



REPURE: Biologisch aanzuren en vergisten faciliteren de winning van fosfaat uit varkensmest tot meststof met waarde

Een eerste verkenning

Johan P.M. Sanders

Sanovations bv

rapport nr 20251130

REPURE: Biologisch aanzuren en vergisten faciliteren de winning van fosfaat uit varkensmest tot meststof met waarde

Een eerste verkenning

Johan P.M. Sanders

Sanovations rapport nr 20251130, Groningen, December 2025

www.sanovations.com

jpmsanders@sanovations.com

Woord vooraf

Dit rapport presenteert de bevindingen van een onderzoek naar de terugwinning van fosfaat uit varkensmest na biologische aanzuren en vergisting van de mest. Het onderzoek werd uitgevoerd in het kader van het publiek-private samenwerkingsproject BIOVALOR (Valorisatie van biomassaströmen; TKI-projectcode LWV20.119), gefinancierd door Topsector Agri&Food. De algehele projectleiding was in handen van Dr. O.F. Schoumans. De studie is uitgevoerd in werkpakket 2 dat zich richtte op verwaarding van mest door fosfaatverwijdering. Binnen dit werkpakket werd samengewerkt door NEDMAG, WUR en Sanovations. De onderhavige studie is in 2025 uitgevoerd en gerapporteerd.

Biologisch aanzuren en vergisting faciliteren de winning van fosfaat uit varkensmest tot meststof met waarde, een eerste verkenning

Samenvatting

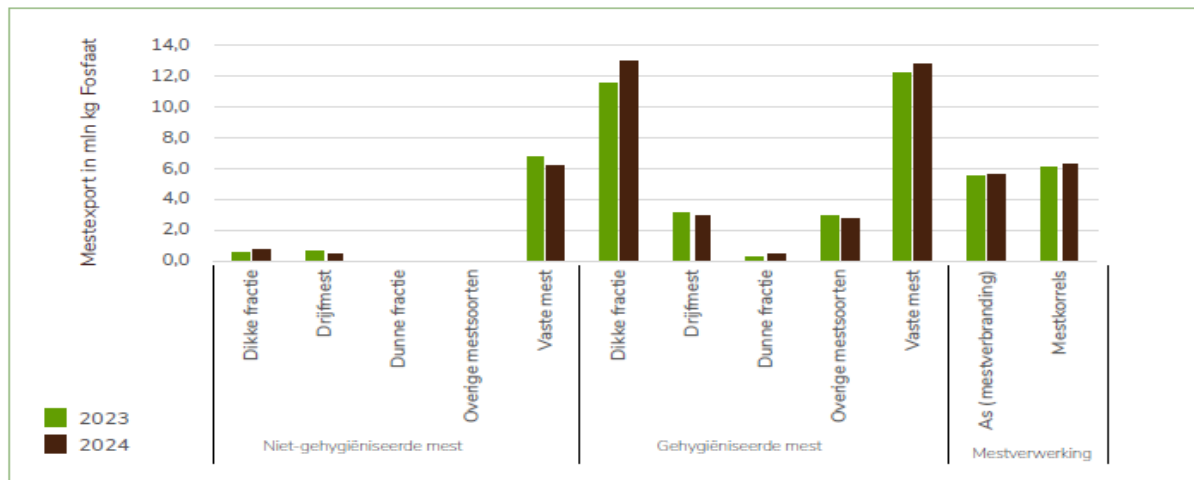
Door het aanzuren van mest (biologisch of chemisch) gaan de aanwezige neergeslagen minerale fosfaten, veelal calcium- en magnesiumfosfaten in oplossing, waardoor de anorganische fosfaatconcentratie in oplossing stijgt. Na eenvoudige mestscheiding komt het opgeloste fosfaat in de dunne mestfractie terecht samen met een beperkt deel van de organische stof (fijne vezeldeeltjes en opgeloste organisch stof). Hierdoor stijgt het fosfaatgehalte uitgedrukt per kg droge stof in de dunne fractie sterk. Indien de dunne fractie vervolgens wordt vergist, stijgt de pH weer tot ongeveer een pH van 8. Hierdoor zullen de opgeloste anorganische /minerale fosfaten weer neerslaan. Tevens wordt tijdens de vergisting een deel van de organische stof omgezet in methaan en CO₂, waardoor het organische stofgehalte verder daalt. Na vergisting kan het geprecipiteerde fosfaat uit het digestaat worden gewonnen middels een decanter centrifuge. Hierdoor wordt een vast product afgescheiden met fosfaat in struvietvorm met een gehalte variërend van 60 tot 90 kg P₂O₅/m³ vast product. Uitgedrukt als struviet product spreken we over 214 en 312 kg/ m³. Het organische stofgehalte in dit product is varieert tussen 105 en 114 kg/ m³. Het fosfaatproduct struviet is dus twee tot driemaal in overmaat ten opzichte van de organische stof. In het 60 kg/m³ product is 13% van de totale stikstof niet in het struviet gebonden. In het 90 kg product is de molaire verhouding fosfaat/ N_{tot} zelfs groter dan 1, waarmee het product ook aan de Europese eisen voor Renure zou voldoen. De stapsgewijze zuivering van fosfaat uit dierlijke mest, REPURE, leidt ertoe dat de gezuiverde dierlijke mest met een verlaagd fosfaatgehalte veel meer lokaal op landbouwgronden kan worden afgezet binnen de fosfaatgebruiksnormen die in de mestwetgeving zijn vastgelegd. Hierdoor dalen de totale transportkosten van mest sterk, doordat alleen het beperkte volume aan teruggewonnen fosfaatproduct hoeft te worden afgevoerd uit de fosfaatoverschotgebieden naar gebieden in binnen en buitenland die juist behoefte hebben aan fosfaat. Struviet heeft in het buitenland waarschijnlijk een hogere agronomische en economische waarde. Door het in oplossing gaan van het fosfaat onder zure omstandigheden kunnen zowel de organische stof als het fosfaat in de dierlijke mest worden verwaard. Indicatieve berekeningen geven aan dat de huidige verwerkingskosten van varkensmest aanzienlijk verlaagd kunnen worden en er mogelijk een positief verdienmodel ontstaat..

Trefwoorden Biologisch aanzuren, varkensmest, vergisten, fosfaat, struviet

1. Inleiding

Ruim 40 000 ton fosfaat uit dierlijke mest wordt jaarlijks geëxporteerd naar vooral Duitsland en Frankrijk. Figuur 1 toont dat ca 13 000 ton in de vorm van dikke fractie (ca 1 miljoen ton), welke door mestscheiding uit varkensmest wordt verkregen, wordt afgevoerd. Deze dikke fractie bevat behalve het fosfaat ook veel organische stof van onverteerde voederresten. Bij een droge stofgehalte van deze dikke fractie van 25-30% heeft het fosfaat slechts een concentratie van 12,5– 25 kg P_2O_5 per m^3 dikke fractie. De kosten om van dit fosfaat te exporteren zijn hoog vanwege de mestscheiding, de hygiëniseratie en vanwege de logistieke kosten. Daarnaast wordt al dan niet in gehygiëniseerde vorm 19 000 ton fosfaat geëxporteerd als vaste mest en 6 000 ton in de vorm van mestkorrels en ook 6 000 ton in asvorm na verbranding van kippenmest en waterzuiveringsslib.

Figuur 5.3. Mestexport in 2023 en 2024 onderverdeeld naar gehygiëniseerde en niet-gehygiëniseerde mestsoorten, en naar mestkorrels en mestverbrandingsassen, in mln. kg fosfaat per jaar.



Bron: RVO, 2025 en BMC Moerdijk, 2025.

Figuur 1. Export van het fosfaat overschot (Inventarisatie Export en Verwerking Dierlijke Mest, Van Noord (2025).

Een belangrijke vraag is, hoe de kosten voor export verlaagd kunnen worden en er tegelijkertijd (nog enige) waarde gecreëerd kan worden uit de verschillende mineralen N, P, K en organische stof die in de mest aanwezig zijn.

Gollenbeek et al. 2020 beschrijven verschillende routes om de mineralen en effectieve organische stof uit de mest te fractioneren zodat er specifieke verrijking van een of meer van deze componenten ontstaat waardoor waarde ontstaat doordat elk van de componenten in voldoende hoge concentratie als meststof kan worden benut. Eén van de routes beschrijft de winning van fosfaat uit de dikke fractie van varkensmest door zure extractie met zwavelzuur en vervolgens een precipitatie van calciumfosfaat door het toevoegen van calciumhydroxide of magnesiumhydroxide zoals ontwikkeld door (Schoumans *et al.*, 2014), (Schoumans *et al.*, 2017) en (Regelink *et al.*, 2019).

