



Kennisvragen Nutriëntenkringloop & Bodemvruchtbaarheid

Cijfers en inzichten ten behoeve van de transitieagenda voor de Werkgroep Nutriëntenkringloop & Bodemvruchtbaarheid

R.P.J.J. Rietra en O. Oenema



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Kennisvragen Nutriëntenkringloop & Bodemvruchtbaarheid

Cijfers en inzichten ten behoeve van de transitieagenda voor de Werkgroep Nutriëntenkringloop & Bodemvruchtbaarheid

R.P.J.J. Rietra en O. Oenema

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Environmental Research (Alterra) in opdracht van en gefinancierd door het ministerie van Economische Zaken, in het kader van het Beleidsondersteunende onderzoeksthema 'Mest en Milieu' (projectnummer BO-20-004-138).

Wageningen Environmental Research
Wageningen, januari 2018

Rapport 2862
ISSN 1566-7197


R.R.J.J. Rietra en O. Oenema, 2018. *Kennisvragen Nutriëntenkringloop & Bodemvruchtbaarheid; Cijfers en inzichten ten behoeve van de transitieagenda voor de Werkgroep Nutriëntenkringloop & Bodemvruchtbaarheid*. Wageningen, Wageningen Environmental Research, Rapport 2862. 38 blz.; 8 fig.; 10 tab.; 116 ref.

Vanwege de gelimiteerde voorraden aan winbare grondstoffen is het nodig om de verliezen zo klein mogelijk te maken en kringlopen te sluiten. Aangezien de landbouw een belangrijke rol speelt in de nutriëntenbalansen voor stikstof en fosfor, is onderzocht wat de rol van de landbouw is bij andere nutriënten. In dit beknopte rapport worden de belangrijkste verliesposten samengevat en worden opties genoemd voor het sluiten van kringlopen.

Due to the limited quantities of mineable resources it is necessary to decrease the losses and close the nutrient cycles. Agriculture is known to be very important for the nutrient flows of nitrogen and phosphorous, and therefore the role of agriculture for the flows of other nutrients has been investigated. In this quick scan the most important nutrient losses and options to close nutrient cycles are summarized.

Trefwoorden: bodem, nutriënten, kringloop, transitie

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/436518> 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.

 2018 Wageningen Environmental Research (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, E info.alterra@wur.nl, 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 Rapport 2862 | ISSN 1566-7197

Foto omslag: Shutterstock

Inhoud

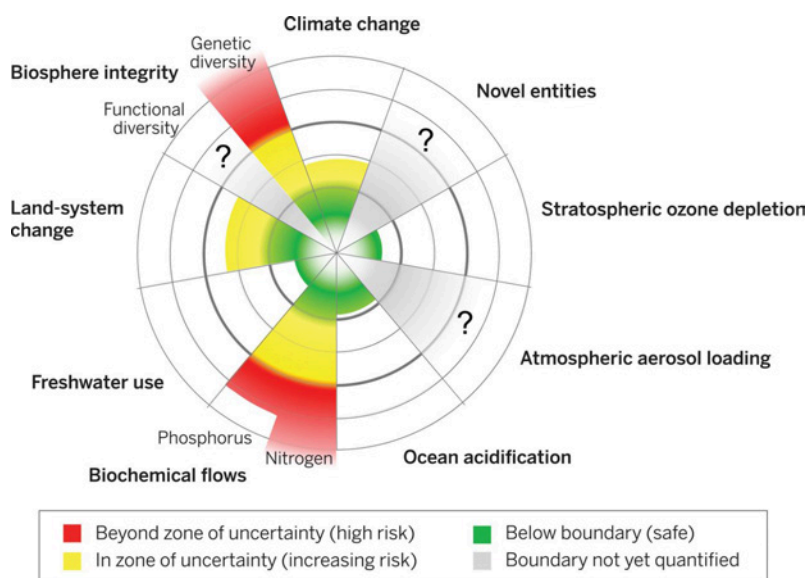
1	Inleiding	5
	1.1 Achtergrond	5
	1.2 Probleem	6
	1.3 Vragen	6
	1.4 Doelstelling van onderhavige studie	7
2	Resultaten	8
	2.1 Balansen voor nutriënten	8
	2.2 Fosfaatverlies	17
	2.3 Stikstofverlies	19
	2.4 Toepassingen van mest buiten de landbouw	20
	2.5 Opties voor nutriëntenrecycling	20
	2.6 Is kringloop mogelijk	25
	2.7 Potentiële afzetmarkten voor herwonnen nutriënten	27
	2.8 Perspectieven	27
3	Conclusies	29
	Literatuur	32

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Bodemvruchtbaarheid is meestal gedefinieerd als de productiecapaciteit van de bodem of als het nutriëntenleverend vermogen van de bodem. Bodemvruchtbaarheid is van belang voor boeren vanwege de invloed op de productiecapaciteit van het land, en voor de samenleving vanwege de invloed van bodemvruchtbaarheid op voedselproductie, waterberging en waterkwaliteit, biodiversiteit en de emissies van broeikasgassen. In het algemeen wordt de bodemvruchtbaarheid bepaald door het moedermateriaal, het klimaat, de vegetatie (bouwplan), de bemestingsgeschiedenis en het management. Indirect wordt de bodemvruchtbaarheid beïnvloed door de economie en het beleid op het gebied van landbouw, meststoffen, energie en voedsel.

Het sluiten van nutriëntenkringlopen is een belangrijk thema (Tilman *et al.*, 2002; TCB, 2010), dat invloed heeft op de bodemvruchtbaarheid. Recente studies geven aan dat de verliezen van stikstof en fosfaat naar het milieu fors groter zijn dan de planeet aarde kan absorberen; de verliezen van stikstof en fosfaat overschrijden de zogenoemde 'planetary boundaries for a safe earth' (Rockström *et al.*, 2009; Steffen *et al.*, 2015). Ook het verlies aan (genetische) biodiversiteit heeft de 'planetary boundaries' overschreden het verlies aan biodiversiteit is deels te wijten aan teveel stikstof en fosfaat in het milieu. Het overschrijden van de planetary boundaries betekent onder andere dat de verliezen van stikstof en fosfaat verminderd dienen te worden tot meer aanvaardbare niveaus. Het verminderen van verliezen van stikstof en fosfaat, en het verhogen van de benutting, zijn ook nodig omdat de voorraden ruwfosfaat beperkt zijn en het produceren van stikstof zeer energie-intensief is. Ruwfosfaat wordt gebruikt voor de productie van fosfaatkunstmest; bij het huidige gebruik raken de voorraden uitgeput in 300-400 jaar (Van Kauwenbergh, 2010). De huidige stikstofkunstmestproductie consumeert circa 1.2% van het jaarlijkse fossiele energiegebruik in de wereld (Fischelick M. & E. Santalla, 2014). Ook de voorraden fossiele energie zijn eindig (Steffen *et al.*, 2015).



Figuur 1 Concept van 'planetary boundaries'.

Er is een Rijksprogramma Circulaire Economie, met daarin de Transitieagenda Biomassa en Voedsel. Deze stelt als doel het sluiten van nutriënten kringlopen en een optimale bodemvruchtbaarheid. De adhoc Werkgroep Nutriënten & Bodemvruchtbaarheid heeft hiervoor hun standpunten beschreven (WerkgroepNutriëntenkringloop&Bodemvruchtbaarheid, 2017).

Ook andere overheden en organisaties zijn met deze thema's bezig. Zo streven de diervoederproducenten naar het zoveel mogelijk sluiten van kringlopen in ketens, met minimale emissies naar de omgeving van (Nevedi, 2016). De Dutch Biorefinery Cluster heeft aangegeven dat de afzetmogelijkheden voor reststromen uit agrofood industrie als meststoffen in de landbouw steeds beperkter zijn geworden, vooral door de gebruiksnormen voor stikstof en fosfaat (DBC, 2017). Aan de andere kant zijn in de Uitvoeringsregeling Meststoffenwet (LNV, 2005)(Bijlage Aa) sinds 2009 een groeiend aantal reststoffen (>150 in 2017) toegelaten als meststof of grondstof voor de landbouw.

In de loop van 2018 volgt een besluit over de herziening van de Europese Meststoffenverordening. In deze herziening wordt voorgesteld om de eisen ten aanzien van organische meststoffen, bodemverbeteraars en groeimedia te harmoniseren binnen de EU. Het bevorderen van bodemverbeterende maatregelen is een onderdeel van het 6^e Nitraat Actieprogramma (van Dam, 2017). Dit Actieprogramma is een belangrijke verplichting in het kader van de Europese Nitraatrichtlijn. Dat programma kan het gebruik van bodemverbeterende meststoffen en groenbemesters, en de kennisontwikkeling over bodemverbeteraars stimuleren. Hierdoor kan het hergebruik van reststoffen als meststoffen verhoogd worden, en het gebruik van kunstmeststoffen verkleind worden.

1.2 Probleem

Het huidige verkwistende gebruik van stikstof en fosfaat in het voedselsysteem is niet houdbaar voor de langere termijn. Er is een transitie nodig naar het verminderen van verliezen en naar een groter hergebruik van stikstof en fosfaat in reststoffen en afval(water). Op dit moment is er onvoldoende kwantitatief inzicht in de mogelijkheden om de verliezen van stikstof en fosfaat uit het voedselsysteem in Nederland drastisch te verminderen en de benutting van stikstof en fosfaat in reststoffen en afval drastisch te verhogen.

1.3 Vragen

De adhoc Werkgroep Nutriënten & Bodemvruchtbaarheid heeft een zevental vragen geformuleerd waarop zij graag een antwoord wil zien. De vragen zijn hieronder weergegeven.

1. Balans voor nutriënten

Hoe ziet de balans van kalium en micronutriënten er uit?

2. Fosfaatverlies

Wat is er voor nodig om het verlies van fosfaat naar de bodem structureel naar nul te brengen, en in de bodems die nu een te hoog fosfaatgehalte hebben een 'negatief verlies' naar de bodem te realiseren?

3. Stikstofverlies

Hoe ver kan het verlies van stikstof naar de bodem worden teruggedrongen en wat zijn de meest kansrijke mogelijkheden om dat te realiseren?

4. Toepassingen van mest buiten de landbouw

Wat zijn 'toepassingen van mestafzet buiten de landbouw', welk deel van de nutriënten wordt weer gebruikt als meststof? Wat zijn de meest kansrijke mogelijkheden om hergebruik van nutriënten in deze stroom te maximaliseren?

5. Opties voor nutriëntenrecycling

Wat zijn de meest kansrijke mogelijkheden om nutriënten die zijn vastgelegd in dierlijke en plantaardige producten na consumptie terug te winnen en te gebruiken als meststof?

6. Is kringloop mogelijk

In hoeverre is het mogelijk om input van kunstmest in Nederland te vervangen door recyclede nutriënten en/of natuurlijke methoden van stikstofbinding?

7. Potentiële afzetmarkten voor herwonnen nutriënten

Waar liggen potentiële afzetmarkten voor herwonnen nutriënten als we meer kunnen herwinnen dan nodig voor kunstmests substitutie in Nederland? Kan het economisch rendabel worden om die afzetmarkten te bereiken? Kun je een systeem met een milieukostprijs maken voor kunstmest zoals bij systeem van CO2 rechten?

8. Perspectieven

Gegeven al het bovenstaande, lijkt het mogelijk om nutriënten kringlopen volledig te sluiten met de huidige mix van plantaardige/dierlijke productie? Of als dat niet het geval is, welke orde van grootte mix verschuiving is nodig om kringlopen wel te kunnen sluiten?

1.4 Doelstelling van onderhavige studie

Op basis van gepubliceerde rapporten en wetenschappelijke studies worden de voornoemde vragen beantwoord, zoveel mogelijk op basis van kwantitatieve informatie.

2 Resultaten

2.1 Balansen voor nutriënten

"Hoe zien de balansen van stikstof, fosfor, kalium en micronutriënten er uit?"

Voor groei en ontwikkeling hebben planten 14 nutriënten nodig, naast water, CO₂ en (zon)energie. De 14 nutriënten worden essentieel genoemd, omdat zonder deze nutriënten de groei en/of ontwikkeling verstoord is en de totale productie beperkt. De benodigde hoeveelheden variëren per nutriënt, van enkele honderden kg per ha per jaar voor stikstof en kalium tot slechts enkele grammen per ha per jaar voor sommige micronutriënten. Dieren en mensen hebben in totaal 22 essentiële nutriënten nodig. Ook hier is de variatie per nutriënt groot; bij mensen van enkele kg voor stikstof tot enkele mg per jaar voor sommige micronutriënten.

In de praktijk worden de volgende voedingsstoffen (nutriënten) in de Nederlandse akkerbouw aangevoerd via mest en meststoffen: N, P, K, S, Ca, Mg, Mn, Fe, Zn, Cu, B, Mo (de Haan & van Geel, 2013). In de diervoeding zijn, naast de genoemde meststoffen, ook Co, J, Na, Cl en Se relevant (Hoeks *et al.*, 2012). Nikkel (Ni) wordt in de huidige bemestingsadviezen niet genoemd. Soms wordt daarnaast ook silicium (Si) gebruikt als meststof, omdat het voor gewasgroei gunstig kan zijn. De overige nutriënten voor dier- en humane voeding (Cr en F) spelen geen rol in de Nederlandse bemestingsadviezen. Voor deze studie zijn vooral Zn, Cu, Se, Co, B, en Mo relevant, omdat deze elementen relatief schaars zijn (Udo de Haes *et al.*, 2012; Chardon & Oenema, 2013). De vraag richt zich dus op N, P, K en Zn, Cu, Se, Co, B, en Mo.

Binnen Nederland zijn drie soorten balansen van belang: 1) de totaalbalans, 2) de balans voor de landbouwsector, en 3) de bodembalans.

CBS maakt mineralenbalansen voor de Nederlandse landbouwsector, en voor de bodem¹. Bij de mineralenbalans voor de bodem is het verschil tussen aan- en afvoer van nutriënten gelijk aan 'de som van de accumulatie van nutriënten in de bodem en het verlies van nutriënten naar grondwater en oppervlaktewater'. Bij de mineralenbalans voor de landbouwsector is er aanvoer van buiten de sector (kunstmest, diervoer) en afvoer naar buiten de sector (plantaardige en dierlijke producten, verlies naar lucht- en bodem). Bij het behandelen van kringlopen is de zogenaamde totaalbalans van mineralen interessant (consumenten, landbouw en industrie). Voor de verliezen naar bodem- en grondwater wordt meestal een landbouwbalans of meer specifiek de bodembalans gehanteerd.

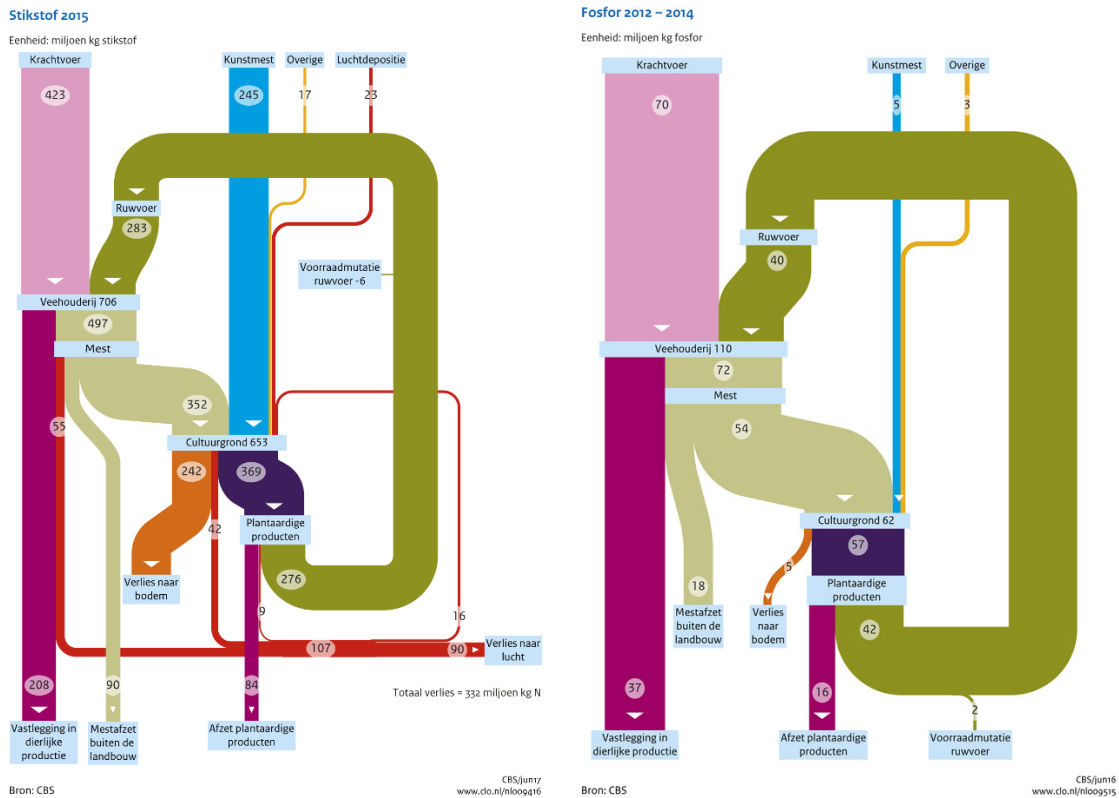
Via kunstmest en geïmporteerd voer worden nutriënten naar de Nederlandse landbouw aangevoerd. De afvoer gebeurt via geogoste producten en via dierlijke producten (melk, vlees en eieren). In de landbouwproductie treden verliezen op naar lucht, grondwater en oppervlaktewater. De afvoer van nutriënten met het geogoste product en/of dierlijke product is daardoor meestal kleiner dan de aanvoer, vooral bij de macronutriënten, en beschouwd over een aantal jaren.

