



---

# Verkenning effecten landbouwinnovaties

Potentieel van landbouwinnovaties om emissies van ammoniak en broeikasgassen naar de lucht en verliezen van nutriënten naar het water te verlagen

Gerard H. Ros, Harry Kager, Gerben Boom & Wim de Vries



**WAGENINGEN**  
UNIVERSITY & RESEARCH

Rapport WU 2024.159

---



# Verkenning effecten landbouwinnovaties

Potentieel van landbouwinnovaties om emissies van ammoniak en broeikasgassen naar de lucht en verliezen van nutriënten naar het water te verlagen

Gerard H. Ros<sup>1</sup>, Harry Kager<sup>2</sup>, Gerben Boom<sup>2</sup>, Wim de Vries<sup>1</sup>

1 Earth Systems and Global Change Group, Wageningen Universiteit, Wageningen

2 Schuttelaar & Partners, Den Haag

Dit onderzoek is uitgevoerd door Wageningen Universiteit en gefinancierd door het Interprovinciaal Overleg (IPO)

Wageningen Universiteit,  
Wageningen, januari 2025

---

Gereviewd door:

Ir. Gerard Michels, Wageningen Livestock Research  
Prof. Dr. Martin van Ittersum, Wageningen Universiteit

Rapport 2024.159

---

Ros, G.H., Kager, H., Boom, G., de Vries, W., 2025. *Verkenning effecten landbouwinnovaties. Potentieel van landbouwinnovaties om emissies van ammoniak en broeikasgassen naar de lucht en verliezen van nutriënten naar het water te verlagen*. Wageningen, Wageningen Universiteit, Rapport 2024.159; 78 blz.; 1 fig.; 12 tab.; 103 ref.

In deze studie wordt het innovatiepotentieel van de veehouderij (rundvee, kippen en varkens) op korte (1-5 jaar) en middellange termijn (5-10 jaar) in beeld gebracht in relatie tot de gewenste emissiereducties in ammoniak, lachgas, en methaan naar de lucht, en van nitraat en fosforverliezen naar grond- en oppervlaktewater. Het gaat hierbij om innovaties in huisvesting en mestopslag, diervoeding, bemesting en bodembeheer, waarbij innovaties rond mesttoediening ook implicaties hebben voor de grondgebonden sectoren zoals akkerbouw en groenteteelt. Op basis van bestaande literatuur is een inventarisatie uitgevoerd naar het effect, de inzetbaarheid, de toepasbaarheid en de kosten van 44 innovaties in de veehouderij. Bij volledige implementatie van deze innovaties (d.w.z. alle bedrijven implementeren de maatregelen op een juiste manier) is het mogelijk om de beoogde doelen voor ammoniak en broeikasgassen van het Nationaal Programma Landelijk Gebied te realiseren. Voor waterkwaliteit blijven er uitdagingen in het landelijk gebied, waarbij andere instrumenten dan innovaties nodig zijn om de doelen te realiseren. Omdat een volledige implementatie in de praktijk erg lastig is te realiseren, is het realistisch om aan te geven dat naast technologische innovaties ook wijzigingen in de landbouwstructuur (dat wil zeggen, extensivering) nodig zijn om de beoogde emissiereducties van ammoniak en broeikasgassen als ook af- en uitspoeling van nutriënten naar grond- en oppervlaktewater te realiseren.

Trefwoorden: landbouwinnovaties, emissies, landbouw, NPLG

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/684600>. Wageningen Universiteit verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten.

