

Kennisvraag over het gebruik van zwavelhoudende meststoffen uit mestverwerkingsinstallaties

Beantwoording van een kennisvraag

Inge Regelink, René Rietra

WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Kennisvraag over het gebruik van zwavelhoudende meststoffen uit mestverwerkingsinstallaties

Beantwoording van een kennisvraag

Inge Regelink, René Rietra

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research en gesubsidieerd door het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, in het kader van het Beleidsondersteunend onderzoeksthema 'Kennisdesk LVVN' (projectnummer KD-2024-002).

Wageningen Environmental Research
Wageningen, maart 2026

Gereviewd door:
Gerard Velthof, Senior onderzoeker (Wageningen Environmental Research)

Akkoord voor publicatie:
Gert Jan Reinds, teamleider (Wageningen Environmental Research)

Rapport 3507
ISSN 1566-7197

WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Regelink, I.C. en R.P.J.J. Rietra, 2026. *Kennisvraag over het gebruik van zwavelhoudende meststoffen uit mestverwerkingsinstallaties.* Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 3507. 42 blz.; 7 fig.; 7 tab.; 81 ref.

Zwavelhoudende meststoffen zijn nodig in de landbouw om gewassen te voeden. RENURE-meststoffen zijn vooral bedoeld als stikstofmeststof en heeft als nevenbestanddeel vaak zwavel. De komst van RENURE-meststoffen, met name ammoniumsulfaat, kan bij gebruik als stikstofmeststof leiden tot een te hoge toepassing van zwavel. Dit leidt tot vragen over zwavel, die in dit rapport worden behandeld.

Trefwoorden: Mest, Renure, zwavel, sulfaat, mestverwerking

Dit rapport is gratis te downloaden van https://doi.org/10.18174/710562 of op www.wur.nl/environmental-research (ga naar 'Wageningen Environmental Research' in de grijze balk onderaan). Wageningen Environmental Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2026 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, www.wur.nl/environmental-research. Wageningen Environmental Research is onderdeel van Wageningen University & Research.

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

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



Wageningen Environmental Research werkt met een gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem volgens ISO 9001 en een milieumanagementsysteem dat voldoet aan de norm ISO 14001.

Daarnaast geeft Wageningen Environmental Research via ISO 26000 invulling aan haar maatschappelijke verantwoordelijkheid.

Wageningen Environmental Research Rapport 3507 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Shutterstock

Inhoud

Verantwoording **5**

Woord vooraf **7**

Samenvatting **9**

1 Inleiding **11**

2 Achtergrond **13**

2.1 Zwavel vanuit een landbouwkundig perspectief 13
2.1.1 Gewasbehoefte 13
2.1.2 Diergezondheid 17
2.2 Zwavel vanuit een milieukundig perspectief 17
2.2.1 Normen voor sulfaat 17
2.2.2 Sulfaatconcentraties in het grond- en oppervlaktewater 18
2.2.3 Uitspoeling van sulfaat 21
2.2.4 Biochemische processen in bodem en water 22
2.2.5 Drinkwaterbeschermingsgebieden 23

3 Beantwoording kennisvragen **25**

3.1 Wat is de huidige en de te verwachten productie aan zwavelhoudende meststoffen? 25
3.1.1 Huidige productie zwavelhoudende stikstofmeststoffen 25
3.1.2 Verwachte productie zwavelhoudende meststoffen bij erkenning RENURE 27
3.2 Bij welke gewassen is er, gezien de stikstofgebruiksnormen, ruimte voor zeer hoge zwavelgiften? 29
3.3 Wat is een goede landbouwpraktijk voor de toepassing van spuiwaters? 30
3.4 Wat zijn de gevolgen van te veel bemesting met (zwavelhoudende) spuiwaters voor gewasgroei, diergezondheid en het milieu? 31
3.5 Zijn er ervaringen in Denemarken en Duitsland waar aanzuren van mest als emissiereducerende maatregel is erkend? Zijn daar milieu- en of agronomische effecten bekend? 33
3.6 Bij welk gebruik van spuiwaters (hoeveelheid per hectare) worden geen negatieve effecten verwacht? 34
3.7 Zijn er andere zuren die beter toegepast kunnen worden dan zwavelzuur? Wat zijn gevolgen daarvan zowel economisch, milieutechnisch als agronomisch? 34

4 Conclusies **36**

5 Aanbevelingen **37**

Literatuur **38**

Verantwoording

Rapport: 3507
Projectnummer: KD-2024-002

Wageningen Environmental Research (WENR) hecht grote waarde aan de kwaliteit van zijn eindproducten. Een review van de rapporten op wetenschappelijke kwaliteit door een referent maakt standaard onderdeel uit van ons kwaliteitsbeleid.

Akkoord referent die het rapport heeft beoordeeld,

functie: Senior onderzoeker

naam: Gerard Velthof

datum: 07-01-2026

Akkoord teamleider voor de inhoud,

naam: Gert Jan Reinds

datum: 25-12-2025

Woord vooraf

Zwavel is een essentieel element voor plantengroei en bemesting van landbouwgrond met zwavelhoudende meststoffen is gangbare landbouwpraktijk. Zwavel wordt – al dan niet bewust – toegediend in de vorm van samengestelde meststoffen (kunstmest) en gips en is een onderdeel van dierlijke mest. Daarnaast zijn er diverse zwavelhoudende reststoffen op de markt zoals spuiwater van luchtwassers van veehouderijen, composteerders of mestverwerkers. Ook kunnen er zwavelhoudende meststoffen ontstaan bij de verwerking van dierlijke mest, zoals ammoniumsulfaat uit meststrippers en mineralenconcentraat uit omgekeerde osmose-installaties. De Europese Commissie heeft recentelijk ingestemd met een erkenning van deze meststoffen als RENURE, wat wil zeggen dat deze meststoffen onder voorwaarden boven de gebruiksnorm voor dierlijke mest (170 kg N/ha), maar binnen de totale stikstofgebruiksnorm toegepast mogen worden. Nederland is voornemens om RENURE in de Meststoffenwet te erkennen. Omdat RENURE-meststoffen zwavelhoudend kunnen zijn, kan dit gevolgen hebben voor de hoeveelheid zwavel die wordt aangevoerd naar landbouwgronden.

Het Ministerie van LVVN heeft een aantal kennisvragen gesteld over het gebruik van zwavelhoudende meststoffen uit mestverwerking. Deze vragen worden in dit rapport beantwoord. Ten tijde van de start van deze opdracht was er nog geen limiet voor RENURE-meststoffen in beeld, waardoor hoge zwavelgiften in theorie mogelijk waren. In 2025 heeft de EC een limiet van 80 kg N ha^{-1} aan de RENURE-criteria toegevoegd waardoor de dosering een duidelijke afbakening kent.

In 2014 was er eveneens aandacht voor de mogelijke gevolgen van overmatig gebruik van zwavelhoudende meststoffen in de landbouw. Destijds was het onderzoek ingegeven vanuit de vraag of het aanzuren van dierlijke mest als emissiereducerende maatregel erkend kon worden. Het leidde tot een rapport over trends in sulfaatconcentraties in het milieu (Fraters en Goffau, 2014), het opstellen van een nationale zwavelbalans (Ehlert en Chardon, 2014) en het boekje '30 vragen en antwoorden over zwavel' (Schils et al., 2014).

Samenvatting

Beantwoording kennisvragen

1. Wat is de huidige en te verwachten productie aan zwavelhoudende meststoffen (kunstmest en andere bronnen)?

Het huidige gebruik aan zwavelhoudende kunstmeststoffen bedraagt circa 30 mln. Kg S, waarvan 13,9 mln. Kg S in de vorm van kunstmest (NPK meststoffen, KAS-zwavel) en naar schatting 17 mln. Kg S in de vorm van ammoniumsulfaat (spuiwater) uit luchtwassers van veestallen en luchtwassers van bedrijfshallen voor de verwerking van mest, gft of zuiveringsslib. Dit geeft gezamenlijk een gemiddelde zwavelaanvoer van 18 kg S ha^{-1} cultuurgrond. De aanvoer van zwavel door gebruik van gips is niet bekend. Dierlijk mest levert circa 30 kg S ha^{-1}, maar bevat zwavel in organische vorm waardoor het niet direct beschikbaar is voor gewasopname.

RENURE-meststoffen bevatten meer zwavel dan onbewerkte mest door het gebruik van zwavelzuur tijdens de productie. Spuiwater bevat 1,1 kg S per kg N. Mineralenconcentraat bevat gemiddeld 0,5 kg S (grotendeels uit zwavelzuur) per kg N, maar er zijn grote verschillen tussen producenten.

Bij een geraamde productie van 19 mln. Kg N als mineralenconcentraat en 14 mln. Kg N als ammoniumsulfaat kan circa 43% van het graslandareaal tot de RENURE-norm van 80 kg N ha^{-1} worden bemest. Dit gaat gepaard met een geschatte aanvoer van circa 24 mln. Kg S, wat hoger is dan het huidige vervangbare gebruik van zwavelhoudende stikstofkunstmest.

2. Bij welke gewassen is er gezien de stikstofgebruiksnormen ruimte voor zeer hoge zwavelgiften?

RENURE zal naar verwachting grotendeels toegediend worden op grasland. Er geldt een aparte gebruiksnorm voor RENURE van 80 kg N ha^{-1}. Op grasland bieden de stikstofgebruiksnormen ruimte om RENURE te gebruiken naast de basisbemesting met dierlijke mest. RENURE kan op grasland worden toegediend met een zodenbemester (mineralenconcentraat) of een spaakwielbemester. De zwaveldosering bij toediening van 80 kg N ha^{-1} bedraagt 45 kg S ha^{-1} en 90 kg S ha^{-1} bij bemesting met mineralenconcentraat respectievelijk ammoniumsulfaat.

Op bouwland zijn er grote verschillen in de stikstofgebruiksnormen tussen gewassen en regio's. In het zuidelijke zandgebied zijn de stikstofgebruiksnormen strenger dan in andere regio's. Voor de meeste akkerbouwgewassen en mais geldt dat de stikstofgebruiksnorm het gebruik van RENURE beperkt, uitgaande van een basisgift van dierlijke mest. Een uitzondering hierop is aardappel. Dit gewas heeft een hoge stikstofgebruiksnorm, maar emissiearme toediening van RENURE is bij aardappelruggen praktisch niet haalbaar (wel als startbemesting). De toepassing op bouwland kan zich verder ontwikkelen, maar wordt vooralsnog beperkt geschat.

3. Wat is een goede landbouwpraktijk voor de toepassing van spuiwaters?

Bij een goede landbouwpraktijk wordt de zwaveldosering afgestemd op het zwavelbemestingsadvies en het zwavel leverend vermogen van de bodem op basis van grondonderzoek. Op grasland op zand is een voorjaarsbemesting tot 40 kg S ha^{-1} onderdeel van een goede landbouwpraktijk, omdat in het voorjaar zwaveltekorten op kunnen treden. Op kleigrond is de zwavel levering veelal voldoende hoog, maar een grondonderzoek kan hier uitsluitsel over geven. Op veengrond wordt het gebruik van zwavelhoudende meststoffen afgeraden, omdat dit kan leiden tot te hoge zwavelgehalten in het gras waar toxische effecten kunnen optreden bij herkauwers. Op bouwland is een zwavelbemesting bij de meeste gewassen laag of niet nodig.

4. Wat zijn de gevolgen van te veel bemesting met (zwavelhoudende) spuiwaters voor gewasgroei, diergezondheid en het milieu?

Er zijn geen risico's voor de gewasgroei, maar een overmatige zwavelbemesting kan wel leiden tot verhoogde zwavelgehalten in gras. Zwavelgehalten boven 5 g S kg^{-1} droge stof in ruwvoer kunnen schadelijk zijn voor herkauwers. Dit risico ontstaat bij gebruik van zwavelhoudende meststoffen op gronden waar de sulfaatbeschikbaarheid reeds hoog is zoals veengronden.

Voor de effecten op het milieu moet er onderscheid gemaakt worden naar grondsoort. In gebieden met veen en mariene klei zijn sulfaatconcentraties van nature hoog door mineralisatie van veen, oxidatie van pyriet en/of zwavelrijk kwelwater. De bijdrage van bemesting op de sulfaatconcentratie is hier beperkt. Zandgronden zijn van nature arm aan zwavel en bemesting is hier van invloed op de hoogte van de sulfaatconcentraties in het uitspoelingswater, grondwater en oppervlaktewater. Voor oppervlaktewater geldt een verslechteringsverbod indien sulfaat is aangewezen als een ondersteunende parameter. In oppervlaktewater kan sulfaat het proces van interne eutrofiëring (vrijkomen van fosfaat) versterken. In kwelgebieden kan sulfaatrijk kwelwater bijdragen aan verzuring. In drinkwaterwingebieden kan extra sulfaatuitspoeling nadelig zijn vanwege extra kosten voor ontharding van water.

Bij een hoge raming van de toekomstige RENURE-productie neemt de zwavelaanvoer naar landbouwgronden toe, maar dit effect wordt voor een groot deel gecompenseerd door een dalende aanvoer van zwavel vanuit dierlijke mest (afbouw derogatie). Omdat zwavel in dierlijke mest aanwezig is in organische vorm, komt deze daling vertraagd tot uiting in lagere sulfaatconcentraties in het uitspoelingswater.

5. Zijn er ervaringen in Denemarken en Duitsland waar aanzuren van mest als emissiereducerende maatregel is erkend? Zijn daar milieu- en of agronomische effecten bekend?

Voor zover we dat kunnen beoordelen, is er in Denemarken en Duitsland nauwelijks aandacht voor mogelijke nadelige effecten van aangezuurde mest en worden de milieukundige risico's laag ingeschat. Mogelijk komt dit omdat het aanzuren van mest maar heel beperkt wordt toegepast en/of door verschillen in de natuurlijke condities waardoor zwavel mogelijk minder bezwaarlijk is.

6. Bij welk gebruik van spuiwaters (ammoniumsulfaat) worden geen negatieve effecten verwacht?

Op zandgrond worden geen negatieve effecten van het gebruik van ammoniumsulfaat verwacht wanneer de zwavelgift past bij de gewasbehoefte. In veen- en zeekleigebieden zijn de sulfaatconcentraties van nature hoog en speelt bemesting nauwelijks een rol en is een hogere gift niet milieubezwaarlijk. Op veengrond wordt het gebruik afgeraden vanuit veterinair oogpunt.

7. Zijn er andere zuren die beter toegepast kunnen worden dan zwavelzuur? Wat zijn gevolgen daarvan zowel economisch, milieutechnisch als agronomisch?

Het is mogelijk om salpeterzuur te gebruiken in plaats van zwavelzuur in luchtwassers en scrubbers. Zonder aanvullend beleid zal het gebruik van zwavelzuur de eerste keuze blijven vanwege de lagere kostprijs ten opzichte van salpeterzuur.

Aanbeveling

Er zijn grote onzekerheden in de toekomstige productie en samenstelling van RENURE als het huidige gebruik van zwavelhoudende meststoffen en daarom is de inschatting van effecten op zwaveloverschotten en sulfaatconcentraties in uitspoelingswater met aanzienlijke onzekerheden omgeven. Het regelmatig evalueren van trends in het gebruik van zwavelhoudende mest- en reststoffen, zodat stijgende sulfaatconcentraties kunnen worden waargenomen en tijdig maatregelen kunnen worden getroffen, wordt aanbevolen. Gedacht kan worden om zwavel als onderdeel op te nemen in de evaluaties van het mestbeleid.

1 Inleiding

Zwavel is een nutriënt en bemesting van landbouwgrond met zwavelhoudende meststoffen is gangbare landbouwpraktijk. Adviesgiften voor zwavelbemesting bij grasland variëren van 0 tot 20 kg ha^{-1}, en bij akkerbouwgewassen van 0 en 60 kg ha^{-1}, afhankelijk van gewas en bodem. Hiermee wordt de extra zwavelbemesting bedoeld boven op de aanvoer van zwavel die aanwezig is in dierlijke mest. Vanwege de dalende depositie van zwavel[1] is de aandacht voor zwavelbemesting in de landbouw toegenomen. Zwavel wordt gebruikt in de vorm van samengestelde meststoffen (kunstmest) en gips. Daarnaast zijn er diverse zwavelhoudende reststoffen op de markt, waaronder spuiwater afkomstig van luchtwassers op veehouderijbedrijven en spuiwater dat vrijkomt bij de reiniging van lucht op bedrijven waar organisch afval of mest wordt verwerkt. Spuiwater van deze bronnen mag als overige anorganische meststof verhandeld worden mits de stof is opgenomen op bijlage Aa van de uitvoeringsregeling Meststoffenwet.

Zwavelhoudende meststoffen ontstaan tevens bij bepaalde verwerkingsmethoden voor dierlijke mest. Ammoniumsulfaat uit meststrippers en mineralenconcentraat uit omgekeerde osmose-installaties zijn voorbeelden van zwavelhoudende meststoffen uit dierlijke mest. Ammoniumsulfaat ontstaat bij het strippen van ammoniak gevolgd door het wassen van de afgassen in de zure wasser, waarbij ammonium absorbeert in de oplossing van zwavelzuur. Mineralenconcentraat ontstaat bij het concentreren van dunne fractie in een omgekeerde osmose-installatie en daarbij wordt bijna altijd zwavelzuur gedoseerd om het scheidingsrendement voor ammonium te verhogen.

