



Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur
Directie Plantaardige Agroketens en Voedselkwaliteit

[Redacted]
Bezuidenhoutseweg 73
2594 AC Den Haag

Geachte [Redacted],

U hebt verzocht om een advies over mogelijke alternatieven voor zwavelzuur bij luchtwassers. De verwachting is dat bij de toelating van ammoniumzouten als RENURE-meststof, deze meststof meer gebruikt zal gaan worden. Het product bevat een hoog gehalte aan zwavel. Dit kan mogelijk leiden tot overdosering van zwavel op gronden die dit niet nodig hebben.

Deze studie onderzoekt de mogelijke alternatieve zuren en de resultaten vindt u in toegevoegde bijlage. Basis voor deze studie is een studie van Starmans en Melse, die deze vraag reeds in 2011 onderzocht hebben. In de huidige studie hebben we gekeken naar de recente beleidsontwikkelingen, ontwikkelingen in de prijzen van alternatieve zuren en technische ontwikkelingen die een alternatief vormen voor het gebruik van zwavelzuur als wasmiddel. We hopen op deze manier een bijdrage te leveren aan de beleidsontwikkeling.

Met vriendelijke groet,

Harm Smit
Emma van Boxmeer

Wageningen
Livestock Research

Emissies en
Mestverwaarding

DATUM
18 december 2025

BEZOEKADRES

INTERNET
www.wur.nl/livestock-research

KVK NUMMER
09098104

Alternatieven voor zwavelzuur bij luchtwassers

Emma van Boxmeer en Harm Smit

Wageningen Livestock Research, De Elst 1, Wageningen

Inleiding

De inzet van chemische luchtwassers is een gangbare techniek voor het verminderen van ammoniak uit stallen. Deze techniek is sinds de jaren negentig in Nederland ingeburgerd. Door ammoniakrijke stallucht door een zure oplossing te geleiden wordt ammoniak uit de lucht gehaald en vastgelegd in een ammoniumzout. Daarnaast kan eenzelfde product gemaakt worden door mest te strippen en de ammoniakrijke lucht te scrubben. De Europese Commissie bereidt wetgeving voor waarin deze producten ook weer opnieuw ingezet kunnen worden als kunstmest op het eigen bedrijf (RENURE). In veel luchtwassers wordt zwavelzuur ingezet, waardoor het eindproduct ammoniumsulfaat ontstaat. Deze meststof is een stikstof-zwavelmeststof.

In een CDM-advies uit 2014 (CDM, 2014) wordt aangegeven dat er risico's verbonden zijn aan het gebruik van zwavelhoudende meststoffen. De landbouw is vaak nog onvoldoende bewust van deze risico's bij een verhoogde aanvoer van zwavel. Zeker in veengebieden, waar het zwaveladvies maar een beperkte hoeveelheid sulfaat adviseert (CBGV, 2024). Tot op heden is er nog geen regelgeving met betrekking tot het gebruik van zwavel. Het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur (LVVN) wil graag een inventarisatie van mogelijke alternatieven voor zwavelzuur in luchtwassers, om te zien hoe men deze alternatieven kan stimuleren.

Onderzoek van Starmans & Melse (2011)

Reeds in 2011 is een onderzoek gedaan naar mogelijke alternatieve zuren voor zwavelzuur in chemische luchtwassers (Starmans & Melse, 2011). In deze veel geciteerde studie is van gangbare organische en anorganische zuren beschreven wat de effectiviteit, veiligheid en kosten zijn. Er werd geconcludeerd dat enkele organische zuren, zoals citroenzuur of maleïnezuur, als mogelijk alternatief voor zwavelzuur gebruikt zouden kunnen worden. Knelpunten waren de kosten van deze zuren en mogelijke additionele geurbelasting.

Opzet

De vraag van het ministerie van LVVN is in grote lijnen vergelijkbaar met wat Starmans & Melse (2011) reeds onderzochten. De kenmerken en chemische eigenschappen van zuren zijn in de loop van de tijd niet veranderd. Er is daarom gekozen om de huidige studie in te steken als een update van de studie uit 2011, die in gaat op een aantal vragen die betrekking hebben op de huidige mogelijkheden van het gebruik van alternatieve zuren in luchtwassers:

1. Wat zijn de gevolgen van een invoering van de RENURE wetgeving op het gebruik van ammoniumsulfaat?
2. Wat zijn de prijzen in 2025 van alternatieve zuren?
3. Zijn er praktijkcases met alternatieve zuren?
4. In hoeverre kunnen mestproducten die ontstaan bij gebruik van organische zuren als RENURE-meststof gebruikt worden?
5. Wat zijn technische ontwikkelingen in recoverytechnieken, die het gebruik van zwavelzuur beperken?

1. Ammoniumsulfaat als RENURE-meststof

DATUM
18 december 2025

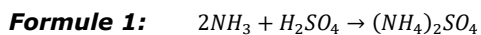
Algemeen

In september 2025 stemde het Nitraatcomité in met het opnemen van RENURE in bijlage III van de Nitraatrichtlijn (EU 91/676). Dit maakt het mogelijk dat diverse meststoffen uit dierlijke mest boven de gebruiksnorm voor dierlijke mest van 170 kg N per hectare gebruikt kunnen worden. Aan deze herwonnen meststoffen uit dierlijke mest worden een aantal eisen gesteld. Het betreft proceseisen, minimale kwaliteitseisen, eisen voor maximale verontreinigen en labeleisen. Daarnaast geven de RENURE-criteria aan dat RENURE meststoffen, die voldoen aan de eisen, tot 80 kg N/ha boven de gebruiksnorm voor dierlijke mest gebruikt mogen worden. Uit eerder onderzoek blijkt dat ammoniumsulfaat aan deze eisen kan voldoen (van Boxmeer et al., 2023).

PAGINA
3 van 17

RENURE eisen en ammoniumsulfaat

Door lucht die is verontreinigd met ammoniak door zwavelzure oplossing te leiden, bindt ammoniak uit de lucht aan sulfaat uit het zwavelzuur en ontstaat ammoniumsulfaat (Formule 1).



Wanneer dit proces wordt gebruikt om ammoniak uit stallucht te verwijderen wordt het "luchtwassen" genoemd. Als het in een verwerkingsproces om stikstof uit mest of digestaat te halen wordt gebruikt, wordt het "strippen en scrubben" genoemd. Het product, ammoniumsulfaat, dat ontstaat is in principe identiek, al worden met het wassen van stallucht ook andere componenten zoals stof meegewassen. Het mestproduct is een heldere vloeistof die vrij is van organisch materiaal. Deze oplossing bevat circa 6% stikstof (N), 7% zwavel (S) en 0% fosfaat (P_2O_5). De stikstof is voor bijna 100% aanwezig in minerale vorm (ammonium) en daarmee direct beschikbaar voor het gewas. Daarnaast zijn de gasvormige verliezen naar de lucht zeer laag, wanneer de meststof lichtzuur ($\text{pH} < 5.5$) is en snel in de bodem infiltreert (Rietra et al., 2024). Het product bevat zeer lage gehalten aan koper (Cu) en zink (Zn) (van Boxmeer et al., 2025, in press).