Een relevant verschil tussen de genoemde stoffen (K en Zn, Cu, Se, Co, B, en Mo) en N en P is het aandeel dat de landbouwsector heeft in het totale gebruik. Terwijl de rol van de landbouw in het gebruik van de stoffen N, P, K, S, B, Se en NaCl resp. 85, 95, 85, 52, 13, 10 en 3% is (Westhoek *et al.*, 2016; EC, 2017; USGS, 2017), is de rol van de landbouw t.o.v. de rest van de economie bij het gebruik van Ca, Mg, Zn, Cu, Co, en Mo dusdanig klein dat het niet genoemd wordt. Alle nutriënten komen uit mijnbouw, behalve N, dat uit N₂ in lucht geproduceerd wordt met behulp van energie uit aardgas. P, Mg², B en Co staan op de lijst voor EU kritieke grondstoffen op basis van de importen en

¹ De term mineralen en nutriënten worden in deze tekst gebruikt in de zin van anorganische voedingsstoffen (vitamines zijn voor mens en dier onontbeerlijke nutriënten).

² De EU bedoeld hier metallische Mg. Mg zouten, en Mg carbonaten, zoals die in Nederland worden gewonnen, en zoals relevant voor de landbouw, zijn hier niet bedoeld.

recyclingpercentages (EU, 2017). Bij gebrek aan Nederlandse data wordt hier soms verwezen naar die van de VS. De Amerikaanse geologische dienst USGS geeft van veel belangrijke grondstoffen het gebruik in de landbouw aan ten opzichte van de rest van de economie.

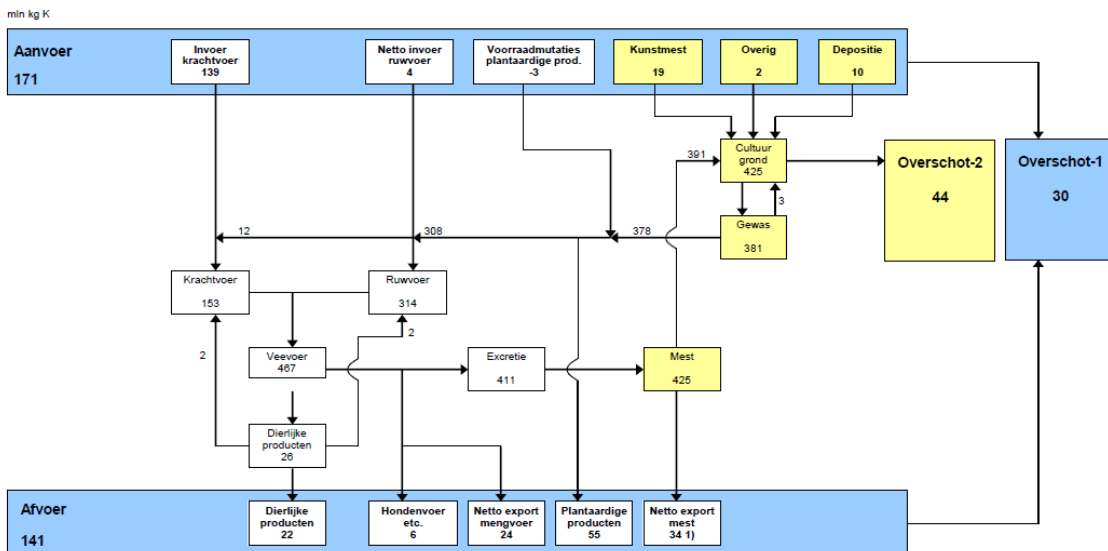


Figuur 2 Balansen van N en P in de landbouw in 2015 (CBS, 2013a; CLO, 2017).

CBS geeft jaarlijks mineralenbalansen voor de landbouw voor N en P (Figuur 2), en tot 2011 ook voor K (CBS, 2013a). Als graadmeter voor de efficiency gebruikt CBS de benutting van mineralen in de landbouw, gedefinieerd als het percentage vastlegging in dierlijke- en plantaardige producten t.o.v. de totale aanvoer van mineralen naar de sector landbouw minus de mestafzet buiten de Nederlandse landbouw. De N-benutting is in de periode 2005 van 2015 gestegen van 41 naar 47%, en de P benutting van 62 naar 93% P. Deze verandering komt voornamelijk door de sterke toename van de mestafzet buiten de Nederlandse landbouw.

De bodembalansen voor Cu en Zn worden sinds 2010 niet meer geactualiseerd door CBS (CBS, 2013b) maar worden nog wel voor de emissieregistratie berekend via een andere methode (Renaud *et al.*, 2015).

Kalium in de landbouw, 2011



Figuur 3 Kaliumbalans van de Nederlandse landbouw in het jaar 2011 (CBS, 2013a).

Van kalium is de landbouwbalans uit 2011 inzichtelijk voor de huidige omstandigheden (Figuur 3). Een bodemoverschot van 331 à 338 mln kg N, 15 à 18 mln P en 30 à 40 mln kg K is berekend voor 2011 door CBS. Veranderingen in de N- en P-balansen tussen 2011 en 2016 zijn deels toe te schrijven aan mestexport, en zijn ook van toepassing op kalium. De bodembalans voor kalium is tot 2014 berekend door CBS en laat een negatieve balans zien in 2014: er wordt meer door gewassen afgevoerd dan aangevoerd via meststoffen (CBS, 2015). Om een geactualiseerde balans te maken zijn gegevens nodig die op dit moment niet meer door CBS worden gerapporteerd (K-kunstmestgebruik, K-excretie etc.).

In de landbouwbalans bestaat de aanvoer uit krachtvoer en meststoffen van buiten de Nederlandse landbouw. De afvoer bestaat uit dierlijke en plantaardige producten, en verlies naar de bodem en lucht (N). Deze aan – en afvoerposten worden hieronder achtereenvolgens besproken.

1. Aanvoer nutriënten via kunstmeststoffen

Mogelijke tekorten aan nutriënten in bodems, voor een optimale gewasproductie, worden door boeren aangevuld via meststoffen. In Nederland en andere Europese landen zijn echter, voor zo ver bekend, geen statistieken of verkoopcijfers van micronutriënten. CBS (2017) geeft sinds 2011 alleen nog gegevens voor het gebruik van N en P kunstmest, en gaf daarvoor ook gegevens over K en kalkmeststoffen. In de VS (Brown, 2008) en Australië (Ryan, 2010) zijn wel schattingen bekend (Tabel 1). Door die schattingen te vergelijken met het gebruik van de NPK meststoffen kan een idee gegeven worden van het gebruik van K en micronutriënten, ook al zijn de bodems en landbouwsystemen sterk verschillend van de Nederlandse situatie. In de VS en Australië vormt het gebruik van micronutriënten slechts 0,6% van het totale gebruik van NPK-meststoffen. In Nederland kan op basis van de bemestingsadviezen een schatting gemaakt worden van het gebruik aan K en micronutriënten (Tabel 1). Naast de genoemde bronnen kunnen de stoffen (B, Co, Cu, Mn, Mo, Zn, Fe) ook in NPK-meststoffen en kalkmeststoffen voorkomen (als microverontreinigingen). Hierover zijn weinig gegevens beschikbaar behalve voor de gehalte aan macronutriënten Mg en S in reguliere meststoffen.

Tabel 1 Meststoffengebruik (1000 kg) in Australië en de Verenigde Staten, en Nederland #.

Element	Australië 2002-2009 (Ryan, 2010)	VS 1967-1984 (Mortvedt et al., 1991)	VS 1995-2004 (Brown, 2008)	NL (CBS, 2017)	
Meststoffen voor macronutriënten					
N	920.000		12.428.482* ²	245.000	
P	420.000		4.251.181* ²	4.000	
K	180.000		4.594.368* ²	22.000 * ⁸	
CaO * ⁵				134.000 * ⁸	
Mg				909 * ⁷	
S				103 * ⁶	
Meststoffen voor micronutriënten				Advies NL kg/ha * ³	Advies NL (1000 kg)* ⁴
B	1667	*	20000	0-0,4 * ^{3b}	167
Co	11	*	*	0-0,5	1,2
Cu	1491	1180	4000	0-6	27
Mn	1165	11620	7000	0 #	0
Mo	54	95	*	0 #	0
Se				0,010 * ^{3a}	5
Zn	5071	23940	40000	0	0

#Exclusief micronutriënten in dierlijke mest, en als onbedoeld bestanddeel in andere meststoffen.

*Niet genoemd.

*² FAOSTAT, 2016.

*³ a/b: grasland of bouwland: met de adviezen voor Co en Cu is met één gift de bodem voldoende voorzien voor een periode van 5 a 10 (Co) en 4 jaar (Cu). #bladmeststoffen bij tekort in bouwlandgewassen.

*⁴ Aangenomen is op basis van bodemadviezen 50% van oppervlak een B en Se advies hanteert, en 1% van het oppervlak een Co en Cu advies.

*⁵ Inclusief schuimaarde (kalk bevat Mg).

*⁶ Pure zwavel wordt als gewasbestrijdingsmiddel gebruikt, hoeveelheid die gebruikt wordt als meststof is onbekend.

*⁷ Import van kieseriet (25% MgO).

*⁸ www.agrimatie.nl/kunstmest, 2015.

Op basis van de bemestingsadviezen (Hoeks *et al.*, 2012; de Haan & van Geel, 2013) kan een grove schatting gemaakt worden van het micronutriënten gebruik in Nederland (laatste kolom in Tabel 1). In Nederlandse bodems en teelten is geen bemesting met Mo, Mn en Zn³ nodig in tegenstelling tot Australië en VS.

2. Aanvoer micronutriënten via voer

Aangezien ruwvoer van eigen grond niet leidt tot aan- of afvoer in Nederland, is hier alleen de aanvoer via krachtvoer in beschouwing genomen (aangenomen dat de grondstoffen van krachtvoer vooral van buiten de Nederlandse landbouw afkomstig zijn). Tekorten in diervoeders worden door diervoederfabrikanten en boeren aangevuld via voedingszouten. De toevoeging van sommige elementen in de veevoeding is gelimiteerd via EU-normen (Regulation EC No 1831/2003). De omvang van het gebruik van voedingszouten is onbekend. De Gezondheidsdienst voor Dieren stelt dat 94% van de melkveehouders mineralenmengsels gebruikt, voor een bedrag van 1000 a 3000 euro per bedrijf per jaar (www.gddiergezondheid.nl).

De gehalten die in Europa in totaal in rundvee-diervoeder via mineralen-supplementen tot stand komen zijn via een questionnaire vastgesteld. De gehalten suggereren dat agrariërs meestal meer nutriënten geven dan de maximum adviezen (Suttle & Underwood, 2010). Het verbruik van micronutriënten in diervoeding is recent voor de wereld, per werelddeel en per diersoort, berekend (van Krimpen *et al.*, 2013). Het betreft de micronutriënten die extra aan het voer zijn toegevoegd, en niet de nutriënten die zich van nature door de gewassen zijn opgenomen. Het laat zien dat het verbruik van de micronutriënten Cu, Zn, Co, Mo, B via diervoeder ten opzicht van het mondiaal verbruik kleiner is dan 1%, en bij Se 11,3%.

³ Volgens bemestingsadviezen. Recentelijk heeft Eurofins-Agro op de website bericht dat de CaCl₂-extraheerbare Zn gehalten in Nederlandse bodems dalen.

De totale afzet van mengvoeders in Nederland in 2016 was 14,4 miljoen ton (FEFAC, 2016), of 19 miljoen ton (88% ds, Nevedi, 2015). Bij de door Van Krimpen et al (2013) genoemde toegevoegde gehalten aan micronutriënten voor Europa (185.620 mln kg) kan de totale toegevoegde hoeveelheden berekend worden (Tabel 2). Dat zijn cijfers die passen bij de schatting van Cu en Zn via dierlijke mest van 0,8 en 3 mln kg (Renaud et al., 2015). De andere bronnen van Cu en Zn in mest zijn voetbaden, ruwvoer, en krachtvoer.

De aanvoer van micronutriënten via krachtvoer en netto-invoer van ruwvoer, kan op basis van gehalten in de verschillende voeders maal het volume voer berekend worden. Het CBS komt zo op een aanvoer naar de sector landbouw via krachtvoer van 73 mln kg P. De samenstelling van 360 soorten voeders zijn gegeven door CVB (gehalten aan B worden niet gegeven). Net als ruwvoer hoeven producten die in de Nederlandse landbouw geproduceerd en geconsumeerd worden niet meegeteld te worden. Dergelijke berekeningen zijn voor micronutriënten niet uitgevoerd. Als we alle 73 mln P toerekenen aan één type krachtvoer (sojaschroot) en de gehalten daarin gebruiken (CVB, 2005) dan volgen de schattingen zoals vermeld in Tabel 2. Borium is een belangrijk nutriënt voor gewassen maar niet voor dieren. De inputs via kunstmest lijken klein, en de aanvoer via mineralen en krachtvoer lijken vergelijkbaar in grootte. De aanvoer van natuurlijk voorkomende elementen in met name in Nederland gebruikte fosfaat- en kalkmeststoffen is onbekend.

Tabel 2 Grove schatting van jaarlijkse micronutriënteninput (1000 kg) via krachtvoer, mineralenmengsels in voer, en kunstmest.

Element	krachtvoer	Mineralen aan voer	Micronutriënt-kunstmest	Depositie * ¹	Kalkmeststoffen* ²	Fosfaatmeststoffen* ³	Import * ⁴
B	-	0	167	-	1	28	onbekend
Co	3	4	1,2	1,1	-	0,1	7.423
Cu	165	262	27	28	4	2	198.965
Mn	457	110	0	-	-	6	440.206
Mo	44	0,2	0	-	-	0,5	23.584
Se	2	4	5	0,7	-	0,04	Onbekend
Zn	526	1003	0	89	22	5	826.256

*¹ Nederlandse onverharde oppervlak (TNO et al., 2016).

*² Romkens et al, 2016. Aanname: B gehalte van 5 mg kg⁻¹.

*³ Gehalten voor NPK uit (Kratz et al., 2016) en 6 mln P bij aanname van 12% P in NPK meststof(CBS, 2017).

*⁴ (BGS, 2016). De productie van 1.750.000 ton borium vindt plaats in Turkije.

3. Afvoer via consumptie en export

De afvoer van micronutriënten via consumptie van voedingsstoffen door mensen is niet bekend. Er zijn weinig gegevens over de afvoer van micronutriënten via melk-, vlees- en akkerbouwproducten (behalve de genoemde CVB veevoedertabel en de Eurofins data over de samenstelling van gras, mais en CCM). De inhoud van het Nederlandse ruwvoer is berekend op basis van de data van Eurofins en de P onttrekking zoals berekend door CBS (2017) voor ruwvoer.

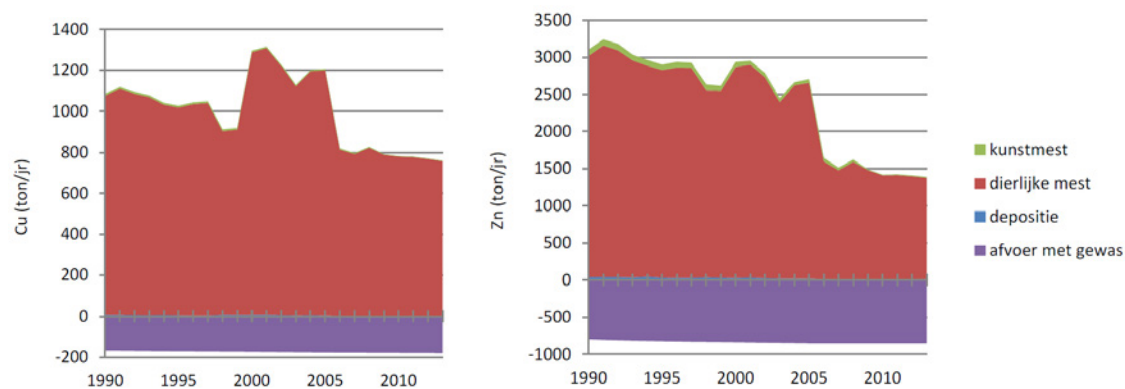
Daarnaast is er afvoer via mestexport. De samenstelling van de verwerkte en geëxporteerd mest is gedeeltelijk bekend. Van de in Nederland toegepaste mest zijn de macronutriënten bekend (den Boer et al., 2012) en de zware metalen (Römken & Rietra, 2008). De gehalten aan Co, Mn, Mo en Se in Nederlandse dierlijke mest zijn echter niet gepubliceerd. Voor het opstellen van een landbouwbalans ontbreken daarom data.