Ammoniumsulfaat (Rietra et al., 2024) en mineralenconcentraat (Velthof et al., 2020) zijn stikstofmeststoffen met een hoog aandeel minerale stikstof waarvan de stikstofwerking 50-90% van die van kunstmest bedraagt (Van Dijk, 2025). Op dit moment vallen deze meststoffen onder de gebruiksnorm dierlijke mest (170 kg N/ha) omdat de Europese Nitraatrichtlijn (EC 91/676/EEC) voorschrijft dat deze norm van toepassing is op dierlijke mest en verwerkingsproducten daarvan. Beide stoffen voldoen de criteria voor RENURE-stoffen (REcovered Nitrogen from manURE) stoffen welke zijn afgeleid door het Joint Research Centre (JRC) van de Europese Commissie (EC) (Huygens et al., 2020). Bij een erkenning van RENURE mogen deze meststoffen onder voorwaarden gebruikt worden conform de gebruiksnormen voor kunstmest. Dat betekent dat de 'gebruiksnorm dierlijke mest' dan niet meer van toepassing is op deze stoffen, maar het gebruik wel beperkt blijft door de stikstofgebruiksnorm. In april 2024 heeft de Europese Commissie een conceptvoorstel gepubliceerd met voorwaarden voor RENURE, en op 19 september 2025 heeft het Nitraatcomité positief geadviseerd over het voorstel. Een regeling ter implementatie van RENURE in de Nederlandse Uitvoeringsregeling Meststoffenwet is ter consulatie gepubliceerd op 11 november 2025.[2]

Een erkenning van RENURE kan leiden tot een verhoogd aanbod van zwavelhoudende meststoffen uit mestverwerkingsinstallaties. In hoeverre de RENURE-productie stijgt, hangt af van diverse andere factoren, waaronder de ontwikkelingen op de mestmarkt en de mestafzetprijzen. Mestverwerking is economisch alleen rendabel indien daarmee hoge mestafzetkosten voorkomen kunnen worden (Regelink et al., 2021). Door het afbouwen van de derogatie per 2026 geldt in Nederland de generieke gebruiksnorm van 170 kg N/ha uit dierlijke mest en stijgt het niet-plaatsbare overschot aan dierlijke mest. Dit verlies in plaatsingsruimte wordt slechts deels gecompenseerd door een krimp van de veestapel als gevolg van de opkoopregelingen, waardoor de verwachting is dat mestafzetprijzen en het mestoverschot zullen toenemen. Onder deze condities kan een investering in mestverwerking en productie van RENURE economisch rendabel zijn, waardoor de productie van RENURE kan stijgen.

[1] Depositie van zwavel was afkomstig van verbrandingsprocessen en is door verplichtingen tot rookgasreiniging en overstap van kolen naar gas sterk gedaald. In 1990 bedroeg de gemiddelde zwaveldepositie 1458 mol H ha^{-1} (23 kg S ha^{-1}) en deze is met 90% gedaald naar 225 mol H ha^{-1} in 2022 (3,6 kg S ha^{-1}) (www.clo.nl/nl018420).

[2] https://www.internetconsultatie.nl/renure/b1

Zwavelhoudende RENURE-meststoffen bevatten relatief (ten opzichte van mest) veel zwavel ten opzichte van stikstof. Wanneer de bemestingsgift van RENURE wordt afgestemd op basis van de stikstofbehoefte van het gewas, wordt meer zwavel gegeven dan nodig is voor het gewas. Dit is bijvoorbeeld een aandachtspunt bij de productie van RENURE op het boerenerf waarbij de RENURE-meststof zo veel mogelijk op het eigen bedrijf benut zal worden om de afzetkosten zo laag mogelijk te houden. Dit leidt tot vragen over de mogelijke gevolgen van hoge zwavelgiften voor gewas, bodem en milieu. Eerdere adviesrapporten wijzen op mogelijke risico's bij overbemesting met zwavel, waaronder te hoge zwavelgehalten in gras en een toenemende uitspoeling van sulfaat en indirecte gevolgen daarvan op de waterkwaliteit (Ehlert en Chardon, 2014; Schils, 2016). Het eerdere onderzoek richtte zich op de gevolgen bij het aanzuren van dierlijke mest met zwavelzuur bedoeld om ammoniakemissies te verlagen. In het huidige rapport wordt deze bestaande kennis betrokken op de actuele context, namelijk op het gebruik van zwavelhoudende RENURE-meststoffen.

Dit rapport behandelt de volgende kennisvragen die zijn opgesteld door het Ministerie van LVVN:

1. Wat is de huidige en te verwachten productie van zwavelhoudende meststoffen?
2. Bij welke gewassen is er gezien de bemestingsruimte ruimte voor zeer hoge zwavelgiften?
3. Wat is een goede landbouwpraktijk voor de toepassing van spuiwaters?
4. Wat zijn de gevolgen van te veel bemesting met (zwavelhoudende) spuiwaters voor gewasgroei, diergezondheid en het milieu?
5. Bij welke hoeveelheid leidt het gebruik van spuiwaters (hoeveelheid per hectare) naar verwachting niet tot negatieve effecten?
6. Zijn er ervaringen in Denemarken/Duitsland waar aanzuren van mest als emissiereducerende maatregel is erkend? Zijn daar milieu- en of agronomische effecten bekend?
7. Zijn er andere zuren die beter toegepast kunnen worden dan zwavelzuur? Wat zijn gevolgen daarvan zowel economisch, milieutechnisch als agronomisch?

Eenheden zwavel

De waterkwaliteitsnorm voor sulfaat is uitgedrukt in mg SO_4 L^{-1}. In een landbouwkundige context wordt de zwavelgift uitgedrukt in kg S ha^{-1} en soms in de oxidevorm SO_3.

In dit rapport hanteren we de eenheid kg S ha^{-1} voor bemestingsgiften en mg SO_4 L^{-1} voor concentraties in grond- en oppervlaktewater. Daarbij geldt de volgende omrekenfactor:

1 kg S = 3 kg SO_4

1 mg SO_4 L^{-1} = 0,33 mg S L^{-1}

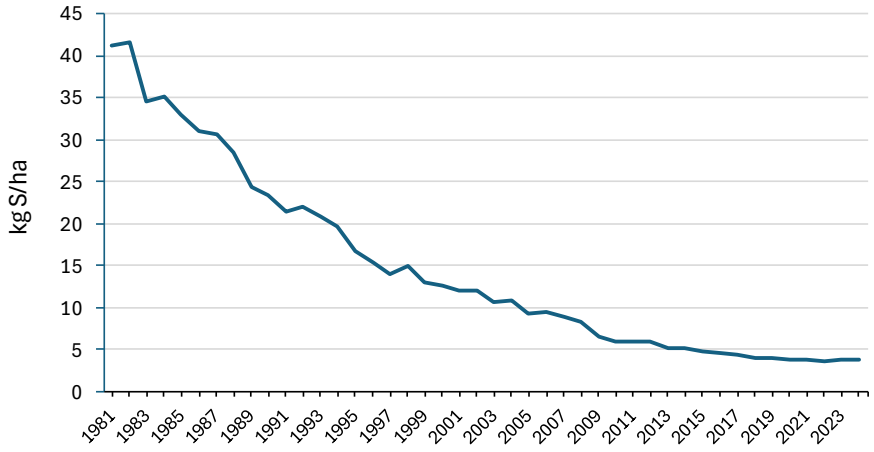
2 Achtergrond

Dit hoofdstuk bevat achtergrondinformatie over zwavel in het bodem-watersysteem. Om de kennisvragen kort en bondig te kunnen beantwoorden, is de achtergrondinformatie in een apart hoofdstuk opgenomen. Deze kennis is benut bij de beantwoording van de kennisvragen.

2.1 Zwavel vanuit een landbouwkundig perspectief

2.1.1 Gewasbehoefte

Zwavel kwam in het verleden in hoge mate via depositie op landbouwgronden (Figuur 1). De depositie van zwavel was afkomstig van verbrandingsprocessen en is door verplichtingen tot rookgasreiniging en overstap van kolen naar gas sterk gedaald. In 1980 bedroeg de gemiddelde zwaveldepositie 40 kg S ha^{-1} $jaar^{-1}$ en deze is gedaald naar 3,8 kg S ha^{-1} in 2024 (Figuur 1). De zwaveldepositie was hoger in het zuiden en rondom de grote steden, en lager in het noorden van Nederland (Klein et al., 2023). Door de dalende zwaveldepositie is de aandacht voor zwavelbemesting sterk toegenomen.



Figuur 1 *Zwaveldepositie in de periode 1981-2023, uitgedrukt in kg S ha^{-1} $jaar^{-1}$ (www.clo.nl/nl018420).*

Bij grasland is er aandacht voor zwavelbemesting, omdat een zwaveltekort leidt tot een lagere grasproductie. Het zwavelbemestingsadvies (Tabel 1) voor grasland varieert van 0 tot 40 kg S ha^{-1} (CBGV, 2025), maar er zijn grote verschillen tussen grondsoorten. Op zandgrond is een voorjaarsbemesting met zwavel effectief, omdat de zwavelbeschikbaarheid vanuit de bodem dan nog laag is. Een zwavelbemesting draagt dan bij aan het verhogen van de opbrengst. In het najaar is een zwavelbemesting niet zinvol. Op veen- en kleigronden wordt een zwavelbemesting afgeraden vanwege de hoge zwavelvoorraden op deze grond waardoor later in het jaar veel zwavel vrijkomt door mineralisatie (CBGV, 2025).

Op bouwland varieert het zwavelbemestingsadvies van 0 tot 60 kg S ha^{-1} voor bouwland (CBAV, 2025). De hoogte van het zwavelbemestingsadvies is afhankelijk van het gewas en het zwavel leverend vermogen van de bodem. De zwavelbehoefte van akkerbouwgewassen is relatief laag; voor de meeste gewassen volstaat een zwavelbemesting van 0-20 kg S ha^{-1} en hierin wordt veelal voorzien door nalevering vanuit de bodem. Een uitzondering hierop zijn koolgewassen, die meer zwavel opnemen en daarom een hogere zwavelbemesting vragen. Drijfmest bevat ook zwavel, maar de eerstejaars zwavelwerking uit drijfmest is relatief laag (2-3 kg S ha^{-1}) (CBGV, 2025).

Tabel 1 *Gewasbehoefte aan zwavel. De waarden geven de range bij een laag tot hoog zwavel leverend vermogen van de bodem.*[1,2]

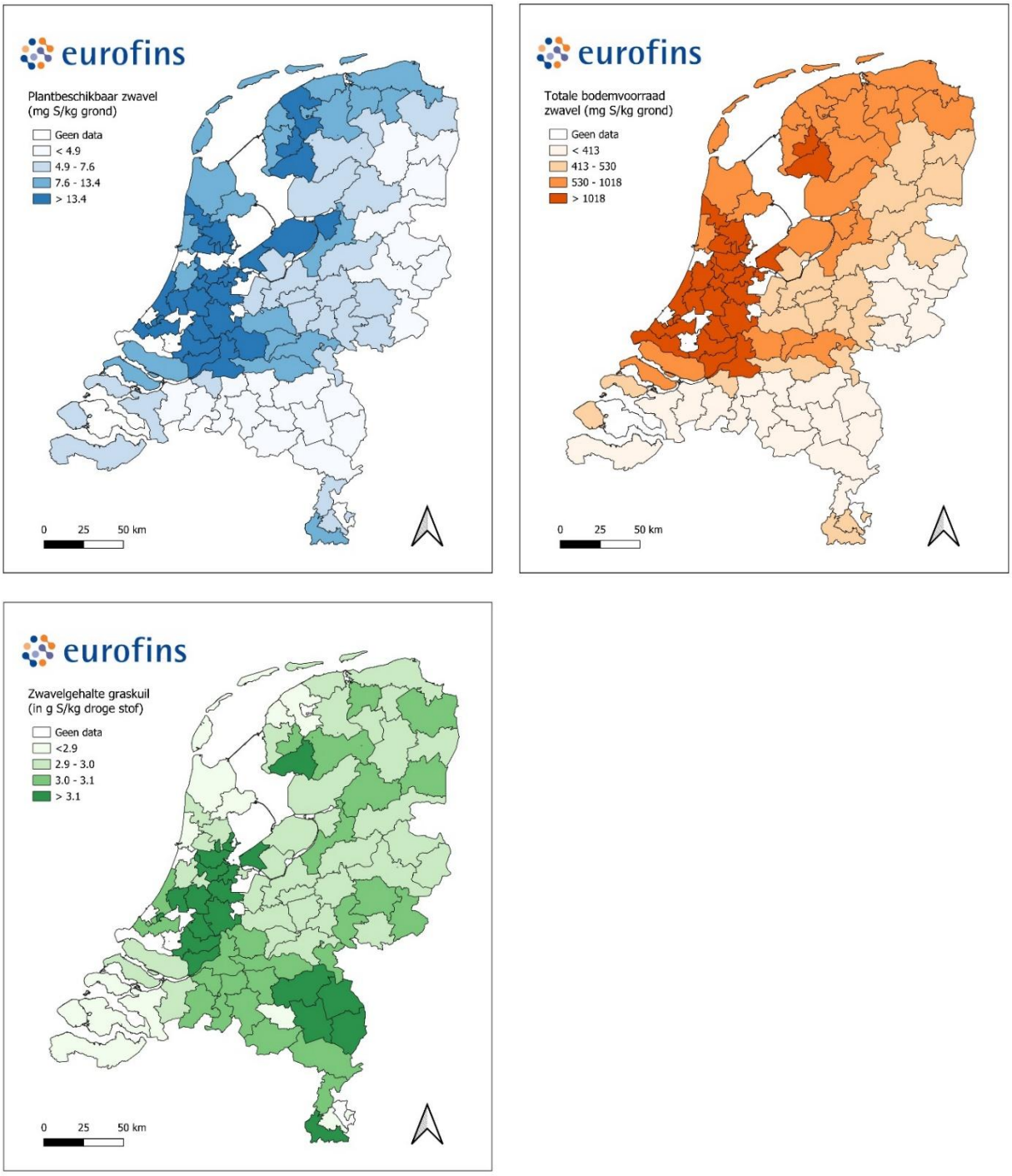
Gewas	**Zwavelbemestingsadvies (kg S ha^{-1})**
Grasland	0-40
Mais	0-30
Gewasgroep 4 O.a. Pootaardappel, sla, suikerbiet, vlas	0
Gewasgroep 3 O.a. Aardappel, snijmais, granen, uien	0-10
Gewasgroep 2 O.a. Koolzaad, bloemkool, Chinese kool	15-20
Gewasgroep 1 Sluitkool, spruitkool	0-55

[1] Grasland: zwaveladvies afhankelijk van zwavel leverend vermogen. Zwavelbemesting alleen voor de eerste en tweede snede om trage zwavelmineralisatie in voorjaar aan te vullen.

[2] Het zwavelbemestingsadvies hangt af van de hoogte van het zwavel leverend vermogen van de bodem, i.e. de hoeveelheid zwavel die door mineralisatie beschikbaar komt. De data geven de range. Bron: www.bodemenbemesting.nl en www.handboekbemesting.nl

De zwavel-adviesgift hangt af van het zwavel leverend vermogen van de bodem. Dit is een maat voor de hoeveelheid zwavel die gedurende het groeiseizoen beschikbaar is in de bodem waarbij mineralisatie van organische zwavel de belangrijkste bron is. Eurofins Agro voorspelt het zwavel leverend vermogen op basis van twee indicatoren; totaal-zwavel en beschikbaar zwavel (S-$CaCl_2$) in de bodem. Totaal-zwavel wordt daarbij bepaald middels een destructie en omvat zwavel in minerale en organische vorm. Beschikbaar zwavel wordt gemeten in een 0,01 M $CaCl_2$-bodemextract en bestaat voornamelijk uit zwavel in de vorm van sulfaat.

Er zijn grote verschillen in de hoogte van de zwavelindicatoren tussen grondsoorten. Data verkregen van Eurofins Agro laten zien dat veengronden en marine kleigronden rijk zijn aan zwavel, terwijl zandgronden aanmerkelijk minder zwavel bevatten (Figuur 2). Uit de data van Eurofins blijkt tevens dat graskuil in het oostelijke en zuidwestelijke zandgebied relatief meer zwavel bevat, ondanks de lage zwavelvoorraden in de bodem. Dit duidt op een bemestingseffect; de bodembemonstering werd uitgevoerd in het voorjaar vóór de bemesting, terwijl het zwavelgehalte in graskuil de gemiddelde situatie over het groeiseizoen weerspiegelde. Deze uitkomsten komen overeen met een eerdere publicatie van Reijneveld et al. (2014), waar op basis van Eurofins grond- en gewasonderzoek een relatie tussen gewas- en bodemdata werd gevonden, evenals een bemestingseffect (Reijneveld et al., 2014).



Figuur 2 *Zwaveltoestand in de landbouw: Plantbeschikbaar zwavel (S-$CaCl_2$) in de bodem, totaalzwavel in de bodem en het zwavelgehalte in graskuil. Bron: Eurofins Agro. Grondmonsters grasland 0-10 cm, grondmonsters voorjaar. graskuil jaarrond 2024.*

Relatie zwavelbemesting, gewasopbrengst en zwavelgehalten
Zwavel speelt een rol in de eiwitproductie in het gras (Mathot et al., 2009) en tekorten aan zwavel kunnen leiden tot opbrengstderving. De meeste proeven richten zich op het optimaliseren van de grasproductie, maar er zijn ook studies beschikbaar waarin ver boven de gewasbehoefte werd bemest. Omdat te hoge zwavelgehalten in veevoer schadelijk zijn voor runderen, is er specifiek gezocht naar studies met hoge zwavelgiften.

Hoewel er diverse studies zijn gedaan naar de stikstofwerking van spuiwater, is er maar één studie gevonden waarin ook zwavel is gemeten. Dit betreft een recente studie in het kader van het EU-project FERTIMANURE waarbij in Nederland tweejarige veldproeven zijn uitgevoerd met ammoniumsulfaatoplossingen, afkomstig van een mestverwerkingsinstallatie (Rietra et al., 2024). Op twee locaties (zand- en kleigrond) werd ammoniumsulfaat getest als stikstofmeststof bij giften van 200 kg N en 260 kg S. Deze zwavelgift is ver boven het bemestingsadvies. De proef was ontworpen om de stikstofwerkingscoëfficiënt te bepalen, maar ook het zwavelgehalte in het gras werd bepaald. Bij de eerste grassnede nam het zwavelgehalte door bemesting toe van 1,4 (onbemest) naar 3,4 g S kg^{-1} ds (bemest) op de kleigrond en van 1,5 naar 4,0 g S kg^{-1} ds op de zandgrond. Bij de tweede snede werden zwavelgehalten in het gras tot 5 g S kg^{-1} waargenomen. In de onbemeste veldjes was het zwavelgehalte in het gras laag, wat duidt op een lage zwavelbeschikbaarheid in deze gronden. In deze proef, met zeer hoge zwavelgiften in de vorm van ammoniumsulfaat, steeg het zwavelgehalte in het gras waarbij de hoogste waarnemingen boven de bovengrens voor gebruik als veevoer komen. Bij het gebruik van RENURE geldt een gebruiksnorm van 80 kg N ha^{-1}, maar bij gebruik van spuiwater uit de categorie 'overige anorganische meststoffen' zijn hoge bemestingsgiften zoals in deze veldproef wel toegestaan.