Daarnaast is de verwachting dat er geen pathogenen in dit product aanwezig zullen zijn, omdat het product gewonnen wordt met een zeer sterk zuur (zwavelzuur), wat ook ingezet wordt als desinfectiemiddel. Daarmee lijkt het product aan de kwaliteitseisen en de eisen voor maximale verontreiniging van RENURE te kunnen voldoen. Doordat het product gewonnen wordt uit een industrieel proces, kan een stabiele en eenduidige kwaliteit gewaarborgd worden.

Gebruik van ammoniumsulfaat als RENURE-meststof

De RENURE-criteria stellen dat herwonnen meststoffen uit dierlijke mest tot 80 kg N per hectare boven de generieke gebruiksnorm van dierlijke mest, 170 kg N per hectare, gebruikt kan worden. Dit betekent dat ammoniumsulfaat tot een maximum van 250 kg N per hectare gebruikt kan worden. De formule van ammoniumsulfaat, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, geeft een verhouding van 2 stikstofatomen per zwavelatoom aan. Daardoor heeft ammoniumsulfaat een massaverhouding van ongeveer 21% stikstof (N) en 24% zwavel (S). Dit betekent dat bij een volledige opvulling van de gebruiksnorm door ammoniumsulfaat, er 285 kg zwavel per ha op het land gebracht zal worden. Dit is het worst case scenario.

De verwachting is dat RENURE meststoffen vooral in de 80 kg N/ha boven de generieke gebruiksnorm voor dierlijke mest gebruikt gaan worden. Bij volledige opvulling van deze gebruiksnorm (80 kg N/ha) betekent dat er rond de 90 kg zwavel per hectare op het land toegediend zal worden. Bij grasland op zandgrond is het gebruikelijk om in

het voorjaar 20 tot 40 kg S/ha te bemesten (CBGV, 2024). Later in het seizoen is een zwavelgift op zandgrond niet meer effectief, omdat er voldoende zwavel vrijkomt door mineralisatie van organische stof uit de bodem. Veen- en kleigronden bevatten veelal van nature voldoende zwavel, waardoor zwavelbemesting niet effectief is. Een verhoging van de zwavel gift in gronden die al voldoende zwavel bevatten zal de gehalten van zwavel in ruwvoer laten stijgen. Daarnaast is sulfaat (SO_4^{2-} , de vorm waarin zwavel door planten wordt opgenomen) goed oplosbaar, waardoor het kan uitspoelen naar het grondwater in perioden dat het niet door het gewas wordt opgenomen.

Productie van ammoniumsulfaat

De huidige productie van spuiwaters wordt door het Nederlands Centrum Mestverwaarding (NCM) geschat op 8,7 miljoen kg N (NCM, 2025). Wanneer het gehele areaal grasland in Nederland bemest zou worden met ammoniumsulfaat tot de RENURE norm van 80 kg N/ha, is er 77 miljoen kg N nodig. Dat betekent dat een verachtvoudiging van de productie mogelijk is. De huidige productie van spuiwater levert voor het gehele areaal cultuurgrond een gebruik van 5,5 kg S/ha. In de afgelopen 5 jaar is geen groei te zien in deze productie. Er wordt zelfs een lichte daling gerapporteerd. In 2020 werd 9,5 miljoen kg N geproduceerd en in 2024 8,7 miljoen kg N (NCM, 2025). De verwachting is niet dat er op landelijk niveau snel een overschrijding zal zijn van de zwavel gift. Op bedrijfs- of lokaal niveau, waar veel ammoniumsulfaat beschikbaar is, kan hier wel sprake van zijn.

Conclusie

Ammoniumsulfaat is een ammoniumzout gewonnen uit dierlijke mest en is een van de meststoffen die als RENURE meststof aangemerkt kan worden. De invoering van RENURE introduceert ook een gebruiksnorm voor stikstof voor deze mestproducten uit dierlijke mest. De verwachting is dat ammoniumsulfaat zal worden gebruikt in de ruimte boven de gebruiksruijme van dierlijke mest. Daarmee wordt het gebruik van zwavel uit ammoniumsulfaat beperkt tot een maximum van 90 kg S per ha.

Als deze gebruiksnorm ten volle wordt gebruikt, leidt dit in veel gevallen tot een overdosering, aangezien de bemestingsadviezen op gemiddeld op 30 kg S per hectare liggen. Dit kan mogelijk tot ophoging van zwavelgehalten in veevoer en uitspoeling van sulfaat leiden. Momenteel is de productie van ammoniumsulfaat nog beperkt. Er is nog groei mogelijk zonder dat dit op landelijke niveau tot milieuschade leidt. Op bedrijfs- of lokaal niveau, waar veel ammoniumsulfaat beschikbaar is, kan hier wel sprake van zijn.

2. Kosten van alternatieve zuren

In 2011 is een deskstudie gedaan naar alternatieven voor zwavelzuur in chemische luchtwassers (Starmans & Melse, 2011). Zij hebben de eigenschappen van verschillende soorten zuren omschreven, waaronder anorganische zuren, organische mono-zuren en organische di- en tri-zuren. Deze zuren zijn vervolgens beoordeeld aan de hand van effectiviteit, veiligheid en kosten. Ze beschrijven twee typen chemische luchtwassers, namelijk luchtwassers met 95% en 70% rendement. Het waswater in 95% luchtwassers heeft bij normaal gebruik een pH van 2, terwijl 70% luchtwassers waswater met een pH van 4 – 5 hebben. Daarnaast is het gangbaar dat 70% luchtwassers meer stallucht per m³ bedding krijgen te verwerken, waardoor de contacttijd en het rendement lager is dan van 95% luchtwassers.

De werking van deze luchtwassers anno 2025 is niet veranderd ten opzichte van 2011. De techniek van het in contact brengen van lucht met een zure oplossing om daarmee ammoniak uit de lucht te vangen is hetzelfde. De huidige ontwikkeling rondom RENURE leidt wel tot een toenemend gebruik van strip/scrub installaties als mestverwerkingstechniek. Deze scrub-techniek is vergelijkbaar met de eerdere beschreven wastechniek van luchtwassers, alleen is de ammoniakconcentratie in de aangevoerde lucht vaak hoger. Doordat om economische redenen in strip/scrub installaties ook zwavelzuur gebruikt wordt, leidt dit tot de productie van meer ammoniumsulfaat, waardoor de zoektocht naar alternatieve zuren relevant blijft.