Tabel 3 Micronutriënteninhoud van ruwvoer en de aanvoer van micronutriënten via dierlijke mest op Nederlandse bodem (1000 kg).

Element	Ruwvoer*	Gebruik dierlijke mest (Renaud <i>et al.</i> , 2015)
B	107	
Co	1,2	
Cu	99	770
Mn	1005	
Mo	23	
Se	0,8	
Zn	552	1400

* op basis van P onttrekking van CBS (2017) en de gemiddelde gehalten in ruwvoer (Eurofins, 2017) en berekening uit jaar 2000 waarin ruwvoer bestaat uit 44% graskuil, 32% weidegras en 25% snijmais (CBS, 2015, statistiek Mestproductie).

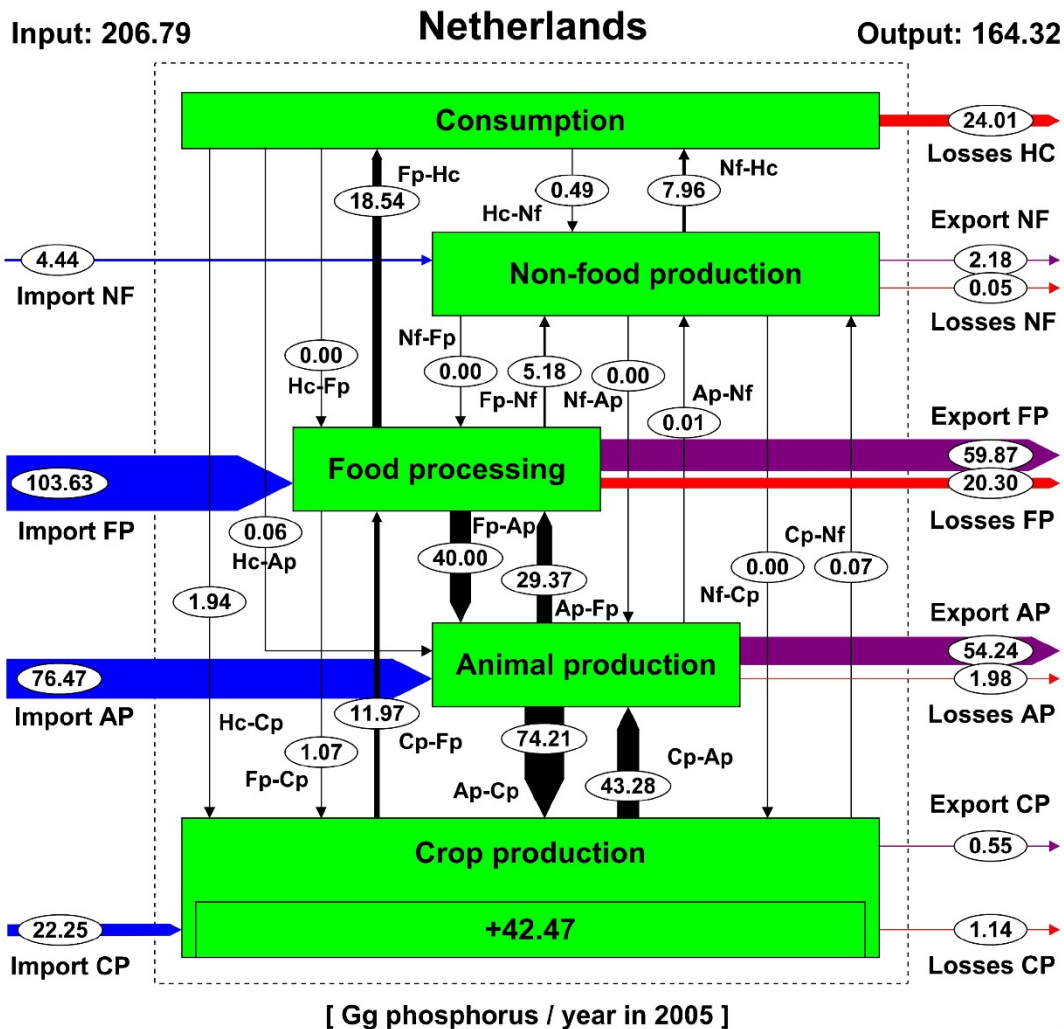
Een bodembalans is eerder opgesteld voor Cu en Zn. Daarbij is de accumulatie in de bodem berekend (Figuur 3). Doordat in dierlijke mest de Cu en Zn gehalten bepaald zijn (Römkens & Rietra, 2008), en aangenomen is dat beide nutriënten niet of nauwelijks via kunstmeststoffen in de akkerbouw gebruikt worden, is het mogelijk om een schatting te maken van balansen (Renaud *et al.*, 2015). Hieruit blijkt dat in Nederland de aanvoer van Cu en Zn voornamelijk plaatsvindt via diervoederadditieven en op het land terechtkomt via dierlijke mest.



Figuur 4 Aanvoer en afvoer van Cu (links) en Zn (rechts) naar Nederlandse landbouwgronden (Renaud *et al.*, 2015).

Door analyses van de genoemde elementen te doen in mest, is het mogelijk om een schatting te maken van de balansen van andere micronutriënten (B, Co, Se, Mo) in de veeteeltsector. Om balansen voor de akkerbouw, en Nederland te maken zijn ook analyses nodig van deze elementen in de belangrijkste gewassen.

Bovenstaande balansen geven de recycling van nutriënten uit dierlijke- en plantaardige productie weer. De "Balansen van N en P in de landbouw in 2015" (Figuur 2) laten de stromen in en uit de landbouw zien maar niet de invoer van N en P zien via voedsel voor humane consumptie. Gedetailleerde fosfor (P) balansen zijn opgesteld voor Nederland (Figuur 5 en andere Europese landen voor het jaar 2005 (van Dijk *et al.*, 2016).



Figuur 5 Hoeveelheden fosforgebruik in Nederland in 2005 (van Dijk et al., 2016).

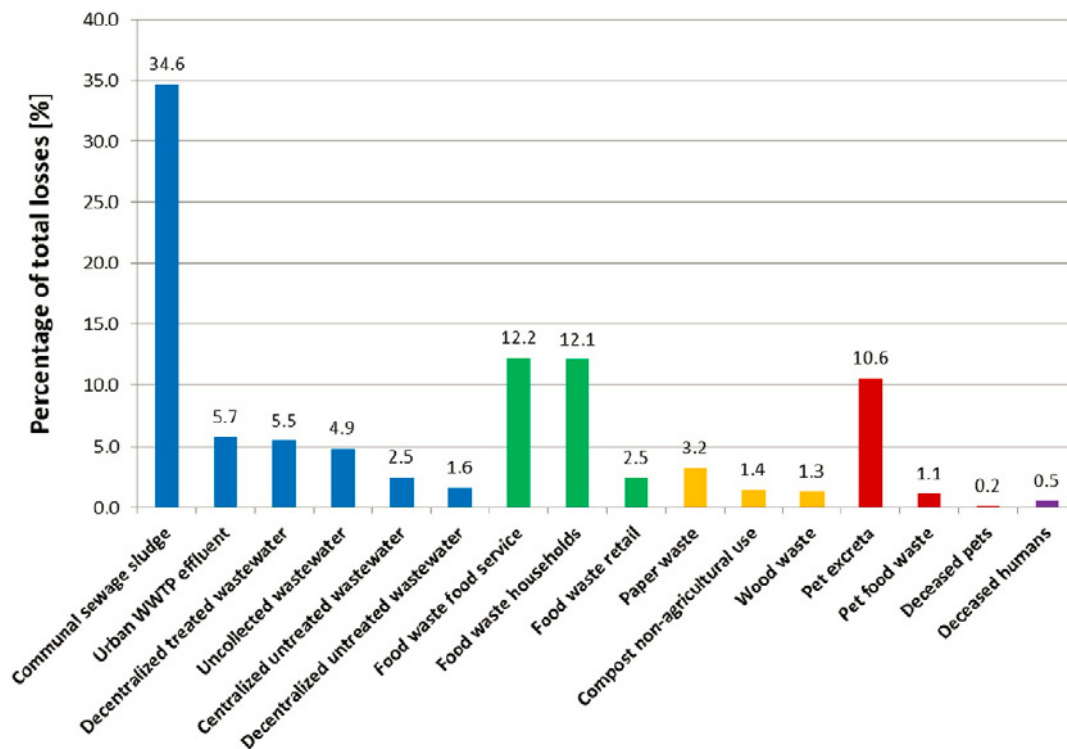
In Figuur 5 is te zien dat –bij de door Van Dijk (2016) gebruikte definitie voor feed en food- de P-import (Gg P= mln kg P) door de voedselindustrie (import FP) groter was dan die via diervoer (import AP). De P-export van producten van de voedselindustrie (export FP) en dierlijke productie (AP) waren van vergelijkbare grootte. De import van kunstmest was in 2005 (import CP) nog aanzienlijk, maar zijn anno nu (2016/2017) gedaald tot < 5 miljoen kg P.

De verliezen⁴ van P treden op na de humane consumptie via de verbranding en het storten van restafval en zuiveringsslib, en de excreta van huisdieren (honden, katten cavia's etc.; losses HC= 24,01), bij de verwerking van dierlijke producten via verliezen in rioolzuivering (losses AP=1,98), en bij voedselindustrie via verbranding van categorie 1+2 slachtafval (losses FP=20,30), en plantaardige productie via verliezen in de bodem (losses 1,14). De P accumulatie in de bodem (+42.47) was dus relatief laag ten opzichte van de totale verliezen bij de voedselindustrie (20.30) en de consumptie van voedsel (24.01).

De verliesposten zijn meer in detail door Van Dijk et al (2016) gegeven in Figuur 6 (voor EU). De grootste P-verliezen treden op via rioolwaterzuiveringsinstallaties. In Nederland ging 18 mln kg P ton via zuiveringsslib 'verloren', 17 kton P via slachtafval (categorie 1 en 2), 2 mln kg P via voedselafval van huishoudens, 2 mln kg P via verliezen vanuit stallen (mest naar rioolzuivering etc.), en 2 mln kg P via excreta van huisdieren (honden en katten; Supporting information 12, Van Dijk et al., 2016). Van

⁴ Verliezen ("losses"), het uit de kortdurende kringloop nemen, of te wel niet meer beschikbaar zijn voor voedsel. Bijvoorbeeld naar een stort, of bij stikstof door de vorming van gasvormig N₂ maar ook door accumulatie van stoffen in (water)bodems waar geen landbouwproductie plaatsvindt).

Dijk et al (2016) noemen de accumulatie van P in de bodem (+42,27 mln kg P in Figuur 6) niet als een verlies, omdat de voorraad P in de bodem kan worden benut in de toekomst. Verlies in Figuur 6 (1,14 mln kg P) is de hoeveelheid die naar grond- en oppervlaktewater gaat.



Figuur 6 Aandeel in fosforverliezen vanuit sector consumenten in EU 2005 (van Dijk et al., 2016).

De P retourstromen vanuit de industrie en consumenten naar de landbouw zijn in Figuur 5 meegenomen: *human consumption* naar *crop production* (1,94 mln kg P) vnl. via compost, en van *food processing* naar *crop production* (1,07 mln kg P) vnl. via diermelen).

De retourstromen van buiten landbouw (consumenten, industrie) naar de landbouw zijn ook geïnventariseerd vanwege de mogelijke effecten op zware metalen (Romkens et al., 2016), waaronder de nutriënten Cu en Zn. De volgende retourstromen zijn geïnventariseerd:

1. Covergisting van reststoffen met dierlijke mest,
2. Zuiveringsslib van voedselindustrie,
3. Compost,
4. Overige organische meststoffen (vnl. categorie 3 diermelen) en
5. Reststoffen die conform de Uitvoeringsregeling Meststoffenwet zijn toegestaan als meststoffen (schuimaarde, vinasse, spuiwater etc.)(Romkens et al., 2016).

De retourstromen leveren opgeteld zo'n 29 mln kg N en 6 mln kg P. De cijfers wijken af van het jaar 2005 (Van Dijk et al, 2017) doordat er in 2005 nog nauwelijks netto mestexport was, en er weinig co-vergisting was (van Bruggen, 2012).

Tabel 4 Meststoffengebruik op Nederlandse landbouwgrond in 2011 en aandeel retourstromen van buiten de landbouw (Römkens et al., 2016)*.

Element	N** (mln kg)	P (mln kg)	Cu (10 ³ kg)	Zn (10 ³ kg)
Dierlijke mest (excl co-substraten)	285	57	1182	1861
EU meststoffen	214	7	4	48
retour				
Zuiveringslib	1	1	2	5
Compost	7	2	21	104
Overige Organische Meststoffen (Oom)	5	1	2	13
Bijlage Aa (incl co-substraten)	16	2	8	39
Som retourstromen	29	6	33	161

* (Een klein deel van dierlijke mest bestaat uit co-substraten, plantaardige reststromen deels van buiten de landbouw, die na vergisting als dierlijke mest worden beschouwd)(van Bruggen, 2012). Het deel dat geëxporteerd wordt is niet in deze tabel opgenomen.

** Eigen inschatting.

Door gehalten te koppelen aan de belangrijkste stromen (zuiveringsslib, diermelen etc. in Figuur 6) zijn schattingen mogelijk van de andere nutriënten. De verliezen van andere nutriënten dan P zijn niet geïnventariseerd door Van Dijk et al (2016). Op basis van de P balans heeft Van Dijk et al (2016) de *P use efficiency* (PUE) per sector berekend. Daarbij is PUE de effectieve output (totale output minus verlies) gedeeld door de input. De definitie is arbitrair en afhankelijk van het gekozen systeem. In de definitie van een effectieve output kun je bijvoorbeeld wel of niet kiezen voor dierlijke mest als effectief.

Het ontbreken van sector- en bodembalansen voor micronutriënten (volgens geprotocolleerde werkwijzen) suggereert dat dergelijke balansen mogelijk minder relevant zijn dan bij macronutriënten. Eén van de redenen is mogelijk dat de aan- en afvoer relatief klein zijn, en andere factoren belangrijker zijn voor de goede nutriëntvoorziening van gewassen en dieren. In onderzoeksrapporten worden incidenteel balansen van micronutriënten aangetroffen.

Tabel 5 Bodembalans voor selenium bij Park Grass experiment in Rothamsted waar sinds 1876 bodem (0-23 cm) en grasmonsters zijn gearhiveerd (Bowley et al., 2017).

aspect	Onbekalkt g ha ⁻¹ yr ⁻¹	Bekalkt g ha ⁻¹ yr ⁻¹
Aanvoer (1870-2009)		
kalk	0	0,03-0,05
meststoffen		0,5-1,3
depositie		0,93
Afvoer (1870-2009)		
gewas		0,04-0,22
	g ha ⁻¹	g ha ⁻¹
Bodem in 2008	1600	1200

Een voorbeeld geeft de bodembalans voor Se in het Park Grass experiment van Rothamsted waar sinds 1903 apart veldjes zijn gemaakt met verschillende kalkbehandelingen in een veldproef die verder sinds 1876 redelijk onveranderd is. In Tabel 5 is te zien dat de bodemvoorraad aan Se veel groter is dan de aanvoer- of afvoer van Se. De aanvoer via depositie is vergelijkbaar met de aanvoer via meststoffen, en de aanvoer via kalk is klein. De aanvoer en afvoer van Se via mest, depositie en gewassen hebben daarmee geen grote invloed op de bodemvoorraad. Toch is na 105 jaar bekalking de bodemvoorraad in 2008 kleiner in het bekalkte veld. Door de hogere bodem pH treedt blijkbaar een groter verlies op naar het grondwater dan in het onbekalkte veld (Bowley et al., 2017). Dit alles geeft aan dat het bijhouden van de bodembalans weinig zinvol is bij Se als niet ook bodem- of grondwateranalyses meegenomen worden. In Nederland wordt door RIVM (Imm/rivm.nl) en provincies (DINOloket.nl) grondwater gemonitord op K, Mn en Cu, en soms op de micronutriënten Mo, Co, Se (Rietra & Voogd, 2011).