© 2025 Wageningen Universiteit (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Wageningen Research), Postbus 47, 6700 AA Wageningen, T 0317 48 07 00, [www.wur.nl](http://www.wur.nl). Wageningen Universiteit 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 Universiteit aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Wageningen Universiteit Rapport 2024.159

Foto omslag: WUR

---

# Inhoud

<b>Inhoud</b>	<b>3</b>
<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1 Introductie</b>	<b>6</b>
1.1 Achtergrond	6
1.2 Doelstelling en afbakening	7
1.3 Leeswijzer	7
<b>2 Methodebeschrijving</b>	<b>9</b>
2.1 Inventarisatie innovatiepotentieel en referentiesituatie	9
2.2 Theoretisch maximale innovatiepotentieel	10
2.3 Praktisch haalbare innovatiepotentieel	11
<b>3 De opgaven voor emissiereductie</b>	<b>14</b>
3.1 De landelijke context	14
3.2 De provinciale opgaven	14
3.3 De opgave vertaalt naar bedrijfsniveau	15
<b>4 Inventarisatie innovatiepotentieel</b>	<b>18</b>
4.1 Innovaties rundveehouderij	18
4.2 Innovaties varkenshouderij	19
4.3 Innovaties pluimveehouderij	20
<b>5 Theoretisch maximale innovatiepotentieel</b>	<b>21</b>
5.1 Innovatiepotentieel voor ammoniak	21
5.2 Innovatiepotentieel voor broeikasgassen	21
5.3 Innovatiepotentieel voor waterkwaliteit	22
5.4 Theoretisch maximale emissiereducties	23
<b>6 Praktisch haalbare innovatiepotentieel</b>	<b>24</b>
6.1 Innovatiepotentieel voor ammoniak	24
6.2 Innovatiepotentieel voor broeikasgassen	27
6.3 Innovatiepotentieel voor waterkwaliteit	29
6.4 Praktisch haalbare emissiereducties	30
<b>7 Realisatie van opgaven en kosten</b>	<b>31</b>
7.1 Kosten van innovaties	31
7.2 Effecten van inkomstenverlies	32
7.3 Risico's en afhankelijkheden	33
7.4 Regionaal maatwerk	35
7.5 Aandachtspunten	36
<b>8 Conclusies</b>	<b>37</b>
<b>Literatuur</b>	<b>39</b>
<b>Bijlage I. Innovatiepotentieel maatregelen</b>	<b>45</b>
<b>Bijlage II. Literatuuroverzicht maatregelen</b>	<b>50</b>
<b>Bijlage III. Verslag stakeholdersessie</b>	<b>75</b>

---

# Samenvatting

In de komende jaren moeten er in de veehouderij grote stappen worden gezet om de emissie van ammoniak, methaan en lachgas naar de lucht, en de uit- en afspoeling van stikstof en fosfor naar het watersysteem te verlagen. Het nieuwe kabinet wil boeren de ruimte geven om te ondernemen en hun vakmanschap weer centraal stellen om daarmee een goede landbouwpraktijk te combineren met een schone leefomgeving. De overheid zet daarom in op 'doelsturing'. Doelsturing in landbouwbeleid vraagt niet alleen een focus op een concreet gedefinieerd doel, maar in veel gevallen ook het goed nadenken over de middelen. Het team strategie van het Interprovinciaal Programma Landelijk Gebied voert daarom in opdracht van de Bestuurlijke Adviescommissie Landelijk Gebied een strategische verkenning uit naar de potentie van landbouwinnovaties. Deze verkenning heeft als doel inzicht te bieden in de manier waarop innovaties in de agrarische sector kunnen worden benut voor de transitie van het landelijk gebied en de mogelijkheden die provincies hebben om daarop te sturen in afstemming met het Rijk.

Binnen deze context is een bureaustudie uitgevoerd om het innovatiepotentieel van de veehouderij (rundvee, pluimvee en varkens) op korte (1-5 jaar) en middellange termijn (5-10 jaar) in beeld te brengen in relatie tot de gewenste reducties in ammoniak, lachgas, methaan naar de lucht, en van stikstof- en fosforverliezen naar het water. Maatregelen en innovaties gericht op de toediening van meststoffen hebben daarbij een bredere impact richting alle grondgebonden sectoren. Om dit innovatiepotentieel te kwantificeren is op basis van bestaande literatuur een inventarisatie gedaan van het effect, de inzetbaarheid, de toepasbaarheid en de kosten van bestaande en verwachte innovaties, en zijn de resultaten bediscussieerd met stakeholders. Op basis hiervan is een schatting gemaakt van de theoretisch maximale<sup>1</sup> als ook praktisch haalbare<sup>2</sup> emissiereducties per provincie ten opzichte van de emissies in 2019, uitgaande van 100% implementatie en afgezet tegen de opgaven vanuit het Nationaal Programma Landelijk Gebied<sup>3</sup> (NPLG).