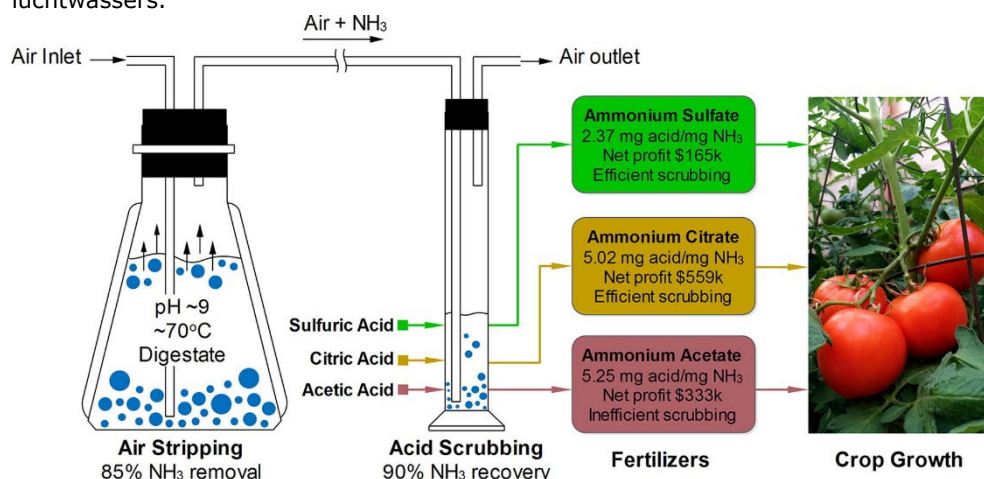
Op basis van eerdere inventarisaties (Starmans & Melse, 2011; CDM, 2014) zijn in het huidige onderzoek de volgende zuren beschouwd als mogelijke alternatieve zuren voor zwavelzuur:

- Anorganische zuren: salpeterzuur, zoutzuur, fosforzuur
- Organische zuren: mierenzuur, azijnzuur, melkzuur, oxaalzuur, maleïnezuur en citroenzuur.

Deze zuren zijn beoordeeld op basis van effectiviteit, veiligheid en kosten. De ammoniumzouten die ontstaan zijn ook beoordeeld op basis van effectiviteit.

Effectiviteit

Een zuur moet sterk genoeg zijn om ammoniak te kunnen binden. De zuurconstante van een zuur geeft aan hoe goed een zuur protonen (H⁺) kan vrijmaken om ammoniak aan te binden. Starmans & Melse (2011) hebben berekend dat de minimale zuursterkte van een zuur $5,8 \times 10^{-10}$ mol/L moet zijn om geschikt te zijn voor toepassing in een luchtwasser. De hierboven genoemde zuren hebben allemaal een zuursterkte die hoger is dan dit minimum, waardoor zij zuur genoeg zijn om ammoniak af te vangen in luchtwassers.



Figuur 1. De kosten en effectiviteit van drie zuren gebruikt als wasmiddel voor de herwinning van ammoniak uit digestaat (Jamaludin et al., 2018).

Temperatuur kan wel een effect hebben op de effectiviteit van zuren. Bijvoorbeeld: azijnzuur functioneerde in een strip-scrub experiment vergelijkbaar met zwavelzuur (Figuur 1), maar alleen bij lagere temperaturen (15 - 18°C) (Jamaludin et al., 2018). Bij temperaturen tussen 36 – 40°C werd maar 70% van de ammoniak afgevangen en bij 67 – 70°C zakte dit zelfs naar minder dan 30%.

Veiligheid

Zowel het gebruik van de organische als de anorganische zuren brengt veiligheidsrisico's met zich mee. Ook het gebruik van zwavelzuur kent risico's, waaronder het feit dat het corrosief is, reageert met organische verbindingen (oxidatiemiddel), er veel warmte ontstaat als het wordt gemengd met water, contact met de huid leidt tot brandwonden en ook kleding wegbrandt. De andere zuren zijn ook corrosief, waarbij de anorganische zuren sterker corrosief zijn dan de organische zuren. Daarnaast is salpeterzuur ook oxidatief. Warmteontwikkeling bij contact met water speelt ook een risico bij salpeterzuur en zoutzuur, maar minder bij organische zuren. De anorganische zuren veroorzaken snelle en diepe brandwonden. De organische zuren zijn minder agressief, maar kunnen in hoge concentraties ook bijtend of irriterend voor de huid zijn. Oxaalzuur en mierenzuur zijn daarnaast systemisch toxisch, waardoor ze bij contact ook schade aan kunnen richten in andere delen van het lichaam. Sommige zuren (zoutzuur, mierenzuur, azijnzuur en melkzuur) kunnen net als zwavelzuur H_2 gas vormen bij contact met metalen, wat brandbaar en mogelijk explosief is. Uit salpeterzuur ontstaat NO_2 , een bruin/geel gas dat giftig is. Uit zoutzuur ontstaat HCl-damp, wat minder giftig is, maar wel zeer irriterend voor luchtwegen, huid en longen is. Bij opslag van organische zuren kan CO en CO_2 ontstaan. CO is extreem giftig en veroorzaakt een zuurstoftekort. CO_2 kan in kleine ruimten verstikkend werken.

Over het algemeen is een luchtwasser volledig gesloten en wordt het zuur automatisch gedoseerd in de luchtwasser. Veiligheidsrisico's ontstaan voornamelijk tijdens het wisselen van de zuurcontainer, bij onderhoud, storingen en lekkages of bij onjuist gebruik. Zuren vallen onder "gevaarlijke stoffen" en bij aanwezigheid van gevaarlijke stoffen op een bedrijf moet voorkomen worden dat deze negatieve gevolgen hebben voor medewerkers. Hiervoor zijn regels opgenomen in de Arbowet, moet een risico-inventarisatie en-evaluatie (RI&E) zijn uitgevoerd, moeten beheersmaatregelen worden genomen om risico's te verlagen en moeten zuren worden opgeslagen volgens de PGS 15 richtlijn. Dit alles met als doel de blootstelling aan gevaarlijke stoffen te beperken. Juridisch gezien wordt er geen onderscheid gemaakt tussen organische en anorganische zuren. Wel zijn de eigenschappen van de zuren verschillend, waardoor de risico's ook verschillen (zie hierboven) en daarom soms andere maatregelen vragen.

Geur

Starmans & Melse (2011) gaven wel aan dat vooral organische zuren een specifieke geur kunnen laten ontstaan of kunnen ontleden tot geurende componenten. Jamaludin et al. (2018) hebben bij gebruik van citroenzuur geen geur waargenomen. Echter, bij het gebruik van azijnzuur ontstond wel een scherpe geur als gevolg van de vervluchtiging van zuurmoleculen.