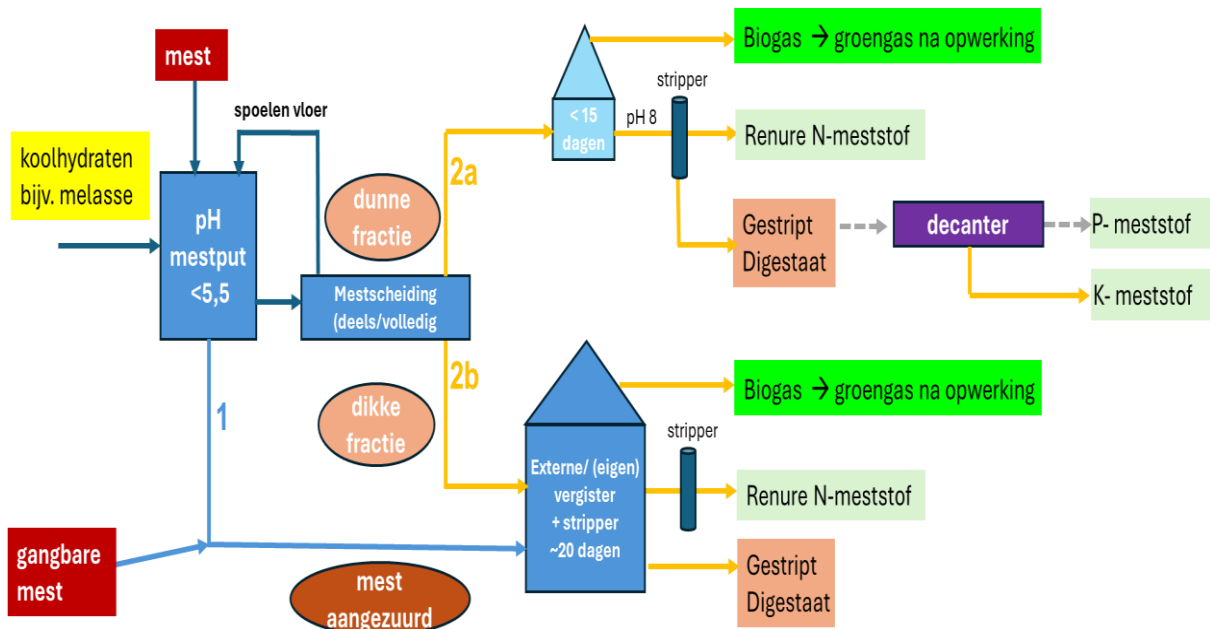
Gekozen is om de dikke fractie aan te zuren omdat de gehele mest een hoge pH buffercapaciteit heeft door het aanwezige bicarbonaat en ammoniak. Na fosfaatverwijdering blijft er een dikke fractie achter met een hoog effectief organisch stof gehalte dat een hoge waarde heeft, doordat het beter plaatsbaar is door het lage fosfaatgehalte. Daarnaast ontstaat een product met hoog fosfaatgehalte dat ook veel calciumsulfaat bevat en er resteert natuurlijk een waterige stroom met kalium en andere eerst nog in de dikke fractie opgeloste componenten.

In het NMI rapport 2035b 'Snelle vergisting en fosfaatterugwinning uit digestaat' (Sanders en Bussink 2025) staat beschreven dat het fosfaat uit rundermest een kleine tien keer geconcentreerd kan

worden door het biologisch aanzuren van mest en vervolgens de mest te vergisten en het digestaat te scheiden. Door het aanzuren van de mest wordt niet alleen de ammoniak en methaanuitstoot gereduceerd, maar gaat ook al het fosfaat in oplossing. Door de mestscheiding komt 90% van het fosfaat in de dunne fractie met een groot deel van het fosfaat. De dikke fractie kan worden vergist in een daarvoor toegeruste vergister waardoor een digestaat overblijft met een hoog gehalte aan effectieve organische stof en relatief lage hoeveelheden NPK welke desgewenst middels een wasstap verder uitgespoeld kunnen worden. De aangezuurde dunne fractie met een hoog fosfaatgehalte wordt apart vergist waarbij het opgeloste fosfaat in de vergister weer onoplosbaar wordt omdat de pH in de vergister op pH 8 blijft ondanks de zure toeloop van de dunne fractie. Biogas kan worden opgewerkt tot groengas en vormt daarmee een belangrijke basis voor het verdienmodel van de keten. Figuur 2 toont een processchema met een ammoniakstripper direct na de vergister om de hoogste ammoniak opbrengst te krijgen. De stripper zou ook ingezet kunnen worden nadat het fosfaat is teruggewonnen uit het digestaat.

Het fosfaat kan na de vergisting middels een tweede mestscheiding (decanter) nu in het neerslag teruggewonnen worden. Sanders en Bussink 2025 beschrijven dat beginnend met rundermest met $1,5 \text{ kg/m}^3$ fosfaat, stapsgewijs de fosfaat verrijkt wordt. Eerst door verwijderen van de onverteerde vezels met de dikke fractie en daarna door de omzetting van de kleinere en lichtere deeltjes in de aangezuurde dunne fractie naar methaan en CO_2 . Wanneer na de vergisting een mestscheiding plaatsvindt, vindt nog een zuivering plaats omdat onder meer oplosbare zouten waaronder kalium in de dunne fractie terecht komen en het fosfaat juist in het neerslag met een concentratiefactor die een kleine factor 10 boven de fosfaat concentratie in de rundermest zelf ligt.

Het zo uit rundermest verkregen fosfaatconcentraat is in concentratie vergelijkbaar met de dikke fractie verkregen uit gangbare varkensmest, daarmee hebben we dus nog geen economische propositie.



Figuur 2. Mogelijk toekomstig processchema.

De verwachting is dat wanneer we de biologisch aanzuurroute met varkensmest uitvoeren ook een kleine tienvoudige concentratie bereikt kan worden. Omdat het fosfaatgehalte in varkensmest $3,5 - 5$

kg/m³ bedraagt terwijl dit in rundermest slechts 1,5 kg/m³ bedraagt, ontstaat mogelijk een product met fosfaatconcentratie van ca 40 kg P₂O₅ dat waarde heeft als meststof en waarvan de transportkosten naar Frankrijk, veel minder zullen doortellen. In ieder geval blijft het stabiele deel van de organische stof in Nederland als effectieve organische stof en kan ook het niet stabiele deel van de organische stof dienen om groengas te produceren, beide met een belangrijke vraag uit de markt.

Het doel van het onderzoek is het testen van de hypothese dat een tienvoudige concentratie verrijking mogelijk is en het uitvoeren van een eerste eenvoudige economische analyse.

2. Methoden en materialen

Mest

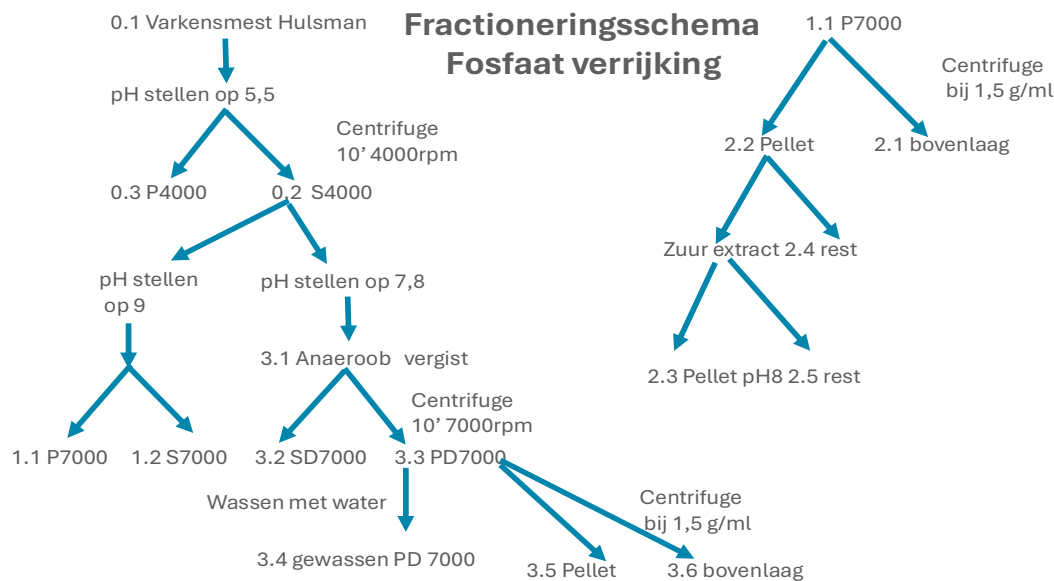
Varkensmest met een fosfaatgehalte van 5,7 kg/ m³ bij een drogestofgehalte van 107 kg/m³ werd verkregen van boer Hulsman in Holten. Bij Twence was bekend dat bij deze boer het fosfaatgehalte in de mest aanzienlijk hoger ligt dan het gemiddelde 3,5 kg/ m³.

Proefuitvoering

In een drietal proevenseries zijn verschillende fractioneringen onderzocht op de verdeling van fosfaat. Figuur 3 geeft het fractioneringsschema van deze drie proevenseries. Er is voor gekozen zoveel mogelijk de investeringsbehoefte en het aantal unit operations beperkt te houden. Opgemerkt wordt dat de toegepaste centrifuge technieken niet zonder meer opgeschaald kunnen worden. In de discussie wordt dieper ingegaan op de mogelijk haalbare routes.

