterliggende hoeveelheden urine en feces met grond in dezelfde concentraties.

REML-analyse (met gebruik van de data van de behandelingen met 0, 10 en 20 ton drijfmest) gaf een significant effect van mestgift, afhankelijk van meetdag ($P < 0,001$). De flux was bij een gift van 10 ton op dag 3 significant hoger bij gescheiden toediening vergeleken met gezamenlijke toediening, en bij een gift van 20 ton op dag 1 en 7 significant lager bij gescheiden toediening.

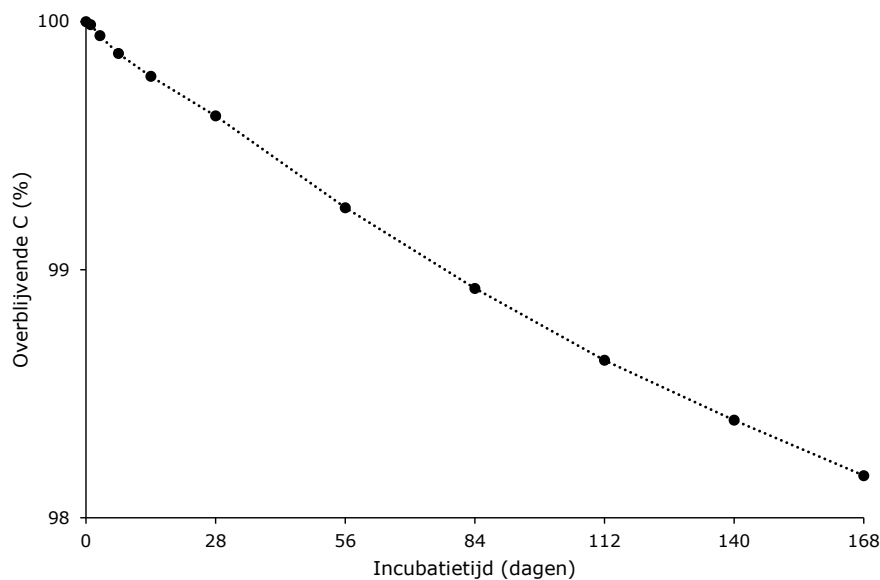


Figuur 13 Verandering van de CO₂-flux tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 10 of 20 ton ha⁻¹ drijfmest van melkkoeien, en van de (opgetelde) CO₂-flux bij apart mengen en incuberen van de achterliggende hoeveelheden urine en feces met grond in dezelfde concentraties, detailweergave voor de eerste 28 dagen.

3.3 Overblijvende koolstof

3.3.1 Grond

De berekende hoeveelheid overblijvende C in alleen de zandgrond nam tijdens de incubatieperiode af met 159 mg C fles⁻¹, relatief met 1,8% (Fig. 14).

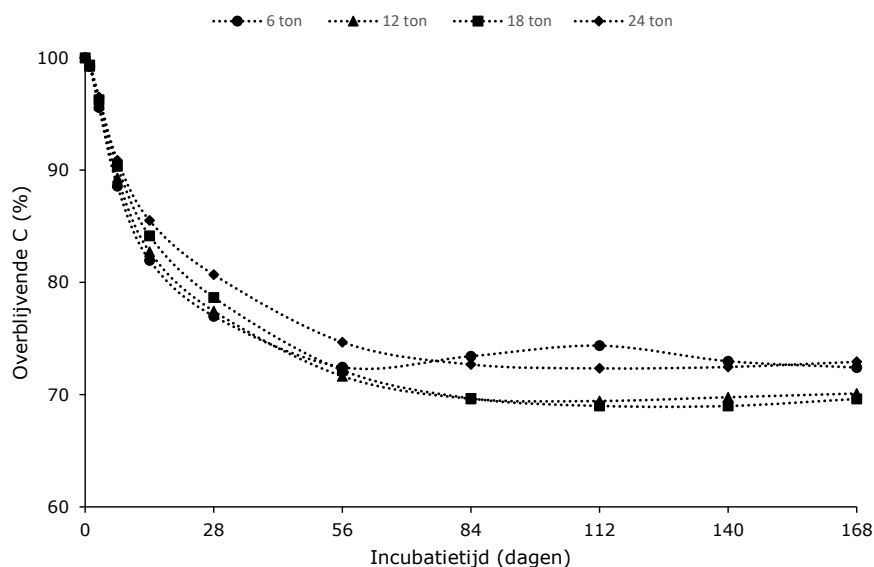


Figuur 14 Verandering van het percentage overblijvende C in alleen de zandgrond tijdens incubatie.