Daarnaast zijn er in de literatuur diverse zwavelbemestingsproeven met diverse zwavelmeststoffen beschreven. Ook deze proeven laten stijgende zwavelgehalte in gras zien, maar deze blijven onder de bovengrens van 4 g S kg^{-1} voor gebruik van het gras als veevoer voor rundvee. In een driejarige veldproef in Noord-Duitsland nam het sulfaat-S-gehalte in gras toe van gemiddeld 1,0 tot 3,3 g S kg^{-1} droge stof onder invloed van bemesting met 50 kg S ha^{-1} extra (Gierus et al., 2005). In België werd het effect van zwavelbemesting getest op locaties met een relatief lage zwaveltoestand (Mathot et al., 2008). In vier van de dertien veldproeven gaf de zwavelbemesting een opbrengstverhoging bij grasland, gemiddeld 0,8 t ds $ha^{-1}jaar^{-1}$. De zwavelbemesting gaf in alle gevallen hogere zwavelgehalten in gras: van gemiddeld 2,4 naar 3,6 g S kg^{-1} droge stof bij respectievelijk 0 en 40 kg S ha^{-1} $jaar^{-1}$ bemesting. De auteurs concluderen uit deze studie dat zwaveltekort in grasland voorkomen kan worden met een zwavelgift tot 24 kg S ha^{-1} $jaar^{-1}$ bij gras. Ook veldproeven in Nederland toonden een positief effect van zwavelbemesting (0-54 kg S ha^{-1}) op de opbrengst van grasland (Bussink & Den Boer, 2000).

Er zijn enkele proeven gevonden waarin zeer hoge zwavelgiften zijn getest. In potproeven met raaigras en diverse vormen van zwavelbemesting (S, K_2SO_4, $MgSO_4$, $(NH_4)_2SO_4$)) blijkt dat het zwavelgehalte in gras kan stijgen tot ver boven 4 g S kg^{-1} bij oplopende zwavelgiften (Kulczycki et al., 2023). De zwavelgehalten in gras namen toe van 4,7 (geen zwavelbemesting) tot 5,6 en 7,0 g S kg^{-1} ds in gras (gemiddelde van 1^e tot 3^e snede) bij een zwavelbemesting van respectievelijk 168 en 336 kg S per ha (60 en 120 mg S-SO_4 kg^{-1} grond). De zwavelbemesting gaf in deze proef een opbrengstverhoging bij de laagste gift van 85 kg S/ha. De hogere zwavelgift gaf geen opbrengstverhoging, maar verhoogde wel het zwavelgehalte in het gras (Kulczycki et al., 2023). Dit wordt aangemerkt als luxeconsumptie, i.e. het gewas neemt meer zwavel op hoewel het gras dit niet meer nodig heeft voor extra groei. Een relevant verschil met de studie van Rietra et al. (2024) waarin ook hoge zwavelgiften zijn gegeven, is de uitgangssituatie: Rietra et al. (2024) voerden de bemestingsproeven uit op gronden met een lage zwaveltoestand en Kulczycki et al. (2023) op gronden met een ruim voldoende hoge zwaveltoestand. De laatste studie laat zien dat zwavelgehalten in grasland boven de veilige norm voor veevoer wel degelijk voor kunnen komen bij een combinatie van hoge zwavelgiften en een reeds voldoende hoge zwavel levering van de bodem. Ook een aantal andere studies geeft aan dat zwavelgehalten in gras kunnen stijgen door luxeconsumptie. In de studie van Kowalenko bleef het zwavelgehalte bij 134 kg S ha^{-1} via gips ($CaSO_4$) meestal wel onder de grenswaarde voor ruwvoeder van 5 g kg^{-1}- (Kowalenko, 2004). Omdat hierbij bemest werd met gips, een slecht oplosbare meststof, kan de directe zwavelopname lager zijn dan bij bemesting met ammoniumsulfaat. Wanneer toepassing van gips wordt gecombineerd met een zwavelhoudende stikstofstof, is een verdere stijging van het zwavelgehalte in het gras wel mogelijk.

Bij akkerbouwgewassen is de zwavelbehoefte in kg ha^{-1} veel lager, met uitzondering van een aantal koolsoorten met een hoge stikstof- en zwavelbehoefte. Ook voor vlinderbloemigen (klaver, luzerne, peulvruchten) is een goede zwavelvoorziening belangrijk. Bij akkerbouwgewassen komen de effecten van zwavelbemesting minder goed tot uiting in veldproeven. Zwavelbemesting bij zetmeelaardappelen op zandgrond (0-60 kg S ha^{-1}) liet geen effecten zien op de opbrengst of kwaliteit van drie aardappelzetmeelrassen (Paauw, 2005). Zwavelbemesting bij winterkoolzaad (0-60 kg S ha^{-1}) in 2010 en 2011 op Vredepeel gaf eveneens geen duidelijke effecten in zaad of olieopbrengst (Meuffels & Van der Voort, 2011). In enkele studies is er aandacht naar effecten van overbemesting met zwavel op opbrengst of zwavelopname op bouwland. Die wijst erop dat elke vorm van zwavelbemesting, ook bij een laag zwavel leverend vermogen, leidt tot meer uitspoeling (Ercoli et al., 2012).

2.1.2 Diergezondheid

Zwavel is een essentieel nutriënt. Voor runderen wordt een zwavelgehalte in het rantsoen van circa 2 g kg^{-1} droge stof (ds) geadviseerd. Een te hoge zwavelopname is schadelijk voor runderen, omdat dit kan leiden tot een verminderde opname van sporenelementen zoals koper en selenium en daarmee kan leiden tot schade aan het centrale zenuwstelsel. In de Nederlandse advisering staat als richtlijn dat het rantsoen (de combinatie van ruwvoer en krachtvoer) van herkauwers niet meer dan 4 g S kg^{-1} ds mag bevatten (Commissie Onderzoek Minerale Voeding, 2005). Andere bronnen geven vergelijkbare of hogere waarden voor maximale zwavelgehalten in voer voor herkauwers (runderen en geiten) van 3 en 5 mg S kg^{-1} ds voor respectievelijk geconcentreerd voeders, en ruwvoer rijk rantsoen (National Research Council et al., 2006; Suttle et al., 2022). Naast voer kunnen runderen ook veel zwavel innemen door het drinken van sulfaatrijk water, bijvoorbeeld bij beweiding in gebieden met sulfaatrijke kwel. Bij een combinatie van hoge zwavelgehalten in het rantsoen en sulfaatrijk drinkwater kan de maximum zwavelinname al snel worden overschreden (Commissie Onderzoek Minerale Voeding, 2005).

Eurofins Agro geeft voor graskuil een streeftraject van 2-4 g S kg^{-1} ds (Eurofins Agro). Het meerjarige gemiddelde zwavelgehalte in Nederlands kuilgras bedroeg 3,3 g S kg^{-1} ds over de periode 2015-2019 (Eurofins Agro). Deze jaarrapportages van Eurofins geven geen inzicht in de spreiding in zwavelgehalten, waardoor onduidelijk is of overschrijdingen van het streeftraject voorkomen of niet.

Het zwavelgehalte in gras reageert op zwavelbemesting, maar deze relatie wordt mede beïnvloed door de mate van zwavel levering vanuit de bodem. Bij zwavelgiften passend bij het bemestingsadvies (tot 50 kg S ha^{-1}) zijn er in veldproeven geen overschrijdingen van de streefwaarde voor zwavel in gras waargenomen (zie paragraaf 2.1.1). Risico's op hoge zwavelgehalten in gras ontstaan bij zwavelgiften ver boven de adviesgiften of wanneer zwavelbemesting wordt toegepast op gronden met een hoog zwavel leverend vermogen of sulfaatrijke kwel. Het is daarom raadzaam om graskuilmonsters te laten analyseren op zwavel om hoge zwavelgehalten in graskuil op te sporen en het rantsoen daarop aan te passen.

2.2 Zwavel vanuit een milieukundig perspectief

2.2.1 Normen voor sulfaat

Ecologische gevolgen van sulfaat in oppervlaktewater worden meestal laag ingeschat, omdat natuurlijke ecosystemen geen tekort hebben aan zwavel (Webb et al., 2016). Onder de KRW is sulfaat is geen prioritaire stof met een EU-milieukwaliteitsnorm, maar kan wel onder de ondersteunende fysisch-chemische parameters vallen en hiervoor geldt een verslechteringsverbod. Sulfaat kan indirect, door processen zoals interne eutrofiëring van fosfaat, wel een negatief hebben op de waterkwaliteit.

Er is een streefwaarde voor sulfaat in grondwater van 150 mg SO_4 L^{-1} (RIVM, 2014). Bij de norm voor grondwater staat vermeld dat in marien beïnvloede gebieden van nature hogere gehalten voorkomen (zout en brak grondwater). De norm voor sulfaat in drinkwater is 150 mg SO_4 L^{-1} (Drinkwaterbesluit) en sulfaat valt daarbij onder de organoleptische/esthetische parameters. Dat wil zeggen dat sulfaat in drinkwater niet schadelijk is voor de gezondheid, maar een maximumwaarde kent vanwege een effect op geur of kleur van het drinkwater. De Europese drinkwaterrichtlijn (EC 2020/2184) hanteert een maximumwaarde van 250 mg SO_4 L^{-1}

voor drinkwater. Voor oppervlaktewater bedoeld voor de productie van drinkwater geldt een maximumwaarde van 100 mg SO_4 L^{-1} en dit is ingegeven vanuit het oogpunt van bescherming van waterbronnen (Besluit Kwaliteit Leefomgeving).

2.2.2 Sulfaatconcentraties in het grond- en oppervlaktewater

Het Landelijk Meetnet Mestbeleid (LMM) rapporteert metingen van sulfaat aan de hand van de jaarlijkse bemonsteringen van uitspoelingswater[3] en slootwater in landbouwgebieden om de relatie tussen mestbeleid en waterkwaliteit vast te kunnen stellen. Sulfaatconcentraties in uitspoelingswater zijn gemiddeld lager in gebieden met de zand- en lössgronden ten opzichte van de gebieden met klei- en veengronden (Tabel 2, Figuur 3). Binnen deze grondsoorten is er een groot bereik aan sulfaatconcentraties. Op zandgrond schommelt de sulfaatconcentratie rond de 50 mg SO_4 L^{-1} met een lichte stijging in de laatste jaren. De laagste sulfaatconcentraties worden gevonden in het lössgebied. Het RIVM rapport (Fraters en Goffau, 2014) gaat dieper in op deze verschillen en toont ook de sulfaatconcentraties per subgebied binnen de zand- en kleiregio's (Figuur 4). Binnen de zandgebieden worden de hoogste sulfaatconcentraties in uitspoelingswater waargenomen in het LMM-gebied zand-zuid en dit wordt verklaard door hogere intensiteit van de landbouw in dat gebied. Zandgronden zijn van nature arm aan zwavel, waardoor bemesting en (historische) depositie de belangrijkste bronnen zijn. Binnen de kleigronden worden de hoogste concentraties waargenomen in gebieden met marine afzettingen in de ondergrond door het vrijkomen van sulfaat uit zwavelhoudende mineralen zoals pyriet. In veengronden worden de hoge sulfaatconcentraties veroorzaakt door het vrijkomen van sulfaat uit pyriet en door de mineralisatie van veen (Fraters en Goffau, 2014). De hoeveelheid zwavel die vrijkomt door oxidatie van veen en pyriet hangt samen met de mate van maaivelddaling en elke mm maaivelddaling correspondeert met een sulfaatflux van zo'n 32 kg S ha^{-1} j^{-1} (Vermaat et al., 2012). De mate van maaivelddaling varieert tussen 2,2 mm tot 10,2 mm per jaar en hangt af van de drooglegging en aanwezigheid van een kleidek op veen. De jaarlijkse sulfaatlevering vanuit veenoxidatie varieert daardoor ook sterk, tussen 70 en 326 kg S ha^{-1} j^{-1}. De bijdrage van externe bronnen waaronder inlaatwater, depositie en de huidige bemesting, is hier kwantitatief veel minder belangrijk.

Weersinvloeden spelen een rol in de fluctuaties in de sulfaatconcentraties in uitspoelingswater. De sterke stijging in sulfaatconcentraties in de jaren 2018-2020 is waarschijnlijk een gevolg van de twee opeenvolgende zeer droge zomers waardoor er meer mineralisatie optreedt en er minder verdunning is.

Deze verschillen tussen grondsoorten komen ook tot uiting in de sulfaatconcentraties in het slootwater. Daarnaast worden sulfaatconcentraties in slootwater ook beïnvloed door seizoenseffecten. In het winterseizoen zijn de sulfaatconcentraties hoger dan in het zomerseizoen. In de zomer is de biologische activiteit in het sediment van de slootbodem hoger, waardoor er meer organische stof wordt afgebroken. Dit leidt tot zuurstofloze ofwel anaerobe condities, waardoor sulfaat omgezet wordt naar het slecht oplosbare sulfide. Sulfide precipiteert vervolgens met ijzer tot de mineralen ijzersulfide (FeS) en/of pyriet (FeS_2). Zwavel wordt hierdoor vastgelegd in het sediment en hierdoor dalen tijdelijk de sulfaatconcentraties in het slootwater. Fosfaat toont een tegenovergesteld effect. Fosfaat bindt ook met ijzer, maar wordt in deze situatie verdreven door sulfide waardoor fosfaat vrijkomt. De interactie tussen sulfaat, ijzer en fosfaat zorgt dus voor een seizoensdynamiek, waardoor de fosfaatconcentratie in de zomer hoger is ten opzichte van de winter.

De zwaveldepositie is sinds 2000 gedaald van 12 kg S ha^{-1} naar 3,6 kg S ha^{-1}, maar de sulfaatconcentraties in het uitspoelingswater bemonsterd via het LMM-netwerk tonen geen dalende trend. Mogelijk is de dalende depositie gecompenseerd met een hogere zwavelbemestingsgift. Bij sulfaatconcentratiemetingen in het bovenste grondwater van bos en natuur werd wel een daling gevonden. Sulfaat werd tot 2010 gemeten op 150 locaties in Trendmeetnet Verzuring (Masselink., 2012). De gemiddelde concentratie bedroeg 38 mg SO_4 l^{-1} (149 monsters) en deze zijn al gedaald in de periode 1989-2010 door de verminderde depositie in de periode daarvoor.

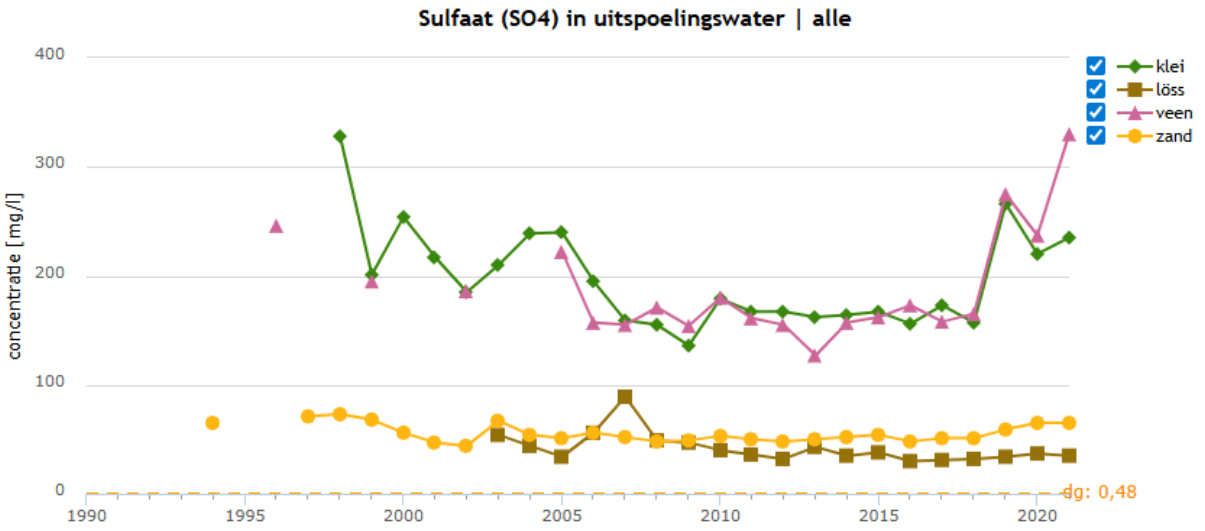
[3] Uitspoelingswater is gedefinieerd als het bovenste grondwater of, bij diepe grondwaterstanden (lössgebieden), grondwater verkregen door het uitslingeren van veldvochtige grondmonsters.

Tabel 2 *Gemiddelde sulfaatconcentraties (mg SO_4 L^{-1}) in uitspoelingswater en slootwater van bedrijven uit het Landelijk Meetnet Mestbeleid (lmm.rivm.nl). Data voor het jaar 2021.*

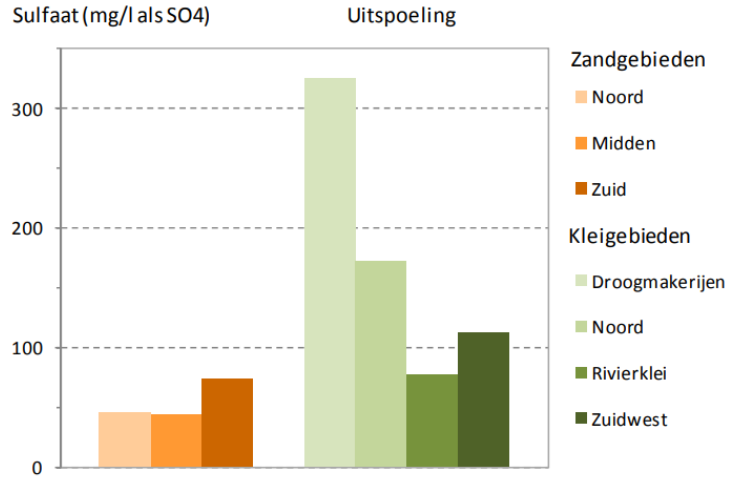
	Uitspoelingswater[1]			Slootwater	
	Gemiddeld	**P50**	**P90**	**Zomer**	**Winter**
Klei	215	172	524	106	171
Löss	34	32	55	n.v.t.	n.v.t
Veen	327	255	783	47	129
Zand	65	52	111	38	59

[1] Uitspoeling is het water in het bovenste grondwater (klei, veen, zand) of het water verkregen door bemonstering van bodemvocht (löss). Data voor alle bedrijven (akkerbouw, melkvee en dierbedrijven). P50 is de mediane waarde en P90 en 90ste percentiel.
Bron: www.lmm.rivm.nl

[2] Gemiddelde concentraties in slootwater op alle bedrijven in het LMM-netwerk. In het lössgebied kan geen slootwater bemonsterd worden.