Berekeningen op basis van gras- en maisanalyses door Eurofins-Agro (eurofins-agro.com/nl-nl/gemiddelden), en gemiddelde oogsten hiervan, geven aan dat de nutriënten-onttrekking per jaar van een aantal micronutriënten (Co, Mn, Se) klein is ten opzichte van macronutriënten (Tabel 6).

Tabel 6 Onttrekking van nutriënten door gras en mais in vergelijking tot bodemgehalten (0-23 cm).

	mais	gras	Gehalte in zandbodem * ¹	Onttrekking als % van totaal in bodem * ²
	kg ha ⁻¹ j ⁻¹	kg ha ⁻¹ j ⁻¹	kg ha ⁻¹	
P	23	42	1550	2
K	158	353	16000	2
S	13	28	675	3
Ca	21	52	3750	1
Mg	16	23	600	3
	g ha ⁻¹ j ⁻¹	g ha ⁻¹ j ⁻¹	g ha ⁻¹	%
B	67	80	6000	1
Co	0,79	2,1	14100* ⁴	0,01
Cu	45	81	3500	2
Mn	413	1047	300000	0,2
Mo	6	22	750	2
Se	0,271	0,44	700	0,05
Zn	504	437	53500	1

*¹ Bij 2500 t/ha mediane gehalten zandgrond (van der Veer, 2006).

*² Bij 66% gras en 33% mais. Data (Evers *et al.*, 2000), en voor B eurofins-agro.com/nl-nl/gemiddelden.

*³ AW2000 *⁴ (Reimann *et al.*, 2016).

2.2 Fosfaatverlies

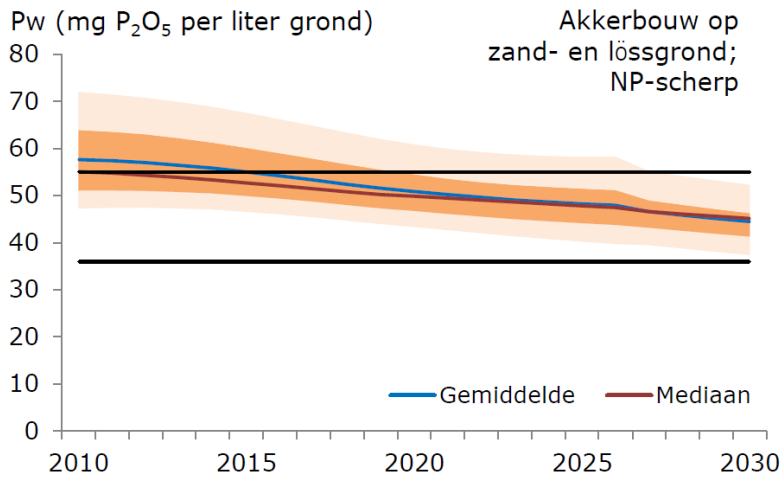
"Wat is er voor nodig om het verlies van fosfaat via de bodem structureel naar nul te brengen, en in de bodems die nu een te hoog fosfaatgehalte hebben een 'negatief verlies' naar de bodem te realiseren?"

Om de KRW-doelen te halen is het nodig om de fosfaatbelasting naar een groot deel van de oppervlaktewateren in Nederland te verminderen (van Gaalen *et al.*, 2016). Het fosfaatoverschot is in de voorbije 20 jaar reeds fors gedaald en kan nog verder worden verminderd tot tijdelijk een negatief overschot (CLO, 2015). Fosfaatverliezen uit de bodem naar het oppervlaktewater zijn met gemiddeld 1,88 kg P/ha/jaar relatief klein ten opzichte van de fosfaatgebruiksnorm van gemiddeld 59 kg P₂O₅ per ha cultuurgrond (Schoumans *et al.*, 2017), maar kunnen ook worden verminderd.

Een overzicht van maatregelen die aanvullend zouden kunnen worden toegepast om de fosfaatverliezen uit de landbouw naar grondwater en oppervlaktewater (verder) te verminderen is beschreven in het rapport van de ex-ante evaluatie Meststoffenwet (Schoumans *et al.*, 2017). Een aanscherping van de fosfaatgebruiksnormen is geanalyseerd in scenarioberekeningen voor het jaar 2027 ("NP-scherp"). Die leiden tot geringe effecten op de bodemvruchtbaarheid, en tot forse economische effecten door veranderingen op de mestmarkt. De gemiddelde P-belasting van het oppervlaktewater daalt met 5,4% van 1,88 kg P /ha/jaar naar 1,77 kg/ha/jaar en specifiek in zandgebieden met 11,3%. Dat komt doordat in zandgebieden zich relatief veel bodems met hoge fosfaatgehalten bevinden (en relatief weinig niet aan bemesting gerelateerde fosfaatbronnen voor het oppervlaktewater). Het percentage regionale waterlichamen dat voldoet aan de ecologische criteria stijgt, volgens het NP-scherp scenario, met 6, 9, 12 en 27% voor respectievelijk algen, vissen, waterplanten en macrofauna. De fosfaatgehalten onder grasland, uitgedrukt in P-AL-getal, dalen in de zandgronden en kleigronden bij het huidige beleid met ca. 0,4 mg P₂O₅ per 100 gram grond per jaar. De fosfaatgehalten van bouwland, uitgedrukt in Pw-getal, dalen in de zandgronden en kleigronden bij het huidige beleid met ca. 0,5 mg P₂O₅ per liter grond per jaar. Er is weinig verschil tussen de daling bij het huidige beleid en de daling bij het scenario "NP-scherp". Het beleid leidt naar verwachting wel

tot een verlaging van de P-gehalten in bodems met hoge P-gehalten: de breedte van de band in onderstaande figuur (Figuur 3) wordt smaller.

Lange termijn P proeven (>10 jaar) met verschillende P giften laten een negatieve fosfaatbalans zien bij de onbemeste veldjes (uitmijnen). Na 10 jaar neemt de fosfaatbeschikbaarheid in de gronden alleen af bij bodems met relatief hoge fosfaattoestand maar niet veel bij een lage fosfaattoestand (van Wijk *et al.*, 2013; Ehlert, 2017). Om te komen tot een lagere fosfaattoestand (ook in de ondergrond), en dus tot minder uitspoeling, is uitmijnen een optie bij bodems met een hoge fosfaattoestand.



Figuur 7 Berekende ontwikkeling van Pw-waarde in scenario "NP-scherp" (Schoumans *et al.*, 2017).

Een overzicht van mogelijke extra maatregelen bovenop de aanscherping van gebruiksnormen, om te voldoen aan de KRW-doelen in 2027, is weergegeven in Tabel 7 (Groenendijk *et al.*, 2016). In scenarioberekeningen is nagegaan hoe de landelijk gemiddelde P-belasting met 0,44 -1,38 miljoen kg P per jaar of te wel 12 -38% verlaagd kan worden. Omdat de opgave voor de reductie van de uit- en afspoeling sterk verschillend is voor de beheersgebieden van hoogheemraadschappen en waterschappen, zijn de maatregelen verschillend per gebied.

Tabel 7 Potentiele reductie van P belasting van oppervlaktewater door aanvullende maatregelen.

Element	Zandgebied noord+midden	Zandgebied zuid	Klei-gebieden
Keuze voor akkerbouwgewassen in zuidelijke zandgebied		0-2%	
Bodemverbetering door opheffen verdichting en aanvoer compost	0-8%	0-4%	onduidelijk
Hogere benutting mest door plaatsing, timing en maximale inzet vanggewas		15-23%	
Aanleg nieuwe regelbare drainage natte gronden	25%		
Omzetten gewone drainage naar regelbare drainage	Negatief, klein areaal positief		

Het fosfaatoverschot op de bodembalans naar nul brengen is goed mogelijk met het huidige beleid (P rechten, gebruiksnormen, verwerking) (Schoumans *et al.*, 2017). Hiermee wordt echter nog niet altijd voldaan aan het voldoende terugdringen van de P-belasting van oppervlaktewater. Dat komt doordat een deel van de belasting van het oppervlaktewater veroorzaakt wordt door het fosfaat dat in het verleden is toegediend (historisch overschot) en door kwel van fosfaatrijk water uit de ondergrond afkomstig van fosfaatrijke sedimenten (Groenendijk *et al.*, 2016).

Het doel "100% zero" (Schnug *et al.*, 2016), i.e., geen (zero) verontreiniging van het milieu is een mooi streven maar vanwege de tweede wet van de thermodynamica niet realiseerbaar; er zijn altijd (kleine) verliezen.

2.3 Stikstofverlies

"Hoe ver kan het verlies van stikstof worden teruggedrongen en wat zijn de meest kansrijke mogelijkheden om dat te realiseren?"

Het stikstofoverschot in de landbouw is de voorbije 30 jaar fors gedaald. Toch zijn er nog diverse mogelijkheden om de opname door gewassen te verhogen en de verliezen te verkleinen. Een overzicht van de maatregelen die in Nederland zijn genomen en gepland zijn, zijn gerapporteerd in de rapportage over de Nitraatrichtlijn in Nederland (Fraters *et al.*, 2016).

In het zuidelijk zandgebied overschrijdt de nitraatconcentraties de norm van 50 mg L⁻¹ nog op verschillende locaties (Fraters *et al.*, 2016). Een overzicht van maatregelen die aanvullend zouden kunnen worden toegepast om de stikstofverliezen uit de landbouw naar de lucht en naar grondwater en oppervlaktewater (verder) te verminderen is beschreven in de rapportage van de ex-ante evaluatie Meststoffenwet (Schoumans *et al.*, 2017). Een verdere aanscherping van de gebruiksnormen is via scenarioberekeningen geanalyseerd ("NP-scherp"). Die leiden tot een geringe daling van de bodemvruchtbaarheid, hebben geen effect op de emissie naar lucht, en leiden tot forse economische effecten door veranderingen op de mestmarkt. De berekende N-uitspoeling daalt; het percentage landbouwgrond waaronder de waarde van 50 mg L⁻¹ wordt overschreden daalt van 42% naar 33%. Het gebiedsgemiddelde nitraatconcentratie in alle zandgebieden daalt in de berekeningen van 51 tot 40 mg L⁻¹. De N-belasting van het oppervlaktewater daalt met 9,2%.

Een overzicht van mogelijke aanvullende maatregelen bovenop de aanscherping van gebruiksnormen, om te voldoen aan de KRW-doelen in 2027, is weergegeven in Tabel 8 (Groenendijk *et al.*, 2016). In scenarioberekeningen is berekend dat de landelijk gemiddelde N-belasting met 5,3 -7,6 miljoen kg N per jaar oftewel 12 -17% verlaagd kan worden.

Tabel 8 Potentiele reductie van N belasting van oppervlaktewater door maatregelen.

Element	Zandgebied noord+midden	Zandgebied zuid	Klei-gebieden
Keuze voor akkerbouwgewassen in zuidelijke zandgebied		5-10%	
Bodemverbetering door opheffen verdichting en aanvoer compost		7-11%	
Hogere benutting mest door plaatsing, timing en maximale inzet vanggewas		15-23%	
Aanleg nieuwe regelbare drainage natte gronden		-33%	
Omzetten gewone drainage naar regelbare drainage	30%		27-35%

Alle genoemde maatregelen leiden tot meer kosten dan opbrengsten. Er zijn ontwikkelingen in precisielandbouw die mogelijk leiden tot een hogere benutting en lagere kosten (Lesschen *et al.*, 2013).

Er is ook een extreem scenario met een forse vermindering van het stikstofverlies geanalyseerd (Schröder, 2013). Een verlies uit de akkerbouw van 22 kg N per ha per jaar via ammoniak, nitraatconcentraties in het bovenste grondwater van 25 mg L⁻¹, in sloot- en greppelwater 2-8 mg L⁻¹ (kleigrond) en fosfaatconcentraties van 0,1-0,2 mg L⁻¹ in het bovenste grondwater en een overschot van hooguit 0 kg P₂O₅ per ha akkerbouw per jaar is mogelijk, maar dan leidt dat tot sterk verminderde opbrengsten: 20-45% (granen) en 25-55% (aardappelen).

Emissies uit de akkerbouw en veehouderij kunnen niet tot nul worden teruggedrongen. Er zal altijd een bepaalde hoeveelheid N verlies optreden uit de bodem via nitraat uitspoeling of lachgas, of ammoniak vervluchtiging optreden uit mest van dieren.

2.4 Toepassingen van mest buiten de landbouw

"Wat zijn 'toepassingen van mestafzet buiten de landbouw', welk deel van de nutriënten wordt weer gebruikt als meststof? Wat zijn de meest kansrijke mogelijkheden om hergebruik van nutriënten in deze stroom te maximaliseren?"

In 2015 werd 5,3 miljoen kg fosfaat (P_2O_5) afgezet bij hobbybedrijven & particulieren, 1,2 mln kg gebruikt op natuurterreinen, en netto 33,4 miljoen kg fosfaat in dierlijke mest geëxporteerd (CBS, 2017)(CDM, 2015). Daarnaast is 9,7 mln fosfaat uit dierlijke mest verwerkt die na verwerking niet langer als dierlijk mest wordt aangemerkt (9 mln fosfaat in de vorm van as van verbande kippenmest, en 0,7 mln als rioolslib van kalvergier na verwerking in rioolzuivering). In totaal werd dus ca 50 miljoen kg fosfaat van mest buiten de Nederlandse landbouw afgezet.

Er werd circa 7,5 miljoen kg fosfaat in dierlijke mest tot mestkorrels verwerkt, en circa 10,1 mln kg fosfaat in dierlijke mest gecomposteerd (Mestverwerkingsloket & BMA, 2017). In deze vormen is de dierlijke mest beter exporteerbaar.

In EU-project Systemic wordt een Duitse case meegenomen waarin vezels uit mest gehaald worden die als alternatief dienen voor vezels van hout in vezelplaten. Geschat wordt dat uit 60 mln digestaat, zo'n 1,5 mln ton vezels gewonnen kan worden. Dat zou zo'n 10% van de houtvezels kunnen vervangen in vezelplaten (Ahrens, 2014). Er zijn ook andere ideeën, zoals het maken van "stenen" van de dikke fractie van dierlijke mest, of het gebruik in lemen huizen (NieuweOogst, 2016). Ook wordt geëxperimenteerd met het kweken van algen op dierlijke meststoffen om ruwe grondstoffen te maken (oliën etc.) (Wolkers *et al.*, 2011).

Overigens bedroeg de totale aanvoer van kunstmest P in 2015 nog slechts 4 mln kg P (CBS, 2017). Kunstmestfosfaat wordt voornamelijk in de aardappel- en groenteteelt gebruikt. Gebruik van fosfaatrijke producten uit de mestverwerking zou het kunstmestfosfaatgebruik nog verder kunnen verminderen.

De mestverwerking en mestexport leiden tot de verlaging van de aanvoer van P naar de Nederlandse landbouwgronden. In termen van nutriëntenrecycling zijn de toepassingen, waarbij mest verbrand wordt of gebruikt wordt als bouw materiaal, een vorm van verlies. Bij de kippenmestverbranding gaat de stikstof verloren maar worden de resterende nutriënten geëxporteerd voor gebruik in de landbouw elders (Billen *et al.*, 2015). LCA berekeningen laten in het geval van kippenmestverbranding zien dat de elektriciteitsopbrengst bij verbranding opweegt tegen de aankoop van N kunstmest (Billen *et al.*, 2015). De andere vormen van "toepassing buiten de landbouw", (mest naar natuurterreinen, hobbybedrijven en particulieren) kunnen beschouwd worden als recycling.

Naast vergroting van de export van dierlijke mest zijn er dus weinig andere opties om hergebruik van mest nog verder te verbeteren/verhogen.

2.5 Opties voor nutriëntenrecycling

"Wat zijn de meest kansrijke mogelijkheden om nutriënten die zijn vastgelegd in dierlijke en plantaardige producten na consumptie terug te winnen en te gebruiken als meststof?"

De verliezen van P in de voedselproductie – consumptieketen zijn geïnventariseerd door Van Dijk *et al.* (2016; Tabel 9). De grootste verliesposten zijn het verbranden van RWZI zuiveringsslib, en het verbranden van een deel van het slachtafval (Lesschen *et al.*, 2013). Het RWZI zuiveringsslib, of de nutriënten daarin, zouden hergebruikt kunnen worden als meststof, en de diermelen zouden liefst

gebruikt worden als voer, of anders als meststof. Nutriëntrecycling, in termen van Figuur 5, is het ombuigen van verliesposten (pijlen naar rechts: 24 mln kg P bij *consumption*, 20,3 mln kg P bij *foodprocessing*, en 1,98 mln P bij *animal production*) naar retourstromen richting de plantaardige of dierlijke production (pijlen naar beneden: *crop production*). De huidige retourstromen, zo'n 6 mln kg P zijn eerder in Tabel 4 gegeven: compost, zuiverings-slib, diermelen en voedselresten (en na vergisting als meststof dient).