Kosten

De kosten voor het aanschaffen van de verschillende zuren zijn op dezelfde manier berekend als Starmans & Melse (2011). Hierbij is de waardigheid van het zuur, in aanwezigheid van ammonium, in de berekening opgenomen. De prijs is uitgedrukt per mol ingevangen (geprotoneerde) ammonium (Tabel 1).

Tabel 1: Kosten van organische en anorganische zuren die mogelijk als vervanging van zwavelzuur gebruikt kunnen worden. (Prijspeil: oktober/november 2025).

DATUM
18 december 2025

Zuur	Molecuul formule	Producent	Afname (kg)	Zuiverheid (%)	Prijs (€)	Zuur (mol)	N	€/100 mol NH ₃
Anorganische zuren								
Zwavelzuur	H ₂ SO ₄	Werkenmetmerken	25	96	99,95	245	1	40,85
		Vivochem	1250	96	412,50	12.235	1	3,37
Salpeterzuur	HNO ₃	Werkenmetmerken	24,0	53	84,50	202	1	41,86
		Vivochem	1250	53	437,50	10.514	1	4,16
Zoutzuur	HCl	Labshop	29,8	30	87,73	245	1	35,84
		Werkenmetmerken	23,8	30	66,95	196	1	34,19
		Vivochem	1150	30	287,50	9.462	1	3,04
Fosforzuur	H ₃ PO ₄	Labshop	33,8	85	320,83	293	2	54,75
		Werkenmetmerken	25,0	75	149,95	191	2	39,19
		Vivochem	1400	75	1652,00	10.714	2	7,71
Organische zuren								
Mierenzuur	CH ₂ O ₂	Labshop	29,9	85	133,10	552	1	24,13
		Werkenmetmerken	23,9	85	82,50	441	1	18,69
		Vivochem	1180	85	920,40	21.790	1	4,22
Azijnzuur	C ₂ H ₄ O ₂	Labshop	5,3	99,5	76,53	87	1	87,98
		Werkenmetmerken	1050	80	2475,00	13.988	1	17,69
		Vivochem	1050	80	787,50	13.988	1	5,63
Melkzuur	C ₂ H ₆ O ₃	Sigma-Aldrich	25,0	85	230,02	236	1	97,51
		Vivochem	1200	80	1704,00	10.657	1	15,99
Oxaalzuur	C ₂ H ₂ O ₄	Labshop	25,0	99,6	107,69	227	2	19,47
		Werkenmetmerken	25,0	99,8	89,75	227	2	16,19
		Vivochem	1000	99,8	1620,00	11.085	2	7,31
Maleïnezuur	C ₄ H ₄ O ₄	Vivochem	1000	99,8	1690,00	8.598	2	9,83
Citroenzuur	C ₆ H ₈ O ₇	Labshop	25,0	99,8	118,58	130	3	30,44
		Werkenmetmerken	25,0	99,8	101,25	130	3	25,99
		Vivochem	1000	99,8	1140,00	5.195	3	7,32

PAGINA
7 van 17

Bronnen: Werkenmetmerken: <https://www.werkenmetmerken.nl>, geraadpleegd 30-10-2025, Labshop: <https://www.labshop.nl>, geraadpleegd: 03-11-2025, Sigma-Aldrich: <https://www.sigmaaldrich.com>, geraadpleegd: 30-10-2025, Vivochem: <https://www.vivochem.nl> (persoonlijke communicatie, 04-11-2025).

Over het algemeen geldt dat prijzen van zuren aangeschaft in bulkhoeveelheden (> 1.000 kg) lager liggen dan wanneer kleine hoeveelheden (circa 25 kg) worden aangeschaft. Afhankelijk van het zuur ligt de bulk-prijs een factor 2 tot 15 lager dan de prijs voor een kleinere hoeveelheid. De prijs van zwavelzuur (in bulk aangeschaft) is op dit moment €3,37 per 100 mol afgevangen NH₃. Zoutzuur is het enige zuur dat per 100 mol ingevangen ammoniak een lagere prijs (10%) heeft dan zwavelzuur. De prijs voor salpeterszuur ligt ongeveer €0,80 per 100 mol NH₃ (23%) hoger en de prijs voor fosforzuur ligt ruim €4 per 100 mol NH₃ hoger (ruim 2 keer duurder). De prijs van de organische zuren ligt over het algemeen wat hoger dan de anorganische zuren. Alleen de prijs van mierenzuur (€4,22/100 mol NH₃) komt in de buurt van de prijs van zwavelzuur, maar is nog steeds 25% hoger. De prijs voor azijnzuur ligt 67% hoger en de prijs voor oxaalzuur en citroenzuur is ruim twee keer zo hoog als de prijs voor zwavelzuur. De prijs van maleïnezuur en melkzuur is het hoogst en is respectievelijk 3 en 4,7 keer hoger dan de prijs voor zwavelzuur.

Vergelijkbare resultaten werden gevonden door Jamaludin et al. (2018). Zij vonden in een strip-scrub experiment (Figuur 1) dat citroenzuur hetzelfde functioneert als zwavelzuur, maar ook zij concludeerden dat vanwege de zuursterkte twee keer zoveel citroenzuur nodig is vergeleken met zwavelzuur en dat hierdoor de kosten hoger liggen.

Ammoniumzouten

Het gebruik van alternatieve zuren leidt tot de productie van alternatieve ammoniumzouten. Deze producten kunnen ook weer gebruikt worden als meststof in de landbouw. In Tabel 2 wordt een overzicht gegeven van de ammoniumzouten die worden gemaakt bij gebruik van de alternatieve zuren die in Tabel 1 worden benoemd, samen met hun stikstofwerking. De meeste zuren produceren een ammoniummeststof, maar alleen bij gebruik van salpeterzuur in de luchtwasser wordt een ammoniumnitraatmeststof geproduceerd. Omdat ammoniumnitraat zowel stikstof in