2.1 Eerste proevenserie voor fractioneringsschema en codering van de fracties)

Omdat de werkzaamheden binnen het BioValor project grotendeels afgerond waren toen deze route alsnog werd voorgesteld, moest het hele onderzoek binnen twee en halve maand worden uitgevoerd en gerapporteerd. Om tijd te winnen en omdat het op laboratoriumschaal lastig is de mest goed anaeroob te houden, is daarom gekozen de aanzuring tot pH 5,5 met mierenzuur te doen en niet met melasse omzetting naar melkzuur zoals dat bij de rundermest was uitgevoerd (biologische aanzuring). In plaats van mestscheiding met een vijzelpers of decanter zoals bij het eerdere rundermest experiment (Sanders en Bussink 2025) is een tafelcentrifuge gebruikt gedurende 10 minuten bij 4000 rpm. Met een deel van de aangezuurde dunne fractie (S4000) is de pH met loog op 9 gebracht en vervolgens is met centrifugeren bij 7000 rpm een supernatant (1.2 S7000) en een pellet verkregen (1.1 P7000) (zie figuur 3 voor fractioneringsschema en codering van de fracties). De temperatuur voor alle stappen was kamertemperatuur.



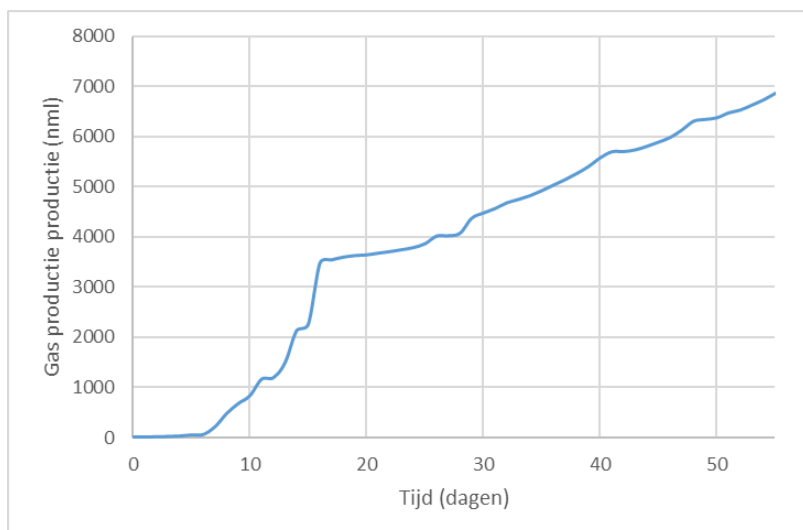
Figuur 3. Fractioneringsschema van varkensmest, inclusief nummering. De P staat voor pellet en de S staat voor supernatant.

2.2 Tweede proevenserie

Een deel van fractie P7000 (1.1 in figuur 3) werd door toevoeging van zout op een verhoogde dichtheid van 1,45 g/ml gebracht om een betere scheiding te krijgen in een tafelcentrifuge. Bij die hogere dichtheid zal een groot deel van de organische stof blijven drijven terwijl de fosfaat-zouten die een hogere dichtheid hebben in de 2.2 pellet eindigen. Deze pellet werd tweemaal met mierenzuur geëxtraheerd. Het extractie residu (2.4) werd geanalyseerd om het extractie rendement te bepalen. Het extract werd gecentrifugeerd en vervolgens werd het supernatant geneutraliseerd met loog tot een pH van 8 bereikt werd en een wittig neerslag ontstond. Dit werd middels centrifugeren verzameld (2.3) en aan het supernatant werd CaCl_2 toegevoegd om vast te stellen of er nog fosfaat neerslag zou ontstaan. Het centrifuge pellet (2.5) werd geanalyseerd om het fosfaatrendement te bepalen.

2.3 Derde proevenserie middels vergisting dunne aangezuurde fractie

Met een ander deel van de aangezuurde dunne fractie (0.2 S4000) is een anaerobe vergisting opgestart bij Bioclear Earth. Omdat Bioclear alleen apparatuur heeft voor batch vergisting is voorafgaande aan de vergisting de pH geneutraliseerd met NaOH. Voor een continue geroerde vergisting is dat niet nodig en kan bijvoorbeeld elk (half) uur een klein volume worden toegelopen in de vergister, zodanig dat de pH hoog blijft en het melkzuur (of in het geval van dit experiment, het mierenzuur) binnen korte tijd wordt omgezet in methaan en CO_2 waardoor de pH omhoog zal gaan. (Zouden we aanzuren met zwavelzuur dan zou dit niet kunnen op deze manier omdat dit zuur dan niet omgezet wordt in methaan en CO_2 maar ook omdat bovendien tijdens de vergisting H_2S gevormd zal worden). Teneinde de hoeveelheid inoculum van de vergisting zo laag mogelijk te houden werd begonnen met 50 ml inoculum en 50 ml S4000. Zodra de vergisting op gang kwam werd stapsgewijs meer S4000 toegevoegd zodat op dag 55 780 ml vergist was.



Figuur 4. Biogasproductie uit de S4000 fractie.

Er werd slechts 7L biogas geproduceerd (Figuur 4) hetgeen overeen komt met circa 8,4g organische stof. Uit 780mL varkensmest is dit ~11g/L organische droge stof afgebroken tot biogas. Er resteert nog opgeloste COD (Chemical Oxygen Demand) 46g/L ; De vergisting is niet goed verlopen. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door een hoge concentratie aan Natrium (Fang et al 2011) (10 g Na₂O per liter, zie analyse van product 3.1 in tabel 1) afkomstig uit het loog dat gebruikt werd ter neutralisatie. (2011). In de praktijk zullen we hiervan geen last ondervinden zoals ook beschreven werd in Sanders en Bussink (2025).

Van het resterende digestaat werd 600 ml werd gecentrifugeerd bij 7800 rpm (6500 g) waardoor een supernatant (3.2 SD7000) van 525 ml en een pellet (3.3 PD7000) werd verkregen van ca 75 ml dat als startmateriaal werd gebruikt voor de verdere fosfaatverrijking.

Een deel van fractie 3.3 PD7000 werd 1:1 gewassen met water en na centrifugeren werd 3.4 gewassen PD 7000 verkregen. Aan een ander deel van fractie 3.3 PD 7000 werd zout toegevoegd zodat de dichtheid van 1,5 g/ml werd bereikt. Na centrifugeren ontstond een stevige pellet (3.5) met een stevige bovenlaag (3.6).

2.4 Analyses

Samenstelling van de verschillende fracties werd bepaald door ALNN in Ferwert.

3. Resultaten

3.0 Fractioneringsroutes

Tabel 1 geeft een overzicht van de samenstelling van alle relevante fracties verkregen in de drie proevenseries. De tabel geeft bovendien de berekende hoeveelheden van de gemeten componenten in die fracties.

	Proevenserie 1			Proevenserie 2				Proevenserie 3					
	0.1	0.2	1.1	2.2	2.3	2.4	2.5	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
	mest	Dun	aan pellet	1,5g/ml	neutr	extractie	rest na	na vergis	dun	dik	was met	1,5g/ml	bovenlaag
Hoeveelheden	gezuurd	na pH9	pellet	pellet	extract	residu	pH 8	ting 0.2	van 3.1	van 3.1	equi H ₂ O	pellet	ingeschat
volume ml	820	520	179	13,4	10	10	20	600	525	75	22,0	13,3	19,9
DS g	87,7	41,6	22,0	4,50	3,28	2,36	8,32	42,0	26,8	11,70	5,71	4,66	7,04
P ₂ O ₅ g	4,7	2,8	2,2	0,87	0,40	0,33	0,07	2,97	0,12	1,58	1,39	1,22	0,36
As g	23,0	13,5	8,8	3,06	2,42	1,00	6,16	21,60	15,75	5,40	3,39	3,15	2,25
OS g	64,8	28,1	13,2	1,45	0,86	1,36	2,16	20,40	11,03	6,30	2,32	1,51	4,79
K ₂ O g	4,7	2,8	2,2	1,20	0,27	0,32	0,65	4,47	3,93	0,52	0,08	0,45	0,68
N _t g	6,2			0,20	0,03	0,11		4,16	3,02	0,87	0,37	0,24	0,63
MgO g	2,1	1,3	1,0	0,49	0,24	0,19	0,03	1,36	0,02	0,74	0,73	0,68	0,06
Na ₂ O g				0,02	1,28	0,01		5,96	5,24	0,67	0,09	0,01	0,02
CaO g	2,4	1,0	0,7	0,09	0,05	0,03	0,71**	1,05	0,01	0,77	0,45	0,30	0,47
Gemeten concentratie (g/l)													
DS	107	80	123	336	328	236	416	70	51	156	259,90	351,00	353,76
As	28	26	49	228	242	100	308	36	30	72	154,10	237,00	113,27
OS	79	54	74	108	86	136	108	34	21	84	105,80	114,00	240,49
N _t	7,5			14,76	3,16	10,84		6,94	5,75	11,66	16,86	18,39	31,67
P ₂ O ₅	5,7	5,36	12,53	64,68	39,8	33,06	3,52	4,95	0,23	21,12	63,04	91,98	18,25
K ₂ O	6,23	8,15	7,93	89,6	27,4	32,18	32,36	7,45	7,48	6,96	3,80	34,20	34,20
MgO	2,62	2,42	5,55	36,56	23,6	18,86	1,56	2,27	0,03	9,84	33,33	51,42	2,79
Na ₂ O				1,4	128,2	0,7		9,93	9,98	8,96	3,91	0,93	0,93
CaO	2,9	2,01	4,14	6,72	4,68	3,3	35,28**	1,75	0,01	10,22	20,26	22,53	23,49
Concentratie verhoudingen													
P ₂ O ₅ /DS %	5,33	6,70	10,19	19,25	12,13	14,01	0,85	7,07	0,04	13,54	24,26	26,21	5,16
P ₂ O ₅ /As %	20,36	20,62	25,57	28,37	16,45	33,06	1,14	13,75	0,07	29,33	40,91	38,81	16,11
P ₂ O ₅ /OS %	7,22	9,93	16,93	59,89	46,28	24,31	3,26	14,56	0,10	25,14	59,59	80,68	7,59

* Bij geen vermelding waarde is geen analyse uitgevoerd

** deze waarde is veroorzaakt door toevoeging van CaCl₂

Tabel 1 Samenstelling van verschillende mestfracties. 'Hoeveelheden' werden berekend uit volume maal concentratie voor de opbrengstberekeningen. Verder zijn deze genormeerd naar het volume van de oorsprong-fracties 1.1 P7000 en 3.3 PD7000 zodat de verschillende methodes vergelijkbaar worden.