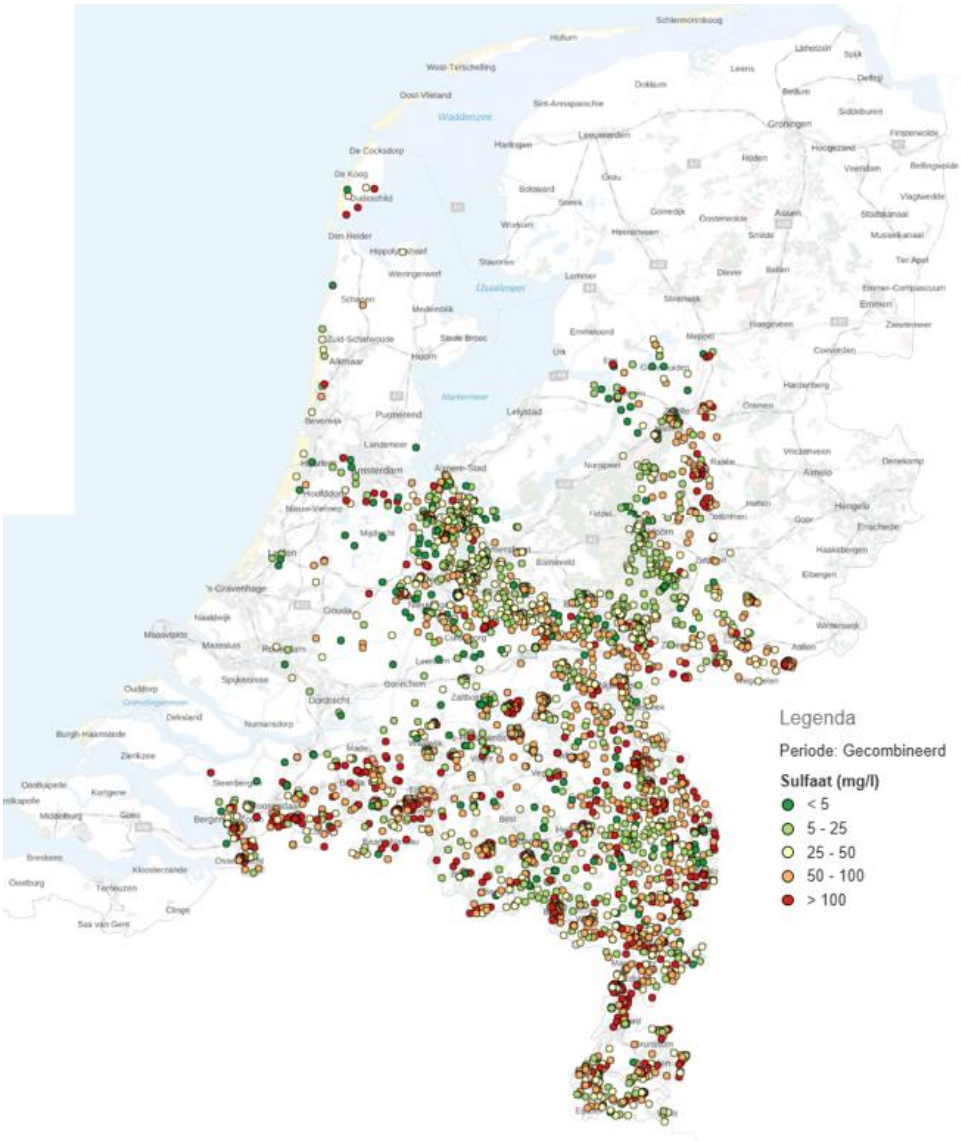
Figuur 3 *Trend in de sulfaatconcentratie in uitspoelingswater op landbouwgronden uit het monitoringsnetwerk LMM (lmm.rivm.nl). Concentratie sulfaat in mg SO_4 L^{-1} per grondsoort, gemiddeld over alle bedrijfstypen.*



Figuur 6.2 Sulfaatconcentraties (gemiddelden in mg/l) in uitspoelingswater op landbouwbedrijven in de verschillende gebieden binnen de Zand- en Kleiregio; gegevens behorende bij de landbouwpraktijk van de periode 2007-2010.

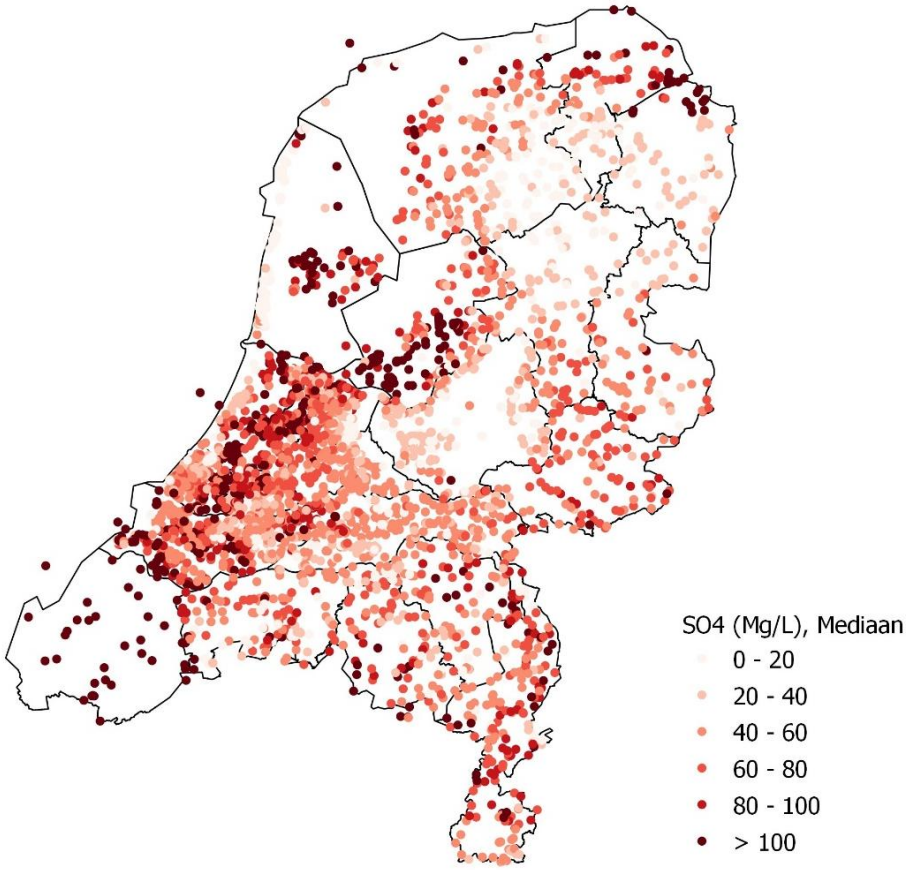
Figuur 4 *Sulfaatconcentraties in uitspoelingswater in subgebieden binnen de zand- en kleigebieden. Figuur overgenomen uit Fraters en Goffau (2014).*

In dieper grondwater is tevens een grote spreiding zichtbaar in de sulfaatconcentraties (Figuur 5) waarbij verschillen in mineralogie van de ondergrond, bemonsteringsdiepte en historische belasting waarschijnlijk een belangrijke rol spelen. In het lössgebied en zuidelijke zandgebied komen concentraties boven 100 mg SO_4 L^{-1} frequent voor. Dit werd ook gevonden in een recent onderzoek naar nitraat- en sulfaatuitspoeling in bronnen in het heuvelgebied in Zuid-Limburg en de Ardennen (De Mars et al., 2024), waarin wordt gewezen op meerdere oorzaken: (i) sulfaat kan van nature aanwezig zijn in diep grondwater wanneer de bodemlagen gips bevatten en (ii) directe uitspoeling van sulfaat vanuit landbouw en (iii) uitspoeling van nitraat vanuit landbouwgronden, wat bij contact met pyriet houdende bodemlagen leidt tot het vrijkomen van sulfaat. De onderzoekers geven aan dat de bijdrage van de verschillende bronnen aan de sulfaatconcentratie onduidelijk is (De Mars et al., 2024).



Figuur 5 *Sulfaatconcentraties in grondwater (alle jaartallen) in ondiep grondwater (+5 tot -10 m NAP). Bron https://www.grondwatertools.nl/gwatlas/*

Sulfaat wordt gemonitord in oppervlaktewater als onderdeel van de KRW-monitoring. Figuur 6 toont de mediane sulfaatconcentratie in KRW-waterlichamen in Nederland in 2022. In gebieden met zeeklei en veen komen sulfaatconcentraties van 100 mg SO_4 L^{-1} of hoger regelmatig voor. In de zand- en lössgebieden neemt de gemiddelde concentratie toe in de volgorde; noord, midden en zuid. Sulfaat in oppervlaktewater kan afkomstig zijn uit diverse bronnen waaronder landbouw, achtergrondbelasting en waterzuiveringsinstallaties. De verdeling over deze bronnen is niet bekend. De figuur dient om een beeld te geven van de huidige sulfaatconcentraties in oppervlaktewater en de regionale verschillen daarin.



Figuur 6 *Sulfaatconcentraties in oppervlaktewater (KRW lichamen) uit de database van het waterkwaliteitsportaal voor het jaar 2022 in mg SO_4 L^{-1}. Mediane waarde per meetpunt. Lijnen zijn de grenzen van de beheersgebieden per waterschap (data www.waterkwaliteitsportaal.nl).*

2.2.3 Uitspoeling van sulfaat

Zwavel is in de bodem aanwezig in de vorm van organisch zwavel en anorganisch zwavel. In zwavelrijke stikstofmeststoffen is zwavel aanwezig in de vorm van sulfaat en dus direct plantbeschikbaar. Sulfaat (SO_4^{2-}) kan als anion binden aan ijzer-hydroxiden in de bodem, maar deze binding is zwak. Wel kan sulfaat met calcium neerslaan tot gips, maar dit komt alleen voor bij zeer hoge concentraties. Over het algemeen is de binding van sulfaat aan bodembestanddelen zwak en zodoende heeft sulfaat een hoge mobiliteit in de bodem. Indien er na afloop van het groeiseizoen een overschot aan sulfaat aanwezig is in de bodem, spoelt een groot deel van dit overschot binnen één winterseizoen uit naar het grondwater (Eriksen et al., 2000). In proeven met hoge zwavelgiften, veelal in de vorm van gips, is deze snelle uitspoeling van sulfaat duidelijk zichtbaar (Stewart et al., 2000).

Onderzoek naar de uitspoeling van sulfaat in relatie tot overmatige bemesting met zwavelhoudende stikstofmeststoffen is schaars. In de meeste veldstudies met RENURE-meststoffen is alleen de werking van stikstof onderzocht. In de veldproef op grasland van Rietra et al. (2024) is wel onderzocht wat het effect is

van hoge giften van ammoniumsulfaat op de uitspoeling van sulfaat op kalkloze zandgrond en kalkhoudende klei. In deze proef werden grasland en maisland bemest met 100 tot 160 kg N ha^{-1} (110-175 kg S ha^{-1}) ammoniumsulfaatoplossing uit een stikstofstripper. Op grasland werden bodemmonsters genomen van de 0-90 cm bodemlaag. In de bemeste veldjes was 130 kg S ha^{-1} aanwezig onder de bouwvoor (30-90 cm diepte), tegenover <40 kg S ha^{-1} in de onbemeste controle. Dit geeft aan dat het overschot aan sulfaat al direct na het groeiseizoen onder de bouwvoor zit en dus zal uitspoelen naar het grondwater. Dit geeft een SO_4-concentratie in het uitspoelingswater van circa 130 mg SO_4 L^{-1} bij een neerslagoverschot van 300 mm per jaar ten opzichte van een verwachte SO_4-concentratie in de onbemeste plot van circa 40 mg SO_4 L^{-1}.

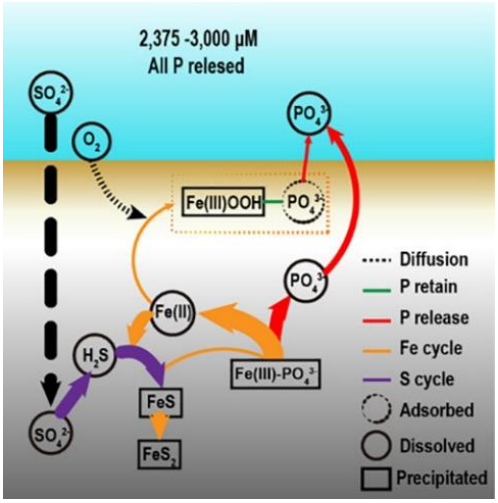
Vergelijkbare resultaten werden gevonden in een andere demoproef op kalkloze zandgrond, waarbij een met zwavel verreikte organische meststof werd gebruikt. Dit betrof een dikke fractie die met zwavelzuur was behandeld om het fosfaat af te scheiden. Bij gebruik van deze meststof werd in enkele jaren een hoge zwaveldosering gegeven van 130-260 kg S ha^{-1} en een deel van dit overschot (70-160 kg S ha^{-1}) werd na afloop van het groeiseizoen (november) teruggevonden als sulfaat in de bodemvochtmetingen in de 0-90cm-bodemlaag. Bij herbemonstering in het voorjaar werden altijd lage zwavelvoorraden gemeten, wat erop duidt de najaarsoverschotten binnen één seizoen naar het grondwater zijn uitgespoeld (Regelink et al., 2024).

De uitspoeling van sulfaat vanuit bouwlandgronden kan beperkt worden door teelt van vanggewassen. Vanggewassen nemen zwavel op en kunnen daarmee de uitspoeling van sulfaat verlagen. In onderzoek in Denemarken is vastgesteld dat gras, koolzaad en radijs respectievelijk 8, 22 en 36 kg S ha^{-1} opnemen in het bovengrondse gewas (Eriksen, 2002). De teelt van vanggewassen na een hoofdteelt is bij mais reeds verplicht op zand- en lössgrond als maatregel om nitraatuitspoeling te voorkomen.

2.2.4 Biochemische processen in bodem en water

Sulfaat heeft geen directe negatieve effecten op oppervlaktewater (Rantamo et al., 2022), maar kan onder bepaalde condities wel effect hebben op andere stoffen (Zak et al., 2021). Sulfaat kan onder anaerobe condities, bijvoorbeeld in het sediment van een waterbodem, biochemisch worden omgezet naar sulfiden. Sulfiden reageren vervolgens met ijzerhydroxiden waarbij het mineraal pyriet (FeS_2) of ijzersulfide (FeS) ontstaat. Omdat ijzerhydroxiden ook een belangrijke rol spelen bij de vastlegging van fosfaat, leidt dit proces tot het vrijkomen van ijzergebonden fosfaat waardoor de fosforconcentratie in het oppervlaktewater stijgt. Dit proces wordt interne eutrofiëring genoemd (Lamers et al., 1998; Smolders et al., 2006).

Interne eutrofiëring kan voorkomen in alle oppervlaktewateren waarbij wordt voldaan aan de volgende drie voorwaarden:
- een voldoende hoge sulfaatconcentratie in het water;
- een hoge fosfaatverzadigingsgraad (fosfaat/ijzer ratio) van het sediment in de waterbodem;
- een voldoende hoog organischestofgehalte in het sediment.



Figuur 7 *Interne eutrofiëring. Effect van sulfaat op het vrijkomen van fosfaat door de interactie met ijzer. Overgenomen uit Chen et al. (2021).*

Interne eutrofiëring leidt tot de typische seizoenschommelingen in fosfaat- en sulfaatconcentraties in oppervlaktewater. Hierbij zijn de hogere fosfaat- en lagere sulfaatconcentraties in de zomer te wijten aan het optreden van anaerobe condities door de versnelde afbraak van organische stof in het zomerseizoen (temperatuur). Deze seizoensfluctuaties in fosfaat en sulfaat zijn ook duidelijk aanwezig in de LMM-data voor slootwater in landbouwgebied (Tabel 1).

Hoewel deze processen bekend zijn, is niet duidelijk in hoeveel wateren interne eutrofiëring door sulfaat substantieel bijdraagt aan de fosforconcentratie. In 2003 heeft het RIVM een studie gedaan naar de afleiding van milieugrenzen voor sulfaat in oppervlaktewater en concludeerde dat het gewenst is om de bijdrage van interne eutrofiëring door sulfaat beter te kwantificeren (Brand et al., 2003). Interne eutrofiëring is een risico bij een hoge sulfaatconcentratie in combinatie met een hoge fosfaatverzadingsgraad van het sediment. De fosfaatverzadiging van sediment in waterbodems wordt echter niet structureel gemonitord. Sulfaatconcentraties in oppervlaktewater zijn wel goed bekend (Figuur 6). In een groot deel van Nederland is sulfaat in oppervlaktewater aanwezig in concentraties boven 60 mg SO_4 L^{-1} en dat is voldoende hoog om interne eutrofiëring te laten plaatsvinden indien ook sprake is van een hoge fosfaatverzadiging en aanwezigheid van organische stof in de waterbodem (Chen et al., 2024). Het is onduidelijk of een verdere verhoging in de sulfaatconcentratie in deze watersystemen leidt tot hogere flux van het vrijkomen van fosfaat uit de waterbodem. Immers, het vrijkomen van fosfaat door de vorming van pyriet is het gevolg van biologische omzettingen en de snelheid waarmee sulfaat wordt omgezet in sulfide zal beperkt worden door de snelheid van de biologische omzettingen en niet zozeer door de hoogte van de sulfaatconcentratie. Het verwijderen van fosfaatrijk sediment door baggeren is wel een effectieve methode om nalevering van fosfor te voorkomen. Volgens de studie van Van Gerven speelt interne eutrofiëring door sulfaat geen rol bij lage sulfaatconcentraties (in zijn studie 20 mg SO_4 L^{-1}-). Het noordelijke zandgebied kenmerkt zich door lage sulfaatconcentraties (0-40 SO_4 L^{-1}) in oppervlaktewater (Figuur 1) waarbij interne eutrofiëring nu waarschijnlijk geen rol speelt, maar mogelijk wel bij een verhoging van de sulfaatconcentratie.