Tabel 9 Acht grootste P verliesposten Nederland (van Dijk et al., 2016)*.

	posten	1000 kg P	Opties voor recycling of vermindering verlies
1	RWZI zuiveringsslib	18699	§2.5 Direct gebruik als meststof, nutriënten herwinnen
2	Slachtafval	16771	§2.5 als voer, meststof
3	Voedselafval huishoudens	2282	§2.5 Scheiden, composteren
4	verwerking & export dierlijke mest	2206	
5	Pet excreta	1910	§2.5 Aandeel restafval composteren
6	Voedselafval industrie	1629	§2.5 als voer, meststof
7	RWZI effluent	1300	
8	Uit- en afspoeling & drainage	1127	zie § 2.2

Posten kleiner dan 1 mln kg P zijn weggelaten.

Zuiveringsslib

Op dit moment wordt het meeste zuiveringsslib verbrand waarna de assen worden gestort of gebruikt als ondergrond van wegen. De nutriënten worden daarmee voor lange tijd uit de kringloop gehaald. Ook gaat bij de verbranding de N verloren. Zuiveringsslib van RWZI's wordt nu in Nederland niet gebruikt als meststof (Regelink et al., 2017). De Meststoffenwet staat het gebruik van zuiveringsslib toe mits het voldoet aan de eisen die daarvoor gesteld worden. Bij gebruik in de landbouw komen het organische stof in het slib en de nutriënten direct terug in de kringloop. Een deel van de zuiveringsslibben voldoet aan de normen. De afzet wordt bemoeilijkt doordat er in de Nederlandse landbouw geen behoefte is aan zo'n P rijke meststof. Het is mogelijk om 60% van de P uit de zuiveringsslib te halen bij zo'n 50% van de Nederlandse slibben, en hiervan een fosfaatmeststof te maken zodat het organische stofrijke, maar P arme slib in de Nederlandse landbouw gebruikt wordt (Regelink et al., 2017).

Er zijn recent technieken ontwikkeld voor de terugwinning van P uit slibverbrandingsas. Er zijn plannen voor terugwinning vanaf 2018 van alle P uit Nederlandse slibverbrandingsassen van SNB en HVC door het Belgische bedrijf EcoPhos. Het is onduidelijk wat er dan gebeurt met alle andere nutriënten. Daarnaast wordt P teruggewonnen bij waterzuivering als struviet. De hoeveelheden die op dit moment gewonnen worden zijn klein (Ehlert et al., 2016). De kosten van de terugwinning worden geschat op -4 tot 10 euro per kg P, wat hoger is dan de conventionele productie van kunstmestfosfaat (1,6 euro per kg P). Indien de P precipitatie tijdens het proces van de waterzuivering verbeterd, dan kunnen de kosten fors worden verminderd. De meerkosten vormen zo'n 3% van de kosten voor waterzuivering (Nättorp et al., 2017). Voor de recycling van P uit zuiveringsslibben via struviet of calciumfosfaat is het relevant te vermelden dat bij de terugwinning relatief veel grondstoffen (Mg, Ca) en energie gebruikt wordt (Nättorp et al., 2017).

De effecten van de verschillende nutriëntenterugwinningsprocessen uit RWZI assen op micronutriënten is recentelijk geïnventariseerd. Daarnaast kunnen micronutriënten ook gerecycled worden uit de verbrandingsassen van kolen, hout en afval (Kupfernagel et al., 2017). Assen van hout- en reststoffenverbranding bevatten echter relatief veel zout en zware metalen ten opzichte van nutriënten en is daardoor niet bruikbaar in de landbouw zonder vergaande zuivering (Pels, 2011).

Slachtafval

Na het uitbreken van de BSE of gekkekoeienziekte in 1992 zijn er strengere regels gekomen voor diermelen in diervoer. Voor de BSE ziekte bestond 10% van het voer uit diermelen (Lesschen et al., 2013). De categorie 1 en 2 diermelen worden in Nederland samen verzameld en verbrand in

energiecentrales en cementovens waardoor de nutriënten voor zeer lange tijd uit de kringloop verdwijnen. In andere landen wordt categorie 2 diermeel soms gebruikt als meststof (ESPP, 2016). Cijfers voor categorie 1 en 2-materiaal die nu niet recycled worden zijn gebaseerd op schattingen. Schattingen van diverse auteurs lopen sterk uiteen (Smit *et al.*, 2010; de Ruijter *et al.*, 2016; Kupfermagel *et al.*, 2017).

De reguliere capaciteit voor categorie 1- en 2-slachtafval en kadavers bij de enige verwerker in Nederland is respectievelijk 4,3 en 3,8 kton per week (Baltussen *et al.*, 2014). De productie van categorie 1 en 2 diermeel volgens de producent is 90 kton (Luske & Blonk, 2009). Een aparte verwerking van categorie 2-materialen (niet-herkauwers), zoals in Duitsland en Denemarken gebeurt, zou helpen bij de recycling van diermeel. De categorie 2-materialen kunnen na verwerking als meststof en als persdiervoer gebruikt worden. De hoeveelheid cat. 2 materialen ten opzichte van cat. 1 materialen is echter klein: in Duitsland is de productie van diermeel verdeeld over cat. 1,2 en 3 respectievelijk 213, 31 en 415 kton (Baltussen *et al.*, 2014).

Het inactiveren van prionen van categorie 1-materiaal na verbranding, vergassing of andere processen maakt hergebruik van de P in de assen mogelijk als grondstof voor kunstmestindustrie. Er blijft echter nog een kleine kans dat er infecties optreden (Paisley & Hostrup-Pedersen, 2005).

GFT afval

Het verhogen van scheiding door de consument van het groente-fruit en tuinafval kan leiden tot meer GFT compost, en dus meer recycling van nutriënten en organische stof. Bovendien kan een deel van het groenafval dat nu verbrand wordt ook gecomposteerd worden. De Branche Vereniging Organische Reststoffen (BVOR) (pers. Noot A. Brinkman) schat dat er maximaal 500 mln kg compost extra geproduceerd kan worden in Nederland. Ter vergelijking, er wordt nu circa 2000 mln kg compost geproduceerd (BVOR, 2015).

De samenstelling van het restafval wordt jaarlijks bepaald (Rijkswaterstaat, 2017b). Het gemiddelde gehalte aan GFT in restafval is 33%. Dat kan gezien worden als verlies uit de plantaardige- en dierlijke productie. Andere fracties zijn papier en karton (21%) en incontinentiemateriaal (6%). In 1994 is de verdeling van de elementen over de verschillende fracties bepaald (Beker & Cornelissen, 1999). Alhoewel de GFT fractie sinds 1994 gedaald is, van 40 naar 33% (Rijkswaterstaat, 2017b) is de verdeling van de chemische elementen later niet meer bepaald. Het is begrijpelijk dat de macronutriënten voornamelijk in de GFT fractie van het restafval van consumenten zit: respectievelijk 55 en 82% van het N en P (1994). De fractie GFT bevat in het jaar 1994 10% van het Cu en in 1995 46% (fracties chemische-, dierlijk- en bijzonder afval zijn niet bepaald). Ook voor andere elementen (Co, Mo, Zn) zijn de verschillen tussen de twee jaren groot.

In bovenstaande tabel is onder kolom "voedselafval huishoudens" alleen de fractie GFT is restafval meegenomen. De elementen in de andere restafval fractie zijn dus niet meegeteld omdat die fracties bij recycling niet relevant zijn voor de plantaardige en dierlijk productie sectoren. Vanzelfsprekend zijn die andere fracties wel van groot belang voor de recycling van Fe, Cu en Zn etc.

Uitwerpselen van huisdieren

Een relatief grote verliespost voor P en daarmee ook voor andere nutriënten zijn de excreta van huisdieren (Figuur 4). Deels is dat eenvoudig te voorkomen door bijvoorbeeld kattenbakgrit te recyclen via de GFT-compost. Kattenbakgrit is ook een relevante post in het restafval in Nederland: het betreft naar schatting 7 kg per persoon in Nederland (pers med. J. Zijlstra, Milieucentraal) (t.o.v. 250 kg restafval per persoon per jaar). Daarmee zouden ook de mineralen van de kattenbakgrit (vaak zeolieten) ook gebruikt kunnen worden als bodemverbeteraars. Op dit moment is het in een beperkt aantal gemeenten toegestaan ⁵. Nutriënten in excreta van honden zijn nochtans lastiger te recyclen omdat de excreta niet (centraal) worden verzameld

⁵ www.almere.nl/wonen/afval/afval-scheiden/bioafval/, <https://www.hvcgroep.nl/gft>

Effluent van RWZI

Het verbeteren van het recyclen van nutriënten in het effluent van rioolwaterzuiveringen zou kunnen door bijvoorbeeld wetlands (waterharmonica) waarin planten geoogst worden voor compostering. Bij een verblijftijd van 9 dagen was de verwijdering van stikstof 45% en de verwijdering van P was gering (Toet *et al.*, 2005). Waterharmonica's worden achter RWZI's geplaatst vanwege de verbetering van de waterkwaliteit en andere maatschappelijke waarden (Roex *et al.*, 2012; van den Boomen *et al.*, 2012; Boomen *et al.*, 2015; Fleskens *et al.*, 2016). Of er nutriënten teruggewonnen kunnen worden in waterharmonica's is niet beschreven in de genoemde referenties.

Tabel 10 Zeven grootste verliesposten Nederland en bijbehorende nutriëntenverliezen. Ter vergelijking wordt ook de mestexport gegeven.

Element	Eenheid	RWZI Zuiverings- slib*2	Diermeel *3	Voedselafval huishoudens *4	Huisdieren excreta *5	Voedselafval industrie*6	RWZI effluent *7	Uitspoeling *8	Totaal	Stalieren mestexport *9
vers	1 miljoen kg	1269	90	1753	600	176			3888	
ds	1 miljoen kg	315	85,3	964	480	97			1941	
N	1 miljoen kg	18,31	7,2	14		1	14,10	44,9	99	71,59
P*	1 miljoen kg	11,086 (18,699)	3,75 (16,77)	2,02 (2,28)	1,92 (1,91)	0,2 (1,629)	2,17 (1,30)	3,65 (1,127)	24,8 (43,7)	24,66 (2,20)
K	1 miljoen kg	1,20	0,50						1,70	68,49
Mg	1000 kg	1900	200		340				2440	16564
S	1000 kg		300	2000		200			2500	26772
B	1000 kg	34,7	0,656						35	61
Co	1000 kg	2,7	<0,085	1,45	0,15	0,15	0,06		4,6	2
Cu	1000 kg	128	1	100	3	10	8	16	266	280
Mn	1000 kg	91	1	131	2,8	13			239	481
Mo	1000 kg	1,6	0,029	4,15	0,42	0,42	2,7		9,3	7
Se	1000 kg	1,4	<0,085	<2	0,14	<0,2	0,011		3,8	1
Zn	1000 kg	321	6	260	30	30	73	167	887	797

* Tussen haakjes: Van Dijk et al 2016.

*2 Hoeveelheid CBS (2017), Gehalten (Oliva et al., 2009; Phyllis, 2012; Regelink et al., 2017). Deels wordt N bij compostering van zuiveringsslib teruggewonnen.

*3 Hoeveelheid (Luske & Blonk, 2009), gehalten(Garcia & Rosentrater, 2008).

*4 Hoeveelheid restafval van consument dat wordt verbrand in 2010 (Rijkswaterstaat, 2013), daarvan is 33% GFT, (Rijkswaterstaat, 2017b), gehalten (Beker & Cornelissen, 1999)(data 1994 en 1995).

*5 Hoeveelheid huiseiervoer in NL (CBS, 2015), geadviseerde minimum gehalten Fedifac voor honden en katten (droge stofgehalte van 80% is aangenomen).

*6 Hoeveelheid restafval van voedselindustrie dat wordt verbrand in 2010 (Rijkswaterstaat, 2013) (SBI code 10) vervaardiging van voedingsproducten, (SBI code 11) dranken en (SBI code 12) tabaksproducten: samen 176 kton. Gehalten zoals *4.

*7 Hoeveelheden 2014 (Rijkswaterstaat, 2016; Rijkswaterstaat, 2017a).

*8 N, P (Groenendijk et al., 2016), Cu, Zn "uitspoeling zware metalen landelijke gebied" (Emissieregistratie.nl).

*9 Hoeveelheden (Mestverwerkingsloket & BMA, 2017), gehalten (Evers et al., 2000; Paulsen et al., 2011; VLACO, 2012; Billen et al., 2015; Fibrophos, 2017; Mestverwerking-Fyflán, 2017; Orgaplus, 2017).

De bijdrage van de acht grootste verliezen aan P, en bijbehorende verliezen aan nutriënten zijn gegeven in Tabel 10. De export via dierlijke mest is voor alle nutriënten groter dan het verlies via de 7 andere posten. De export van dierlijke mest zorgt voor hergebruik in het buitenland waardoor de nutriënten in de kringloop blijven. In totaal gaat naar schatting 100 mln kg N en 25 mln kg P verloren via de zeven grootste verliesposten (Tabel 10). RWZI zuiveringsslib is de grootste verliespost voor P, maar ook voor B, Co, Cu, Se, Zn. Voedselafval van huishoudens vormt de tweede verliespost voor veel nutriënten, en vormt de grootste verliespost voor Mo en Mn.

Een vergelijking van de verliesposten in Tabel 10 met de inschatting van de aanvoer via mineralen krachtvoer, voer, depositie en meststoffen (Tabel 2) laat grote verschillen zien tussen de nutriënten. De geschatte minerale aanvoer van Cu en Zn in Tabel 2 heeft dezelfde orde van grootte als de verliesposten in Tabel 10. De geschatte minerale aanvoer van B, Co, Mo, Mn en Se via minerale aanvoerposten zijn groter dan de gegeven verliesposten.

Ammoniak uit stallen

Om de emissies van ammoniak tegen te gaan (totale emissie: 107 mln kg NH₃ in 2010 (Vonk *et al.*, 2012) wordt de NH₃ afgevangen uit de lucht van stallen. In veel gevallen wordt daarvoor zwavelzuur gebruikt en ontstaat ammoniumsulfaat dat gebruikt wordt als meststof. Aangenomen wordt dat 70 tot 95% van de emissies uit varkensstallen voorkomen kunnen worden, en dat in 2010 5 mln NH₃ van de emissies voorkomen werd (Vonk *et al.*, 2012). Het betreft in totaal naar schatting 4,1 mln kg N. Ook bij andere processen, zoals compostering van zuiveringsslib, wordt naar schatting 1 mln kg N teruggewonnen als ammoniumsulfaat (Romkens *et al.*, 2016). Indien er meer systemen komen om NH₃ af te vangen, bijvoorbeeld ook in de rundveehouderij, kan de hoeveelheid teruggewonnen N toenemen (Ehlert & Chardon, 2014). Ter vergelijking, het totale N kunstmestgebruik in 2015 was 245 mln kg N (CBS, 2017).

2.6 Is kringloop mogelijk

"In hoeverre is het mogelijk om input van kunstmest in Nederland te vervangen door recyclede nutriënten en/of natuurlijke methoden van stikstofbinding?"

Gesloten grenzen

Berekend is hoe, en hoeveel mensen, de Nederlandse landbouw kan voeden als de grenzen gesloten zijn, bijvoorbeeld in een crisissituatie (Terluin *et al.*, 2013). Als er geen import meer is van voedsel, gewasbeschermingsmiddelen en diergeneesmiddelen, en er geen kunstmeststoffen meer geproduceerd worden, kan Nederland toch 17 miljoen mensen voeden. Dat blijkt mogelijk door het wijzigen van de landbouwgewassen (fors meer peulvruchten, koolzaad, veel minder grasland), en het veranderen van de (samenstelling van de) populatie landbouwdieren (minder dieren, en geen varkens die vooral voer van buiten NL eten), en het wijzigen van de consumptie (meer aardappelen, en veel minder granen eten). Aangezien er in dit scenario geen inputs meer zijn van minerale nutriënten, voer en voedsel, is de kringloop bijna gesloten. Er zijn nog wel nutriëntenverliezen, met name van N.

Efficiënter

Bij evenwichtsbemesting wordt vaak geen rekening gehouden met de fosfaattoestand van de bodem. Door de relatieve hoge fosfaattoestand van Nederlandse bodems is het bemestingsadvies meestal veel lager dan de mestgift via dierlijke mest die gegeven wordt op basis van het N gehalte in mest. Dit is deels via gedifferentieerde P gebruiksnorm verbeterd. Mestscheiding en mestproducten leiden tot meststoffen waarbij de nutriënten ratio's beter passen bij de behoefte van de gewassen. Mestscheiding heeft in 2014 volgens RVO.nl al geleid tot 420 kton dikke fractie van varkensmest en 270 kton dikke fractie van rundveemest (Schoumans *et al.*, 2017). In 2015 is 18% van de P in dierlijke mest geëxporteerd (33 van de 180 mln P, CBS, 2017). Een techniek om 25% van alle P te winnen uit dierlijke mest zou kunnen leiden tot gebruik van alle dierlijke mest in Nederland, en daarmee ook van alle organische stof en alle andere nutriënten daarin, en de export van een P rijk product (Schoumans *et al.*, 2014). Het is nu onderwerp van studie in een Eu project (Systemicproject.eu). Indien er minder P accumuleert in de bodem is dat, in termen van de balans zoals Figuur 1, minder verlies. Het P-overschot dient dan wel geëxporteerd te worden.