Uit deze analyse blijkt dat er veel innovaties binnen de rundveehouderij inzetbaar zijn (n = 38, waarvan 31 binnen 1-5 jaar) om de emissies te beperken via maatregelen in diermanagement en -voeding, in de stal en mestopslagen, en via bemesting en bodembeheer. In de varkenshouderij zijn er 16 innovaties inzetbaar op korte termijn en 5 innovaties op middellange termijn. In de pluimveehouderij is het aantal beschikbare innovaties beperkt. Dit overzicht weerspiegelt de huidige verdeling in emissies als ook de wettelijke urgentie om met name emissies van ammoniak en broeikasgassen te beperken. Innovaties in relatie tot waterkwaliteit zijn veelal onderdeel van de Goede Landbouwpraktijk.

Op basis van de inventarisatie van het innovatiepotentieel van maatregelen in de veehouderij zijn substantiële emissiereducties van ammoniak en broeikasgassen naar de lucht en verliezen van stikstof en fosfor naar het watersysteem mogelijk. De belangrijkste bevinden zijn als volgt:

- Op basis van onze huidige kennis van het landbouwsysteem in Nederland blijkt dat de emissies van ammoniak en methaan *in theorie* met 61-72% gereduceerd kunnen worden. Voor lachgas is deze theoretische reductie 42%, voor uitspoeling van stikstof naar het grondwater is dat 60%, en voor afspoeling van fosfor naar het oppervlaktewater is dat 10%. Let wel, dit zijn theoretische reducties

---

<sup>1</sup> Theoretisch maximale reducties zijn gedefinieerd als emissiereducties die in theorie mogelijk zijn in een landbouwsysteem als alle omstandigheden optimaal zijn, en het beheer van bodem, gewas, mest en water op een optimale manier worden uitgevoerd. Daarbij gaat het in dit rapport om emissies van CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, en N<sub>2</sub>O naar de lucht en verliezen van N en P naar grond- en oppervlaktewater. Deze theoretische reducties worden veelal afgeleid van modelmatige extrapolaties op basis van de chemische en biologische processen die het gedrag van stikstof, koolstof en fosfor in het landbouwsysteem sturen.

<sup>2</sup> Praktisch realiseerbare reducties betreffen emissiereducties die mogelijk zijn op basis van het huidige landbouwsysteem in Nederland, uitgaande van het jaar 2019, waarbij alle landbouwbedrijven de best beschikbare technieken en maatregelen inzetten die binnen vijf jaar beschikbaar zijn of komen om emissies van CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, en N<sub>2</sub>O naar de lucht en verliezen van N en P naar grond- en oppervlaktewater te verminderen.

<sup>3</sup> Gedurende de looptijd van dit onderzoek is het NPLG als zodanig stopgezet. De onderliggende opgaven voor lucht, bodem- en waterkwaliteit zijn echter nog steeds actueel. Doelrealisatie van NPLG zoals gebruikt in deze studie geeft daarmee geen volledig antwoord op de (nog te besluiten) emissiereducties en bijbehorende beleidsinstrumenten in toekomstig beleid.

---

voor het landbouwsysteem als geheel als alle bedrijven mogelijke maatregelen op een juiste manier implementeren. Deze reducties gelden daarmee niet noodzakelijkerwijs op elk agrarisch bedrijf.