de vorm van ammonium als in de vorm van nitraat aanbiedt aan de plant wordt dit gezien als een de meest effectieve meststof (zelfs effectiever dan ammoniumsulfaat). Alle andere zuren hebben ammonium als stikstofbron. De stikstof effectiviteit van ammoniumnitraat en ammoniumfosfaat is uitgebreid onderzocht en is vergelijkbaar met (100%) of hoger (>100%) wanneer het in veldproeven getest wordt tegen de referentie van ammoniumsulfaat (CBGV, 2024; Rietra et al., 2024; IFA, 1998). Bij het gebruik van fosforzuur ontstaat ammoniumfosfaat, wat ook fosfor bevat. Dit product voorziet de plant dus in twee macronutriënten, wat de plantengroei bevordert. Wel dienen boeren bij aanwending van deze meststof niet alleen rekening houden met de maximale stikstofgift, maar ook met de maximale fosforgift per hectare. Het kennisniveau van het gebruik van ammoniumsulfaat, -nitraat en -fosfaat is hoog en er zijn veel wetenschappelijke veldexperimenten uitgevoerd om de stikstofefficiëntie te bepalen. Deze producten worden ook door kunstmestproducenten op de markt aangeboden (NMI, 2025). Voor het gebruik van ammoniumchloride zijn er minder peer-reviewed artikelen beschikbaar. Chemisch gezien draagt ammonium wel bij aan plantenvoeding, maar chloride kan in hogere concentraties de opname van andere voedingsstoffen negatief beïnvloeden. Met name bij gebruik op zandgronden is het product gevoelig voor uitspoeling en heeft het een negatieve invloed op waterkwaliteit. Voor sommige gewassen kan een teveel aan chloride leiden tot verzilting en een daling van de productie (Megda et al., 2019).

Tabel 2. Ammoniumzouten die ontstaan bij gebruik van alternatieve zuren, de stikstofvorm en stikstofeffectiviteit ten opzichte van ammoniumsulfaat (NH_4SO_4 , 100% is vergelijkbaar) en het kennisniveau van deze ammoniumzouten.

Zuur	Ammonium zout	N-vorm	N-efficiëntie t.o.v. NH_4SO_4	Kennis over meststof	Toelichting
Anorganische zuren					
Salpeterzuur	Ammonium nitraat	50% NH_4^+ 50% NO_3^-	105–110%	Ze er uitgebreide veldproeven	Nitraat is direct opneembaar en zorgt voor snellere werking
Zoutzuur	Ammonium chloride	NH_4^+	95–100%	Beperkte veldproeven	Chloride kan opname remmen bij hogere giften
Fosforzuur	Ammonium fosfaat	NH_4^+	100–105%	Ze er uitgebreide veldproeven	Naast ammonium stimuleert ook fosfaat wortelgroei, daarmee iets betere benutting
Organische zuren					
Mierenzuur	Ammonium formiaat	NH_4^+	95–100%	Theoretisch	Formiaat wordt snel gemineraliseerd
Azijnzuur	Ammonium acetaat	NH_4^+	95–100%	Theoretisch	Acetaat wordt snel afgebroken
Melkzuur	Ammonium lactaat	NH_4^+	90–100%	Theoretisch	Lactaat is biologisch afbreekbaar
Oxaalzuur	Ammonium oxalaat	NH_4^+	70–85%	Theoretisch	Oxalaat bindt Ca/Fe en is traag afbreekbaar
Maleïnezuur	Ammonium maleaat	NH_4^+	85–95%	Theoretisch	Intermediair afbreekbaar
Citroenzuur	Ammonium citraat	NH_4^+	80–90%	Theoretisch	Product vormt complexen met micronutriënten (Ca, Fe, Al)

Bronnen : Marschner (2012), Havlin et al. (2014), Madigan et al. (2018); Paul (2015), Stevenson (1994); Jones (1998), IFA (1998).

Van de ammoniumzouten die geproduceerd worden met de organische zuren is niet veel bekend. Er zijn vrijwel geen wetenschappelijke artikelen te vinden die deze meststoffen in veldproeven hebben getest tegen een referentiemeststof. Echter, op basis van handboeken kan in algemene zin worden gesteld dat alle wateroplosbare ammoniumzouten zich in de bodem hetzelfde gedragen. Ze vallen uiteen in ammonium (NH_4^+) en een anion. De verschillen in effectiviteit komen daardoor voort uit bodemprocessen en niet uit de stikstofvorm zelf (Marschner, 2012; Havlin et al., 2014). Het anion kan wel effect hebben op die bodemprocessen. De stikstofefficiëntie die in Tabel 2 wordt genoemd is dus op basis van dit theoretisch kader vastgesteld. Madigan et al (2018) en Paul (2015) beschrijven anionen formiaat, acetaat en lactaat

als zeer gemakkelijk biologisch afbreekbare koolstofbronnen, waardoor deze anionen nauwelijks blijvende invloed hebben op de ammoniumbeschikbaarheid. Oxalaat en citraat vormen echter complexen met micronutriënten in de bodem, zoals calcium, ijzer of aluminium, waardoor de afbreekbaarheid van deze producten trager zal zijn en de stikstofwerking minder efficiënt (70-80%).

Conclusies

In Tabel 3 is een samenvatting gegeven van de veiligheid en prijs van alternatieve zuren en de N-efficiëntie van het ammoniumzout wat ontstaat ten opzichte van het gebruik van zwavelzuur. Zoutzuur is goedkoper dan zwavelzuur, maar het brengt meer veiligheidsrisico's met zich mee. Daarnaast is de bemesting van chloride een aandachtspunt. Van de anorganische zuren is fosforzuur het enige zuur wat minder veiligheidsrisico's heeft vergeleken met zwavelzuur, ook al is de prijs hoger. Hier moet rekening gehouden worden met extra aanvoer van fosfor. Salpeterzuur heeft zowel hogere veiligheidsrisico's en een hogere prijs, maar het ammoniumnitraat wat ontstaat is wel zeer goed opneembaar voor het gewas.

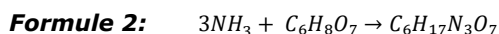
Tabel 3. Samenvattende tabel met de veiligheid en prijs van alternatieve zuren ten opzichte van het gebruik van zwavelzuur.

Zuur	Molecuul formule	Veiligheids risico	Prijs	N-efficiëntie ammonium zout
Anorganische Zuren				
Salpeterzuur	HNO ₃	Hoger	+23%	105-110%
Zoutzuur	HCl	Hoger	-10%	95-100%
Fosforzuur	H ₃ PO ₄	Lager	+129%	100-105%
Organische Zuren				
Mierenzuur	CH ₂ O ₂	Hoger	+25%	95-100%
Azijnzuur	C ₂ H ₄ O ₂	Lager	+67%	95-100%
Melkzuur	C ₂ H ₆ O ₃	Lager	+374%	90-100%
Oxaalzuur	C ₂ H ₂ O ₄	Hoger	+117%	70-85%
Maleïnezuur	C ₄ H ₄ O ₄	Lager	+191%	85-95%
Citroenzuur	C ₆ H ₈ O ₇	Lager	+117%	80-90%

De veiligheidsrisico's rondom het gebruik van azijnzuur zijn niet hoger dan dat van zwavelzuur, maar azijnzuur is wel 67% duurder dan zwavelzuur. De andere organische zuren hebben of hogere veiligheidsrisico's (mierenzuur en oxaalzuur) of zijn enkele malen duurder in gebruik vergeleken (citroenzuur, maleïnezuur en melkzuur) met zwavelzuur. Daarnaast is de N-efficiëntie van ammoniumzouten die ontstaan bij het gebruik van oxaalzuur, maleïnezuur en citroenzuur naar verwachting ook lager. Hierdoor zijn deze zuren voor ondernemers niet aantrekkelijk om te gebruiken als alternatief voor zwavelzuur.