Minder inputs

Naast recycling zijn er opties om de inputs te verminderen. Het verhogen van de efficiency van de inputs is mogelijk. Precisie landbouw zou kunnen leiden tot een efficiënter gebruik van meststoffen (van der Wal *et al.*, 2017). Data ontbreken. Ook nieuwe rassen kunnen leiden tot efficiënter gebruik van meststoffen (Lesschen *et al.*, 2013).

Betere meststoffen en/of het gebruik van betere mestverwerkingsproducten leiden tot minder verlies aan stikstof waardoor minder aanvoer van stikstofkunstmest nodig is. Onderzoek naar de toepassing van mineralenconcentraten heeft laten zien dat de stikstofwerking van mineralenconcentraten in 14 van de 21 proeven vergelijkbaar was met de standaard stikstofkunstmest (kalkammonsalpeter). In 7 proeven was de werking slechter (9-70%). De LCA geeft echter aan dat emissies van ammoniak en nitraatuitspoeling weinig veranderen door de productie en gebruik van mineralenconcentraten uit vleesvarkensmest (Velthof, 2011). Er zijn ook opties voor de verbetering van de opslag, bewerking en compostering van vaste mest, bijvoorbeeld door co-ensilage van vast mest met gewasresten (Viaene *et al.*, 2017a; Viaene *et al.*, 2017b). Dat kan leiden tot minder gasvormige verliezen, en een betere N benutting van de gewassen.

In landbouwgronden is de aanvoer via vrijlevende N-bindende bacteriën beperkt tot naar schatting 0-10 kg N per ha per jaar. De biologische N-binding door vlinderbloemige planten kan aanzienlijk zijn bij vlinderbloemigen, tot 250 kg N per ha. In de veehouderij zijn mengsels van gras met klaver mogelijk, maar het aantal hectaren met grasklavermengsels is thans onbekend. In de akkerbouw zijn de gewassen luzerne, erwten, veldbonen en landbouwstamslabonen relevant voor de biologische stikstofbinding (Velthof, 2000). De som van het oppervlak peulvruchten, erwten, kapucijners, bruine bonen, veldbonen en stambonen, klaver en luzerne is gedaald van circa 110.000 ha rondom 1900 tot circa 9.000 ha nu (CBS, 2017). Overigens wordt in de gids KWIN-AGV (Schreuder & Hendriks-Goossens, 2015) aangenomen dat bij dergelijke teelten ook stikstofbemesting plaatsvindt (0-160 kg N per ha N). In de huidige Nederlandse landbouw wordt de aanvoer van N via biologische N-binding geschat op circa 8 mln kg N (CBS, 2017). Er wordt geëxperimenteerd met meer eiwitrijke akkerbouwproducten voor de veehouderij (sojabonen, erwten)(Kamp *et al.*, 2010; Beeckman *et al.*, 2014; Timmer & de Visser, 2014).

In de melkveehouderij kunnen grasklaver mengsels soms een vergelijkbare grasproductie realiseren als grasland met een monocultuur van gras en bemest met 450 kg N per ha per jaar (Nyfeler *et al.*, 2009; Finn *et al.*, 2013). In een vergelijking tussen een Nederlandse bedrijf met en zonder witte klaver was de bruto winst bij de inzet van een gras en witte klavermengsel 10% lager, maar was het energiegebruik 15% hoger bij bedrijven zonder klaver, voornamelijk door gebruik van stikstofkunstmest (Schils *et al.*, 2000). Het verlies van N via drainwater is in beide systemen even groot. Momenteel worden ook mengsels met gras en rode klaver onderzocht, onder andere om de emissie van CO₂ te verminderen (www.klaverklimaat.nl).

Stimulering

Op dit moment worden klimaatvriendelijke energievormen gesubsidieerd (Stimulering Duurzame Energieproductie, SDE). Productiemethoden die geen energie produceren maar wel broeikasgassen en NH₃ emitteren worden niet gestimuleerd om te veranderen. Technieken voor de recycling van nutriënten zouden op dezelfde wijze als de SDE regeling gestimuleerd kunnen worden.

In Duitsland wordt zo'n 2/3 van de slib verbrand zonder terugwinning van de nutriënten. Met de op "Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung" (27 sept 2017)(Anonymous, 2017) wordt terugwinning van P uit RWZI zuiverings-slib verplicht binnen 12 tot 15 jaar voor RWZI's die afvalwater van meer dan 50.000 mensen verwerken.

2.7 Potentiële afzetmarkten voor herwonnen nutriënten

"Waar liggen potentiële afzetmarkten voor herwonnen nutriënten als we meer kunnen herwinnen dan nodig voor kunstmestsubstitutie in Nederland? Kan het economisch rendabel worden om die afzetmarkten te bereiken? Kun je een systeem met een milieukostprijs maken voor kunstmest zoals bij systeem van CO2 rechten?"

In Zwitserland is in een recente studie de interesse van marktpartijen gepeild in P- recyclingproducten die de komende 5 jaar beschikbaar gaan komen (BLW, 2016). De markt, landbouw en chemie-industrie, heeft mogelijkheden om de recyclingproducten op te nemen zodat de kringloop te sluiten is. De huidige producten zijn echter niet voldoende goed, met name de afwijkende vorm en geringe homogeniteit is een bezwaar voor afnemers zodat eigenlijk een extra opslag en verwerkingstap nodig is, waardoor de kosten stijgen. Dat bezwaar leeft minder bij de biologische landbouw die 2 kton P/jaar (1/3 van de totale hoeveelheid recyclingproducten) kan opnemen in Zwitserland als alternatief voor ruwfosfaat, vrijwel tegen kostendeekkende tarieven.

Er bestaat onduidelijkheid over de risico's van organische contaminanten in recyclingproducten, als het geen assen betreft. De prijs is ook ongunstig (BLW, 2016). Waarschijnlijk wijkt de Zwitserse markt niet sterk af van de Nederlandse, behalve dat de biologische markt in Nederland kleiner is.

Dezelfde vragen over homogeniteit van het product en de onzekerheid over contaminanten spelen een rol bij de toelating volgens de meststoffenwet (Ehlert *et al.*, 2016). Herwonnen fosfaten zijn sinds maart 2015 in de Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet opgenomen, en dienen te voldoen aan de in de meststoffenwet gestelde maximumgehalten aan zware metalen en organische microverontreinigingen (artikel 17a). De verwachting is dat in de revisie van de Europese verordening nr 2003/2003 over minerale meststoffen, ook nieuwe categorieën opgenomen zullen worden die struviet betreffen.

Een marktverkenning in Nederland van struviet van RWZI's (Evers *et al.*, 2016) en van struviet bij aardappelverwerkende bedrijven is recentelijk gedaan.

2.8 Perspectieven

"Gegeven al het bovenstaande, lijkt het mogelijk om nutriënten kringlopen volledig te sluiten met de huidige mix van plantaardige/dierlijke productie? Of als dat niet het geval is, welke orde van grote mix verschuiving is nodig om kringlopen wel te kunnen sluiten?"

Het sluiten van kringlopen

Kringlopen op aarde zijn eigenlijk per definitie gesloten, want nutriënten kunnen (en worden) altijd hergebruikt. Er ontsnappen vrijwel geen nutriënten van het systeem aarde naar het heelal. Maar het hergebruik is deels op een geologische tijdschaal (miljoenen jaren) en vooral op een plaats (oppervlaktewater, lucht) die minder gewenst zijn. De aarde gaat anders functioneren en de beschikbaarheid van essentiële nutriënten voor voedselproductie wordt minder, indien de nutriënten accumuleren in plassen, meren, zeeën, en oceanen en de sedimenten daaronder. Het leven wordt daardoor minder aangenaam.

Met "het sluiten van kringlopen" wordt bedoeld dat nutriënten in een kortdurende kringloop zitten en voortdurend hergebruikt kunnen worden voor menselijke doeleinden. De benodigde nutriënten voor mens en natuur zijn en blijven dan beschikbaar, en de verliezen naar elders zijn minimaal. Een aanvullende eis is vaak dat het energiegebruik (vooral fossiele energie) en de emissie van broeikasgassen daarbij beperkt zijn. Het sluiten van kringlopen is woekeren met de eerste en tweede wet van de thermodynamica; nutriënten kun je niet creëren uit niets, en nutriënten hebben de natuurlijke neiging om zich te verspreiden

Ook in natuurlijke systemen treden verliezen van nutriënten op door verluchting en door uitspoeling en afspoeling. Die verliezen compenseert de natuur door aanvoer via verwerking van gesteenten,

biologische binding van N₂ uit de lucht, en depositie vanuit de lucht (aanvoer van stof en elementen van elders). Een scenarioberekening voor Nederland, om een akkerbouw met minimale N en P verliezen te benaderen, gaf aan dat een drastische verlaging van de bemesting nodig is, en daarmee van de bodemvruchtbaarheid en de gewasopbrengsten (Schröder, 2013). Bij een gelijke consumptie in Nederland leidt een streven naar een landbouw met minimale emissies in Nederland dus tot meer import van voedsel of tot het gebruik van meer land, dat wil zeggen minder natuur en biodiversiteit.

Voor het beter sluiten van kringlopen zijn drie samenhangende factoren belangrijk; (i) beperking van de input (aanvoer), vooral om verliezen te beperken, (ii) vermindering van de verliezen naar ongewenste milieuc compartimenten, door emissiebeperkende maatregelen, en (iii) nutriënten in restproducten en afval te verzamelen en te hergebruiken. Ten opzichten van de situatie van begin 1980 zijn in Nederland in de voorbije dertig jaar forse verbeteringen opgetreden. De input van nutriënten is verminderd, de verliezen van nutriënten zijn verminderd en er wordt meer gestreefd naar hergebruik. Maar om de kringlopen verder (meer) te sluiten, zijn nog forse stappen nodig, op het gebied van alle drie hiervoor genoemde factoren, d.w.z. minder input, minder verliezen en meer hergebruik.

De input van nutriënten in de landbouw is nodig om voedsel te produceren. Dat voedsel is nodig om mensen en dieren te voeden, hier en elders. Door minder te consumeren en/of te exporteren kan de input worden verminderd, maar met forse sociaaleconomische consequenties. Emissie van nutriënten naar lucht, grondwater en oppervlaktewater zijn een gevolg van de tweede wet van de thermodynamica en natuurlijke drijvende krachten. Emissies kunnen worden verminderd door het afsluiten van lekken en door weggelekte nutriënten terug te winnen. Dat kost energie (volgens de eerste wet van de thermodynamica). Hergebruik van nutriënten uit reststoffen en afval is zeker voor fosfaat op dit moment de factor die de meeste zoden aan de dijk zet (Tabel 10). Daar is nog veel winst te boeken; het gaat daarbij om een paar grote posten en vele kleine posten.

Voor een drastische verbetering van het hergebruik kan het gewenst zijn om bepaalde producten niet meer te maken en te gebruiken. Hoe groter de diversiteit in producten, hoe meer energie het vergt om resten te verzamelen en vervolgens zinvol te verwerken en te hergebruiken. Hoe kleiner de verpakkingen hoe groter de resten in de verpakkingen en hoe lastiger het is om die te verzamelen.

Welke verschuivingen zijn dan nodig en mogelijk?

Voor het verder sluiten van kringlopen blijven de voornoemde drie samenhangende factoren belangrijk, d.w.z. minder input, minder verliezen en meer hergebruik. Technisch is veel mogelijk, maar sociaaleconomisch niet en ook niet altijd vanuit de overweging om het gebruik van fossiele energie en de emissie van broeikasgassen gelijktijdig te beperken. Voor een drastische beperking van de input is bijvoorbeeld een fundamentele discussie nodig over het type samenleving waarin wij willen wonen, over het consumptiepatroon en over de economie. Voor een drastische verbetering van het hergebruik is ook een maatschappelijke discussie nodig, want een wegwerpcultuur en consumptiemaatschappij passen minder goed bij efficiënt hergebruik. Het ligt voor de hand om vooralsnog eerst te concentreren op technische maatregelen die sociaaleconomisch relatief gemakkelijk zijn te realiseren.

Een vaak genoemd perspectief is het verminderen van de aanvoer van veevoerders uit het buitenland. De milieueffecten van import van diervoeders kunnen op twee manieren verminderd worden: vervangen van grondstoffen, en het productieproces veranderen. Vervanging van grondstoffen is mogelijk; theoretisch gezien kan bijvoorbeeld Citrus pulp vervangen worden door bietenpulp waardoor het energiegebruik van het krachtvoer met circa 25% zou verminderen. Echter, bietenpulp wordt momenteel al volop benut als veevoer. Raffinage van veevoergrondstoffen biedt mogelijk ook perspectief. Daarbij worden de grondstoffen ontleed in verschillende essentiële nutriënten en substraten. Recent is voorgesteld om de volledige import van sojabonen vervangen door efficiënter gebruik van voer van een kwart van het Nederlandse areaal aan gras en mais (Sanders *et al.*, 2016). Dit vergt echter nog veel aanvullend onderzoek en testen in de praktijk. Een belangrijke reden voor de relatief beperkte perspectieven op vervanging van grondstoffen in veevoer is dat de diervoedersector al heel sterk geoptimaliseerd is (Vellinga *et al.*, 2009).

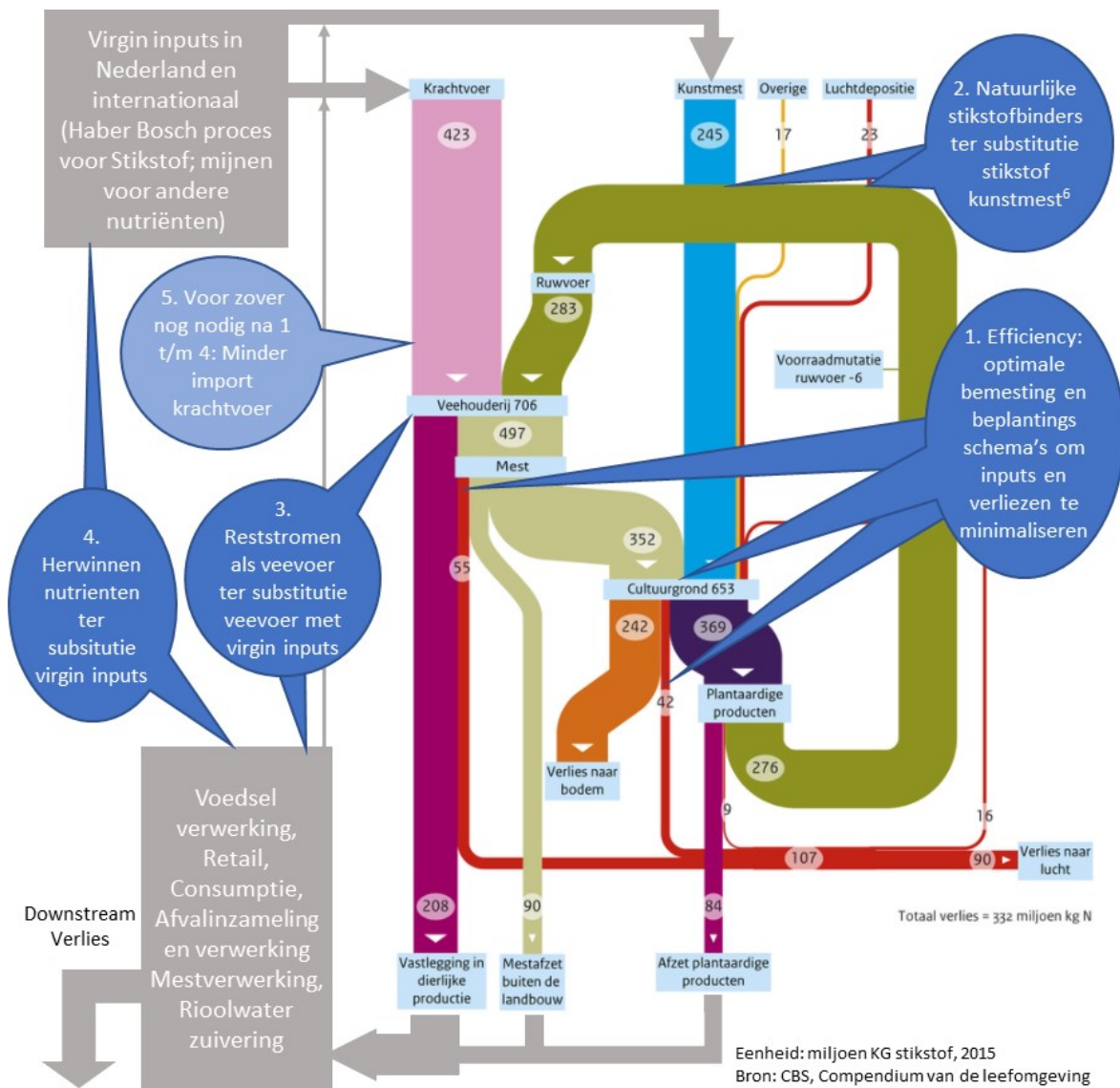
3 Conclusies

De adhoc Werkgroep Nutriënten & Bodemvruchtbaarheid heeft een zevental vragen geformuleerd over het gebruik van (micro)nutriënten. Op basis van diverse artikelen en rapporten zijn schattingen gemaakt van het gebruik van (micro)nutriënten in de Nederlandse landbouw. De belangrijkste bevindingen van het literatuuronderzoek zijn hieronder samengevat.