3.3.2 Feces

Het percentage overblijvende C uit alleen feces, dus na aftrek van grond-C, was aan het einde van de incubatieperiode, op dag 168, voor de oplopende giften respectievelijk 72%, 70%, 70%, en 73% (Fig. 15).

Bij een gift van meer dan 6 ton bleef het percentage overblijvende C stabiel na meting op dag 112. Bij een gift van 6 ton nam het percentage overblijvende C (ogenschoonlijk) toe vanaf dag 56 t/m dag 112, en daarna weer af.



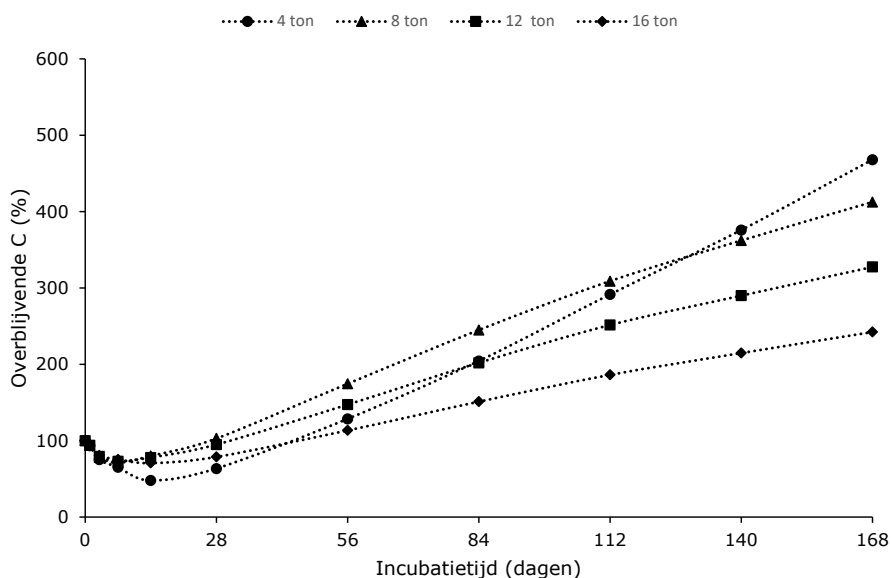
Figuur 15 Verandering van het percentage overblijvende C tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 6, 12, 18, of 24 ton ha^{-1} feces van melkkoeien, na aftrek van de mineralisatie van grond-C (bij de controle).

REML-analyse gaf geen significante interactie tussen gift en meetdag ($P = 1,00$) maar wel een significant hoofdeffect van gift ($P < 0,001$) en van meetdag ($P < 0,001$). Het percentage overblijvende C uit feces was bij een gift van 24 ton significant hoger dan bij 12 of 18 ton.

3.3.3 Urine

Zonder correctie voor remmend effect van urine op mineralisatie van grond-C

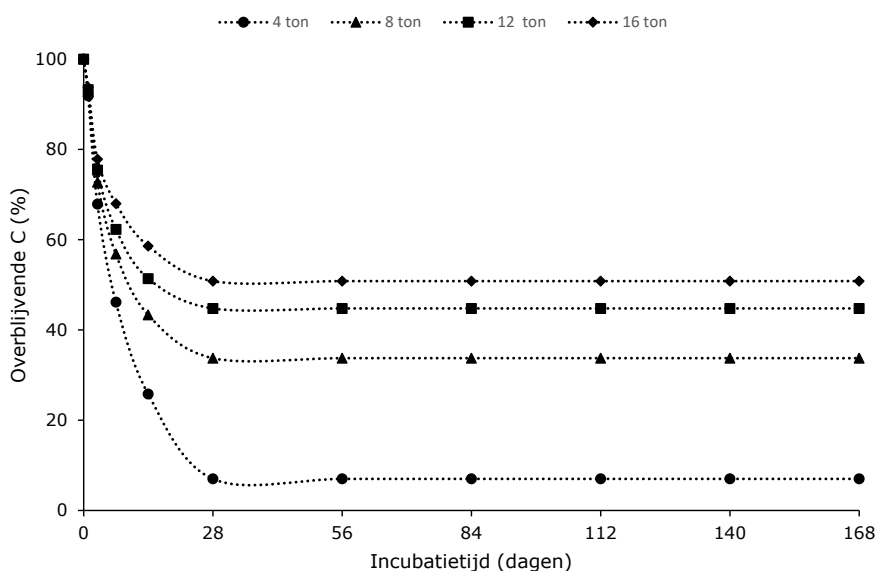
Het percentage (ogenschoonlijk) overblijvende C uit urine was als gevolg van het remmende effect op de mineralisatie van grond-C aanzienlijk hoger dan de hoeveelheid toegediende urine-C, en was na 168 dagen incubatie voor de oplopende giften respectievelijk 468%, 413%, 328%, en 242% (Fig. 16). REML-analyse gaf een neiging tot een significant effect van gift, afhankelijk van meetdag ($P = 0,06$). Vergeleken met een gift van 4 ton was bij 8, 12, en 16 ton het percentage overblijvende C significant hoger op dag 14, en bij 8 ton ook op dag 28. Bij 12 ton was het percentage overblijvende C op dag 168 significant lager dan bij 4 ton, en bij 16 ton op dag 112, 140, en 168. Vergeleken met een gift van 8 ton was bij 16 ton het percentage overblijvende C vanaf dag 56 t/m dag 168 significant lager.