3.1 Proevenserie 1

is in feite een herhaling van de fractionering zoals voor rundermest beschreven in Sanders en Bussink (2025) behalve dat aanzuren en neutraliseren chemisch is uitgevoerd waardoor de zoutlast verhoogd werd en daarmee het as- en drogestofgehalte. Terwijl de concentratie fosfaat in de varkensmest van boer Hulsman uit Holten met 5,7 g/ l veel hoger was dan het fosfaatgehalte in de rundermest zien we dat de concentratie van fosfaat in het pellet (0.1 P7000) na neutralisatie van de aangezuurde dunne fractie met 12,53 kg/ m³ aan de lage kant is. Dit wordt allereerst veroorzaakt door het lage droge stofgehalte van het pellet 0.1 P7000 dat verkregen is na chemische neutralisatie van de dunne fractie van chemisch aangezuurde mest. Wanneer we deze fractie verder zouden concentreren tot 337 kg/ ton zoals Sanders en Bussink (2025) eerder voor rundermest na centrifugeren verkregen, dan zou de fosfaatconcentratie 34 kg/ m³ kunnen bedragen.

Een tweede oorzaak van tegenvallend fosfaatgehalte is dat bij de mestscheiding ruim een derde van het fosfaat in de dikke fractie terecht komt, deels veroorzaakt omdat de dikke fractie relatief meer volume had dan in de eerdere proef met rundermest. Kennelijk is bij het aanzuren minder fosfaat in oplossing gegaan, waarschijnlijk doordat deze fosfaat in organisch gebonden moleculen aanwezig was of doordat de pH van 5,5 niet laag genoeg was om alle fosfaat-zouten op te lossen. Bij de rundermest zien we dat slechts 12% van de fosfaat in de dikke fractie achterblijft. Het beste resultaat bij rundermest laat een P₂O₅/ DS zien van 7,3% uitgaande van de controle mest met 2,2% P₂O₅/ DS. De vergelijkbare waarde in proevenserie 1 laat een waarde van 10,2% zien uitgaande van 5,3% in de verse mest.

3.2 Proevenserie 2

Deze serie laat met een aangepaste centrifugering bij een met zout op dichtheid 1,5 g/ml gebrachte mestfractie (0.1 P7000) een sterke verrijking van het fosfaatgehalte in de zware fractie (2.2) zien leidend tot een concentratie van bijna 65 g/l.

De zware fractie werd tweemaal geëxtraheerd met mierenzuur bij pH 4 en het extract werd na centrifugeren geneutraliseerd zodat bij pH 8 een precipitaat ontstond. In tegenstelling tot de verwachting (een factor 10 verrijking) werd 'slechts' een fosfaatconcentratie van 39,8 g/l behaald. Uit analyse blijkt dat de extractie slechts een rendement van ruim 50% had. Een groot deel van het fosfaat zit nog in het extractieresidu ..

3.3 Proevenserie 3

Deze serie is uitgevoerd met de dunne chemisch aangezuurde fractie die eveneens chemisch werd geneutraliseerd (0.2 S7000) en vervolgens vergist met het doel om meer organische stof om te zetten naar methaan en CO₂ om zo een verdere verrijking van fosfaat tov droge stof en organische stof te verkrijgen. De vergisting is uitermate langzaam verlopen (Figuur 4) en er werd besloten na 55 dagen deze af te breken terwijl pas een 20-25% van het biogas was geproduceerd tov de verwachte hoeveelheid. Waarschijnlijk werd de trage vergisting veroorzaakt door een te hoge natriumconcentratie (Fang et al 2011) uit de natriumhydroxyde die vanwege de neutralisatie werd toegevoegd om deze vergisting in batchvorm op te starten. In de praktijk zal die neutralisatie niet nodig zijn omdat de aangezuurde fractie continue in de vergister kan worden toegelopen. (Sanders en Bussink 2025).

De verrijking van fosfaat middels de centrifugering bij verhoogde dichtheid resulteerde in een product (3.5) met 92 g/l aan P₂O₅ hoger dan die in proevenserie 2 (2.2) omdat de scheiding tussen de zware en de lichte fracties die ontstonden beter werd uitgevoerd. De P₂O₅/DS verhouding werd ruim 24 % hetgeen aanzienlijk hoger dan 5,3% in de uitgangsmest werd behaald.



Figuur 5. Scheiding van zware en lichte laag tbv product 3.5

Verrassend was dat ook zonder deze bijzondere centrifuge aanpak ook al door middel van een 1:1 wasstap met water er een lichtgrijs product verkregen kon worden met 63 g/l P₂O₅. (figuur 6). Daarbij was het nodig om de zwarte laag die bovenop de lichtgrijze laag precipiteerde in de centrifugebuis zo goed mogelijk mechanisch te verwijderen met een spatel.



Figuur 6. Pellet met lichtgrijze onderlaag en zwarte bovenlaag tbv product 3.4

Opgemerkt moet worden in proevenserie 3 dat de massabalans die meestal geen grotere verschillen tussen input en output laten zien voor fosfaat dan 20%, bij de scheiding van het digestaat in dik en dun, een onverklaarbaar verschil van 43% liet zien. Bij de vervolgstappen klopte de massabalans voldoende, zodat de conclusie is dat er een analysefout is bij het meten van digestaat (3.1) en/ of dat van de dunne fractie (3.2) uit het digestaat.

3.4 Kwaliteit van de fosfaatproducten.

Tabel 2 vergelijkt een aantal fosfaatproducten uit de 3 proevenseries. Ten opzichte van het pellet verkregen uit de dunne aangezuurde fractie zien we in tabel 1 bij product 3.4 en 3.5 (12^e en 13^e kolom) dat de P_2O_5 -concentratie oploopt tot 63 resp. 92 kg/m³, een verrijking van 3,5 resp. 5 keer ten opzichte van de P_2O_5 -concentratie in de dikke fractie van varkensmest van 18 kg P_2O_5 / m³ zoals (Nutrinorm vermeldt. <https://nutrinorm.nl/meststoffen/de-samenstelling-van-organische-meststoffen/>). Wat betreft de transportkosten voor export van de fosfaat betekent dat een forse reductie, en bovendien bij de hogere concentraties fosfaat krijgen de producten waarschijnlijk een economische waarde. Ten opzichte van het P_2O_5 -gehalte in de droge stof zien we een verrijking met een factor 5 als we product 3.4 en 3.5 vergelijken met de uitgangsmest (0.1). P_2O_5 als fractie van de as loopt op van 25 % naar 45%. Tov de organische stof gaat het fosfaatgehalte met factor 5 omhoog. Deze laatste verhoging geeft aan dat we per ton geëxporteerde fosfaat vijfmaal minder organische stof zonder vergoeding afvoeren naar het buitenland.