3. Praktijkcase in Nederland

In Nederland is van één bedrijf bekend dat citroenzuur gebruikt wordt als alternatief wasmiddel. Dit bedrijf, Bertens Poultry in Haghorst (Noord-Brabant), is een legpluimveebedrijf met 100.000 legkippen. De mest wordt dagelijks afgevoerd met mestbanden en in een externe mestopslag gecomposteerd. Hier wordt de mest biothermisch verhit, waarbij veel ammoniak vrijkomt. Het bedrijf heeft samen met techniekleverancier Special Machines de Boer een ammoniak-filter ontworpen. De hete lucht vanuit de composteerinstallaties wordt afgevoerd en gecondenseerd. Het ammoniakwater (het condens) wat hierbij ontstaat wordt over kokosfilters geleid, die periodiek worden geïmpregneerd met citroenzuur. Het ammoniakwater wordt omgezet in ammoniumcitraat (Formule 2). De wastechniek van het ammoniak-filter verschilt dus van die van chemische luchtwassers die bij stallen gebruikt worden. In luchtwassers wordt de gasvormige ammoniak gevangen in een zure oplossing, waardoor het ammoniak opgelost wordt. Bij het ammoniak-filter is de ammoniak al opgelost en wordt het in vloeibare toestand omgezet.



Ammoniumcitraat is een heldere vloeistof zonder organisch materiaal en geeft geen geur af. Bertens Poultry neemt het citroenzuur af van een Belgische leverancier uit Tienen, Citribel, die het citroenzuur produceert uit melasse. Deze melasse is de grootste zijstroom van suikerraffinaderijen. Tijdens een fermentatieproces wordt de suiker in melasse met de schimmel mycelium omgezet naar vloeibaar citroenzuur. Het citroenzuur heeft dus een biologische oorsprong en is beschikbaar op de markt. Het product ammoniumcitraat is echter een onbekende meststof voor afnemers. Gepoogd wordt om het product als meststof in de biologische sector of in de glastuinbouw af te zetten. Het bedrijf heeft zich recent aangemeld bij het Regieorgaan Versnelling Innovatie Emissiereductie Duurzame Veehouderij, die zich wil in zetten voor introductie van deze innovatie.



Figuur 2. De ammoniakfilter van Special Machines de Boer, die is geïnstalleerd op het leghennenbedrijf Bertens Poultry in Haghorst (Stal & Akker, 2021).

Citroenzuur als alternatief

Zowel Starmans & Melse (2011) als Guedes Silveira et al. (2025) concludeerden dat citroenzuur qua functionaliteit een geschikt alternatief is voor zwavelzuur in luchtwasinstallaties. Guedes Silveira et al. (2025) lieten zien dat de terugwinning van ammoniak uit digestaat bij gebruik van citroenzuur weliswaar iets minder efficiënt (81%) is dan bij zwavelzuur (86%), maar dat citroenzuur een veelbelovend en milieuvriendelijker alternatief vormt voor ammoniakterugwinning.

Onderzoekers geven aan dat het product dat gevormd wordt (ammoniumcitraat) kan worden afgezet als een ammoniumzout, dat kan voldoen aan de eisen die in de EU verordening 2019/1009 onder PFC 1C worden gesteld. Ook geven de onderzoekers aan dat het ammoniumcitraat zou kunnen voldoen aan de RENURE-criteria zoals recent benoemd door de Europese Commissie. Kijkend naar de bemestende waarde lijkt het product veelbelovend. Het heeft een stikstofmineralisatie van 70% ten opzichte van 91% bij ammoniumsulfaat en 85% bij kalkammonsalpeter (KAS). Het lage zwavelgehalte (S) in ammoniumcitraat in vergelijking met ammoniumsulfaat, geeft dit product wellicht een meerwaarde in gebieden waar zwavelaccumulatie een aandachtspunt vormt.

Conclusies

Het gebruik van alternatieve zuren in Nederland komt maar zéér beperkt voor. Er is één primair bedrijf bekend die citroenzuur gebruikt, maar dit betreft een andere techniek dan in chemische luchtwassers wordt gebruikt. De afzet van het product (ammoniumcitraat) gaat moeizaam.

4. Alternatieve ammoniumzouten als meststof

Nitraatrichtlijn

In het recente voorstel van de Europese Commissie voor de aanpassing van Bijlage III van de Nitraatrichtlijn (EU 91/676) worden beschrijvingen gegeven van verwerkingsmethoden die RENURE-meststoffen kunnen produceren:

- Strippen en scrubben van ammoniak om ammoniumzout te produceren
- Toepassing van omgekeerde osmose om mineralenconcentraat te produceren
- Neerslaan van stikstofrijke fosfaat-zouten (struviet) uit dierlijke mest

In de wijziging die de Europese Commissie voorstelt, worden de ammoniumzouten niet verder gespecificeerd. In het Joint Research Centre (JRC) rapport, dat ten grondslag ligt aan het de RENURE-criteria, zijn ammoniumsulfaat en ammoniumnitraat onderzocht als mogelijke RENURE-meststoffen (Huygens et al., 2018).

Producten die gewonnen kunnen worden uit organische zuren zijn bijvoorbeeld: ammoniumcitraat (citroenzuur), ammoniumacetaat (azijnzuur), ammoniumlactaat (melkzuur), ammoniumformiaat (mierenzuur) of ammoniumoxalaat (oxaalzuur). Deze zouten zouden ook als ammoniumzout geclassificeerd kunnen worden en daarmee in aanmerking kunnen komen als mogelijk RENURE-meststof.

Meststoffenwet

In de concept-wijziging van de uitvoeringsregeling Meststoffenwet (Urm), die momenteel ter consultatie wordt voorgelegd, wordt in de hoofdtekst van artikel 35 consequent gesproken over RENURE. Er wordt hierbij geen onderscheid gemaakt naar een specifieke stof. In de bijlage Af worden RENURE producten wel gedefinieerd, namelijk op dezelfde manier als in het EU-voorstel (zie hierboven). Ook hier wordt geen onderscheid gemaakt in de diverse ammoniumzouten.