Figuur 16 Verandering van het percentage overblijvende C tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 4, 8, 12, of 16 ton ha⁻¹ urine van melkkoeien, na aftrek van de mineralisatie van grond-C (bij de controle), maar inclusief het remmende effect van urine op mineralisatie van grond-C.

Na correctie voor remmend effect van urine op mineralisatie van grond-C

Als gevolg van het remmende effect van urine mineraliseerde er bij oplopende giften respectievelijk 0,5%, 0,7%, 0,8%, en 0,7% minder van de totale grond-C, ofwel respectievelijk 25%, 39%, 44%, en 41% minder grond-C dan bij de controle zonder urine. Na correctie voor het remmende effect van urine waren de geschatte percentages overblijvende urine-C na 168 dagen incubatie voor de oplopende giften respectievelijk 7%, 34%, 45%, en 51% (Fig. 17).

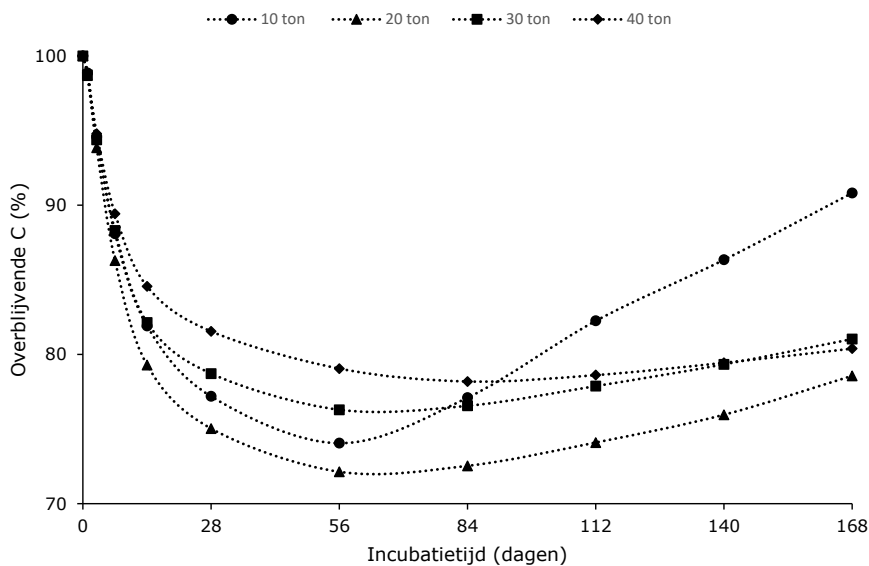


Figuur 17 Verandering van het percentage overblijvende C tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 4, 8, 12, of 16 ton ha⁻¹ urine van melkkoeien, na aftrek van de mineralisatie van grond-C (bij de controle) en van het remmende effect van urine op de mineralisatie van grond-C.