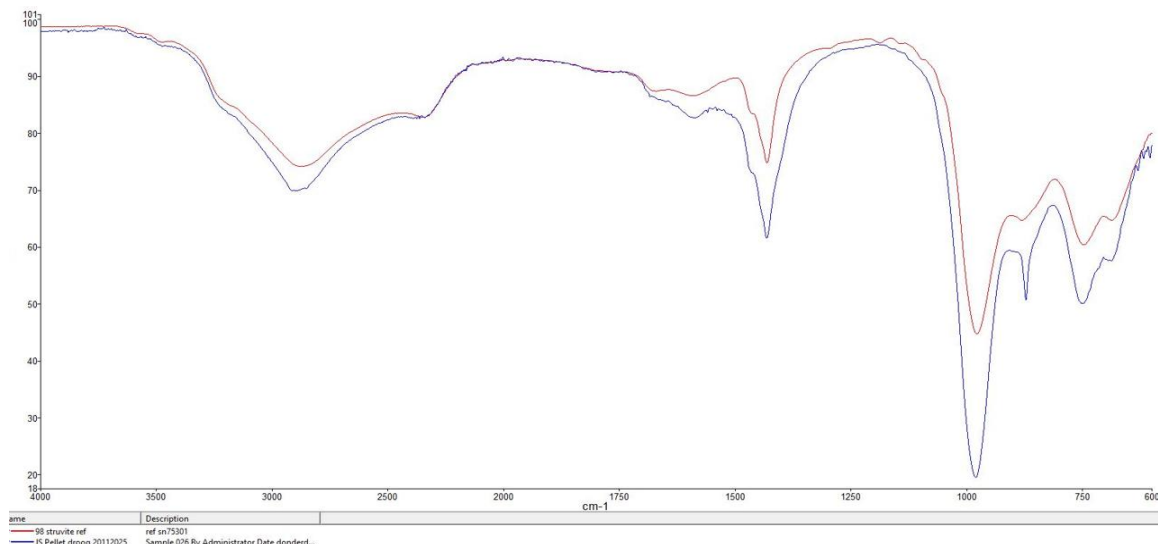
		P_2O_5	DS	$P_2O_5/$	$P_2O_5/$	$P_2O_5/$		N	P	Mg	Ca	K
code	korte beschrijving voorbehandeling	kg/m ³	kg/m ³	DS %	As %	OS %		mM	mM	mM	mM	mM
1.1	pellet uit aangezuurd dun na neutralisatie	12,5	123	10,2	25,6	16,9		58	31	24	30	35,5
1.2	supernatant uit aangezuurd dun na neutralisatie	0,39	74	0,53	1,23	0,93		>100	2	0,9	4,8	60
2.2	pellet advanced centrifugeren van 1.1	64,7	336	19,2	28,4	59,9		11,6	12	11,7	1,6	30
2.3	aanzuren van 2.2 en dan neutraliseren	39,8	328	12,1	16,4	46,3		1,9	5,5	5,6	6,8	6,9
3.3	PD7000 pellet uit digestaat	21,1	156	13,5	29,3	25,1		51,4	22	17,6	13,2	13,1
3.4	PD 7000 eenmaal wassen met H ₂ O	63	259	24,3	40,9	59,6		21,8	19,2	17,4	7,7	2,1
3.5	advanced centrifugeren van 3.3	92	351	21,2	38,8	80,7		14,4	17	16,2	5,2	11,3

Tabel 2. Nadere karakterisering van fosfaatproducten.

Verdere analyse van de molaire verhouding (Tabel 2) van de verschillende elementen geeft aan dat in de fosfaatproducten 2.2 en 3.4 en 3.5 het fosfaat waarschijnlijk volledig in struvietvorm is. Bij al deze 3 producten zijn de molaire verhoudingen van N, Mg en P gelijk met een marge van hooguit 10%.

Het soortelijk gewicht van het neerslag uit fractie 3.5 werd bepaald op 1,65 g/ ml, weinig lager dan de literatuurwaarde van 1,7 g/ml. Waarschijnlijk is de struviet verontreinigd met organisch materiaal dat het struviet deeltje lichter maakt.

Figuur 7 met een FTIR analyse van fractie 3.5 geeft > 95% overeenkomst met het referentie struviet spectrum. Alleen het signaal bij 1000 en bij 850 cm^{-1} zijn wat sterker dan in het referentiespectrum.



Figuur 7. FTIR spectrum van fractie 3.5 (blauw) en referentie struviet (rood), zoals bepaald door NEDMAG.

Struviet is als één van de 3 Renure kunstmestvervangers door de Europese Unie goedgekeurd indien de kwaliteit voldoet aan een aantal randvoorwaarden. In Nederland zal dit waarschijnlijk in april 2025 gebeuren.

Bij de droge stof bepaling bij hoge temperatuur verliest struviet met molgewicht van 245, 6 watermoleculen en de ammoniak. Daardoor valt de drogestof waarde per mol struviet (dus ook per mol P) met 126 terug. 92 kg P_2O_5 komt overeen met 315 kg struviet. Bij drogestof bepaling is dus 162 kg aan water plus ammoniak verloren gegaan. Dus in feite hebben we de facto in fractie 3.5 een droge stofgehalte -indien we zouden drogen bij 80C- van $(351\text{kg} + 162\text{kg}) / 1000 + 162 = 440 \text{ kg/m}^3$. Bij 100-300€ per ton struviet heeft product 3.5 dus een waarde van ca 63€. Teruggerekend op de uitgangsmest ca 15€/m³ mest. Na verwijdering van 90% van de organische stof onder meer door een goede vergisting, zou het struviet gehalte nog hoger worden. Een berekening leert dat de struviet bijna alle droge stof representeert na uitspoelen van kalium en organische stof. (P_2O_5 gehalte in struviet is 29% in aanwezigheid van water en NH_3 en 60% nadat het kristalwater en de NH_3 zijn uitgetreden.).

3.5 Indicatieve schets van het economische perspectief

Vanwege beperkte plaatsingsruimte voor fosfaat in Nederland zijn het vooral de boeren met te weinig of geen grond die het overschot aan mest op een of andere manier moeten exporteren. Meestal zijn het de varkensboeren die middels een collectief transport en verwerkingsorganisaties te werk gaan. Figuur 1 toont de verschillende productvormen waarin fosfaat wordt geëxporteerd. Bij mestkorrels wordt de mest gedroogd hetgeen veel investeringen en hoge kosten met zich meebrengt. Mestscheiding kan worden uitbesteed aan loonwerkers en vraagt geen investering door de boer en dit moet worden gecompenseerd met een poorttarief gedurende een lange contractduur. Export naar buitenland met logistieke kosten en een product dat niets oplevert is kostbaar. Daar

komt bij dat de dunne fractie nog steeds afgezet moet worden met een forse hoeveelheid stikstof. Centrale verwerking tot een Renure product als NK concentraat, vraagt hoge investeringen die middels een langjarig contract met hoog poorttarief wordt gefinancierd. Het strippen van de ammoniak is een andere optie welke eigenlijk alleen op grote schaal met voldoende opbrengst en lage kosten kan worden uitgevoerd bijvoorbeeld met het Byoflex systeem van Byosis. (<https://www.nijhuissaurindustries.com/solutions/byoflex/>). Ook hierbij wordt een Renure meststof gemaakt waarvoor de Europese Commissie haar goedkeuring gaf in herfst 2025 en in voorjaar 2026 wordt ook in Nederland de goedkeuring verwacht.

In tabel 3 is een ruwe economische analyse uitgevoerd van de huidige situatie waarbij fosfaat met een concentratie van 18 kg/m³ wordt geëxporteerd. Transportkosten zijn hoog bij deze fosfaatconcentratie die door Nutrinorm <https://nutrinorm.nl/meststoffen/de-samenstelling-van-organische-meststoffen/> wordt gegeven. Twee overige grote kostenposten zijn het scheiden van mest en de afzetkosten voor de dunne fractie. Behalve deze directe kosten zijn er ook verborgen kosten: de waarde van fosfaat, stikstof, kalium en organische stof die we afvoeren terwijl we daarvoor in Nederland of buitenland waarde zouden kunnen creëren. De gederfde waarde is 28,4 M€ bij een fosfaatconcentratie van 18 kg/ m³.

In het geval dat de fosfaat wordt 'gezuiverd' tot een product REPURE, met 60 kg/m³ dan is zo'n 20M€ niet meer nodig voor transport. Bij een product van 90 kg/m³ gaat er nog eens 2,5M€ af. In de tabel is gerekend met de 60 kg/m³ omdat te verwachten is dat deze makkelijker in de praktijk te realiseren is. Bij een fosfaatgehalte van 18 kg/m³ gaat het om 20300 vrachten van 35 ton naar buitenland en bij fosfaatgehalte van 60 kg/m³ gaat het nog maar om 5450 vrachten van 35 ton en bij 90 kg/m³ om 4050 vrachten. Indien de dunne fractie na opwerking van het fosfaat naar een centrale vergister (> 25000 m³ mest per jaar) wordt afgevoerd die voorzien is van een efficiënte stripper, dan kan de stikstof als Renure meststof worden ingezet. De kosten van het strippen zijn in dit overzicht opgenomen en zijn verkregen van Byosis.

(<https://www.nijhuissaurindustries.com/solutions/byoflex/>). Aan de inkomstenkant is daarom de Renure-meststof (ammonium sulfaat of ander zout) meegenomen als inkomstenbron alsmede de inkomsten voor het niet hoeven afvoeren van mest waarvoor met 25€/ m³ rundermest à 4 kg N/ m³ gerekend is. De vergister en de aanzuurkosten zoals de melasse en de toeloopapparatuur en pH monitoring zijn niet meegerekend en ook niet de (extra) opbrengsten aan biogas door het aanzuren. Desgewenst zijn de economische details voor deze onderdelen van de keten terug te vinden in Bussink et al (2025). Het aanzuren zorgt er wel voor, dat uit de dunne fractie nog zeker 35 m³ biogas/ m³ gemaakt kan worden (Sanders en Bussink, 2025) en daardoor nog aantrekkelijk is voor centrale verwerker die nog alleen zijn digestaat met kalium moet afzetten in de nabije omgeving indien hij een N-stripper heeft geïmplementeerd.