- Via *praktisch haalbare emissiereducties* bij volledige uitrol van innovaties kan de emissie van *ammoniak* met 41-50% worden gereduceerd ten opzichte van de landelijke emissies in 2019. Het gaat hierbij om innovaties die binnen vijf jaar beschikbaar komen voor toepassing in de veehouderij en bij mesttoediening in de grondgebonden teelten. Ook hier gaat het om landelijke emissiereducties. Op bedrijfsniveau is de bandbreedte van deze reductie namelijk groter. De grootste bijdrage komt van innovaties die zich richten op emissiereductie in de stal en mestopslagen, en tijdens mesttoediening. In vrijwel alle provincies kan hiermee de NPLG-opgave worden gerealiseerd. De melkveehouderij heeft het grootste innovatiepotentieel.
- De emissie van broeikasgassen (N<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub>) kan bij volledige uitrol van innovaties worden gereduceerd met 27 tot 48% ten opzichte van de situatie in 2019. Ook dit betreft praktisch haalbare emissiereducties. De grootste bijdrage komt van innovaties die methaanemissies via pensfermentatie en mestopslag weten te verlagen. In alle provincies kan hiermee de NPLG-opgave worden gerealiseerd. Wel blijven er uitdagingen om de gewenste reductie op lange termijn (50% in 2050) te realiseren.
- De uitspoeling van nitraat naar het grondwater kan via de inzet van duurzaam bodembeheer en precisiebemesting (in zowel de veehouderij als de grondgebonden sectoren) worden gereduceerd zodat het gemiddelde nitraatgehalte in vrijwel alle provincies lager is dan 50 mg per liter. Voor het oppervlaktewater is een emissiereductie mogelijk die op kan lopen tot 49% (voor stikstof) en 26% (voor fosfor). De NPLG-doelen voor beide nutriënten kunnen voor deze verliezen slechts in 6 provincies voor stikstof en 3 provincies voor fosfor worden gerealiseerd.

Realisatie van de landelijke opgaven voor ammoniak, broeikasgassen en uit- en afspoeling van nutriënten is alleen mogelijk als alle bedrijven ofwel extensiveren ofwel innovaties op een juiste manier implementeren in hun bedrijfsvoering. Hiervoor zijn innovaties nodig in de bedrijfsvoering (met maatregelen voor dierrantsoenen, diermanagement, mestbewerking en mesttoediening) én de huisvesting (stal en mestopslagen). Het grote aantal beschikbare innovaties biedt bedrijven perspectief om de juiste maatregel te selecteren die past binnen het bedrijf. Omdat de praktijk van afgelopen jaren laat zien dat het vrijwel onmogelijk is om overal een breed pallet aan maatregelen op een juiste manier te implementeren, is het daarom realistisch om aan te geven dat er ook een gedeeltelijke veestapelreductie, d.w.z. een extensivering van dieraantallen per hectare, nodig is om de landelijke opgaven te realiseren.

De innovaties in stalsystemen worden gekenmerkt door relatief hoge jaarkosten (>20 euro per kg NH<sub>3</sub>-reductie) waardoor de totale kosten voor Nederland *indicatief* oplopen tot circa 270 miljoen euro per jaar om de doelen in het landelijk gebied te realiseren. De kosten voor innovaties in het dier- en mestspoor (5 euro per kg NH<sub>3</sub>-reductie) lopen op tot *maximaal* 127 miljoen euro per jaar, al zijn er diverse innovaties (zoals minder krachtvoer en kunstmest) die ook tot kostenreducties leiden. Grootschalige implementatie van innovaties leidt daarnaast tot een daling van het inkomen van veehouderijbedrijven; een daling die in deze studie niet is gekwantificeerd. Om de beoogde emissiereductie te realiseren zijn er beleidsinstrumenten nodig om de agrarische sector economisch perspectief te bieden. Daarnaast zijn er extra investeringen nodig voor borging en handhaving, juist omdat een goede uitvoering van deze maatregelen cruciaal is om de emissiereductie te realiseren. Investeringen in huisvesting, met name in de rundveehouderij, vergroten het risico op lock-in (voor agrarische bedrijven) en zorgen daarmee voor een verdere schaalvergroting en intensivering. Ook in dit kader lijkt een zekere veestapelreductie, met bijbehorend flankerend beleid, relevant om dergelijke trends af te remmen.