3.3.4 Drijfmest

Zonder correctie voor remmend effect van urine in drijfmest op mineralisatie van grond-C

Het percentage (ogenschijnlijk) overblijvende C uit toegediende drijfmest was na 168 dagen incubatie voor de oplopende giften respectievelijk 91%, 79%, 81%, en 80% (Fig. 18). De overblijvende C nam (ogenschijnlijk) weer toe na dag 56 (bij 10, 20, en 30 ton) of dag 84 (bij 40 ton).

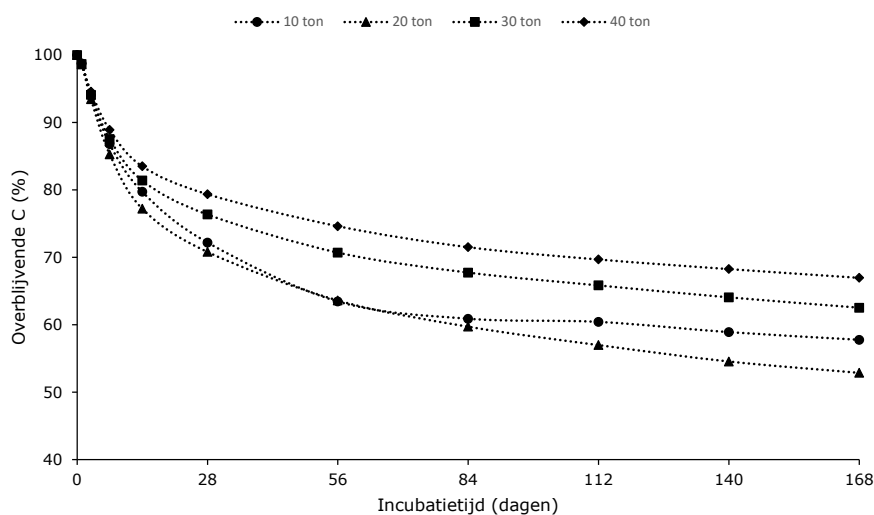


Figuur 18 Verandering van het percentage overblijvende C tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 10, 20, 30, of 40 ton ha⁻¹ drijfmest van melkkoeien, na aftrek van de mineralisatie van grond-C (bij de controle).

REML-analyse gaf een significant effect van mestgift, afhankelijk van meetdag ($P < 0,001$). Vergeleken met een gift van 10 ton was bij 20 ton het percentage overblijvende C vanaf dag 84 significant lager, bij 30 ton vanaf dag 112, en bij 40 ton vanaf dag 140. Bij een gift van 40 ton was daarnaast het percentage overblijvende C op dag 28 en 56 significant hoger dan bij een gift van 10 ton. Vergeleken met een gift van 20 ton was bij 30 ton het percentage overblijvende C vanaf dag 28 t/m 112 significant hoger, en bij een gift van 40 ton vanaf dag 7 t/m dag 140. Tussen een gift van 30 of 40 ton waren geen significante verschillen.

Na correctie voor remmend effect van urine in drijfmest op mineralisatie van grond-C

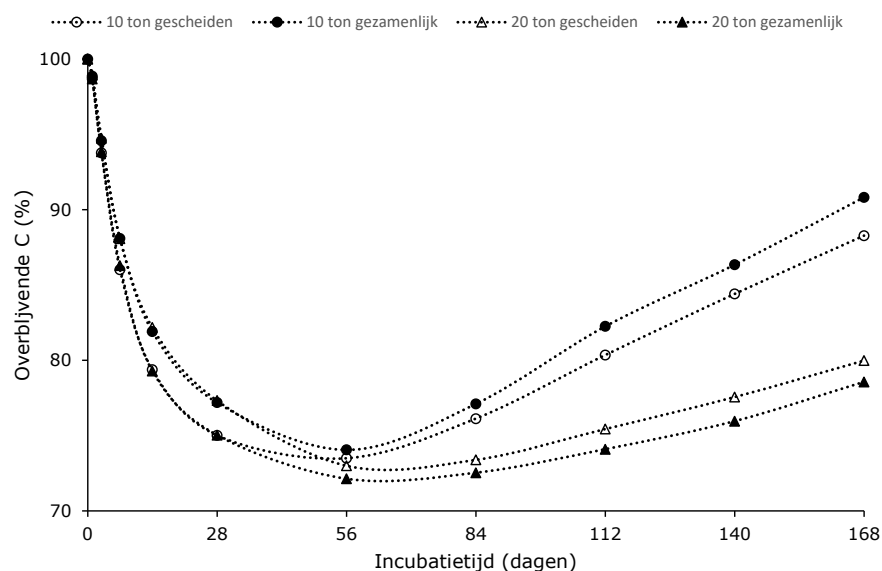
Na correctie voor het remmende effect van de urine in de drijfmest op de mineralisatie van grond-C waren de percentages overblijvende C uit drijfmest na 168 dagen incubatie voor de oplopende giften respectievelijk 58%, 53%, 63%, en 67% (Fig. 19). Na correctie bleef het percentage overblijvende C uit drijfmest afnemen tot aan het einde van de proefperiode.