2.2.4.1 Sulfaat in kwel gevoede beekdalen

In kwel gevoede natuurgebieden zoals beekdalen is de samenstelling van het kwelwater van belang voor een goede ecologische toestand van de natuur. Kwelwater is rijk aan basen (Ca, Mg), maar kan ook verhoogde concentraties sulfaat en nitraat bevatten. Kwel gevoede beekdalen komen voor in de zandgebieden. Er is bijvoorbeeld onderzoek gedaan bij kwelgebieden in Twente (Aggenbach, 2021) en De Gelderse Vallei (Cirkel et al., 2014) en daarbij werd sulfidevorming in de bodem aangetoond door verhoogde concentraties van sulfaat in de kwelstroom. In de studie van Cirkel et al. (2014) worden in het diepere grondwater sulfaatconcentraties van 90-160 mg SO_4 L^{-1} gemeten en deze worden verklaard uit een combinatie van historische zwaveldepositie, (historische) zwavelbemesting en het vrijkomen van sulfaat uit pyriet als gevolg van uitspoeling van nitraat. Afhankelijk van de herkomst en verblijftijd van dit kwelwater kunnen diverse bronnen bijdragen aan verhoogde sulfaatconcentraties, waaronder historische depositie, bemesting of oxidatie van pyriet of veen. Oxidatie van pyriet en veen kan ontstaan door verdroging in het intrekgebied of, bij diepere lagen van pyriet en veen, door uitspoeling van nitraat uit landbouw. Nitraat is daarbij de elektronacceptor die de oxidatie van pyriet of veen mogelijk maakt. In kwel gevoede systemen kan sulfaat onder anaerobe condities en de aanwezigheid van organische stof omgezet worden naar sulfide, waarbij het mineraal pyriet (FeS) wordt gevormd. In de ondergrond wordt zo verzuringscapaciteit opgebouwd. Bij droogte en een dalende grondwaterstand vindt de omgekeerde reactie plaats, waarbij pyriet oxideert tot zwavelzuur en dit maakt deze natte natuurgebieden extra gevoelig voor de gevolgen van extreme droogte. Bij extreme droogte kan er een sterke verzuring optreden die van invloed is op de vegetatie (Aggenbach, 2021; Cirkel et al., 2014).

2.2.5 Drinkwaterbeschermingsgebieden

In drinkwaterbeschermingsgebieden kan een toename van sulfaatuitspoeling nadelig zijn. Dit niet zozeer vanuit het risico op overschrijding van de norm voor sulfaat in drinkwater (150 mg SO_4 L^{-1}, Drinkwaterbesluit), maar voornamelijk omdat de hardheid van het water toeneemt door uitspoeling van sulfaat. Met sulfaat komen immers ook basische kationen (calcium, magnesium) mee, mede door de extra bekalking die nodig is bij gebruik van sulfaatmeststoffen omdat deze verzurend werken. Wanneer deze meststoffen grootschalig in drinkwaterwingebieden worden toegepast, kan de hardheid van het water toenemen en dit leidt tot extra kosten bij de drinkwaterproductie voor de ontharding van drinkwater. Calcium en magnesium spoelen

gelijktijdig met sulfaat uit, omdat de lading van het sulfaation (SO_4^{2-}) gecompenseerd moet worden door een gelijke lading aan kationen (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+) vanuit het principe van elektroneutraliteit. In een monitoringsstudie in de Achterhoek (Eibergen-Haarlo) werden onder enkele landbouwpercelen hoge sulfaatconcentraties in bodemvocht en grondwater aangetroffen – vermoedelijk door bemesting – van 144 mg SO_4 L^{-1} ten opzichte van een gemiddelde in alle meetpunten van 75 mg SO_4 L^{-1} en daarbij was tevens de calciumconcentratie met een op molbasis equivalente hoeveelheid verhoogd naar 98 mg Ca L^{-1} (Rietra et al., 2022).

Meststoffen die toegestaan zijn in grondwaterbeschermingsgebieden zijn per provincie gereguleerd (Omgevingsverordening). In provinciale omgevingsverordeningen staat steeds een lijst met meststoffen die wel gebruikt mogen worden. Bijvoorbeeld provincie Gelderland, artikel 4.24, activiteiten met meststoffen in grondwaterbeschermingsgebieden: "a. is het op of in de bodem brengen van andere meststoffen dan dierlijke meststoffen, compost, anorganische meststoffen, kalkmeststoffen of dierlijke uitwerpselen niet toegestaan". Andere provincie hebben dezelfde regels. Overige anorganische meststoffen en de overige organische meststoffen zijn hier niet expliciet benoemd. Spuiwater op bijlage Aa valt onder overige anorganische meststoffen. De indeling in meststoffen staat in de Uitvoeringsregeling Meststoffenwet: dierlijke meststoffen, compost, EG-meststoffen, herwonnen fosfaten, overige anorganische meststoffen, overige organische meststoffen en zuiveringsslib. RENURE-meststoffen hebben vooralsnog geen plek in de Meststoffenwet, maar waarschijnlijk worden deze ondergebracht onder de categorie 'dierlijke mest' of in een aparte categorie.

3 Beantwoording kennisvragen

3.1 Wat is de huidige en de te verwachten productie aan zwavelhoudende meststoffen?

3.1.1 Huidige productie zwavelhoudende stikstofmeststoffen

Kunstmest
Bemesting met zwavelhoudende meststoffen is standaardpraktijk op zowel grasland als bouwland. Nadat de zwaveldepositie is gedaald tot niveaus onder de gewasbehoefte, is de aandacht voor zwavelbemesting toegenomen met o.a. de verkoop van KAS-zwavelblends. Er zijn diverse zwavelmeststoffen op de markt waaronder minerale meststoffen en overige anorganische meststoffen, zoals spuiwater van luchtzuiveringsinstallaties. Zwavel kan aanwezig zijn in de vorm van kaliumsulfaat, ammoniumsulfaat, gips (calciumsulfaat) of elementair zwavel (S^0). Vaak is op basis van de productinformatie onduidelijk in welke vorm zwavel aanwezig is in de meststof. Kaliumsulfaat en ammoniumsulfaat zijn wateroplosbare sulfaatzouten. Polysulfaat is een natuurlijk zout dat naast kalium en magnesium ook sulfaat bevat, en die ook in de biologische landbouw gebruikt mag worden. Gips is slecht oplosbaar in water en komt daarom trager beschikbaar. Elementair zwavel moet eerst oxideren tot SO_4 alvorens het plan beschikbaar is, en is zodoende ook een trage zwavelmeststof.

Er is geen landelijke registratie van het gebruik van zwavelhoudende meststoffen, maar met behulp van data uit de NEMA-rapporten en data vanuit Meststoffen Nederland is de afzet van zwavelhoudende meststoffen als volgt geschat:

- Ammoniumsulfaatkunstmest: In 2024 werd 2,4 mln. kg N en 2,7 mln. kg S in de vorm van ammoniumsulfaatkunstmest afgezet (Meststoffen Nederland).
- KAS-zwavel: In 2024 werd 21 mln. kg N in de vorm van KAS-zwavel afgezet (Meststoffen Nederland). Uitgaande van een stikstof- en zwavelgehalte van 24% N en 15% SO_3, komt dit overeen met 5,2 mln. kg S.
- Kalihoudende mengmeststoffen: Zwavel is vaak een onderdeel van mengmeststoffen (NPK en NK meststoffen) als tegen-ion voor kalium. Kalium kan aanwezig zijn in de vorm van K_2SO_4 of KCl. Wanneer we aannemen dat de helft van alle kalium in K-, NK- en NPK-meststoffen opgebouwd is uit K_2SO_4, dan is een schatting mogelijk van de hoeveelheid S via mengmeststoffen. De hoeveelheid kaliumsulfaat, patentkali, NPK, NK en PK en overige kalimeststoffen is berekend op 36 mln. kg K_2O (Van Bruggen et al., 2023). Als de helft daarvan verkocht wordt als K_2SO_4, dan geeft dat een grove inschatting van 6 mln. S (1 mol K_2SO_4 = 94 gram en K_2O en 32 gram S).
- Gips ($CaSO_4$): Gips wordt gebruikt als bodemverbeterend middel, maar alleen op kleigronden. Er zijn geen gebruikshoeveelheden bekend. Lokaal kunnen de doseringen hoog zijn

Ammoniumsulfaatkunstmest en KAS-zwavel zijn meststoffen die gegeven worden om te voorzien in de zwavelbehoefte en deze meststoffen zouden logischerwijs vervangen kunnen worden door zwavelhoudende RENURE-meststoffen. In de kalimeststoffen en mengmeststoffen is zwavel aanwezig als tegen-ion van kalium en dit gebruik zal niet dalen.

Spuiwater (overige anorganische meststof)
Daarnaast zijn er diverse zwavelhoudende reststoffen die gebruikt mogen worden als meststof. Dit betreft ammoniumsulfaatoplossingen uit luchtbehandelingssystemen van veestallen, industriële bedrijven of verwerkingsinstallaties voor organisch afval, slib of mest. Er is echter geen registratie van de handel in deze stoffen, waardoor de hoeveelheden geschat moeten worden.

De productie van ammoniumsulfaatoplossingen uit luchtwassers van veestallen wordt geschat op 9,4 mln. kg N en 11 mln. kg S op basis van het aantal veehouderijen met luchtwassers (Van Bruggen et al., 2023).[4]
Op bijlage Aa staan spuiwateroplossingen vanuit diverse bronnen, waaronder bedrijven die kippenmest compostering of drogen.
De productie van ammoniumsulfaat door mestverwerkingsbedrijven die mest korrelen, kan ingeschat worden aan de hand van hoeveel mest (veelal kippenmest) die verwerkt wordt tot korrels. Het NCM publiceert jaarlijks de stikstof- en fosfaatexport en -verwerking. Op basis van de hoeveelheid en N/P-ratio in vaste mest en mestkorrels (beide zijn hoofdzakelijk afkomstig van pluimveemest) en de N/P-ratio in afgevoerde pluimveemest (CBS overzicht vervoer meststoffen) kan geschat worden dat er tot 6 mln. kg N vervluchtigt bij het drogen en korrelen van pluimveemest. Wanneer we aannemen dat 70% hiervan wordt opgevangen in een luchtwasser, betekent dit 3,8 mln. kg N en 4,3 mln. kg S in de vorm van spuiwater. Dit getal moet gezien worden als een grove indicatie; immers, het aandeel verwerkers met een luchtwasser en het rendement van de luchtwassers is onbekend.
De productie van ammoniumsulfaat die vrijkomt bij de compostering van zuiveringsslib is bekend vanuit het jaarverslag van de producent (GMB BioEnergie, jaarverslag 2022) en bedraagt ca. 1,1 mln. kg N. De hoeveelheid ammoniumsulfaat uit composteerhallen is onbekend en mogelijk laag, omdat het gebruik van bio-filters, waarbij stikstof wordt afgebroken, gangbaar is (Honig et al., 2025). Het aanbod van spuiwater uit andere bronnen dan dierlijke mest zal de komende jaren ook toenemen door bijvoorbeeld extra luchtwassers in de industrie en de winning van spuiwater uit digestaat van rioolwaterzuiveringsinstallaties. Een onbekende hoeveelheid spuiwater wordt over de grens naar o.a. Duitsland afgezet.

Dierlijke mest bevat eveneens zwavel, ca. 0,7 kg S ton^{-1}, maar dit is grotendeels aanwezig in organische vorm. De eerstejaarswerking van bij 25 m^3 drijfmest bedraagt 2-3 kg S ha^{-1} (adviezen CBAV). Het organisch gebonden zwavel (ca. 18 kg S ha^{-1}) is niet direct beschikbaar, maar draagt wel bij aan de opbouw van de zwavelvoorraad en daarmee aan het zwavel leverend vermogen van de bodem. Door het wegvallen van de derogatie daalt het mestgebruik in Nederland en daarmee ook de zwavelaanvoer vanuit mest.

Het totale gebruik aan zwavelhoudende kunstmeststoffen en overige anorganische meststoffen (Tabel 3) is geschat op 30 mln. kg S. Dit geeft een gemiddelde zwavelaanvoer van 18 kg S ha^{-1} cultuurgrond, exclusief het gebruik van gips, omdat gebruiksgegevens daarvan ontbreken.

Tabel 3 *Huidig gebruik van zwavelhoudende meststoffen vóór erkenning van RENURE.*

vorm	N (mln. kg N)	S (mln. kg S)	referentie
Kunstmest $(NH_4)_2SO_4$	2,4	2,7	Meststoffen Nederland
K_2SO_4, NPK, NK mengmeststoffen		6	Schatting o.b.v. kaliumgebruik waarbij we aannemen dat 50% van de kalium in meststoffen aanwezig is als K_2SO_4 (Van Bruggen et al., 2023).
KAS-zwavel	21	5,2	Meststoffen Nederland
Spuiwater uit luchtwassers van stallen	≈9,9	≈11	NEMA-rapportages (schatting o.b.v. stallen met luchtwasser) (Van Bruggen et al., 2023).
Spuiwaters van luchtwassers bij mestverwerkingsbedrijven	≈3,8	≈4,3	Schatting op basis van hoeveelheden vaste en gekorrelde mest, maar zeer onzeker (zie tekst).
Spuiwaters overige herkomst	≈1	≈ 1	Schatting (zie tekst)
Gips		-	Geen registratie
Totaal		30	

[1] Omrekening: 1 mol $(NH_4)_2SO_4$ bevat 28 g N en 32 g S, ratio S/N= 1,14.

[4] Gebruik van spuiwater van luchtwassers is berekend uit gegevens over stallen voorzien van luchtwassers.

3.1.2 Verwachte productie zwavelhoudende meststoffen bij erkenning RENURE

De erkenning van RENURE biedt mogelijkheden om meer stikstof uit dierlijke mest te benutten op landbouwgrond waar de gebruiksnorm dierlijke mest reeds wordt ingevuld met dierlijke mest. De productie van RENURE uit mest is ook kostbaar en de hoeveelheid RENURE zal daarom samenhangen met de ontwikkelingen op de mestmarkt, waaronder de omvang van het mestoverschot, de mestafzetprijzen, de kosten voor certificering etc. Het is zodoende lastig om een inschatting te maken van de toekomstige RENURE-productie.

Als gevolg van de afbouw van de derogatie – vanaf 2026 geldt in Nederland generiek een gebruiksnorm dierlijke mest van 170 kg N/ha – stijgt de hoeveelheid dierlijke mest die niet plaatsbaar is binnen de Nederlandse landbouw. Schatting van de omvang van het mestoverschot vanaf 2026 zijn eerder gemaakt door het CDM en daaruit volgt een toename in het mestoverschot van ca. 50 mln. kg N boven op de mestexport in het referentiejaar 2022. De toename in het mestoverschot zal de productie van RENURE stimuleren.

De potentiële productie van RENURE (Tabel 5) is geschat aan de hand van de volgende uitgangspunten:

- Varkensmest: Een groot deel van de varkensmest wordt reeds verwerkt, waarbij de drijfmest wordt gescheiden in een dikke en dunne fractie waarna de dikke fractie geëxporteerd wordt. De huidige mestverwerkers hebben voldoende capaciteit om 19 mln. kg P_2O exportwaardige vaste mest af te zetten (NCM). Dunne fracties zijn het startpunt voor de productie van mineralenconcentraten met behulp van omgekeerde osmose. Wanneer we aannemen dat al deze bedrijven overschakelen op de productie van mineralenconcentraat, dan kan de sector 19 mln. kg N mineralenconcentraat uit varkensmest produceren. Daarbij is aangenomen dat 50% van de stikstof uit drijfmest wordt teruggewonnen het mineralenconcentraat en 50% in de dikke fractie. Deze schatting is vergelijkbaar met de prognose afgegeven door het NCM (2025).
- In Nederland zijn 1050 bedrijven met meer dan 200 melkkoeien en deze zijn gezamenlijk verantwoordelijk voor 22% van de mestproductie in de melkveesector (CBS Statline, 2024). We nemen aan dat deze bedrijven mest gaan verwerken door een combinatie van monomestvergisting en stikstof strippen/scrubben. Hierbij wordt 30% van de stikstof uit de drijfmest omgezet naar een RENURE-meststof. Op nationale schaal betekent dit een productie van 14 mln. kg N (16 mln. kg S) in de vorm van ammoniumsulfaat.
- Pluimveemest wordt al volledig buiten de Nederlandse landbouw afgezet en zal daarom niet bijdragen aan de productie van RENURE.

Bij bovenstaande RENURE-productie wordt 33 mln. kg N uit dierlijke mest omgezet naar een RENURE-meststof. Of RENURE daadwerkelijk op zeer grote schaal geïmplementeerd wordt, hangt af van diverse factoren waaronder de ontwikkelingen in de omvang van de veestapel en de omvang van de mestvergisting in Nederland. Mestvergisting en stikstofstrippen komen vaak gezamenlijk voor.

Voor de zwavelaanvoer vanuit bovengenoemde RENURE-productie is het relevant om onderscheid te maken naar ammoniumzouten en mineralenconcentraten:

- Ammoniumzouten: Stikstofstrippers binden ammonium vanuit de gasfase door een reactie met een zure vloeistof. Meestal wordt hierbij zwavelzuur gebruikt als zuur, waarbij een ammoniumsulfaatoplossing ontstaat met een vrij vaste verhouding tussen stikstof en zwavel van 1,14 kg S (2,9 kg SO_3) per kg N. Zwavel is aanwezig in de vorm van sulfaat (SO_4).
- Mineralenconcentraat: Bij omgekeerde osmose wordt een dunne mestvloeistof gescheiden in een permeaat (schoon water) en een concentraat. Hierbij wordt zwavelzuur gedoseerd aan de dunne meststofvloeistof om de pH te verlagen, zodat de retentie van de ammoniakale stikstof bij de omgekeerde osmose beter verloopt. Zonder pH-sturing zal een deel van de stikstof in de vorm van NH_3 het membraan passeren naar de waterstroom. Ook kan er ijzersulfaat gedoseerd worden om meer fosfaat en deeltjes uit de mestvloeistof te verwijderen. Er zijn grote verschillen in chemieverbruik tussen mestverwerkers en daardoor zijn er zowel zwavelarme als zwavelhoudende mineralenconcentraten op de markt (Tabel 4). Gemiddeld bevat mineralenconcentraat 0,5 kg S (1,4 kg SO_3) per kg N in mineralenconcentraat, maar gelet op de grote variatie is het wenselijk dat een afnemer bekend is met het zwavelgehalte van het mineralenconcentraat. Het zwavel in mineralenconcentraten is daarmee grotendeels afkomstig vanuit additieven; dierlijke mest bevat ook zwavel, maar in een relatief lage hoeveelheid van 0,7 kg S ton^{-1} en dit wordt afgescheiden naar de dikke fractie (Regelink et al., 2021).