Echter in de bijlagen van de concept-wijziging van de Urm wordt wel onderscheid gemaakt. Zo worden in bijlage H, paragraaf 5.3 slechts twee ammoniumzouten benoemd, namelijk ammoniumsulfaat en ammoniumnitraat. Alleen voor deze twee ammoniumzouten wordt een analysemethode voor stikstof en fosfor voorgeschreven. Ook bijlage I, tabel V wordt aangepast voor deze twee ammoniumzouten en alleen deze twee producten krijgen een mestcode.

Conclusies

De aanpassing van de Nitraatrichtlijn voor RENURE sluit andere alternatieve ammoniumzouten niet uit. Echter, de aanpassing in de Urm geeft op bepaalde onderdelen expliciet voorwaarden voor alleen ammoniumsulfaat en -nitraat. Een aanpassing van de uitvoeringsregeling Meststoffenwet is natuurlijk mogelijk, maar deze implementatie werpt barrières op voor het gebruik van alternatieven voor zwavelzuur. Alleen het gebruik van zwavelzuur of salpeterzuur om een RENURE meststof te produceren is hiermee mogelijk. Voor het gebruik van andere zuren dient de Urm aangepast te worden.

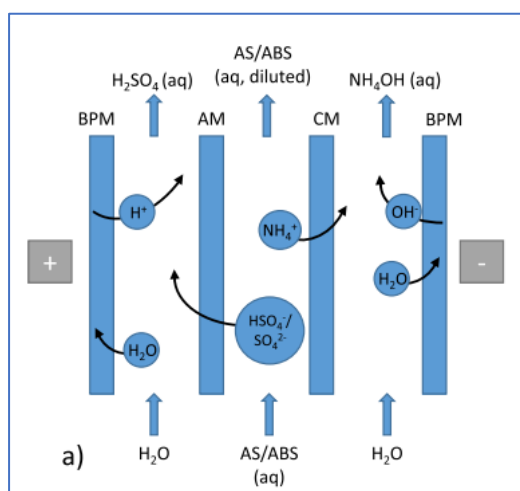
5. Wat zijn technische ontwikkelingen in recoverytechnieken, die het gebruik van zwavelzuur beperken?

DATUM
18 december 2025

PAGINA
13 van 17

In de beperkte literatuurstudie die tijdens dit onderzoek plaatsvond is één kansrijke technologie naar voren gekomen die het gebruik van zwavelzuur sterk kan beperken, namelijk bipolaire membraan elektrodialyse. Het bedrijf Lenntech in Delft ontwikkelt deze technologie.

Bipolaire membraan elektrodialyse (BPMED) is een elektrochemische scheidingstechniek waarbij een elektrisch veld en bipolaire membranen worden gebruikt om zuren en basen te produceren uit zouten. Het is een combinatie van twee technieken: 1) elektrodialyse, waarbij ionen migreren door selectieve membranen onder invloed van een elektrisch veld en 2) gebruik van bipolaire membranen om water onder elektrische spanning te splitsen in H^+ en OH^- . Met BPMED kan zwavelzuur worden teruggewonnen uit ammoniumsulfaat. Hierdoor is minder ammoniumsulfaat nodig om ammoniak af te vangen en ontstaat er een stikstofmeststof zonder zwavel.



Figuur 3. Vereenvoudigde schematische weergave van een BPMED set-up met drie compartimenten (Koivisto et al., 2023).

Figuur 3 geeft schematisch weer hoe zwavelzuur wordt herwonnen uit ammoniumsulfaat met BPMED. Het ammoniumsulfaat $((NH_4)_2SO_4)$ wordt in de middelste cel toegevoegd, terwijl de andere cellen worden gevoed met water (H_2O). Het water wordt door de bipolaire membranen gesplitst in H^+ en OH^- . Het ammoniumsulfaat splitst in NH_4^+ en SO_4^{2-} , waarbij de positief geladen deeltjes naar de negatieve pool gaan en andersom. Vervolgens bindt NH_4^+ met OH^- tot NH_4-OH , wat in een oplossing ammoniak ($NH_3 + H_2O$) vormt. Het sulfaat (SO_4^{2-}) bindt aan de H^+ en vormt zwavelzuur (H_2SO_4). Op deze manier wordt het zwavelzuur uit het ammoniumsulfaat teruggewonnen en wordt een stikstofmeststof zonder zwavel geproduceerd (ammoniakwater: NH_4OH).

In de afgelopen jaren is BPMED op laboratoriumschaal geoptimaliseerd met als hoofddoel het terugwinnen van ammonium uit diverse afvalwaterstromen (Mohammadi et al., 2021; Mutahi et al., 2024). Ferrari et al. (2022) hebben laten zien dat de eerste pilot opstelling voor het terugwinnen van ammonium uit digestaat succesvol was. Wel gaven ze enkele aandachtspunten die opschaling in de weg kan zitten. De membranen moeten regelmatig schoongemaakt en hersteld worden en hiervoor zijn chemische additieven nodig. Hierdoor kan de installatie ook niet continu draaien. Een ander aandachtspunt is dat mogelijk een voorbehandeling nodig is om ionen die kunnen

neerslaan (zoals Ca^{2+} en Mg^{2+}) vooraf te verwijderen en zo kristallisering van struviet te voorkomen.

De toepassing van BPMED om zwavelzuur terug te winnen uit ammoniumsulfaat is, weliswaar op laboratoriumschaal, onderzocht door Narayen et al. (2024). Zij vonden dat pH en temperatuur effect hadden op het energieverbruik van BPMED. Bij een pH van 5 en een temperatuur van 30°C waren de energiekosten voor BPMED om zwavelzuur te recyclen even hoog als het steeds moeten aanschaffen van nieuw zwavelzuur (uitgaand van 0,1 dollar/kWh en 0,2 euro/kg H_2SO_4 96%). Waarschijnlijk kan het energieverbruik verder worden verlaagd als de concentratie ammoniumsulfaat hoger is. Wel ontstaat dan het risico op lekkage van NH_4^+ naar SO_4^{2-} , waardoor de eindproducten minder zuiver zijn. De zuiverheid van het zuur en de base hangt ook af van de temperatuur en de pH (Narayen et al., 2024).

Conclusies

BPMED heeft potentie om zwavelzuur terug te winnen uit ammoniumsulfaat, waardoor minder zwavelzuur nodig is en daarnaast een stikstofmeststof wordt geproduceerd zonder zwavel. Deze techniek dient eerst nog verder opgeschaald en geoptimaliseerd te worden. Door eventuele vervuiling van membranen door organische stof en omdat er meer energieverlies is bij lagere zoutconcentraties, is deze techniek waarschijnlijk geschikter voor ammoniumsulfaat uit stip/scrub installaties dan voor spuiwater uit luchtwassers bij stallen. Overigens is NH_4OH een meststof die zeer gevoelig is voor ammoniakverliezen op het veld. Er moet dus goed nagedacht worden over hoe deze meststof toegediend gaat worden. Aanzuren of ondergrondse toediening (fertigatie) zouden mogelijkheden kunnen zijn om de ammoniak emissie tijdens toediening te vermijden.