Figuur 19 Verandering van het percentage overblijvende C tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 10, 20, 30, of 40 ton ha^{-1} drijfmest van melkkoeien, na aftrek van de mineralisatie van grond-C (bij de controle) en het remmende effect van het urine-aandeel op de mineralisatie van grond-C.

3.3.5 Gescheiden of gezamenlijke toediening van urine en feces

Het percentage overblijvende C verschilde t/m dag 28 niet tussen gescheiden of gezamenlijke toediening (Fig. 20). Daarna was het percentage overblijvende C bij gescheiden toediening van 10 ton wat lager, en bij gescheiden toediening van 20 ton wat hoger. Na 168 dagen incubatie was het percentage overblijvende C bij gescheiden of gezamenlijke toediening van 10 ton respectievelijk 88% of 91%, en bij 20 ton respectievelijk 80% of 79%. Deze verschillen waren niet significant binnen giftniveau ($P > 0,05$).



Figuur 20 Verandering van het percentage overblijvende C tijdens incubatie van een zandgrond gemengd met 10 of 20 ton ha^{-1} drijfmest van melkkoeien, of bij apart mengen en incuberen van de achterliggende hoeveelheden urine en feces met grond in dezelfde concentraties, na aftrek van de mineralisatie van grond-C (bij de controle).

4 Discussie

4.1 Samenstelling van urine, feces, en drijfmest

Het aandeel ureum in de urine was na vier dagen in het opvangvat nog relatief hoog, wat verklaard wordt uit de lage omgevingstemperatuur tijdens de opvangperiode (7°C; De Boer, 2023). De pH van de drijfmest was wat hoger dan op basis van het mengen van beide fracties zou worden verwacht, waarschijnlijk als gevolg van de omzetting van ureum tot ammonium na het mengen, een proces waarbij carbonaten worden gevormd en de pH kan toenemen. De EC van de drijfmest was lager dan op basis van de mengverhouding zou worden verwacht, mogelijk door neerslag van zouten na het mengen. De C/N verhouding van de verse feces (13,6) kwam redelijk overeen met een eerdere gemeten waarde in verse feces van melkkoeien (14,6) (De Boer et al., 2018).

4.2 Koolstofmineralisatie

4.2.1 Grond

De C-flux uit de zandgrond had tijdens incubatie twee, mogelijk drie pieken: op dag 1, dag 28, en mogelijk op dag 168. Het tussentijds pieken, ofwel een tijdelijke toename van de flux na eerdere afname, kan betekenen dat in periode tussen de twee meetmomenten de hoeveelheid en/of activiteit van de micro-organismen was toegenomen. Het percentage gemineraliseerde C na 168 dagen incubatie (1,8%) was relatief laag, vergeleken met bv. de gemineraliseerde percentages van negen zandgronden (1,3% - 3,7%, gem. 2,4%) uit een ander incubatieonderzoek uitgevoerd onder vergelijkbare condities (168 dagen, 20 °C) (niet gepubliceerd). Het aandeel C in de organische stof was met 54% (Tabel 2) relatief hoog, wat erop wijst dat de gebruikte zandgrond relatief veel 'oude' of 'inerte C' bevatte, iets wat bij deze oude cultuurgronden vaker wordt waargenomen.

4.2.2 Feces

Bij toediening van alleen feces was de C-flux aan het begin van de proefperiode hoger bij een hogere gift, maar later werden deze verschillen minder duidelijk en verdwenen (Fig. 2). Vanaf dag 84 was er geen extra flux meer bij giften van 6 en 12 ton, en vanaf dag 112 niet meer bij alle giften. Dit suggereert dat vanaf dag 112 de mineralisatie van feces-C tot stilstand kwam, een verschijnsel dat eerder werd waargenomen na de toediening van drijfmest. Nu dit verschijnsel zich ook voordoet bij toediening van alleen feces, kan worden geconstateerd dat het ogenschijnlijk tot stilstand komen van de mineralisatie van C uit drijfmest niet het gevolg hoeft te zijn van het mengen van urine en feces. De hypothese dat de mineralisatie van C uit feces niet tot stilstand komt, maar blijft doorgaan, wordt daarmee verworpen.