Aan de opbrengstenkant zijn alleen de componenten in de dikke fractie meegenomen die met huidige werkwijze aan het buitenland wordt weggegeven. Technisch kan de dikke fractie uit aangezuurde mest ook in die grote vergister worden verwerkt met een geschatte opbrengst van totaal 35 M m³ biogas, maar omdat deze dikke fractie zeker na een keer wassen vooral organische stof bevat, is vergisten in aparte vergister aantrekkelijk omdat een product resulteert met weinig NPK en een hoog gehalte aan effectieve organische stof dat een goede waarde heeft als veenvervanger. Voor het fosfaatproduct is gerekend met een waarde van 200 €/ ton struviet, ofwel 680€/ ton P₂O₅.

Overall zien we dat aan de kostenkant ondanks dat er een ammoniak stripper opgevoerd staat de kosten 20 M€ lager uitvallen dan in de huidige businesscase (afzet varkensmest). Omdat aan inkomsten 87,7 M€ binnenkomst, levert de verwerking van 3,66M m³ mest dus -30,9M€ kosten; dit is dus 30,9 M€ inkomsten in plaats van de 77M€ directe kosten. Een groot deel van de inkomsten komt

4 Discussie

4.1 Verhogen van het fosfaatgehalte

4.1.1 middels verhogen van droge stof gehalte

Belangrijk verschil tussen de rundermest en de varkensmestresultaten van proevenserie 1 is dat allereerst geen biologische aanzuring heeft plaats gevonden maar een chemische en dat er geen vergisting heeft plaats gevonden van de dunne aangezuurde fractie. Door vergisting zou het celmateriaal verder afgebroken zijn met een verlaging van het droge stofgehalte (DS) tot gevolg. Wellicht zou dan ook het centrifugatiegedrag verbeterd zijn waardoor een hoger drogestofgehalte van rond de 300 g/l gehaald zou kunnen worden ipv 123 g/l. Zouden we fractie 1.1 (na chemische aanzuring, mestscheiding en neutralisatie en centrifugeren) tot een DS van 337 g/l kunnen ontwateren middels een centrifugestap dan zou het fosfaat 34 g/l bedragen. Voor fractie 3.3 (waar een weinig geslaagde vergistingsstap extra is uitgevoerd tov 1.1) zou het fosfaatgehalte bij een DS van 337 g/l ongeveer 46 kg P_2O_5 per m^3 bedragen. Zou door de vergisting meer organische stof naar methaan en CO_2 zijn omgezet dan zou deze concentratie nog hoger zijn geworden.

Droge stof zou ook middels andere ontwateringstechnologieën kunnen plaatsvinden zoals drogen maar dat is onnodig kostbaar.

4.1.2. middels opbrengstverhoging door meer fosfaat in dunne fractie te krijgen

Bij rundermest blijft slechts 12% van de fosfaat achter in de dikke fractie en zou door uitwassen van deze dikke fractie een hogere fosfaatopbrengst en mogelijk een hogere concentratie verkregen kunnen worden in het fosfaateindproduct. Timmerman et al (2018) laten zien dat slechts enkele procenten van de fosfaat in varkensmest aanwezig is in de vrije vorm ortho-fosfaat. Of het veel grotere verlies (ca 40%) van fosfaat bij de scheiding van aangezuurde varkensmest veroorzaakt wordt door een andere vorm waarin fosfaat gebonden zit of door het slecht in oplossing gaan bij het chemisch aanzuren of dat er tijdens en na het biologisch aanzuren enzymatische processen de gebonden vormen van fosfaat in de rundermest hebben vrijgemaakt zal verder uitgezocht moeten worden willen we opbrengst en de concentratie fosfaat in de fosfaatproducten van alle geteste fractioneringsroutes verder aanzienlijk verhogen. Ma (2017) meldt dat anaerobe vergisting tot biogas organisch gebonden fosfaat omzet naar vrij fosfaat.

4.1.3 middels wassen en centrifugeren

levert op labschaal na afschrapen van een deel van de organische stof bij product 3.4 een mooie kwaliteit op met 63 kg/ m^3 P_2O_5 in struvietvorm. Op grote schaal zal het minder makkelijk zijn de organische stof te verminderen maar dat leidt tot verhoging van het volume van het product en daarmee tot verlaging van het P_2O_5 -gehalte met naar schatting een 50%, dus nog steeds ruim 30 kg/ m^3 aan P_2O_5 en een struvietgehalte van ca 100 kg/ m^3 product. Bij 100-300€ per ton struviet heeft product 3.4 dus een waarde van ca 20€ per m^3 product met 30 kg/ P_2O_5 in struvietvorm. Dit is teruggerekend op de uitgangsmest ca 6.60 €/ m^3 mest.

4.1.4 middels centrifugeren bij verhoogde dichtheid.

Wanneer het soortelijk gewicht van de waterige laag dmv toevoegen van zouten op 1,5 g/ml gebracht wordt, dan ontstaat de mogelijkheid om met een decanter of een hydrocycloon ook op grote schaal een fractionering te verkrijgen en organische stof en struviet in verschillende fracties te krijgen: het struviet (dichtheid= 1,7 g/ml) en andere zouten hebben een dichtheid van vaak boven 2 g/ ml en zullen dus in de zware fractie terechtkomen. Koolhydraatvezels en eiwit hebben in droge

vorm een dichtheid rond de 1,4 g/ml en binden water waardoor de dichtheid in mest minder dan 1,4 g/ml bedraagt. Deze organische massa zal in een decanter dus flotten en in de lichte fractie opgehoopt worden. Het nadeel is dat zouten moeten worden toegevoegd en ook weer moeten worden teruggewonnen om de kosten en milieudruk te beperken. Kaliumcarbonaat en Kaliumbicarbonaat zijn zouten die in mest voldoende aanwezig zijn en goed oplosbaar zijn in water zodat de gewenste dichtheid behaald kan worden, maar in een te lage concentratie. Zouden we middels omgekeerde osmose en verdere indamping van het NK concentraat uit de mestverwerking een goede en goedkope grondstof hebben of zouden we uit de proces-eigen mest al voldoende Kaliumcarbonaat kunnen concentreren? Op zich zijn de volumes die op dichtheid gebracht moeten worden bescheiden omdat in een voorscheiding met decanter de organische stof en de zouten beide al in de dikke fractie belanden.

4.1.5 middels extractie en precipitatie

In experiment 2.3 is uitgegaan van allereerst centrifugering op verhoogde dichtheid. (zie 4.1.4). Daarmee krijgen we een product (2.2) met 64 kg P_2O_5 / m³ en een forse verrijking tov de organische stof (P_2O_5 /OS= 60%). Door de zure extractie met mierenzuur en vervolgens een precipitatie met loog wordt een product verkregen met bijna 40 kg P_2O_5 / m³ met de aantekening dat bijna de helft van de fosfaat nog in het extractie residu achterbleef. De molaire verhouding van Mg en fosfaat in het precipitaat zijn vrijwel gelijk. Mogelijk is hier $MgHPO_4$ gevormd. De stikstof (N_t) bedraagt slechts 40% op molaire basis. Deze blijft kennelijk achter in het extractie residu (product 2.4), waarschijnlijk nog in de vorm van struviet uit product 2.2 dat niet door het mierenzuur in oplossing werd gebracht.

Zouden we de zure extractie uitvoeren op een tussenproduct als 3.1 of 3.4 of zelfs op de dikke fractie van varkensmest dan zouden we daarmee veel van de organische stof kwijtraken. Het is wenselijk het extractierendement sterk te verbeteren door herhaalde extractie met mierenzuur bij pH rond pH4 of via een ander eenwaardig sterk zuur zoals zoutzuur of salpeterzuur in te zetten maar vanwege corrosiviteit respectievelijk mogelijk explosiegevaar bij hogere droge stof gehaltes van de mest zijn dit geen aantrekkelijke opties. Echter het feit dat we na neutralisatie geen struviet meer maken terwijl de verhouding Mg/N/ P de juiste moet zijn geweest, kan veroorzaakt zijn door de hoge osmotische waarde die volgens Harrison et al (2022) de vorming van struviet hindert. Met zwavelzuur hebben Gollenbeek et al (2020) en Schoumans et al (2014 en 2017) een goed extractie rendement verkregen maar dit zuur brengt complicatie met zich omdat bij neutralisatie gips wordt gevormd dat erg moeilijk te precipiteren is en waardoor fosfaat moeilijk te zuiveren is en geen struviet gevormd zal worden en waarschijnlijk heeft daar ook de hoge osmotische druk een negatieve rol gespeeld op de vorming van struviet.

Nadeel van zure extractie is dat we met de neutralisatie veel Natrium in het eindproduct brengen (39% tov drogestof) waardoor de toepassing beperkt wordt. In dit geval maken we waarschijnlijk magnesiumfosfaat, in principe een goede meststof voor grasland en natrium vormt dan geen probleem.

4.1.6. middels wassen en precipitatie

3.3 is na vergisten 21 kg/ m³ P_2O_5 en dus ca 70 kg struviet per m³. Zouden we met wassen met water en centrifugeren zoals in product 3.4 en de hele stevige pellet als product winnen bij een DS gehalte van 250 kg/ m³ dan zouden we een product hebben met 33 kg/ m³ P_2O_5 en 112 kg/ m³ struviet.