Algemene conclusies

De huidige ammoniumsulfaatproductie leidt op landelijk niveau niet tot een overbemesting met zwavel. Door de invoering van de RENURE wetgeving zal de productie van ammoniumsulfaat naar verwachting toenemen, waardoor bij volledige benutting van de (RENURE)ruimte het advies voor zwavelbemesting wel wordt overschreden. Hoewel er veiligere alternatieven voor zwavelzuur zijn, bijvoorbeeld organische zuren, zijn deze zuren vaak vele malen duurder in aanschaf. Op laboratoriumschaal blijken citroenzuur en azijnzuur even effectief in het afvangen van ammoniak als zwavelzuur. Bij toepassing van andere zuren, worden ook andere ammoniumzouten geproduceerd, bijvoorbeeld ammoniumcitraat en ammoniumacetaat. Deze producten voldoen aan de kwaliteitseisen voor RENURE, maar worden binnen de huidige meststoffenwet nog niet toegestaan. Citroenzuur wordt in Nederland al wel toegepast bij een andere wastechniek, waarbij ammoniumcitraat wordt gewonnen uit ammoniakwater. Een aanvulling op strip/scrub installaties kan BPMED zijn, waarmee zwavelzuur teruggewonnen wordt uit ammoniumsulfaat en tegelijkertijd een stukstofrijke meststof zonder zwavel wordt geproduceerd. Deze techniek moet echter nog verder worden opgeschaald voordat grootschalige toepassing haalbaar is.

DATUM
18 december 2025

PAGINA
15 van 17

Gebruikte literatuur

- CBGV, 2024. BEMESTINGSADVIES. <http://www.bemestingsadvies.nl>
- CDM, 2014. Advies "Bemesting met zwavelhoudende meststoffen". <https://edepot.wur.nl/459071>
- Guedes Silveira, T., R.Molaey, C. Akyol, N. Sweygers, N. Edayilam, S. Houtmeyers, E. Meers, L. Appels, 2025. Nitrogen recovery from digestate via stripping-scrubbing using citric acid: Potential effects of recirculation and postdigestion on additional biogas recovery, and assessment of the fertilizer potential of end-products. Resources, Environment and Sustainability, Volume 22, (2025), 100258. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2025.100258>
- Havlin, J.L., Tisdale, S.L., Nelson, W.L., & Beaton, J.D., 2014. Soil Fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management (8th ed.). Pearson Education, New Jersey. Chapter 11: Nitrogen, pp. 358-422.
- Huygens, D., Orveillon, G., Lugato, E., Tavazzi, S., Comero, S., Jones, A., Gawlik, B. and Saveyn, H., 2020. Technical proposals for the safe use of processed manure above the threshold established for Nitrate Vulnerable Zones by the Nitrates Directive (91/676/EEC), EUR 30363 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, <https://doi.org/10.2760/373351>
- IFA, 1998. The Fertilizer Manual (8th ed.). Kluwer Academic Publishers. International Fertilizer Association
- Jamaludin, Z., S. Rollings-Scattergood, K. Lutes, C. Vaneeckhaute, 2018. Evaluation of sustainable scrubbing agents for ammonia recovery from anaerobic digestate. Bioresource Technology 270. 296-602. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.09.007>
- Koivisto, E.S., T. Reuter, R. Zevenhoven, 2023. Performance Optimization of Bipolar Membrane Electrodialysis of Ammonium Sulfate/Bisulfate Reagents for CO₂ Mineralization. ACS EST Water 3, 1953 – 1962. <https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00028>
- Madigan, M.T., Bender, K.S., Buckley, D.H., Sattley, W.M., & Stahl, D.A. (2018). Brock Biology of Microorganisms (15th ed.). Pearson, Boston. Chapter 14: Microbial Metabolism, pp. 379-420.
- Marschner, P. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (3rd ed.). Academic Press, Elsevier, London. Hoofdstuk 12: Nitrogen, pp. 335-368.
- Megda, M.X.V., E. Mariano, J.M. Leite, M.M Megda, P.C.O Trivelin. 2019 Ammonium chloride as an alternative source of nitrogen for sugarcane during two consecutive cycles. FERTILIZATION • Pesq. agropec. bras. 54. <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00329>
- Mutahi, G., J.B. van Lier, H. Spanjers, 2024. Leveraging organic acids in bipolar membrane electrodialysis (BPMED) can enhance ammonia recovery from scrubber effluents. Water Research 265. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122296>
- Narayen, D. E. van Berlo, J.B. van Lier, H. Spanjers, 2024. Recovery of sulfuric acid and ammonia from scrubber effluents using bipolar membrane electrodialysis: Effect of pH and temperature. Separation and Purification Technology 338. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.126605>
- NCM, 2025. Landelijke rapportage en inventarisatie export en verwerking dierlijke mest 2025. <https://www.mestverwaarding.nl/>, geraadpleegd op 25-11-2025.
- NMI, 2025. Databank Meststoffen. <https://databankmeststoffen.nl/>, geraadpleegd op 16-01-2026
- Paul, E.A., 2015. Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry (4th ed.). Academic Press, Elsevier. Chapter 8: Soil Organic Matter Dynamics, pp. 245-272.

- Rietra, R., K. van Dijk, O. Schoumans, 2024. Environmental Effects of Using Ammonium Sulfate from Animal Manure Scrubbing Technology as Fertilizer. *Applied Sciences* 14(12):4998. <https://doi.org/10.3390/app14124998>
- Stal & Akker, 2021. Pluimveehouder en ingenieurs proberen in Haghorst politiek warm te krijgen voor ammoniakfilter. <https://www.stal-en-akker.nl/>, geraadpleegd op 25-11-2025
- Starmans, D.A.J., R.W. Melse, 2011. Alternatieven voor zwavelzuur in chemische luchtwassers. Wageningen UR Livestock Research. <https://edepot.wur.nl/163071>
- Stevenson, F.J., 1994. *Humus Chemistry: Genesis, Composition, Reactions* (2nd ed.). John Wiley & Sons, New York. Chapter 9: Metal Complexation, pp. 287–330
- Van Boxmeer, E.G.G., et al., 2025. In press. BSMO-project: Bemonstering en analyse van mestproducten uit innovatieve melkveestallen.
- Van Boxmeer, E.G.G., H. Schilder, N. Verdoes, P.J. Galama, G.C.C. Kupers, 2023. Samenstelling mestproducten uit innovatieve stalsystemen in de melkvee-, varkens- en kalverhouderij; Betere stal, betere mest, betere oogst. Wageningen Livestock Research, Rapport 1410. <https://doi.org/10.18174/588047>