Het ogenschijnlijk tot stilstand komen van de mineralisatie van feces werd mogelijk (deels) veroorzaakt door 'priming', het verschijnsel dat de mineralisatie van grond-C wordt gestimuleerd door de toediening van externe C, bijvoorbeeld met mest. Deze stimulering leidt tot een versnelde uitputting van de voorraad makkelijk mineraliseerbare grond-C, waardoor op een later tijdstip de mineralisatie van de resterende grond-C lager kan zijn dan wanneer geen externe C was toegediend. Als gevolg van priming kan de totale mineralisatie (grond-C en feces-C) op hetzelfde niveau liggen als bij de controle (alleen grond-C), terwijl er toch nog een geringe hoeveelheid C uit de feces mineraliseert. De C-fluxen op dag 168 waren bij giften van 18 en 24 ton feces significant lager dan bij de kleinere giften en de controle, wat erop wijst dat uitputting door priming een rol kan hebben gespeeld en de C-mineralisatie uit feces op (minimaal) niveau kan zijn doorgedaan.

Het percentage overblijvende C uit feces was bij giften van 6 en 24 ton wat lager dan bij giften van 12 en 18 ton. Een mogelijke verklaring kan zijn dat bij 6 ton het maximale effect van priming niet werd bereikt, terwijl dat bij 12 en 18 ton wel het geval was, en bij 24 ton de relatieve bijdrage van priming al kleiner was geworden. Wanneer deze verklaring van toepassing is, dan is het percentage overblijvende C bij een gift van 6 en 24 ton (72%, 73%) een wat nauwkeurigere weergave dan het percentage bij 12 en 18 ton (70% en 70%).

Stikstofgebrek is zeer waarschijnlijk geen oorzaak geweest voor het (vrijwel) tot stilstand komen van de C-mineralisatie uit feces. De C/N-verhouding van de feces was 13,6 bij start van de proef en gezien de vlot verlopende mineralisatie in de eerste weken was er toen geen sprake van N-gebrek. Als gevolg van de mineralisatie nam de C/N-verhouding tijdens de proefperiode af, en had aan het einde een berekende waarde van 9,5 tot 9,9. Een tekort aan N of andere mineralen had de C-mineralisatie wel kunnen vertragen maar niet volledig tot stilstand kunnen brengen, omdat er altijd een deel van de mineralen wordt gerecycled door micro-organismen.

Een mineralisatie van 30% van de C uit verse feces betekent dat de mineralisatie uit oudere feces of oudere drijfmest waarschijnlijk lager zal zijn, omdat er tijdens de opslag in de kelder ook C verloren gaat. De resterende C die aan de bodem wordt toegediend mineraliseert trager, waardoor oudere drijfmest een lagere mineralisatie en groter percentage overblijvende C heeft dan verse drijfmest. In eerder onderzoek mineraliseerde er 41% van de C uit verse feces, bij incubatie onder vergelijkbare omstandigheden als in het huidige onderzoek (168 dagen, 20°C) (De Boer et al., 2018). Deze hogere C-mineralisatie kan het gevolg zijn geweest van een minder vergaande vertering van het rantsoen door de koe, waardoor meer makkelijk mineraliseerbare C werd uitgescheiden met de feces, of van een groter effect van priming.

4.2.3 Urine

Na toediening van urine piekte de C-flux vrijwel meteen en nam daarna erg snel af. De piek en snelle afname waren waarschijnlijk het gevolg van de mineralisatie van de kleine hoeveelheid labiele organische C en mogelijk ook van dissociatie van anorganische C (carbonaten), die een aanzienlijk aandeel van de totale C in urine kunnen vormen (Tabel 1). Vanaf dag 28 was bij alle urinegiften de bruto C-flux lager dan bij de controle, ofwel werd de mineralisatie van grond-C geremd. Het remmende effect werd waarschijnlijk veroorzaakt door het zoutgehalte van de urine, wat een remmend effect kan hebben op de activiteit van micro-organismen (De Boer, 2020).