4.2 Struvietvorming

Struvietvorming uit dierlijke mest is in verschillende Nederlandse projecten (Oosterhof Holman (Schott (2023)), NedMag (van Vliet en Groenendal persoonlijke mededeling), CCS (Szymanska (2020))), met weinig succes getest. Vaak wordt als verklaring gegeven dat kleine struvietkristallen op het oppervlak van celwandmateriaal dat door de dieren niet verteerd is worden ingevangen. Dit celwandmateriaal heeft een groot watervasthoudend vermogen en is daarmee verantwoordelijk voor een soortelijk gewicht van struviet + celwanden dat niet veel hoger is dan 1 waardoor de struviet defacto niet dmv centrifuge techniek te precipiteren is. Bowers en Westerman (2005) beschrijven de vorming van struviet uit varkensspoelwater. Dit is mest met lage droge stof gehalte (1% DS). De Europese Unie heeft struviet uit mest goedgekeurd als een van de drie Renure meststoffen. In het JRC rapport staat als grondstof juist ook het dunne spoelwater en niet de drijfmestconcentratie zoals wij die in Nederland kennen.

Het ziet er naar uit dat de struviet gevormd wordt bij de neutralisatie tot pH9 van S4000 (0.2) waarbij een precipitaat 1.1 P7000 of 3.3 PD 7000 kan worden verkregen.

Wanneer we de molaire verhoudingen van CaO, MgO, P₂O₅ met elkaar vergelijken dan kan een uitspraak gedaan worden wanneer er wel en geen struviet gevormd wordt. Let wel het gaat hier om een eerste analyse die zeker niet volledig hoeft te zijn en die getoetst moet worden. Een overzicht van de relevante informatie over N, P, Mg, Ca, K, Na is in bijlage 1 als concentratie op gewicht en op molaire basis weergegeven vanuit gegevens voor varkensmest die in de Resultaten sectie staan en die eerder voor rundermest gepubliceerd door Sanders en Bussink (2025).

- Voorbehandeling door pH < 6 en / of anaerobe vergisting draagt bij aan vergroten van vrije fosfaat zoals voorgesteld door Sanders en van Kasteren (2010)
- Mg/ Ca > 1; Tao (2016) stellen dat Mg/Ca >5 moet zijn.
- P/ Ca > 1 Huchzermeier en Tao (2012) en Brown, K., Harrison, J., & Bowers, K. (2018) melden dat P/Ca > 1-2 moet bedragen.
- Som monovalente kationen en anionen kleiner dan 700 mM lijkt geen probleem
- Som monovalente kationen en anionen groter dan 800 mM wel een probleem, waarschijnlijk bij aanzienlijk lagere concentraties ook al.
- Tweewaardige anionen kunnen problemen veroorzaken zoals sulfaat maar kunnen ook de calcium concentratie verlagen zoals oxalaat.

Deze combinatie van omstandigheden moeten worden getoetst en kunnen nog verder worden aangescherpt. Siciliano et al (2020) geven veel achtergrond over struvietvorming uit dierlijke mest en afvalwater.

4.3 fractioneren van de 4 belangrijkste componenten in 4 afzonderlijke fracties

Sanders (1993) merkt op dat door de min of meer vaste verhouding van stikstof, fosfaat en kalium er bijna altijd kunstmest gegeven moet worden om een optimale dosering van elk van deze hoofdcomponenten voor het gewas te krijgen. Door een bijna volledige scheiding kan al een optimale bemesting met de mineralen uit mest verkregen worden. Dit betekent de facto vanuit de Nederlandse optiek dat we minder kunstmest nodig hebben en vaak al dat we met minder transportafstand de dierlijke mest al goed kunnen plaatsen.

4.4 Economisch perspectief

Hierboven is voor het hele volume aan fosfaat dat via dikke fractie van varkensmest wordt geëxporteerd berekend dat in plaats van forse kosten per m³mest van 21€/m³ varkensmest er met veel lagere of zelfs met bescheiden inkomsten gerekend mag worden. De kapitaalskosten zijn relatief klein, maar een goede economische evaluatie draagt bij aan verdere optimalisatie van de route om de mineralen te scheiden en mest als bron van waarde in te zetten. Recente uitlatingen van Staatssecretaris van Defensie dat we onafhankelijk moeten worden van het buitenland voor tenminste de mineralen nodig om voedsel te produceren, onderstreept deze aanpak. Gerekend werd met dat het resistente deel van de organische stof (waaruit het fosfaat is verwijderd) in de akkerbouw kan worden ingezet om de bodemkwaliteit te verhogen. Zou deze markt onvoldoende behoefte hebben dan zouden bouwmaterialen geproduceerd kunnen worden zoals bij Groenewoud in Sint Oederode met als voordeel dat we de fosfaat al grotendeels uit de organische stof verwijderd hebben en deze voor landbouwproductie van voedsel kunnen inzetten en niet wegstoppen in een materiaal.

5 Conclusie en aanbevelingen

Biologisch aanzuren lijkt behalve dat fosfaat in oplossing gaat nog een aantal andere bijvangsten te hebben zoals het vrijmaken van fosfaten in minerale vorm (ortho-fosfaten) en mogelijk ook nog fosfaten uit organisch gebonden vormen.

Neutraliseren van de afgescheiden aangezuurde dunne fractie moet tijdens de vergisting plaatsvinden door omzetting van melkzuur tot methaan zoals we eerder bij de rundermest zagen (Sanders en Bussink(2025) en zeker niet door toevoegen van Natronloog omdat daardoor de vergisting wordt afgeremd en onvoldoende organische stof wordt omgezet. In tegenstelling tot bovenstaande is in dit onderzoek toch chemische aanzuring en neutralisatie van varkensmest toegepast om tijd te winnen en dit leidde na centrifugatie en wassen met water tot een product met een fosfaatgehalte van 63 kg P₂O₅ per m³ (al dan niet na anaerobe vergisting). Na centrifugatie en na verhoging van het zoutgehalte om zo een betere scheiding te verkrijgen neemt het fosfaatgehalte toe tot 92 kg/ m³.

- Het fosfaat wordt geheel als struviet gewonnen (na aanzuren van de mest gevolgd door mestscheiding en neutralisatie van de dunne fractie).
- In combinatie met een N-stripper en een biogasvergister (op een schaal van tenminste 25000m³/jaar) ontstaan 4 producten: fosfaatproduct, fosfaatarm organische stof, mineraal stikstofproduct en een kaliumrijke dunne fractie. Het fosfaatproduct en bescheiden volume moet afgezet worden naar fosfaattekortgebieden. Het fosfaatarm organische stof is beter lokaal plaatsbaar op bouwlandpercelen. Het terugwonnen stikstof kan als stikstofkunstmest ingezet worden als het aan de criteria van de Europese Commissie voldoet en de resterende kalium dunne fractie is waarschijnlijk met minder transportkilometers beter plaatsbaar binnen de stikstof- en fosfaatgebruiksnormen.
- Een grove economische doorrekening gaat er vanuit dat de verwerking van dat varkensmest 21€ per m³ kost (export dikke fractie en verwerking dunne fractie). Inclusief verlies aan waardevolle mestcomponenten bedragen de kosten zelfs 33€/m³ mest (tabel 3 bovenste panel). Uitgaande van de situatie dat biologisch aangezuurde varkensmest met hetzelfde gemak als rundermest kan worden vergist tot biogas(Bussink et al (2025) en Sanders en Bussink (2025)), ontstaat een businesscase met bescheiden inkomsten voor de betrokken ketenpartijen indien fosfaat als een product met 60 kg/ m³ en 44 % ds geëxporteerd wordt, de makkelijk afbreekbare organische stof in biogas wordt omgezet en de ammoniak gestript wordt. Investerings voor mestscheiding en ammoniak strippen zijn meegerekend terwijl er

van uit gegaan is dat alle kosten voor het aanzuren en vergisten van varkensmest al door derden wordt gedragen.

- Aanbevolen wordt om een proef op praktijkschaal (boerderij tot grootschalig) uit te voeren waarbij de biologisch aangezuurde dunne fractie van varkensmest apart wordt vergist. Tevens dient men na te gaan met welke scheidingstechniek (decanter, hydrocycloon of anders) in de praktijk het beste gewerkt kan worden om het geconcentreerde fosfaatproduct in handen te krijgen.
- Onderzoek onder welke omstandigheden reproduceerbaar struviet kan worden geproduceerd zodat fosfaat als product met waarde met bescheiden logistieke kosten kan worden geëxporteerd.
- Reken verdienmodellen inclusief de investerings- en operationele kosten en de transportafstanden door bij verschillende schaalgrootte en zelfs op boerderijniveau voor een paar 1000 varkens.

6 Acknowledgements

- Topsector project BioValor (Oscar Schoumans) voor financiële ondersteuning, de samenwerking op het gebied van fosfaatrecoverie en het reviewen van het onderhavige rapport.
- Wim Bussink (NMI) voor het reviewen van het onderhavige rapport.
- Nedmag vanwege analyses en samenwerking op gebied van struviet.
- Twence vanwege contactleggen met varkensboer met mest met hoog P gehalte.