Tabel 4 *Stikstof en zwavelgehalten in mineralenconcentraat en spuiwater afkomstig van mestverwerkingsinstallaties en de zwavelgift bij een stikstofbemesting van 80 kg N ha^{-1}.*

Type RENURE- meststof	Stikstof	Zwavel	Ratio	Zwavelgift bij 80 kg N ha^{-1}
	(kg N/ton)	(kg S/ton)	(kg S/kg N)	(kg S/ha)
Mineralenconcentraat[1]	7,1	0,5	0,1	5
Mineralenconcentraat[1]	5,5	0,1	0,02	2
Mineralenconcentraat[1]	4,5	0,3	0,1	5
Mineralenconcentraat[1]	5,3	5,2	1,0	79
Mineralenconcentraat[1]	3,1	1,8	0,6	47
Mineralenconcentraat[1]	8,3	1,0	0,1	10
Mineralenconcentraat[1]	6,8	6,6	1,0	78
Mineralenconcentraat[1]	8,0	0,8	0,1	8
Mineralenconcentraat[1]	5,9	7,4	1,3	100
Mineralenconcentraat[2]	7,6	1,6	0,2	17
Mineralenconcentraat[2]	5,6	2,4	0,4	34
Mineralenconcentraat[2]	8,0	5,4	0,7	54
Spuiwater[3]	65	73	1,1	88

[1] Monitoring pilot Mineralenconcentraten (Hoeksma et al., 2021).

[2] Monitoring project Meerwaarde Mest en Mineralen (Regelink et al., 2021).

[3] Monitoring EU project FertiManure, bedrijfsschaal stikstofstripper (Adani et al., 2024).

Tabel 5 *Potentiële productie van RENURE meststoffen (mineralenconcentraat en ammoniumsulfaat) in mln. kg N en S vanuit varkensdrijfmest en runderdrijfmest. Zie tekst voor aannames.*

Vorm	N (mln. kg N)	S (mln. kg S)
Ammoniumsulfaat door strippen uit runderdrijfmest. Aanname: 22% van de drijfmest wordt verwerkt in een stripper.	14	16
Mineralenconcentraat uit varkensmest. Aanname: 70% van de varkensdrijfmest wordt verwerkt tot mineralenconcentraat.	19	8

Bij een hoge implementatiegraad van RENURE zal het aanbod aan zwavelhoudende stikstofmeststoffen stijgen met ca. 24 mln. kg S. Bij een goede landbouwpraktijk wordt RENURE ingezet als vervanger voor zwavelhoudende kunstmest (KAS-zwavel en ammoniumsulfaat kunstmest), wat betekent dit er netto sprake is van een toename van 16 mln. kg S.

RENURE-meststoffen zullen voornamelijk op grasland toegepast worden (paragraaf 3.2). De RENURE-gebruiksnorm bedraagt 80 kg N ha^{-1} en bij de geschatte productie kan ongeveer 43% van het huidige graslandareaal (870.000 ha)[5] met RENURE (ammoniumsulfaat en mineralenconcentraat) tot de norm bemest worden. Ammoniumsulfaat is niet geschikt voor toepassing op veengrond (te hoge zwavelgehalten in gras). Bij de productie van 14 mln. kg N in de vorm van spuiwater kan ca. 25% van het grasland op zand, klei- en löss[6] bemest worden tot de RENURE-gebruiksnorm van 80 kg N ha^{-1}.

[5] Areaal grasland zonder natuurgrasland (CBS Statline 2024).

[6] Areaal grasland zonder natuurgrasland in Nederland met aftrek van grasland in het veenweidegebied (CBS Statline 2024).

3.2 Bij welke gewassen is er, gezien de stikstofgebruiksnormen, ruimte voor zeer hoge zwavelgiften?

De stikstofgebruiksnorm begrenst de hoeveelheid zwavelhoudende stikstofmeststof die per hectare gegeven kan worden. Voor RENURE-meststoffen geldt daarnaast een doseringslimiet van 80 kg N/ha. Deze limiet geldt niet voor zwavelhoudende stikstofmeststoffen afkomstig van andere bronnen, bijvoorbeeld spuiwater van luchtwassers of vanuit de agro-foodindustrie.

Tabel 6 toont de stikstofgebruiksnormen voor grasland en een selectie van akkerbouwgewassen. Hierbij is uitgegaan van de stikstofgebruiksnormen uit het concept 8e actieprogramma Nitraatrichtlijn[7], die met name afwijken van 2025 door een verdere aanscherping van de gebruiksnormen in het zuidelijk zandgebied in het 8e Actieprogramma. Er is aangenomen dat er een basisbemesting wordt uitgevoerd met runderdrijfmest op grasland (werkingscoëfficiënt 60%) en met varkensdrijfmest op bouwland (werkingscoëfficiënt 80%). De resterende stikstofgebruiksruimte, na aftrek van de werkzame stikstof uit dierlijke mest, is de plaatsingsruimte voor kunstmest, waaronder RENURE.

Grasland heeft een hoge stikstofgebruiksnorm, waardoor er ruimte is om 154 tot 283 kg N in de vorm van kunstmest aan te wenden boven op het gebruik van dierlijke mest. Dit kan deels worden ingevuld met RENURE vanwege de gebruikslimiet van 80 kg N/ha voor stikstof uit RENURE. De zwavelgift hierbij bedraagt 90 kg S ha^{-1} bij gebruik van ammoniumsulfaat. Bij gebruik van mineralenconcentraat is de variatie in het zwavelgehalte erg groot en gemiddeld 40 kg S $ha^{-1.}$ Deze limiet is niet van toepassing op zwavelhoudende stikstofmeststoffen vanuit andere bronnen. Maisland heeft daarentegen een veel lagere stikstofgebruiksnorm, waardoor het RENURE-gebruik bij mais op zand beperkt wordt tot 55 kg N/ha, aannemende dat een basisgift van dierlijke mest wordt gegeven. In het zuidelijke zandgebied is er door aanscherping van de stikstofgebruiksnorm geen ruimte meer voor kunstmest of RENURE na gebruik van een basisgift van dierlijke mest.

Bij akkerbouwgewassen zijn er grote verschillen in de stikstofgebruiksnormen tussen gewassen en tussen gebieden. Gewassen met hoge stikstofgebruiksnormen zijn consumptieaardappelen, wintertarwe en koolgewassen. Door differentiatie van de stikstofgebruiksnormen naar grondsoort is de gebruiksnorm op zuidelijk zand aanzienlijk lager dan op kleigrond. Bij de lage normen op zuidelijk zandgrond wordt de stikstof voor diverse gewassen al volledig opgevuld bij gebruik van drijfmest als basisbemesting. Op bouwland wordt het gebruik van zwavelhoudende stikstofmeststoffen voor de meeste gewassen door de stikstofgebruiksnorm beperkt tot maximaal 50 kg N/ha, waardoor de zwavelgift niet hoger zal zijn dan 55 kg S/ha, aannemende dat de kunstmestruimte volledig wordt opgevuld met ammoniumsulfaat. Uitzonderingen hierop zijn consumptieaardappelen en koolgewassen, beide gewassen met hoge stikstofgebruiksnormen. Maar bij deze, en ook bij andere akkerbouwgewassen, geldt dat praktische aspecten bepalend zijn voor de keuze van een stikstofmeststof. RENURE-meststoffen zoals mineralenconcentraat en ammoniumsulfaat lenen zich niet of minder goed voor toediening op beteeld bouwland, omdat het land met zware machines betreden moet worden en de mest in de grond gebracht moet worden. Wel vinden er ontwikkelingen plaats op dit gebied en zijn er al loonwerkers die RENURE-meststoffen emissiearm in staande gewassen kunnen toedienen. Door deze ontwikkeling zal het gebruik van RENURE op bouwland op termijn een grotere omvang kunnen krijgen.

[7] Het 8e actieprogramma Nitraatrichtlijn is uitgesteld.

Tabel 6 *Stikstofgebruiksnormen voor grasland en akkerbouwgewassen[1] en invulling daarvan met dierlijke mest en kunstmest. Er is aangenomen dat er basisbemesting wordt gegeven met dierlijke mest van 170 kg N/ha op grasland en 140 kg N/ha op bouwland, waarna de resterende stikstofgebruiksruimte beschikbaar is voor gebruik van kunstmest of RENURE.*

Gewas		**Stikstof-gebruiksnorm[1]**	**Dierlijke mest[2]**	**Werkzame stikstof dierlijke mest[3]**	**Stikstof-kunstmest[4]**
		(kg N/ha)	**(kg N/ha)**	**(kg N/ha)**	**(kg N/ha)**
Grasland maaien	Klei	385	170	102	283
Grasland maaien	Zand (N/W/C)	320	170	102	218
Grasland maaien	Zand (Z), löss	256	170	102	154
Grasland maaien	Veen	300	170	102	198
Mais	Klei	185	170	102	83
Mais	Zand (N/W)	157	170	102	55
Mais	Zand (Z)	90	150	90	0
Consumptieaardappel	Klei	250	140	112	138
Consumptieaardappel	Zand (N/W)	235	140	112	123
Consumptieaardappel	Zand (Z)	188	140	112	76
Suikerbiet	Klei	150	140	112	38
Suikerbiet	Zand (N/W)	145	140	112	33
Suikerbiet	Zand (Z)	83	104	83	0
Voederbiet	Klei	165	140	112	53
Voederbiet	Zand (N/W)	165	140	112	53
Voederbiet	Zand (Z)	106	133	106	0
Wintertarwe	Klei	245	140	112	133
Wintertarwe	Zand (N/W)	162	140	112	50
Wintertarwe	Zand (Z)	128	140	112	16
Zomertarwe	Klei	150	140	112	38
Zomertarwe	Zand (N/W)	140	140	112	28
Zomertarwe	Zand (Z)	77	96	77	0
Rode kool	Klei	285	140	112	173
Rode kool	Zand (N/W)	260	140	112	148
Rode kool	Zand (Z)	157	140	112	45

[1] Concept-stikstofgebruiksnormen voor 2026 (referentie). Omdat de gebruiksnormen per regio verschillen, is steeds de gebruiksnorm voor kleigrond, zand noordelijk/westelijk (zand N/W) en zand zuidelijk (zand Z) opgenomen. Voor grasland zijn de gebruiksnormen voor alle grondsoorten opgenomen.

[2] Stikstofgift met dierlijke mest. Aangenomen is dat op grasland de gebruiksnorm dierlijke mest van 170 kg N/ha volledig wordt benut. Op bouwland is uitgegaan van een mestgift van 140 kg N/ha uit drijfmest, omdat de fosfaatgebruiksnorm het gebruik van dierlijke mest op bouwland begrenst, of een lagere mestgift indien de stikstofgebruiksnorm begrenst.

[3] Werkzame stikstof uit dierlijke mest: Wettelijke werkingscoëfficiënt voor drijfmest * de drijfmestgift. Voor grasland en mais is een werkingscoëfficiënt van 60% aangehouden (runderdrijfmest). Voor de akkerbouwgewassen is een werkingscoëfficiënt van 80% aangehouden (varkensdrijfmest).

[4] Gebruiksruimte voor kunstmest: N-gebruiksnorm – werkzame stikstof uit mest.

3.3 Wat is een goede landbouwpraktijk voor de toepassing van spuiwaters?

In een goede landbouwpraktijk worden de dosering en het moment van toepassen afgestemd op het bemestingsadvies voor zwavel (Tabel 1) en de zwavel levering van de bodem op basis van grondonderzoek. Een zwavelbemesting is vooral zinvol op zandgrond. Op kleigrond is de zwavel levering meestal voldoende, al zijn er wel regionale verschillen in het zwavelgehalte van kleigronden (Figuur 2). Op veengrond wordt het gebruik van spuiwater afgeraden, omdat daar de zwavelbeschikbaarheid al ruim voldoende is en overbemesting kan leiden tot te hoge zwavelgehalten in het gras wat schadelijk kan zijn voor herkauwers (zie paragraaf 2.1). Een zwavelbemesting op grasland is alleen effectief wanneer deze voor de eerste en tweede snede wordt gegeven, omdat op dat moment de zwavel levering vanuit de bodem nog laag is. Bij

latere snedes levert de bodem door mineralisatie voldoende zwavel en is een extra zwavelgift niet meer zinvol. Bij bouwlandgewassen is de zwavelbehoefte voor de meeste gewassen vrij laag, met uitzondering van een aantal specifieke gewassen zoals koolgewassen.

Ammoniumsulfaat kan zowel oppervlakkig uitgereden worden, of in de grond ingebracht worden, bijvoorbeeld met een spaakwielbemester. Op grasland wordt ammoniumsulfaat meestal in de bodem ingebracht, omdat contact met het gewas kan leiden tot gewasschade door verbranding. Ammoniumsulfaat is weinig emissiegevoelig; alleen bij toepassing op kalkrijke gronden kunnen wel hoge emissies ontstaan en is een emissiearme toediening gewenst (Rietra et al., 2024; Powlson et al., 2020). Op kalkhoudende gronden vindt er een reactie plaats tussen sulfaat en kalk waarbij gips wordt gevormd en de pH stijgt waardoor het risico op ammoniakemissies toeneemt. Daarom is een emissiearme aanwending op kalkhoudende gronden aanbevolen.

Ammoniumsulfaat is een verzurende meststof, maar dit geldt voor alle stikstofmeststoffen. Bovendien leidt overmatig gebruik van ammoniumsulfaat tot uitspoeling van sulfaat (SO_4^{2-}) waarbij calcium (Ca^{2+}) als tegen-ion uitspoelt. Een bemesting boven de zwavelbehoefte leidt dus tot verlies van calcium en dit moet aangevuld worden met kalk om een voldoende hoge calciumverzadiging van het kationen-omwisselings-complex in de bodem te behouden. Bij gebruik van ammoniumsulfaat zal de landbouwer daarom extra aandacht moeten geven aan de kalkgift. Op basis van standaard vuistregels bedraagt de verzurende waarde van ammoniumsulfaat 300 kg CaO per 100 kg N en dit is hoger ten opzichte van andere stikstofmeststoffen zoals Urean (100 kg CaO per kg 100 N). Urean is een mengsel van ammoniumnitraat en ureum. Bij een stikstofgift van 80 kg N ha^{-1}, de limiet voor RENURE, betekent dit een jaarlijkse extra kalkbehoefte van 160 kg CaO ha^{-1} ofwel 300 kg kalkmeststof (kalk met 50% CaO). Bij inkoop in bulk kost dit circa 40-50 euro per hectare.

Het mengen van ammoniumsulfaat met dierlijke mest geeft bij opslag risico op de vorming van giftige zwavelgassen (H_2S). Deze gassen vormen zich wanneer sulfaat onder anaerobe condities door bacteriën wordt omgezet naar sulfide, waarbij het gas waterstofsulfide ontstaat. Het is daarom verboden om spuiwater bij te mengen bij drijfmest of mineralenconcentraat in een mestopslag.

3.4 Wat zijn de gevolgen van te veel bemesting met (zwavelhoudende) spuiwaters voor gewasgroei, diergezondheid en het milieu?

In hoofdstuk 2 staat een uitgebreidere toelichting op de landbouwkundige en milieukundige aspecten van zwavel.

Gewas en diergezondheid
Een overmaat aan zwavel in ruwvoer is schadelijk voor runderen. Het rantsoen van herkauwers (ruwvoer en krachtvoer) mag daarom niet meer dan 4 g S kg^{-1} bevatten. Voor graskuil geldt een streeftraject van 2 tot 5 g S kg^{-1-} droge stof. Met name op zandgrond is er behoefte aan zwavelbemesting op grasland vanwege de van nature lage zwavel levering van zandgrond. Bij bemestingen tot circa 50 kg S/ha blijft het zwavelgehalte in het gras binnen het streeftraject, maar bij zeer hoge zwavelgiften (260-380 kg S ha^{-1}) en in combinatie met een al voldoende hoge zwavelbeschikbaarheid van de bodem worden te hoge zwavelgehalten in het gras gevonden. Bij gebruik van RENURE binnen de gebruiksnorm van 80 kg N is er geen risico op te hoge zwavelgehalten in het gras tenzij de bodem zelf reeds veel zwavel levert. Deze situatie doet zich voor in veengronden (hoge zwavel levering door mineralisatie), in mariene gebieden waar sprake is van sulfaatrijk grondwater en wanneer naast RENURE ook andere zwavelhoudende meststoffen zoals gips gebruikt worden. Een grondonderzoek kan uitsluitel bieden over de zwavel levering vanuit de bodem. Het laten uitvoeren van graskuilanalyses op zwavel is bij gebruik van ammoniumsulfaatmeststoffen wenselijk om (zeer) hoge zwavelgehalten in graskuil op te sporen en hier bij samenstelling van de rantsoenen rekening mee te houden.

Op bouwland is er weinig onderzoek gedaan naar effecten van overmatige zwavelbemesting. Bemesting met gips is gangbaar op bouwland op klei. Omdat bekend is dat de meeste akkerbouwgewassen niet reageren op een zwavelbemesting, is er geen risico voor de gewassen door een overmaat aan zwavel.

Milieu
In RENURE is zwavel aanwezig in de vorm van sulfaat en dit is in de bodem zeer mobiel vanwege de lage binding aan minerale bodemdelen. Wanneer meer zwavel (in de vorm van sulfaat) wordt bemest dan door het gewas wordt opgenomen, ontstaat er een overschot aan sulfaat in de bodem en dit spoelt grotendeels binnen één winterseizoen uit naar het grondwater. Paragraaf 2.2.3. beschrijft enkele veldproeven in Nederland waarin de snelle uitspoeling van sulfaat in zandgronden na overmatige bemesting met zwavelhoudende meststoffen is aangetoond.

Effecten voor het milieu hangen af van het areaal waarop met zwavelhoudende meststoffen wordt bemest, de mate van overbemesting en de natuurlijke achtergrondconcentratie in het systeem (hoofdstuk 2).

In de zeekleigebieden en veengebieden zijn sulfaatconcentraties in uitspoelingswater en oppervlaktewater hoog, met name in gebieden met veenlagen en/of bodemlagen van marine oorsprong die van nature rijk zijn aan zwavel. Een verhoging van sulfaat door bemesting zal hier relatief weinig bijdragen aan de toch al hoge achtergrondconcentraties. In het van nature zwavelarme zandgebied zijn sulfaatconcentraties in uitspoelingswater relatief laag en is de bijdrage vanuit bemesting substantieel. Hoewel sulfaat geen directe ecologische gevolgen heeft, geldt er vanuit de KRW een verslechteringsverbod indien sulfaat is aangemerkt als een ondersteunende fysisch-chemische parameter. Sulfaat kan een negatieve invloed hebben op de oppervlaktewaterkwaliteit door de rol van sulfaat in de 'interne eutrofiëring' waarbij fosfaat vrijkomt. Sulfaatrijk kwelwater kan daarnaast leiden tot verzuring van kwel gevoede gebieden. Verder is een toename van sulfaatuitspoeling in drinkwatergebieden ongewenst vanwege kans op overschrijding van de norm voor sulfaat in drinkwater en toenemende hardheid van water wat leidt tot extra kosten voor drinkwaterbedrijven.