De negatieve bruto C-fluxen bij urinegiften van 8, 12, en 16 ton lagen op een vergelijkbaar niveau (-15 tot -17 $\mu\text{g C fles}^{-1} \text{ uur}^{-1}$), terwijl de flux bij 4 ton urine minder negatief was (-10 $\mu\text{g C fles}^{-1} \text{ uur}^{-1}$). Dit verschil suggereert dat ergens tussen een gift van 4 en 8 ton de remming maximaal was en dat een hogere gift geen extra remmend effect had. Vanwege het remmende effect van de urine op de mineralisatie van grond-C zijn de in eerste instantie aan urine-C toegeschreven hoeveelheden overblijvende C niet realistisch en daarom gecorrigeerd. Als gevolg van deze correctie nam het percentage overblijvende urine-C toe met toenemende gift, tot een maximum van 51%. Het aandeel anorganische C in totale urine-C, na volledige omzetting van ureum tot ammonium, werd eerder berekend op 54%. De resultaten geven als indicatie dat, wanneer de kleine gift van 4 ton (met relatief grote meetfout) buiten beschouwing wordt gelaten, de anorganische C grotendeels in de grond aanwezig bleef en er vooral organische C mineraliseerde. Een andere verklaring is dat bij een toenemende urinegift er relatief steeds minder van de anorganische C ontweek als CO_2 .

Als gevolg van de remming door urine was de mineralisatie van grond-C tot 44% lager. Verwacht wordt dat in veldsituaties een dergelijk groot effect meestal niet optreedt. In de laboratoriumproef was er geen sprake van regenval, zoals in het veld, waardoor de zoutconcentratie in de grond niet werd verdund. Ook was er in de proef geen gewas aanwezig, waardoor er geen kationen werden opgenomen en de zoutconcentratie niet kon afnemen. Door de afwezigheid van beide invloeden was het remmende effect de hele proefduur maximaal. Onder praktijkomstandigheden kan de zoutconcentratie na toediening snel afnemen, waardoor het remmende effect van urine op mineralisatie van grond-C aanzienlijk lager kan zijn. Wanneer de urine bij uitrijden niet met de grond wordt gemengd, maar plaatselijk in sleufjes wordt geïnjecteerd (bouwland) of wordt zodebemest (grasland), kan het remmende effect ook kleiner zijn, vanwege minder contact met bodem en micro-organismen.

Daar staat tegenover dat wanneer de urine met een grotere hoeveelheid grond wordt vermengd dan in de proef, het remmende effect groter zou kunnen zijn. Bij uitscheiding van urine door de koe in de wei zal er ook sprake zijn van remming van mineralisatie van grond-C, maar omdat de urine in plekken wordt geconcentreerd kan dit effect mogelijk kleiner zijn. Praktisch gezien kan de remming van mineralisatie van grond-C worden beperkt door urine (of drijfmest) niet uit te rijden bij een dreigend vochttekort in de bodem, en door de urine niet volvelds uit te rijden of door de bouwvoor te mengen, maar te concentreren, bv. in sleuven.

4.2.4 Drijfmest

Verschillen in C-mineralisatie tussen gescheiden en gezamenlijke toediening van urine en feces waren klein bij giften van 10 of 20 ton, de giften waarbij betrouwbaar vergeleken kon worden. Hieruit kan worden geconstateerd dat er bij gezamenlijke toediening van verse urine en verse feces geen wezenlijk andere effecten optraden vergeleken met gescheiden toediening. Het remmende effect van urine was vrijwel gelijk voor de urine in drijfmest en apart toegediende urine, en had in drijfmest geen waarneembaar effect op de mineralisatie van de feces-C. De hypothese dat gescheiden toegediende feces sneller afbreekt dan feces in drijfmest wordt daarmee verworpen. Uit het ontbreken van verschillen kan ook worden afgeleid dat er bij de mineralisatie van alleen feces geen sprake was van N-gebrek. Was dit wel het geval geweest, dan had de extra minerale N uit urine geleid tot een hogere C-mineralisatie bij gezamenlijke toediening van urine en feces, vergeleken met gescheiden toediening.

Een vraag die open blijft staan is of er verschillen zullen zijn wanneer urine, feces, en drijfmest langere tijd in opslag zijn geweest, en de samenstelling is veranderd. Hoewel vergelijking van de effecten na toediening van verse drijfmest in deze proef met 'oudere' drijfmest in vorige proeven niet de indruk geeft dat er wezenlijk andere effecten kunnen worden verwacht, dient dit nog specifiek te worden onderzocht.