7 Referenties

- Bowers, K. E., & Westerman, P. W. (2005). Performance of coneshaped fluidized bed struvite crystallizers in removing phosphorus from wastewater. Trans. ASAE, 48(3), 1227-1234. <https://doi.org/10.13031/2013.18523>
- Brown, K., Harrison, J., & Bowers, K. (2018). Struvite precipitation from anaerobically digested dairy manure. Water Air Soil Pollution, 229(7), 217. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3855-5> Church, C. D
- Bussink DW, Sanders, JPM en Boode, J (2025) Praktijkproef biologisch aanzuren in een rundveestal NMI rapport 2035a.N.24. , 65 pp.
- Fang, C., Boe, K., and Angelidaki, I. (2011); Anaerobic co-digestion of desugared molasses with cow manure: focussing on sodium and potassium inhibition. Bioresource Technology volume 102 pp 1005- 1011
- Gollenbeek, L.R., J.P.B.F. van Gastel, J.J.M. Schellekens, P. Bussmann, J. Roefs, R.M. Melse, N. Verdoes, 2020. Verkenning mogelijke mestverwerkingsroutes en duurzaamheidsaspecten. Wageningen Livestock Research.
- Harrison, JH., Fullerton, K , Whitefield, E, Bowers, K, Church, C, Vanotti, M, Dube, P; Struvite production at commercial dairies with use of a mobile system and comparisons to alternative nutrient recovery systems; Applied Engineering in Agriculture Vol. 38(2): 361-373 2022 American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0883-8542 <https://doi.org/10.13031/aea.14836>
- Huchzermeier, M. P., & Tao, W. (2012). Overcoming challenges to struvite recovery from anaerobically digested dairy manure. Water Environ. Res., 84(1), 34-41. <https://doi.org/10.2175/106143011X13183708018887>

- Ma, G., Neibergs, J. S., Harrison, J. H., & Whitefield, E. M. (2017). Nutrient contributions and biogas potential of co-digestion of feedstocks and dairy manure. *Waste Manag.*, 64, 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.035>
- Van Noord, R; Landelijke rapportage en inventarisatie export en verwerking dierlijke mest 2025 <https://www.mestverwaarding.nl/kenniscentrum/5348/landelijke-rapportage-en-inventarisatie-export-en-verwerking-dierlijke-mest-2025> Overzicht en beoordeling van technologie voor verwaarden van mest rapportage
- Regelink, I.c., Van Puffelen, J., Ehlert, P. en Schoumans, O. 2021, Wageningen UR Rapport 3120; Evaluatie voor verwerkingsinstallaties voor mest en covergister mest
- Regelink, I.C., Ehlerts, P., Smit, P., Everlo, S., Prinsen, A., Schoumans, O., 2019. Phosphorus recovery from co-digested animal manure. Development of the RePeat process. Wageningen Environmental Research, Wageningen, report 2949, p. 66.
- Sanders, JPM & Bussink DW (2025) snelle vergisting van biologisch aangezuurde rundveemest en fosfaatwinning uit digestaat, NMI rapport 2035b.N.24. 30 pp.
- Sanders, JPM (1993), Coping with agricultural waste problems in an economic way, in Contaminated soil 1993 pp 1511-1517, Arendt, F., Annokkee GJ. Eds, Kluwer Academic Publishers
- Sanders, JPM, van Kasteren JH, InnovatieNetwerk P, de Wilt JG. Mest als waardevolle grondstof. Enkele technologische opties. Rapport in opdracht van Innovatienetwerk (10.2.233), Utrecht, The Netherlands. 2010.
- Schott C. (2023), *Recovery of phosphorus from animal manure* (Doctoral dissertation, Wageningen University and Research).
- Schoumans, O.F., Ehlert, P.A.I., Nelemans, J.A., Van Tintelen, W., Rulkens, W.H., Oenema, O., 2014. Explorative study of phosphorus recovery from pig slurry. Laboratory experiments. Alterra Wageningen UR, report 2514, Wageningen, p. 44.
- Schoumans, O.F., Ehlert, P.A.I., Regelink, C.I., Nelemans, J.A., Noij, I.G.A.M., Van Tintelen, W., Rulkens, W.H., 2017. Chemical phosphorus recovery from animal manure and digestate. Laboratory and demonstration pilots. Alterra, Wageningen, Alterra report 2849.
- Siciliano, A., Limonti, C., Curcio, G. M., & Molinari, R. (2020). Advances in struvite precipitation technologies for nutrients removal and recovery from aqueous waste and wastewater. *Sustainability*, 12(18), 7538. <https://doi.org/10.3390/su12187538>
- Szymańska M, Sosulski T, Bożetka A, Dawidowicz U, Wąs A, Szara E, Malak-Rawlikowska A, Sulewski P, van Pruissen GW, Cornelissen RL. Evaluating the struvite recovered from anaerobic digestate in a farm bio-refinery as a slow-release fertiliser. *Energies*. 2020 Oct 14;13(20):5342.
- Tao, W., Fattah, K. P., & Huchzermeier, M. P. (2016). Struvite recovery from anaerobically digested dairy manure: A review of application potential and hindrances. *J. Environ. Manag.*, 169, 46-57. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.006>
- Timmerman, M., Verdoes, N., Kupers, G. C. C., & Verheijen, R. (2018). *Orthofosfaat gehalten in varkensmest en potentieel voor terugwinning*. (Wageningen Livestock Research rapport; No. 1089). Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/442522>
- Nico Verdoes, Rik Maasdam, Roland Melse, Jos van Gastel, Luuk Gollenbeek, Paul Bussmann, Jan Schellekens, Jan Roefs; Overzicht en beoordeling van technologie voor verwaarden van mest; Wageningen UR Rapport 1290. 2021

Bijlage 1.

Een overzichtstabel is samengesteld uit dezelfde relevante informatie die al onder 'Resultaten' zijn weergegeven voor de varkensmest en gepubliceerd is voor rundermest door Sanders en Bussink (2025). Concentraties op gewicht en op molaire basis zijn weergegeven.

	dumefraonderuit	0.1Hulma	0.3P4000	0.2S4000	1.2S7000	1.1P7000	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
	koe	bezieker					lichte Kfo	zwarte Kfo	geneutrali	rest na				was met		ingeschat
g/liter									extract	extractie				equi H2O		schraapse
17 Nt	4,2	2,26	7,5				4,5	14,76	3,16	11 Nt	6,94	5,75	11,66	16,86	18,39	31,67
72 P2O5	1,6	5,05	5,7	4,58	5,36	12,53	4,69	64,68	39,8	33 P2O5	4,95	0,23	21,12	63,04	91,98	18,25
48 K2O	9,2	7,96	6,23	7,43	8,15	7,97	7,93	89,6	27,4	32 K2O	7,45	7,48	6,96	3,80	34,20	34,20
40 MgO	1,03	3,44	2,62	2,54	2,42	0,1	5,55	36,56	23,6	19 MgO	2,27	0,03	9,94	33,33	51,42	2,79
32 Na2O	1,54	1,13					2,82	1,4	128,2	1 Na2O	9,93	9,98	8,96	3,91	0,93	0,93
56 CaO	2,63	28,29	2,9	3,03	2,01	0,77	4,14	6,72	4,68	3,3 CaO	1,75	0,01	10,22	20,26	22,53	23,49
g/g																
N/P2O5	2,63	0,45	1,32	0,00	0,00	0,00	0,96	0,23	0,08	0,33 N/P2O5	1,40	25,00	0,55	0,27	0,20	1,74
MgO/P2O5	0,64	0,68	0,46	0,55	0,45	0,26	0,44	0,28	0,57	0,57 Mg/P2O5	0,46	0,13	0,47	0,53	0,56	0,15
CaO/MgO	2,55	8,22	1,11	1,19	0,83	7,70	2,86	0,18	0,20	0,17 CaO/MgO	0,77	0,33	1,04	0,61	0,44	8,41
mMolair	indien in oplossing	NB Nt en niet NH4+														
Nt	247	133	441	0	0	0	265	868	186	638 Nt	408	338	686	992	1082	1863
P2O5	22	70	79	64	74	5	174	898	553	459 P2O5	69	3	293	876	1278	254
K2O	192	166	130	155	170	166	5146	1867	571	670 K2O	155	156	145	79	713	713
MgO	26	86	66	64	61	3	339	914	590	472 MgO	57	1	246	833	1286	70
Na2O	48	35	0	0	0	0	88	44	4006	22 Na2O	310	312	280	122	29	29
CaO	47	505	52	54	36	14	74	63	120	59 CaO	31	0	183	362	402	419
formiaat									4006							
M/M																
N/P2O5	11,12	1,90	5,57	0,00	0,00	0,00	4,06	0,97	0,34	1,39 N/P2O5	5,94	105,88	2,34	1,13	0,85	7,35
MgO/P2O5	1,16	1,23	0,83	1,00	0,81	0,46	0,51	1,02	1,07	1,03 Mg/P2O5	0,83	0,23	0,94	0,95	1,01	0,28
CaO/MgO	1,82	5,87	0,79	0,85	0,59	5,50	1,90	0,13	0,14	0,12 CaO/MgO	0,55	0,24	0,74	0,43	0,31	6,00