Op basis van een vereenvoudigde bodembalans is de extra sulfaatuitspoeling bij het gebruik van ammoniumsulfaat te schatten. Bij gebruik conform de RENURE-gebruiksnorm van 80 kg N ha^{-1} bedraagt de zwavelgift 90 kg S ha^{-1} en ligt daarmee boven de gewasonttrekking van grasland van circa 50 kg S ha^{-1}. We nemen aan dat het ammoniumsulfaat volgens een goede landbouwpraktijk wordt toegediend en gebruikt wordt in plaats van een huidige KAS-zwavel gift van 40 kg S ha^{-1} (het bemestingsadvies). De zwavelgift stijgt in dat geval met 50 kg S ha^{-1} ten opzichte van de referentiesituatie en vanwege de hoge mobiliteit van sulfaat in zandgronden, is het aannemelijk dat het overschot aan sulfaat grotendeels uitspoelt. We nemen hier aan dat 20% van het overschot accumuleert in de bodem (binding aan mineralen, opbouw organisch zwavel) en 80% de bodem verlaat via uitspoeling. Bij een neerslagoverschot van 300 mm per jaar geeft dit – op perceelsniveau – een stijging van de sulfaatconcentratie van 40 mg SO_4 L^{-1} in het bovenste grondwater ten opzichte van de huidige sulfaatconcentratie in het uitspoelingswater. Deze stijging vindt plaats op een beperkt areaal, omdat ten hoogste 25% van het grasland op zand, klei en löss bemest kan worden met ammoniumsulfaat, uitgaande van een hoge RENURE-productie. De gemiddelde sulfaatconcentratie – onder grasland – zal dan met ten hoogste 10 mg SO_4 L^{-1} stijgen.

De extra zwavelaanvoer middels RENURE wordt deels tenietgedaan door een lagere zwavelaanvoer vanuit dierlijke mest op grasland. Dit daalt van 44 naar 30 kg S ha^{-1} bij een gemiddeld zwavelgehalte in mest van 0,7 g S kg^{-1}. Dit is een daling van 14 kg S ha^{-1} op circa 800.000 hectare grasland (11 mln. kg S in Nederland). De geraamde extra zwavelaanvoer via RENURE, na vervanging van zwavelhoudende kunstmest, is geraamd op 16 mln. kg S (paragraaf 3.12.). Dierlijke mest bevat zwavel in organische vorm en het effect van aan lagere mestgift op de sulfaatuitspoeling komt daarom vertraagd tot uiting.

Het netto resultaat van deze ontwikkelingen is waarschijnlijk dat de gemiddelde sulfaatconcentratie in uitspoelingswater onder grasland in de tijd constant blijft of een licht stijgende trend vertoont. In gebieden waar het gebruik van RENURE bovengemiddeld is, kan er sprake zijn van stijgende trends in de sulfaatconcentraties in het grondwater.

3.5 Zijn er ervaringen in Denemarken en Duitsland waar aanzuren van mest als emissiereducerende maatregel is erkend? Zijn daar milieu- en of agronomische effecten bekend?

In Denemarken is aanzuren van mest in de kelder of tijdens het uitrijden geaccepteerd als emissiereducerende maatregel.[8] In Denemarken wordt circa 20% van alle drijfmest aangezuurd waarvan ca. 1/3 deel tijdens het uitrijden en 2/3 deel in de stal of mestopslag (Jensen et al., 2018). Het doel is om dit verder uit te breiden.[9] Er geldt een verplichting om dierlijke drijfmest emissiearm aan te wenden (het in de grond brengen bijvoorbeeld met een zodenbemester) óf de mest aan te zuren. Aangezuurde drijfmest mag aangewend worden met sleepvoetbemester. Het aanzuren van mest is daarmee een alternatief voor uitrijden van drijfmest met een zodenbemester.

De voorwaarden bij gebruik van aanzuren van mest zijn voorgeschreven in de Deense wet.[10] Daarbij wordt onderscheid gemaakt tussen dosering in de mestopslag en de dosering tijdens uitrijden. Bij dosering in de mestopslag moet de pH-waarde verlaagd worden tot pH 6 of lager.[11] Bij aanzuren tijdens het uitrijden moet de pH verlaagd worden naar pH 6,4 of lager. Er zijn wettelijke voorschriften voor de minimale hoeveelheid zwavelzuur die toegediend wordt.[12]
In Duitsland is het aanzuren van mest ook toegestaan als emissiereducerende techniek voor het uitrijden van mest waarbij een pH van <6,4 wordt aangehouden. Ook hier wordt aanzuren gebruikt in combinatie met sleepvoetbemesting en dus als alternatief voor mestinjectie. Het is niet bekend hoeveel mest wordt aangezuurd in Duitsland, maar vermoedelijk is dit beperkt.[13] Er loopt een aantal demonstratieprojecten naar het gebruik van aangezuurde mest waaronder Saure im Feld (www.saeureplus.de). De firma SyreN levert in Duitsland en Denemarken mestinjecteurs waarmee mest tijdens het aanrijden wordt aangezuurd en deze vermeldt een zuurdosering van 3 kg (1,7 L) zwavelzuur per m^3 runderdrijfmest (pH 6,0). Bij een stikstofgebruiksnorm van 170 kg N/ha, een stikstofgehalte in mest van 3,8 kg N/ton, geeft dit een zwavelgift van ca. 45 kg S/ha wat goed past bij de zwavelbehoefte van grasland.[14] In praktijkonderzoek in Denemarken bleek dat hogere zuurdoseringen nodig zijn, tussen 5,5 en 4,8 kg per m^3 runder- en varkensmest, om de beoogde pH-daling te bereiken (Jensen et al., 2014). Bij een hoger gehalte mineraal stikstof mag een hogere zuurbuffering verwacht worden en daarom kan de zuurbehoefte ook sterk verschillen tussen mesten. Bij deze zuurdoseringen wordt circa 75 tot 92 kg S ha^{-1} bemest uitgaande van gebruik tot 170 kg N ha^{-1} wat hoger is dan de zwavelbemestingsnorm voor grasland die oploopt tot 40 kg S ha^{-1}.

Zowel in Denemarken als in Duitsland zijn in enkele publicaties zorgen geuit rondom het gebruik van aangezuurde mest (Pedersen et al., 2022; Ellersiek et al., 2025). In Denemarken is in 2018 een verkennende studie uitgevoerd naar de mogelijke nadelige effecten van het gebruik van aangezuurde drijfmest op het bodemsysteem, zoals verzuring van de bodem, bodemleven en interactie met koper en zink. De auteurs zien op dat vlak geen risico's, temeer omdat het gangbare landbouwpraktijk is om de zuurgraad van landbouwgronden met bekalking op het gewenste niveau te houden. De auteurs beschrijven ook de risico's van sulfaatuitspoeling en een verhoogde sulfaataanvoer, wat in kwel gevoede wetlands kan leiden tot interne eutrofiëring (vrijkomen van fosfaat)). Dit risico wordt beperkt geacht, omdat de uitspoeling van

[8] https://eng.mst.dk/industry/agriculture/environmental-technologies-for-livestock-holdings/list-of-environmental-technologies/livestock-housing-system
[9] https://interreg-baltic.eu/project/baltic-slurry-acidi/
[10] Bekendtgørelse om jordbrugsvirksomheders anvendelse af gødning
[11] De mest in de opslag moet worden aangezuurd tot pH 5.5, en mag op moment van aanwending niet hoger zijn dan pH 6.0 (Jensen et al., 2018)
[12] De voorgeschreven hoeveelheid geconcentreerd zwavelzuur (96%) per ton mest bij aanzuren van mest in de opslag bedraagt 4,4 kg (2,4 L) per ton rundveedrijfmest, 5,7 kg (3,2 L) per ton varkensdrijfmest en 14 kg (7,8 L) bij digestaat of elke andere mestsoort. Bij aanzuren tijdens het uitrijden zijn lagere hoeveelheden zwavelzuur voorgeschreven namelijk 3 kg (1,7 L) per ton rundveemest, 2,9 kg (1,7 L) per ton varkensmest en 11 kg (6,1 L) per ton digestaat of elke andere mestsoort.
[13] https://www.ble.de/DE/Projektfoerderung/Foerderungen-Auftraege/Ackerbaustrategie/Guelleansaeuerung/Guelleansaeuerung_node.html
https://www.mestverwaarding.nl/kenniscentrum/2432/duitse-onderzoekers-zien-veel-perspectief-voor-aanzuren-van-mest?utm_source=chatgpt.com
[14] 96% zwavelzuur, dichtheid is 1,8 kg/L, molariteit 18 mol/L. Een dosering van 3 kg zwavelzuur per ton drijfmest is dan gelijk aan 1,7 L zwavelzuur. Dit staat gelijk aan 30 mol S en 0,96 kg S per ton drijfmest.

sulfaat in de winter plaatsvindt en er dan voldoende verdunning is en de microbiologische activiteit in de bodem laag is. Bovendien hangen deze effecten samen met het areaal waarop de verhoogde zwavelbemesting wordt toegepast en de hoogte van de zwavelgift. Omdat in Denemarken slechts 20% van de drijfmest wordt aangezuurd, is het areaal waarop aangezuurde mest gebruikt wordt, beperkt.

In Finland is veel onderzoek gedaan naar het gebruik van gips om fosfaat uitspoeling te verminderen. Hiermee zijn proeven gedaan waarbij een geheel stroomgebied werd bemest met gips (Ekholm et al., 2012). Dit leidde tot verhoogde sulfaatconcentraties in uitspoelend water. Om interne eutrofiëring te voorkomen, adviseerde men in Finland géén gips toe te passen wanneer het terechtkomt in stilstaand oppervlaktewater, omdat daar de kans op zuurstofloze condities in sediment hoog is. Bij gebruik van gips zijn de zwaveldoseringen vele malen hoger dan bij gebruik van ammoniumsulfaat.

3.6 Bij welk gebruik van spuiwaters (hoeveelheid per hectare) worden geen negatieve effecten verwacht?

Het gebruik van zwavelhoudende stikstofmeststoffen is veilig wanneer de zwavelgift past bij de gewasbehoefte. Zwavelbemestingsadviezen lopen uiteen van 0 tot ca. 40 kg S ha^{-1} op grasland. Op bouwland is een zwavelbemesting voor de meeste gewassen niet nodig. Wanneer het bemestingsadvies als richtlijn wordt aangehouden en spuiwater het huidige gebruik van zwavelhoudende kunstmeststoffen vervangt, mag verwacht worden dat de uitspoeling van sulfaat niet toeneemt ten opzichte van de huidige situatie. Dit betekent dat giften van ca. 40 kg N ha^{-1} in de vorm van ammoniumsulfaat goed passen en veilig zijn. Deze giften worden bij voorkeur in het voorjaar gegeven wanneer de zwavel levering vanuit de bodem nog laag is. Mineralenconcentraat bevat gemiddeld minder zwavel per kg stikstof, waardoor een hogere stikstofgift inpasbaar is binnen de zwavelbehoefte. Wel moet het zwavelgehalte bij de afnemer bekend zijn, zodat de afnemer hier rekening mee kan houden. Er is nu geen verplichting om het zwavelgehalte van RENURE-meststoffen te vermelden.

In gebieden met van nature hoge sulfaatconcentraties in het grondwater, zoals veengronden en zeekleigronden, is de bijdrage van bemesting aan de zwavelconcentratie in het grondwater beperkt. Vanuit die redenatie kunnen hogere zwavelgiften acceptabel zijn. Echter, op veengronden wordt het gebruik van zwavelhoudende meststoffen echter afgeraden om te hoge zwavelgehalten in het gras te voorkomen. Op kalkrijke zeekleigronden kan een zwavelhoudende meststof gebruikt worden, maar is een emissiearme toediening van ammoniumsulfaat gewenst om hoge verliezen door ammoniakemissies te voorkomen. Dit omdat oppervlakkige toediening van ammoniumsulfaat op kalkrijke gronden kan leiden tot hoge emissies door een reactie tussen sulfaat en kalk (Powlson et al., 2020; Regelink et al., 2025).

3.7 Zijn er andere zuren die beter toegepast kunnen worden dan zwavelzuur? Wat zijn gevolgen daarvan zowel economisch, milieutechnisch als agronomisch?

Zwavelzuur is veruit het meest gebruikte zuur in luchtwassers in veestallen en stikstofscrubbers bij mestverwerkingsinstallaties. Zwavelzuur is relatief goedkoop en relatief veilig is in gebruik. Er is vanuit de praktijk wel aandacht voor de ontwikkeling van alternatieve methoden, met name gedreven door de lage afzetprijzen voor ammoniumsulfaatoplossingen als gevolg van het toenemende aanbod.

In 2011 is er een verkennend onderzoek gedaan naar mogelijke alternatieven voor zwavelzuur in luchtwassers. De alternatieven blijken beperkt. Op basis van effectiviteit en veiligheid bij gebruik in luchtwassers, werd citroenzuur geopperd als mogelijk alternatief (Starmans en Melse, 2011), maar de aankoopprijs van deze organische zuren is echter hoger dan zwavelzuur. Daarnaast zijn organische zuren biologisch afbreekbaar en het is onbekend of deze oplossingen langdurig stabiel zijn bij opslag. Bemesting met een ammonium vastgelegd in citroenzuur of zwavelzuur liet geen verschillen zien in wintertarwe (Ellenriek et al., 2025).

Salpeterzuur (HNO_3) wordt vaak genoemd als alternatief voor zwavelzuur. Salpeterzuur is evenals zwavelzuur zeer effectief in het binden van ammonium. Bij het gebruik van salpeterzuur ontstaat een ammoniumnitraat (NH_3NO_3) dat geen zwavel bevat en waarbij stikstof voor de helft afkomstig is vanuit het salpeterzuur. Ammoniumnitraat is naar verwachting goed afzetbaar in landbouw. Ook zijn er perspectieven voor afzet naar de glastuinbouw. Nadelen van salpeterzuur zijn de fors hogere aankoopkosten en de extra aandachtspunten t.a.v. veiligheid. Starmans en Melse (2011) raden het gebruik van salpeterzuur af omwille van veiligheidsrisico's bij gebruik in luchtwassers. Salpeterzuur is sterk oxidatief en kan zeer giftige nitreuze dampen vormen, bijvoorbeeld bij verhitting, het mengen van salpeterzuur met zwavelzuur of bij de opslag van salpeterzuur in vaten van niet-bestendige metalen. Het werken met salpeterzuur vraagt om extra veiligheidsmaatregelen bij de opslag en verwerking van de stof en stelt extra eisen t.a.v. het materiaalgebruik in installaties. In grootschalige industriële omgevingen zal het makkelijker zijn om aan deze extra eisen te voldoen dan bij installaties op het boerenerf.

De verwachting is dat zwavelzuur het meest gangbare zuur blijft. Een overproductie van ammoniumsulfaatmeststoffen kan een stimulans vormen om het duurdere salpeterzuur te gaan gebruiken. Anderzijds kan ammoniumsulfaat bij overproductie ook goed buiten Nederland worden afgezet. De nieuwe Europese Meststoffenverordening biedt mogelijkheden om ammoniumzouten uit mest en andere bronnen met een CE-keurmerk te verhandelen binnen Europa. Ook zijn er ontwikkelingen op het gebied van het kristalliseren van ammoniumsulfaat uit spuiwater waarbij een vaste ammoniumsulfaat meststof ontstaat. Een vaste stof is eenvoudig te vervoeren over lange afstanden en kan gebruikt worden als grondstof voor de productie van minerale meststoffen.

Een andere ontwikkeling is biologische omzetting van ammoniawater uit meststrippers tot ammoniumnitraat. Ammoniawater wordt hierbij verdund en belucht waarbij bacteriën ammonium oxideren tot nitraat. Dit is een verzurende reactie waardoor de pH daalt waardoor de omzetting weer wordt geremd. Om dit te voorkomen, wordt de pH gestuurd door toevoeging van kalkmelk of kaliloog. Het eindproduct is een calcium-ammonium-nitraat of kalium-ammonium-nitraat vloeistof. Dit zijn zeer gangbare meststoffen in de land- en tuinbouw die – mits in voldoende geconcentreerde vorm – een positieve marktwaarde kennen. Kosten zijn relatief hoog vanwege het energieverbruik van de beluchting en voor het op-concentreren. Dit proces is bekend onder de merknaam GreenSwitch. Er zijn diverse bedrijven die op pilotschaal experimenteren met vergelijkbare processen, waaronder RWB als onderdeel van het PPS-project NitriNure.

4 Conclusies

RENURE-meststoffen bevatten, door het gebruik van zwavelzuur en soms ijzersulfaat, meer zwavel dan onbewerkte dierlijke mest. Vooral het ammoniumsulfaat (ca. 1,1 kg S per kg N) kan leiden tot aanzienlijke zwavelgiften. Bij mineralenconcentraat varieert het zwavelgehalte sterk tussen producten van verschillende producenten. RENURE is met name geschikt voor grasland, waar zwavelbemesting in het voorjaar gangbare praktijk is. Het gebruik van zwavelhoudende meststoffen op veengrond wordt afgeraden om te hoge zwavelgehalten in het gras te voorkomen.

Bij een geraamde productie van 19 mln. kg N als mineralenconcentraat en 14 mln. kg N als ammoniumsulfaat kan ca. 43% van het graslandareaal tot de RENURE-norm van 80 kg N ha^{-1} worden bemest. Dit gaat gepaard met een geschatte aanvoer van ca. 24 mln. kg S, wat hoger is dan het huidige vervangbare gebruik van zwavelhoudende stikstofkunstmest. Daarentegen daalt de aanvoer van zwavel uit dierlijke mest door het wegvallen van derogatie en dit compenseert deels de geraamde extra zwavelaanvoer. Lokaal kan het gebruik van RENURE wel leiden tot een toename in de sulfaatconcentratie in het bovenste grondwater, uitgaande van een hoge geraamde RENURE-productie. Invoering van de RENURE-gebruiksnorm van 80 kg N ha^{-1} is effectief in het beperken van de zwavelaanvoer naar grasland.