Jaarlijks stelt CBS aanvoer-afvoer balansen op van de Nederlandse landbouw voor stikstof (N) en fosfor (P), volgens een standaardmethode. In het recente verleden werd dat ook gedaan voor kalium (K). Voor andere nutriënten ontbreken die balansen. Er zijn geen nauwkeurige gegevens beschikbaar over de import en export van zwavel (S), calcium (Ca), magnesium (Mg) en micronutriënten, op basis waarvan balansen van S, Ca, Mg en micronutriënten snel en betrouwbaar berekend zouden kunnen worden.

- Volgens de US Geological Survey is het gebruik van N, P, K, S, Se en Na in de landbouw respectievelijk 85, 95, 85, 52, 10 en 3% van het totale gebruik in de wereld (USGS, 2017). Voor B is dat becijferd op 13% (EC, 2017). Het gebruik van Ca, Mg, Zn, Cu, Co, en Mo in de landbouw is kleiner dan 3% van het totale gebruik in de wereld. Een deel van het gebruik van micronutriënten in de landbouw is via toevoegingen aan diervoer. Minder dan 1% van het totale mondiale verbruik van Cu, Zn, Co, Mo, B gaat via toevoegingen van diervoeders. De toevoeging van Se aan diervoeders is geschat op 11% van het totale wereldgebruik aan Se (van Krimpen *et al.*, 2013).
- De P-verliezen uit de plantaardige productiesector als gevolg van uit- en afspoeling uit landbouwgronden zijn relatief klein t.o.v. de aanvoer. De verliezen uit de voedselkringloop zijn hoger in de dierlijke productiesector en voedselindustrie, met name door dierlijk afval en voedselafval. Relatief hoge P-verliezen treden op bij RWZI slib, GFT in restafval, en excreta van huisdieren, omdat die vrijwel niet worden recycled in de landbouw (Van Dijk *et al.*, 2016).
- De N-verliezen uit de plantaardige productiesector (inclusief mais- en grasland) zijn relatief hoog t.o.v. de aanvoer, en treden op door uit- en afspoeling uit landbouwgronden en ammoniakemissie. De verliezen zijn ook relatief hoog in de dierlijke productiesector, door ammoniakemissies.
- De K-verliezen zijn relatief klein de laatste jaren, vanwege een negatieve bodembalans voor kalium (CBS, 2015). Kennis van kaliumgehalten in diverse afvalstromen ontbreken momenteel (Tabel 10).
- De afgelopen 20 jaar zijn de N en P verliezen uit de landbouw sterk teruggedrongen door het mest- en ammoniakbeleid (van Grinsven & Bleeker, 2017). Opties om de N-verliezen door uit- en afspoeling uit landbouwgronden verder te verlagen boven op de maatregelen die nu al in zwang zijn, zijn beperkt. Deze aanvullende opties gaan gepaard met relatief hoge kosten en/of leiden tot productieafname in de landbouw (Groenendijk *et al.*, 2016).
- Verliezen aan micronutriënten treden voornamelijk op bij RWZI-slibben en het voedselafval, vergelijk met de P-verliezen (Tabel 10), omdat het slib en het afval vrijwel niet worden gerecycled in de landbouw. De verliezen zijn nochtans kleiner dan de som van de minerale aanvoer via meststoffen in de landbouw en de toevoegingen aan diervoer (Tabel 2).
- De rol van biologische N-binding is momenteel klein ten opzichte van de potentieel mogelijke bijdrage aan de stikstofbalans van de Nederlandse landbouw.
- Recycling/herwinnen van nutriënten kan beschouwd worden als het ombuigen van verliesposten naar retourstromen (in termen van Figuur 5: pijlen naar rechts worden naar beneden omgebogen). De retourstromen ⁶ betreffen nu naar schatting 29 mln kg N en 6 mln kg P (Tabel 4: via compost en covergisting etc.). Via de zeven grootste verliesposten gaat in Nederland zo'n 100 mln kg N en 25 mln kg P en verloren (Tabel 10).

⁶ Route van voedselafval naar diervoer is niet apart beschouwd.



Figuur 8 Hefbomen om nutriëntkringlopen van Nederlands voedselsysteem te sluiten. Voorbeeld: Stikstof (van den Berg et al., 2017). De benutting van mineralen in de landbouw is bij stikstof 47% en bij P 93%⁷.

Opties voor nutriëntenrecycling en het sluiten van nutriëntenkringlopen

Samenvattend zijn er verschillende aanknopingspunten om nutriëntenkringlopen zo ver mogelijk te sluiten (zie Figuur 8):

1. De benutting van mineralen in de landbouw⁵ is tussen 2005 en 2015 toegenomen van 41 tot 47% voor N, en van 62 tot 93% voor P, met name door de mestexport (CBS, 2017). De benutting van P en K in gewasproductie is relatief efficiënt ten opzichte van die van stikstof (N). Door een combinatie van veel verschillende maatregelen kunnen de N-verliezen verder worden beperkt en de benutting van N verder worden verhoogd, onder andere door meer precisiebemesting, en efficiëntere gewassen en bouwplannen. Maar grote verbeteringslagen, zonder derving van gewasopbrengsten, zijn onwaarschijnlijk. De benutting van N, P en K in de dierlijke productie kan ook beperkt worden verbeterd door een combinatie van meer precisievoeding, diersselectie op hogere voederconversie, en betere benutting van dierlijke mest (dus minder verliezen). Maar ook hier zijn geen grote verbeteringslagen meer te verwachten.

⁷ Benutting mineralen landbouw CBS (2017): % input vastgelegd in dierlijk- en plantaardige producten t.o.v. aanvoer minus mestexport.

-
2. Substitutie van stikstofkunstmest in de grasland-gebonden veehouderij is mogelijk door gebruik van meer klaver. In de akkerbouw zou ook meer gebruik van vlinderbloemigen gemaakt kunnen worden; zo wordt er al geëxperimenteerd met de teelt van sojabonen in Nederland.
 3. Via recycling van P uit RWZI slibben, diermelen en voedselafval kan maximaal 37 mln P herwonnen worden. Om dat in perspectief te zetten, er wordt nu 70 mln P via krachtvoer geïmporteerd (Figuur 2) en 25 mln P via mest geëxporteerd (Tabel 10). Op dit moment wordt via compost, zuiveringsslib en reststoffen zo'n 6 mln P en 29 mln N hergebruikt (Tabel 4).
 4. Herwonnen nutriënten (Nättorp *et al.*, 2017) zijn momenteel vaak duurder dan nutriënten in kunstmeststoffen. De afzet van recyclede nutriënten als substitutie van kunstmest buiten Nederland, is mogelijk als storten of verbranden niet toegestaan is, of recycling verplicht wordt (P recycling uit RWZI slib zoals nu verplicht is gesteld in Duitsland), of door interventies die het kosteneffectief maken. Er zijn dan meer prikkels nodig, vergelijkbaar met die voor de ontwikkeling van duurzame energie via de SDE regeling.
 5. Een volledig sluiten van kringlopen, dat wil zeggen "geen import van voedsel, veevoer of meststoffen, en zonder export van landbouwproducten", is in theorie mogelijk met 17 miljoen Nederlanders (Terluin *et al.*, 2013). Het vergt een ander consumptiepatroon, met minder import-gebaseerde producten en minder dierlijke producten. Ook in zo'n situatie zijn er echter verliezen via uitspoeling en emissies van N naar de lucht. Een minder extreem doel kan zijn door kringlopen te sluiten samen met omliggende landen, waardoor de verliezen ook worden verminderd. De verliezen bij consumenten en industrie (minimaal 100 mln kg N en 25 mln kg P) worden dan omgebogen in retourstromen naar de plantaardige productiesector (punt 4 in Figuur 8).

Literatuur

- Ahrens, H. 2014. Das Brett aus Biogasabfall. *VDI Nachrichten*, **51**.
- Anonymous 2017. Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung. *Bundesgesetzblatt, Teil I nr 65*.
- Baltussen, W., Hoste, R., van der Meulen, H., Oosterkamp, E. & Poort, J. 2014. *Vergoeding Rendac voor het ophalen, verwerken en vernietigen van kadavers*, LEI Wageningen UR, Wageningen.
- Beeckman, A., Sobry, L. & Govaerts, W. 2014. *Mengteelten graan met erwten of veldbonen*, Wageningen UR, Wageningen.
- Beker, D. & Cornelissen, A. 1999. *Chemische analyse van huishoudelijk restafval: resultaten 1994 en 1995*, RIVM, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu.
- BGS 2016. *European Mineral Statistics*
<http://www.bgs.ac.uk/mineralsuk/statistics/europeanStatistics.html>, BritishGeologicalSurvey, Nottingham, Edinburgh, London.
- Billen, P., Costa, J., Van der Aa, L., Van Caneghem, J. & Vandecasteele, C. 2015. Electricity from poultry manure: a cleaner alternative to direct land application. *Journal of Cleaner Production*, **96**, 467-475.
- BLW 2016. *Angebots- und Nachfragepotenzial mineralischer Recyclingdünger in der Schweiz. Modul B: Marktvolumen, Marktpotenzial, Machbarkeit 14. April, 2016. Bundesamt für Landwirtschaft BLW*.
- Boomen, R. v. d., Uijterlinde, C. & Foekema, E. M. 2015. Waterschappen klaar voor de 'Waterharmonica'. *H2O: tijdschrift voor watervoorziening en afvalwaterbehandeling*, **45**, 4-5.
- Bowley, H. E., Mathers, A. W., Young, S. D., Macdonald, A. J., Ander, E. L., Watts, M. J., Zhao, F. J., McGrath, S. P., Crout, N. M. J. & Bailey, E. H. 2017. Historical trends in iodine and selenium in soil and herbage at the Park Grass Experiment, Rothamsted Research, UK. *Soil Use and Management*, **33**, 252-262.
- Brown, P. H. 2008. Micronutrient Use in Agriculture in the United States of America. In: *Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production*. (ed B. J. Alloway), Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 267-286.
- BVOR 2015. Compost Sleutel tot een vruchtbare bodem. *nieuwsbulletin BVOR*, **25**.
- CBS 2013a. Stroomschema's stikstof, fosfor en kalium 2009-2011 <https://www.cbs.nl/nl-nl/achtergrond/2013/52/stroomschema-s-stikstof-fosfor-en-kalium-2009-2011>. In.
- CBS 2013b. Zware metalen op landbouwgrond, 1980 - 2009 <http://statline.cbs.nl/>. In.
- CDM 2015. *Commissie van Deskundigen, Meststoffenwet, Advies 'Mestverwerkingspercentages 2017'*, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Wageningen.
- Chardon, W. J. & Oenema, O. 2013. *Verkenning mogelijke schaarste aan micronutriënten in het voedselsysteem*, Alterra Wageningen UR, Wageningen.
- CLO 2017. Balans van stikstof in de landbouw, 2015. <http://www.clo.nl/indicatoren/nl0094-balans-van-stikstof>. In.
- CVB 2005. *Commissie Onderzoek Minerale Voeding. Handleiding mineralenvoorziening rundvee, schapen, geiten*, Centraal Veevoederbureau, Lelystad.
- DBC 2017. *Hemel, S. Klijn, N. Bodem in zicht. Duurzaam en circulair beheer van de Nederlandse Bodemkwaliteit.* <http://www.dutchbiorefinerycluster.nl/themas/bodem-in-zicht>, Dutch Biorefinery Cluster (DBC), Wageningen.
- de Haan, J. J. & van Geel, W. 2013. *Adviesbasis voor de bemesting van akkerbouw- en vollegrondsgroentengewassen*, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Lelystad.
- de Ruijter, F. J., van Dijk, W., van Middelkoop, J. C. & van Reuler, H. 2016. *Phosphorus recycling from the waste sector*, Plant Research International, Wageningen.
- den Boer, D. J., Reijneveld, J. A., Schröder, J. J. & van Middelkoop, J. C. 2012. *Mestsamenstelling in Adviesbasis Bemesting Grasland en Voedergewassen*, Wageningen UR Livestock Research, Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen, Lelystad.
- EC 2017. *Study on the review of the list of Critical Raw Materials. Critical Raw Materials Factsheets*.
- Ehlert, P. A. I. 2017. *Veeljarige effecten van fosfaatbemesting. Presentatie 2 februari 2017*.
- Ehlert, P. A. I. & Chardon, W. J. 2014. *Veranderingen van de zwavelbalans van de Nederlandse bodem: beantwoording van een helpdeskvraag*, Alterra Wageningen UR, Wageningen.

- Ehlert, P. A. I., van Dijk, T. A. & Oenema, O. 2016. *Opname van struviet als categorie in het Uitvoeringsbesluit Meststoffenwet: advies*, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, Wageningen.
- ESPP 2016. Understanding Animal by-products and phosphorus recycling. *Scope Newsletter, European Sustainable Phosphorous Platform*, **122**.
- EU 2017. *Mededeling van de commissie aan het Europees parlement, de raad, het Europees economisch en sociaal comité en het comité van de regio's over de lijst van 2017 van voor de EU kritieke grondstoffen COM (2017) 490.*, Brussel.
- Evers, M., Vroegrijk, M. & Evers, T. 2016. *Marktverkenning en gewasonderzoek struviet en struviethoudende producten uit communaal afvalwater*, Stowa, Amersfoort.
- Evers, M. A. A., Hensgens, V. R. C. & Pothoven, R. 2000. *Handboek meststoffen*, Nutrienten Management Instituut NMI [etc.], Wageningen [etc.].
- FEFAC 2016. *Feed & Food Statistical Yearbook 2015* <http://www.fefac.eu/files/72357.pdf>.
- Fibrophos 2017. <http://www.fibrophos.co.uk/fertiliser-specification/>.
- Finn, J. A., Kirwan, L., Connolly, J., Sebastià, M. T., Helgadottir, A., Baadshaug, O. H., Bélanger, G., Black, A., Brophy, C. & Collins, R. P. 2013. Ecosystem function enhanced by combining four functional types of plant species in intensively managed grassland mixtures: a 3-year continental-scale field experiment. *Journal of Applied Ecology*, **50**, 365-375.
- Fischedick M., J. R., A. Abdel-Aziz, A. Acquaye, J. M. Allwood, J.-P. Ceron, Y. Geng, H. Kheshgi, A. Lanza, D. Perczyk, L. Price, & E. Santalla, C. S., and K. Tanaka, 2014: Industry. 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Fleskens, L., Matte, G. & van Zanten, O. 2016. *Zuiver water komt tot leven: vijftien jaar waterharmonica’s bij Waterschap De Dommel*, Waterschap De Dommel, Boxtel.
- Fraters, B., Hooijboer, A. E. J., Vrijhoef, A., Claessens, J., Kotte, M. C., Rijs, G. B. J., Denneman, A. I. M., van Bruggen, C., Daatselaar, C. H. G., Begeman, H. A. L. & Bosma, J. N. 2016. *Landbouwpraktijk en waterkwaliteit in Nederland; toestand (2012-2014) en trend (1992-2014): resultaten van de monitoring voor de Nitraatrichtlijn*, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven.
- Garcia, R. A. & Rosentrater, K. A. 2008. Concentration of key elements in North American meat & bone meal. *Biomass and Bioenergy*, **32**, 887-891.
- Groenendijk, P., van Boekel, E. M. P. M., Renaud, L., Greijden, A., Michels, R. & de Koeijer, T. J. 2016. *Landbouw en de KRW-opgave voor nutrïnten in regionale wateren: het aandeel van landbouw in de KRW-opgave, de kosten van enkele maatregelen en de effecten ervan op de uit- en afspoeling uit landbouwgronden*, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Hoeks, P., van Middelkoop, J. C., Philipsen, A. P., Talens, B., Bussink, D. W., Bos, A. J., van Dijk, W., Schröder, J. J., Abbink, G. & van Eekeren, N. 2012. *Bemestingsadvies*, Animal Sciences Group, Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen, Lelystad.
- Kamp, J., van Berkum, S., Timmer, R. & van Reeuwijk, P. 2010. *Verkenning naar de mogelijkheden van eiwithoudende teelten in Europa*, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Groene ruimte en Vollegrondsgroenten, Lelystad.
- Kratz, S., Schick, J. & Schnug, E. 2016. Trace elements in rock phosphates and P containing mineral and organo-mineral fertilizers sold in Germany. *Science of The Total Environment*, **542**, 1013-1019.
- Kupfernagel, J., Reitsma, B., Stekete, J. & De Ruijter, F. J. 2017. *Possibilities and opportunities for recovery of nutrients other than phosphorus. Reference R001-1244882KJU-wga-V01-NL* Tauw bv, Deventer.
- Lesschen, J. P., van der Kolk, J., van Dijk, K. & Willemse, J. 2013. *Options for closing the phosphorus cycle in agriculture: assessment of options for Northwest Europe and the Netherlands*, Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu.
- LNV 2005. Uitvoeringsregeling Meststoffenwet Regeling van de Minister van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit van 4 november 2005, nr. TRCJZ/2005/3295, houdende regels ter uitvoering van de Meststoffenwet (Uitvoeringsregeling Meststoffenwet)21 november 2005. *Staatscourant*, **226**.
- Luske, B. & Blonk, H. 2009. Milieueffecten van dierlijke bijproducten. *Gouda: Blonk Milieu advies*.
- Mestverwerking-Fyslân 2017. <http://www.mestverwerkingfriesland.com/>.