De hoge percentages overblijvende C uit verse drijfmest, variërend tussen 80% en 91%, worden vooral veroorzaakt door het remmende effect van de urine in drijfmest op de mineralisatie van grond-C. Na correctie hiervoor varieerden de overblijvende percentages van 53% tot 67%. In ander onderzoek, bijvoorbeeld De Boer et al. (2013), was de overblijvende C aanzienlijk lager, met percentages rond 35%. Een dergelijke laag percentage overblijvende C lijkt niet te kunnen worden verklaard door een beperktere vertering door de koe, omdat dit zou betekenen dat een groot deel van de makkelijk afbreekbare energie de pens zou zijn gepasseerd en uitgescheiden met feces. Het lijkt waarschijnlijker dat zulke lage overblijvende percentages het gevolg zijn van een groter effect van priming. Onduidelijk is door welke eigenschappen van de grond of een meststof deze priming wordt veroorzaakt.

Conclusies

- Het tot stilstand komen van de C-mineralisatie van drijfmest enkele maanden na toediening, zoals geconstateerd in diverse laboratoriumproeven, kan worden veroorzaakt door de feces in drijfmest en hoeft niet het gevolg te zijn van het mengen van feces met urine;
- Van met feces toegediende C was na 168 dagen incubatie nog 70 tot 73% over. Aan het einde van de proefperiode was de bruto C-flux bij een gift van 18 of 24 ton feces ha⁻¹ kleiner dan bij de controle met alleen grond, wat erop wijst dat eerder in de proefperiode priming had plaatsgevonden.;
- Bij toediening van verse urine was de C-flux vanaf dag 14 lager dan bij de controle, wat betekent dat toediening van urine de mineralisatie van grond-C remde;
- De remming door urine verlaagde de mineralisatie van grond-C voor de oplopende urinegiftten met gemiddeld respectievelijk -10, -15, -17, en -16 µg C fles⁻¹ uur⁻¹. Daardoor mineraliseerde er over de proefperiode respectievelijk 25%, 39%, 44%, en 41% minder grond-C vergeleken met de controle;
- De geschatte percentages overblijvende urine-C, na correctie voor het remmende effect van urine op de mineralisatie van grond-C, waren voor de oplopende giften respectievelijk 7%, 34%, 45%, en 51% na 168 dagen incubatie;
- De percentages (schijnbaar) overblijvende drijfmest-C waren voor de oplopende giften respectievelijk 91%, 79%, 81%, en 80% na 168 dagen incubatie. Na correctie voor het remmende effect van urine waren de overblijvende percentages respectievelijk 58%, 53%, 63%, en 67%. De gecorrigeerde percentages zijn voor een veldsituatie een betere reflectie van overblijvende drijfmest-C;
- Gescheiden toediening van urine en feces gaf geen wezenlijke verschillen in C-flux of percentage overblijvende C vergeleken met de gezamenlijke toediening als drijfmest.

Dankwoord

Ik dank melkveehouder Rob Overesch voor de mogelijkheid om grond van een van zijn graspercelen te verzamelen; Willeke van Tintelen en Tamas Salanki (beiden SBL) voor het uitvoeren van de incubatieproef; en Lotte Veenemans (Wageningen Environmental Research), Wieke Vervuurt (Wageningen Plant Research), en Jantine van Middelkoop (Wageningen Livestock Research) voor de review van een conceptversie van dit rapport. 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

- 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 runderdrijfmest: 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.
- De Boer HC (2023) Stikstofemissie en mineralenbalans van een melkveeststal met roostervloer en drijfmestproductie. Rapport Wageningen Livestock Research, Wageningen (in voorbereiding).
- De Boer HC, Timmerman M, Verdoes N, Schilder H (2018) Afbraak van organische stof uit (bewerkte) rundermest na toediening aan een zandgrond. Rapport 1095, Wageningen Livestock Research, Wageningen.
- Houba VJG, Van der Lee JJ, Novozamsky I (1997) Soil and plant analysis. Part 1: Soil analysis procedures, Department of Soil Quality, Wageningen University.
- Sigurdarson JJ, Svane S, Karring H (2018) The molecular processes of urea hydrolysis in relation to ammonia emissions from agriculture. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 17:241–258.
- 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.

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
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.