De milieueffecten verschillen sterk per grondsoort. In veen- en zeekleigronden zijn sulfaatconcentraties van nature hoog en speelt bemesting nauwelijks een rol; op zand- en lössgronden is het risico op extra uitspoeling en negatieve effecten (zoals interne eutrofiëring, verzuring en toenemende hardheid van grondwater voor drinkwaterproductie) groter. Daarom is vooral op zand- en lössgronden gewenst om het gebruik aan zwavelhoudende meststoffen beter in beeld te krijgen en eventuele effecten op de sulfaatconcentratie tijdig te signaleren.

Omdat zowel de toekomstige productie en samenstelling van RENURE als het huidige gebruik van zwavelhoudende meststoffen erg onzeker is, blijft ook de inschatting van effecten op zwaveloverschotten en sulfaatconcentraties in uitspoelingswater met aanzienlijke onzekerheden omgeven.

5 Aanbevelingen

- Zwavelgehalten in RENURE-meststoffen kunnen sterk variëren afhankelijk van het productieproces, maar deze informatie is voor de ontvanger niet zichtbaar op de afleverbon. Voorlichting aan gebruikers over gemiddelde zwavelgehalten in RENURE-meststoffen of het laten vermelden van het zwavelgehalte door de producent kan bijdragen aan een bewuster gebruik van zwavelhoudende RENURE-meststoffen.
- Het regelmatig evalueren van trends van sulfaatconcentraties in grond- en oppervlaktewater en het gebruik van zwavelhoudende mest- en reststoffen, zodat stijgende sulfaatconcentraties kunnen worden waargenomen en tijdig maatregelen kunnen worden getroffen. Gedacht kan worden om zwavel als onderdeel op te nemen in de evaluaties van het mestbeleid.

Literatuur

Adani, F., Clagnan, E., Rodríguez, R., Guerra Gorostegui, N., Mora, M., Llenas, L., Sigurnjak, I., Vingerhoets, R., van Dijk, K., Schoumans, O., Thevenin, N., Ruidavets, L., Schönfeld, S., 2023. D2.6. Mass and energy balance of the on-farm pilots to WP5, FERTIMANURE. Central University of Catalonia, Catalonia, Spain. http://hdl.handle.net/10854/8584

Aspel, C., Murphy, P. N., McLaughlin, M. J. & Forrestal, P. J. 2022. Sulfur fertilization strategy affects grass yield, nitrogen uptake, and nitrate leaching: A field lysimeter study#. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science,* **185,** 209-220.

Aggenbach, C.J.S., 2021. Duurzaamheid van basenminnende schraallanden in kwelzones. Monitoring 1989-2020 Stroothuizen, Punthuizen en Lemselermaten. Rapport nummer OBN-28-BE*, VBNE, Driebergen.*

Bussink, D. & Den Boer, D. 2000. Sulphur fertilization on grassland in relation to crop yield and nitrogen use efficiency. *Sulphur fertilization on grassland in relation to crop yield and nitrogen use efficiency.***,** 68-70.

Brand, E., A.J. Baars, E.M.J. Verbruggen, J.P.A. Lijzen. Afleiding van milieurisicogrenzen voor sulfaat in oppervlaktewater, grondwater, bodem en waterbodem RIVM Briefrapport 711701069/2008

CBAV, 2025. Bemestingsadvies. Commissie Bemesting Akkerbouw/Vollegrondsgroenteteelt. https://www.handboekbodemenbemesting.nl/

CBGV, 2025. Bemestingsadvies. Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen. https://www.bemestingsadvies.nl/

Commissie Deskundigen Meststoffenwet, 2014, Advies zwavelhoudende meststoffen.

Commissie Onderzoek Minerale Voeding 2005. *Handleiding mineralenvoorziening rundvee, schapen, geiten,* CVB, Centraal Veevoederbureau, Lelystad.

Cirkel, D.G., Van Beek, C.G.E.M., Witte, J.P.M., Van der Zee, S.E.A.T.M. Sulphate reduction and calcite precipitation in relation to internal eutrophication of groundwater fed alkaline fens. Biogeochemistry (2014) 117

Degryse, F., da Silva, R. C., Baird, R., Beyrer, T., Below, F., & McLaughlin, M. J. (2018). Uptake of elemental or sulfate-S from fall-or spring-applied co-granulated fertilizer by corn—A stable isotope and modeling study. *Field Crops Research*, **221**, 322–332.

Ehlert, P. (2022). Pilot Biobased Fertilisers Achterhoek: synthesis report monitoring program Wageningen Environmental Research. (Report / Wageningen Environmental Research; No. 3167). Wageningen Environmental Research. https://doi.org/10.18174/571507

Ehlert, P.A.I. en W.J. Chardon, 2014. *Veranderingen van de zwavelbalans van de Nederlandse bodem. Beantwoording van een helpdeskvraag.* Wageningen, Alterra Wageningen UR (University & Research centre), Alterra-rapport 2516. 48 blz.; 7 fig.; 6 tab.; 59 ref.

Ekholm, P., Ollikainen, M., Punttila, E., Ala-Harja, V., Riihimäki, J., Kiirikki, M., Taskinen, A. & Begum, K. 2024. Gypsum amendment of agricultural fields to decrease phosphorus losses – Evidence on a catchment scale. *Journal of environmental management,* **357,** 120706. doi:https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120706.

Ekholm, P., Valkama, P., Jaakkola, E., Kiirikki, M., Lahti, K. & Pietola, L. 2012. Gypsum amendment of soils reduces phosphorus losses in an agricultural catchment. *Agricultural and Food Science,* **21,** 279-291.

Ellersiek, N. C. T., Broll, G., & Olfs, H. W. (2024). Effects of Sulfuric and Citric Acid for Slurry Acidification on Winter Wheat Yield, N-and S-Balance. *Journal of Agricultural Science*, *17*(1), 1-1.

Emmerling, C.; Krein, A.; Junk, J. Meta-analysis of strategies to reduce NH_3 emissions from slurries in European agriculture and consequences for greenhouse gas emissions. *Agronomy* **2020**, *10*, 1633

Emmerling, C., Krein, A. & Junk, J. 2020. Meta-analysis of strategies to reduce NH3 emissions from slurries in European agriculture and consequences for greenhouse gas emissions. *Agronomy,* **10,** 1633.

Ercoli, L., Arduini, I., Mariotti, M., Lulli, L., & Masoni, A. (2012). Management of sulphur fertiliser to improve durum wheat production and minimise S leaching. *European Journal of Agronomy*, *38*, 74-82.

Eriksen, J., M Askegaard. 2000. Sulphate leaching in an organic crop rotation on sandy soil in Denmark, Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 78, Issue 2, https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00117-6.

Eriksen, K. Thorup-Kristensen, 2002. The effect of catch crops on sulphate leaching and availability of S in the succeeding crop on sandy loam soil in Denmark, Agriculture, Ecosystems & Environment, Volume 90, Issue 3. https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00214-6.

Fangueiro, D., Hjorth, M. & Gioelli, F. 2015. Acidification of animal slurry–a review. *Journal of environmental management,* **149,** 46-56.

Fraters, B; de Goffau, A. 2014. Sulfaat in grondwater en oppervlaktewater in Nederland. Overzicht van meetresultaten van nationale meetnetten. RIVM Briefrapport 2014-0120

Gierus, M., Jahns, U., Wulfes, R., Wiermann, C. & Taube, F. 2005. Forage quality and yield increments of intensive managed grassland in response to combined sulphur-nitrogen fertilization. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science,* **55,** 264-274.

Gerven, van, L.P.A,; R.F.A. Hendriks, J. Harmsen, V. Beumer en P.W. Bogaart, 2011. Nalevering van fosfor naar het oppervlaktewater vanuit de waterbodem; Metingen in een veengebied in de Krimpenerwaard. Wageningen, Alterra, Alterra rapport 2217. 54 blz.; 22 fig.; 5 tab.; 29 ref.

Hendriks, J. & Vrielink, M. 1996. Aanzuren van vleesvarkensmest met micro - organismen. In: *Praktijkonderzoek varkenshouderij 10 (3): 10 - 11.* 1996.

Honig E., et al., 2025. Methodology to calculate industrial emissions into the air from the energy, industry and waste sectors. RIVM rapport 2025-0002

Hutchings, N., Webb, J. & Amon, B. 2019. *3.D. Crop production and agricultural soils, in EEA (Eds.) "EMEP/EEA air pollutant emission inventory Guidebook 2019",* European Environmental Agency, Luxembourg.

Huygens, D., Orveillon, G., Lugato, E., Tavazzi, S., Comero, S., Jones, A., Gawlik, B. & 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). *JRC121636***,** 170.

Jensen, J., 2018 POTENTIELLE MILJØEFFEKTER VED ANVENDELSE AF FORSURET GYLLE PÅ LANDBRUGSJORD (MOGELIJKE MILIEUGEVOLGEN VAN HET GEBRUIK VAN VERZURE MEST OP LANDBOUWGROND). Aarhus Universiteit N257 http://dce2.au.dk/pub/SR257.pdf

Johnson, J., Graf Pannatier, E., Carnicelli, S., Cecchini, G., Clarke, N., Cools, N., Hansen, K., Meesenburg, H., Nieminen, T. M. & Pihl-Karlsson, G. 2018. The response of soil solution chemistry in European forests to decreasing acid deposition. *Global change biology,* **24,** 3603-3619.

Khan, F., Franco-Luesma, S., Janz, B., Dannenmann, M., Gasche, R., Gattinger, A., ... & Wolf, B. (2025). Effect of slurry bio-acidification and leonardite addition on ammonia and greenhouse gas emissions in soil-plant mesocosms. *Journal of Cleaner Production*, 145753.

Klein, H., Gauss, M., Tsyro, S. & Nyíri, Á. 2023. Transboundary Air Pollution by Sulphur, Nitrogen, Ozone and Particulate Matter in 2021, Country Report The Netherlands. In., Norwegian Meteorological Institute.

Kowalenko, C. 2004. Response of forage grass to sulphur applications on coastal British Columbia soils. *Canadian journal of soil science,* **84,** 227-236.

Kulczycki, G., Sacała, E., Koszelnik-Leszek, A. & Milo, Ł. 2023. Perennial Ryegrass (Lolium perenne L.) Response to Different Forms of Sulfur Fertilizers. *Agriculture,* **13,** 1773.

Lamers, L. P., Dolle, G. E. T., Van Den Berg, S. T., Van Delft, S. P. & Roelofs, J. G. 2001. Differential responses of freshwater wetland soils to sulphate pollution. *Biogeochemistry,* **55,** 87-101.

Lamers, L. P., Tomassen, H. B. & Roelofs, J. G. 1998. Sulfate-induced eutrophication and phytotoxicity in freshwater wetlands. *Environmental science & technology,* **32,** 199-205.

Masselink, N. J., Jeths, R., & Wattel-Koekkoek, E. J. W. (2012). TrendMeetnet Verzuring: Monsternemingen in 2009/2010/2011.

Mathot, M., Mertens, J., Verlinden, G. & Lambert, R. 2008. Positive effects of sulphur fertilisation on grasslands yields and quality in Belgium. *European Journal of Agronomy,* **28,** 655-658.

Mathot, M., Thélier-Huché, L. & Lambert, R. 2009. Sulphur and nitrogen content as sulphur deficiency indicator for grasses. *European Journal of Agronomy,* **30,** 172-176.

Melse, R. W., Starmans, D. A. J. & Ogink, N. 2015. Aanzuursystemen voor rundveedrijfmest in stallen. In., Wageningen UR Livestock Research, Wageningen.

Meuffels, G. & van der Voort, M. 2011. Onderzoek zwavelbemesting winterkoolzaad: resultaten onderzoek 2010 en 2011. In., PPO AGV.

National Research Council, Earth, D. o., Studies, L., Agriculture, B. o., Minerals, C. o., Diets, T. S. i. & Animals, W. f. 2006. *Mineral tolerance of animals: 2005,* National Academies Press.

NCM, 2025. Landelijke rapportage en inventarisatie export en verwerking dierlijke mest.

Paauw, J. 2005. Zwavelbemesting in zetmeelaardappelen 2004: op zandgrond. In., Praktijkonderzoek Plant & Omgeving.

Pedersen, J., & Nyord, T. (2023). Effect of low-dose acidification of slurry digestate on ammonia emissions after field application. *Atmospheric Environment: X*, *17*, 100205.

Powlson, D.S.; Dawson, C.J. 2020. Use of ammonium sulphate as a sulphur fertilizer: Implications for ammonia volatilization. Soil Use and Management 38. DOI: 10.1111/sum.12733

Rantamo, K., Arola, H., Aroviita, J., Hämälainen, H., Hannula, M., Laaksonen, R., Laamanen, T., Leppänen, M. T., Salmelin, J. & Syrjänen, J. T. 2022. Risk assessment of gypsum amendment on agricultural fields: Effects of sulfate on riverine biota. *Environmental Toxicology and Chemistry,* **41,** 108-121.

Regelink, I., van Dijk, W., van Geel, W. & Huijsmans, J., 2025, Wageningen: Wageningen Environmental Research. 27 p. Beantwoording kennisvraag 'emissiearme aanwending van spuiwater, vloeibare stikstofmeststoffen en ureummeststoffen' WUR notitie. https://edepot.wur.nl/707000

Regelink, I. C., van Puffelen, J. L., Ehlert, P. A. I., & Schoumans, O. F. (2021). Evaluatie van verwerkingsinstallaties voor mest en co-vergiste mest. (Rapport / Wageningen Environmental Research; No. 3120). Wageningen Environmental Research. https://doi.org/10.18174/554452

Rietra, R., P.G. Dijk, J.P. Van t Hull. 2023. Bodem als indicator. Wageningen Environmental Research Report 3180.

Rietra, R., K. van Dijk, O. Schoumans. 2024. Environmental effects of using ammonium sulfate from animal manure scrubbing technology as fertilizer (submitted)

Reijneveld, J., Abbink, G., Termorshuizen, A. & Oenema, O. 2014. Relationships between soil fertility, herbage quality and manure composition on grassland-based dairy farms. *European Journal of Agronomy,* **56,** 9-18.

Schils, R. 2016. 30 vragen en antwoorden over zwavel. Wageningen, Alterra. https://doi.org/10.18174/392373

Schreiber, M., Bazaios, E., Ströbel, B., Wolf, B., Ostler, U., Gasche, R., ... & Dannenmann, M. (2023). Impacts of slurry acidification and injection on fertilizer nitrogen fates in grassland. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *125*(2), 171-186.

Schoot, J. R. v. d. & Borm, G. E. L. 2007. Zwavelbemesting graszaad Engels raaigras: effect van zwavelbemesting op opbrengst en kwaliteit van Engels raaigras bestemd voor zaadproductie, Oogst 2006 en meerjarenanalyse. In., Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Lelystad.

Smolders, A., Lamers, L., Lucassen, E., Van der Velde, G. & Roelofs, J. 2006. Internal eutrophication: how it works and what to do about it—a review. *Chemistry and ecology,* **22,** 93-111.

Starmans, D. A. J. & Melse, R. W. 2011. Alternatieven voor zwavelzuur in chemische luchtwassers = Alternatives for the use of sulphuric acid in air scrubbers. In., Wageningen UR Livestock Research, Lelystad.

Stewart, D., Cameron, K., Cornforth, I. et al. Release of sulphate-sulphur, potassium, calcium and magnesium from spent mushroom compost under field conditions. *Biol Fertil Soils* **31**, 128–133 (2000). https://doi.org/10.1007/s003740050635

Suttle, N. F. 2022. *Mineral nutrition of livestock,* Cabi.

ten Huf, M., Reinsch, T., Zutz, M., Essich, C., Ruser, R., Buchen-Tschiskale, C., Flessa, H. & Olfs, H. W. (2023). Effects of liquid manure application techniques on ammonia emission and winter wheat yield. *Agronomy*, *13*(2), 472.

Van Dijk, W. 2025. RENURE. Presentatie Themamiddag CBAV-CBGV 6 februari 2025, De Schakel, Nijkerk. https://www.bemestingsadvies.nl/wp-content/uploads/2025/10/Presentatie-Themadag-6-feb-2025-Wim-van-Dijk-def.pdf

van Bruggen, C., Bannink, A., Bleeker, A., Bussink, D., van Dooren, H., Groenestein, C., Huijsmans, J., Kros, J., Lagerwerf, L. & Oltmer, K. 2023. Emissies naar lucht uit de landbouw berekend met NEMA voor 1990-2021. In., Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Wageningen UR.

van der Schoot, J. R., Borm, G. & van Dijk, W. 2007. Sulphur fertilization in seed crops of Lolium perenne. *Seed production in the northern light***,** 252.

Varcoe, J., van Leeuwen, J. A., Chittleborough, D. J., Cox, J. W., Smernik, R. J. & Heitz, A. 2010. Changes in water quality following gypsum application to catchment soils of the Mount Lofty Ranges, South Australia. *Organic Geochemistry,* **41,** 116-123.

Velthof, G.L.; Ehlert, P.A.I.; Schroder, J.J.; Curth-van Middelkoop, J.C. Application of Mineral Concentrates from Processed Manure. *Biorefinery of Inorganics: Recovering Mineral Nutrients from Biomass and Organic Waste* **2020**.

Vermaat, J., J. Harmsen, F. Hellman, H. van der Geest, J. de Klein, S. Kosten, F. Smolders, J. Verhoeven. 2012. Zwaveldynamiek in het West-Nederlandse laagveengebied. Vrije Universiteit Amsterdam, AE-12/01 https://edepot.wur.nl/237652

Webb, J., Jephcote, C., Fraser, A., Wiltshire, J., Aston, S., Rose, R., Vincent, K. & Roth, B. 2016. Do UK crops and grassland require greater inputs of sulphur fertilizer in response to recent and forecast reductions in sulphur emissions and deposition? *Soil Use and Management,* **32,** 3-16.

Zak, D., Hupfer, M., Cabezas, A., Jurasinski, G., Audet, J., Kleeberg, A., McInnes, R., Kristiansen, S. M., Petersen, R. J. & Liu, H. 2021. Sulphate in freshwater ecosystems: A review of sources, biogeochemical cycles, ecotoxicological effects and bioremediation. *Earth-Science Reviews,* **212,** 103446.

Zhao, F., Fortune, S., Barbosa, V., McGrath, S. P., Stobart, R., Bilsborrow, P. E., Booth, E., Brown, A. & Robson, P. 2006. Effects of sulphur on yield and malting quality of barley. *Journal of Cereal Science,* **43,** 369-377.

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



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 0317 48 07 00
wur.nl/environmental-research

Rapport 3507
ISSN 1566-7197

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.900 medewerkers (7.100 fte), 2.500 PhD- en EngD-kandidaten, 12.700 studenten en 80.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.