- Mestverwerkingsloket & BMA 2017. *Rapport Landelijke Inventarisatie Mestverwerkingscapaciteit 2017*
<http://www.mestverwerkingsloket.nl/inventarisatie-2017/>.
- Mortvedt, J. J., Cox, F. R. & Shuman, L. M. 1991. *Micronutrients in agriculture*, Soil Science Society of America, Madison.
- Nättorp, A., Remmen, K. & Remy, C. 2017. Cost assessment of different routes for phosphorus recovery from wastewater using data from pilot and production plants. *Water Science and Technology*, wst2017212.
- Nevedi 2016. Standpunt aangaande Mineralenkringloop
<https://assets.nevedi.nl/p/229376/20170301%20Mineralenkringloop.pdf>. In.
- NieuweOogst 2016. Luijmes, R. Achterhoeker bouwt huizen met mestblokken. *Nieuwe Oogst*
<https://www.nieuweoogst.nu/nieuws/2016/09/07/achterhoeker-bouwt-huizen-met-mestblokken>,
7 september 2016.
- Nyfeler, D., Huguenin-Elie, O., Suter, M., Frossard, E., Connolly, J. & Lüscher, A. 2009. Strong mixture effects among four species in fertilized agricultural grassland led to persistent and consistent transgressive overyielding. *Journal of Applied Ecology*, **46**, 683-691.
- Oliva, J., Read, B. & Österreich, U. 2009. *Klärschlamm: Materialien zur Abfallwirtschaft*, Umweltbundesamt.
- Orgaplus 2017. Technische fiche Orgaplus HiCal <http://www.orgaplus.nl/nederlands/producten-diensten>. In.
- Paisley, L. G. & Hostrup-Pedersen, J. 2005. A quantitative assessment of the BSE risk associated with fly ash and slag from the incineration of meat-and-bone meal in a gas-fired power plant in Denmark. *Preventive veterinary medicine*, **68**, 263-275.
- Paulsen, H. M., Kratz, S. & Schnug, E. 2011. Nährstoffgehalte ökologischer Wirtschaftsdünger.
- Pels, J. 2011. Hergebruik van assen uit biomassaverbranding. *Hoeveelheden en samenstelling van de assen en opties voor materiaalhergebruik*.
- Phyllis, E. 2012. Database for biomass and waste. *Energy Research Centre of the Netherlands*.
- Regelink, I., Ehlert, P. & Römkens, P. 2017. *Perspectieven voor de afzet van (fosfaat-verarmd) zuiverings-slib naar de landbouw*, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Reimann, C., Fabian, K., Birke, M., Filzmoser, P., Demetriades, A., Négrel, P., Oorts, K., Matschullat, J. & de Caritat, P. 2016. GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. *Applied Geochemistry*.
- Renaud, L., Bonten, L., Groenendijk, P. & Groenenberg, B. J. 2015. *Berekening van uit- en afspoeling van nutriënten- en zware metalen ten behoeve van de EmissieRegistratie 2013*, Alterra Wageningen UR, Wageningen.
- Rietra, R. P. J. J. & Voogd, J. C. 2011. *Ontwikkeling van de bodemkwaliteit in Gelderland: trends in het Meetnet Bodemkwaliteit (1997-2010)*, Alterra Wageningen UR, Wageningen.
- Rijkswaterstaat 2013. *Nederlands afval in cijfers, 2006-2010*, Agentschap NL.
- Rijkswaterstaat 2016. *Effluenten RWZI's (gemetenstoffen) Versie mei 2016*
[http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/Water/Factsheets/Nederlands/Effluenten%20RWZI%20\(gemeten\).pdf](http://www.emissieregistratie.nl/erpubliek/documenten/Water/Factsheets/Nederlands/Effluenten%20RWZI%20(gemeten).pdf).
- Rijkswaterstaat 2017a. *Effluenten RWZI's, regenwaterriolen, niet aangesloten riolen, overstorten en IBA's*
[http://www.emissieregistratie.nl/ERPUBLIEK/documenten/Water/Factsheets/Nederlands/Effluenten%20RWZI%20\(berekend\).pdf](http://www.emissieregistratie.nl/ERPUBLIEK/documenten/Water/Factsheets/Nederlands/Effluenten%20RWZI%20(berekend).pdf).
- Rijkswaterstaat 2017b. *Samenstelling van het huishoudelijk restafval, resultaten sorteeranalyses 2016. Gemiddelde driejaarlijkse samenstelling 2015*.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin III, F. S., Lambin, E., Lenton, T., Scheffer, M., Folke, C. & Schellnhuber, H. J. 2009. Planetary boundaries: exploring the safe operating space for humanity. *Ecology and society*, **14**.
- Roex, E., Foekema, E., Sneekes, A., Koelemij, E., Atsoi, M. T., Hoornsman, G., Bakker, A., Murk, T. & van de Berg, H. 2012. *De invloed van moerassystemen op de milieukwaliteit van rwzi effluent en aanbevelingen tot optimalisering*, IMARES Wageningen UR, IJmuiden [etc.].
- Römkens, P., Rietra, R. & Ehlert, P. 2016. *Effectbeoordeling van het voorstel voor een nieuwe Europese Meststoffenverordening: analyse van de aanvoer van zware metalen de landbouwbodem en gevolgen voor vrije verhandeling van nationale meststoffen*, Wageningen Environmental Research, Wageningen.

- Römkens, P. F. A. M. & Rietra, R. P. J. J. 2008. *Zware metalen en nutriënten in dierlijke mest in 2008: gehalten aan Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, As, N en P in runder-, varkens- en kippenmest*, Alterra, Wageningen.
- Römkens, P. F. A. M., Rietra, R. P. J. J. & Ehlert, P. A. 2016. *Effectbeoordeling van het voorstel voor een nieuwe Europese Meststoffenverordening: analyse van de aanvoer van zware metalen de landbouwbodem en gevolgen voor vrije verhandeling van nationale meststoffen*, Wageningen Environmental Research.
- Ryan, T. 2010. *The Australian fertilizer industry -- values and issues. Australian Fertilizer Industry Conference 2010*.
- Sanders, J. P. M., van Liere, J., de Wilt, J. G. & Courage 2016. *Geraffineerd voeren: naar een sluitende mineralenkringloop door raffinage van lokaal geteeld veevoer*, Innovatie Agro & Natuur - Netwerkorganisatie voor grensverleggende vernieuwingen, Utrecht.
- Schils, R. L. M., Boxem, T. J., Jagtenberg, C. J. & Verboon, M. C. 2000. The performance of a white clover based dairy system in comparison with a grass/fertiliser-N system. II. Animal production, economics and environment. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, **48**, 305-318.
- Schoumans, O. F., Blokland, P. W., Cleij, P., Groenendijk, P., de Koeijer, T. J., Luesink, H. H., Renaud, L. V. & van den Roovaart, J. 2017. *Ex-ante-evaluatie van de mestmarkt en milieukwaliteit: evaluatie van de meststoffenwet 2016*, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- Schoumans, O. F., Ehlert, P. A. I., Nelemans, J. A., van Tintelen, W., Rulkens, W. H. & Oenema, O. 2014. *Explorative study of phosphorus recovery from pig slurry: laboratory experiments*, Alterra Wageningen UR, Wageningen.
- Schreuder, R. & Hendriks-Goossens, V. 2015. *Kwantitatieve informatie akkerbouw en vollegrondsgroenteteelt 2015.*, PPO rapport nr 643. PPO, Lelystad.
- Schröder, J. J. 2013. *Emissie-neutrale akkerbouw*, Wageningen UR, Wageningen.
- Smit, A. L., van Middelkoop, J. C., van Dijk, W., van Reuler, H., de Buck, A. J. & van de Sanden, P. A. C. M. 2010. *A quantification of phosphorus flows in the Netherlands through agricultural production, industrial processing and households*, Plant Research International, Business Unit Agrosysteemkunde, Wageningen.
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., Biggs, R., Carpenter, S. R., de Vries, W. & de Wit, C. A. 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, **347**, 1259855.
- Suttle, N. F. & Underwood, E. J. 2010. *The mineral nutrition of livestock*, CABI, Wallingford [etc.].
- TCB 2010. *Advies Sluiten nutriëntenkringlopen A059*, Technische commissie bodem
- Terluin, I. J., Kamphuis, B. M., Oudendag, D. A. & van Leeuwen, M. G. A. 2013. *Voedselvoorziening in Nederland onder buitengewone crisistandigheden*, LEI Wageningen UR, Den Haag.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. & Polasky, S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, **418**, 671-677.
- Timmer, R. D. & de Visser, C. L. M. 2014. *Ontwikkeling van de sojateelt in Zuidoost Nederland*, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, onderdeel van Wageningen UR, Business Unit Akkerbouw, Groene Ruimte en Vollegrondsgroenten, Lelystad.
- TNO, Deltares & PBL 2016. *Atmosferische depositie op Nederland en Nederlands Continentaal Plat.*, www.emissieregistratie.nl.
- Toet, S., Van Logtestijn, R. S., Kampf, R., Schreijer, M. & Verhoeven, J. T. 2005. The effect of hydraulic retention time on the removal of pollutants from sewage treatment plant effluent in a surface-flow wetland system. *Wetlands*, **25**, 375-391.
- Udo de Haes, H. A., Voortman, R. L., Bastein, T., Bussink, D. W., Rougoor, C. W. & van der Weijden, W. J. 2012. *Schaarste van micronutriënten in bodem, voedsel en minerale voorraden: urgentie en opties voor beleid*, Platform Landbouw, Innovatie & Samenleving, Utrecht.
- USGS 2017. Mineral Commodity Summaries 2016. In.
- van Bruggen, C. 2012. *Covergisting van dierlijke mest 2006-2011*, Den Haag/Heerlen.
- van Dam, M. 2017. Kamerbrief 4 juli 2017, betreffende "Voortgang invulling zesde actieprogramma Nitraatrichtlijn". *Kamerstuk Tweede Kamer der Staten Generaal*, **kamerstuk 33 037 nr 219**.
- van den Berg, K., Brinkmann, A., Brooijmans, P., de Buck, W., Renske Verhulst, R., Coster, R., Hagting, L., Kager, H., Oene Oenema, O., Schouten, W. J., Straatsma, J. W., Walthaus, H., van der Weijden, W. & Westhoek, H. 2017. *Nutriëntenkringlopen & Bodemvruchtbaarheid. Onderdeel transitie agenda Biomassa & Voedsel*.

-
- van den Boomen, R., Kampf, R. & Claassen, T. 2012. *Waterharmonica's in Nederland 1996-2011: van effluent tot bruikbaar oppervlaktewater*, STOWA, Amersfoort.
- van der Veer, G. 2006. Geochemical soil survey of the Netherlands: atlas of major and trace elements in topsoil and parent material; assessment of natural and anthropogenic enrichment factors. In., Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap [etc.], Utrecht [etc.].
- van der Wal, T., Vullings, L. A. E., Zaneveld-Reijnders, J. & Bink, R. J. 2017. *Doorontwikkeling van de precisielandbouw in Nederland: een 360 graden-verkenning van de stand van zaken rond informatie-intensieve landbouw en in het bijzonder de plantaardige, openluchtteelt*, Wageningen Environmental Research, Wageningen.
- van Dijk, K. C., Lesschen, J. P. & Oenema, O. 2016. Phosphorus flows and balances of the European Union Member States. *Science of The Total Environment*, **542**, 1078-1093.
- van Gaalen, F., Tiktak, A., Franken, R., van Boekel, E. M. P. M., van Puijenbroek, P., Muilwijk, H., Grinsven, H., Rougoor, C. W., van der Salm, C., Groenendijk, P., Cleij, P. & van den Roovaart, J. 2016. *Waterkwaliteit nu en in de toekomst: eindrapport ex ante evaluatie van de Nederlandse plannen voor de Kaderrichtlijn Water: beleidsstudie*, Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag.
- van Grinsven, H. & Bleeker, A. 2017. *Evaluatie Meststoffenwet 2016: syntheserapport*, PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag.
- Van Kauwenbergh, S. J. 2010. *World phosphate rock reserves and resources*, IFDC Muscle Shoals.
- van Krimpen, M. M., van Vuuren, A. M. & Bikker, P. 2013. *Behoeftte en verbruik van micronutriënten in de diervoeding = Requirement and consumption of micro nutrients in animal feed*, Wageningen UR Livestock Research, Lelystad.
- van Wijk, C., de Haan, J., Ehlert, P. A. I. & van den Berg, W. 2013. *Lange termijn effecten van fosfaatbalansen op bouwland: fosfaatrapporten proefveld Lelystad: observaties op basis van het meetprogramma 1987-2011 in een proefveld Lelystad*, Praktijkonderzoek Plant & Omgeving, Business Unit Akkerbouw, Groene Ruimte en Vollegrondsgroenten, Lelystad.
- Vellinga, T., van Laar, H., Thomassen, M., de Boer, I., Berkhout, P. & Aiking, H. 2009. *Milieueffecten van diervoeders*, Wageningen UR, Animal Sciences Group, Lelystad.
- Velthof, G. L. 2000. *Schatting van de netto stikstofmineralisatie en de biologische stikstofbinding in landbouwgronden*, Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Wageningen.
- Velthof, G. L. 2011. *Synthese van het onderzoek in het kader van de Pilot Mineralenconcentraten*, Alterra Wageningen UR, Wageningen.
- Viaene, J., Nelissen, V., Reubens, B., Willekens, K., Driehuis, F., De Neve, S. & Vandecasteele, B. 2017a. Improving the product stability and fertilizer value of cattle slurry solid fraction through co-composting or co-ensiling. *Waste Management*, **61**, 494-505.
- Viaene, J., Nelissen, V., Vandecasteele, B., Willekens, K., De Neve, S. & Reubens, B. 2017b. Field storage conditions for cattle manure to limit nitrogen losses and optimise fertiliser value. *Animal Production Science*, **57**, 2148-2166.
- VLACO 2012. *Economische en Ecologische voordelen van digestaat*
<http://www.vlaco.be/sites/default/files/generated/files/page/ecol-en-econ-waardering-digestaat-vlaco-vzw.pdf>.
- Vonk, J., van Pul, W. A. J., Schols, E. & de Groot, G. M. 2012. *Naleeftekorten bij luchtwassers in de intensieve veehouderij. RIVM briefrapport 609021121*.
- WerkgroepNutriëntenkringloop&Bodemvruchtbaarheid 2017. 5 pager. Werkgroep Nutriëntenkringloop & Bodemvruchtbaarheid. Transitieteam Biomassa & Voedsel.
- Westhoek, H., Ingram, J., van Berkum, S. & Hajer, M. 2016. *Food systems and natural resources*, United Nations Environment Programme, Nairobi.
- Wolkers, H., Barbosa, M., Kleinegris, D. M. M., Bosma, R., Wijffels, R. H. & Harmsen, P. 2011. *Microalgae: the green gold of the future?: large-scale sustainable cultivation of microalgae for the production of bulk commodities*, Wageningen UR Food & Biobased Research, Wageningen.

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

Wageningen Environmental Research
Rapport 2862
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, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.



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



Wageningen Environmental Research
Postbus 47
6700 AB Wageningen
T 317 48 07 00
www.wur.nl/environmental-research

Rapport 2862
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, 5.000 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.