In welke mate de inzet van technische innovaties rond stalsystemen te prefereren zijn boven sociale of systeeminnovaties waarmee het landbouwsysteem wijzigt (bijv. extensivering, vergroting areaal biologische landbouw, inzet van nieuwe gewassen en dierrassen, etc.) staat en valt met de lange-termijn visie op de positie van de landbouw in Nederland. De gewenste oplossingsrichting kan verschillen per landbouwsector en ondernemer.

---

# 1 Introductie

## 1.1 Achtergrond

De veehouderij in Nederland heeft de afgelopen decennia een substantiële reductie in emissies van nutriënten en broeikasgassen naar lucht en water gerealiseerd. Voor de komende jaren moeten er echter nog grote stappen worden gezet om met name de emissie van ammoniak, methaan en lachgas naar de lucht, en de uit- en afspoeling van stikstof en fosfor naar het watersysteem te verlagen. Het nieuwe kabinet wil de boeren de ruimte geven om te ondernemen en hun vakmanschap weer centraal stellen om een goede landbouwpraktijk te combineren met een schone leefomgeving. Ondertussen moeten ze wel de wettelijke doelen voor stikstof, broeikasgassen en waterkwaliteit halen in de komende jaren. De overheid zet daarom in op 'doelsturing'.

Doelsturing in landbouwbeleid vraagt niet alleen een focus op een concreet gedefinieerd doel, maar in veel gevallen ook het goed nadenken over de middelen (Jongeneel, 2024). Doelsturing betekent namelijk dat de agrarische ondernemer zelf aan het stuur zit en dus zelf vrij is om (uit een gegeven set aan) de middelen te kiezen. Maar het dient wel helder te zijn via welke maatregelen of middelen de ondernemer in staat is om de beoogde doelen te realiseren. Doelsturing kan vaak zo worden ingericht dat rekening wordt gehouden met de rol van innovaties. Dat laatste is zowel vanuit maatschappelijk (kostenefficiënte emissiereductie) als (bedrijfs)-economisch oogpunt (verdienmodel) van belang. Door doelsturing wordt er als het ware automatisch een verdienmodel voor innovaties gecreëerd.

Het Interprovinciaal Programma Landelijk Gebied (IPLG) is een programma van het Interprovinciaal Overleg (IPO). Het IPLG voert in opdracht van de Bestuurlijke Adviescommissie Landelijk Gebied (BAC LG) een strategische verkenning naar landbouw-innovatie uit. Deze verkenning heeft als doel inzicht te bieden in de manier waarop innovaties in de agrarische sector kunnen worden benut voor de transitie van het landelijk gebied en de mogelijkheden die provinciebestuurders hebben om daarop (gezamenlijk) te sturen, in onderling overleg en door het maken van afspraken met het Rijk. Ter ondersteuning aan deze strategische verkenning is het gewenst om een inschatting te krijgen van het 'innovatiepotentieel' van technische- en managementmaatregelen (inclusief kosten en risico's) en hierover het gesprek aan te gaan met provinciebestuurders over wat gewenst en haalbaar is.

Om het beoogde innovatiepotentieel in beeld te brengen, wordt gewerkt met een expertoordeel. Om dit expertoordeel verder te onderbouwen en in te vullen heeft het IPLG aan Wageningen Universiteit gevraagd om het theoretisch maximale en het praktisch realiseerbare innovatiepotentieel cijfermatig te onderbouwen, rekening houdend met technische, financiële, en maatschappelijke randvoorwaarden.

- *Theoretisch maximale reducties* zijn gedefinieerd als emissiereducties die in theorie mogelijk zijn in een landbouwsysteem als alle omstandigheden optimaal zijn, en het beheer van bodem, gewas, mest en water op een optimale manier worden uitgevoerd. Daarbij gaat het in dit rapport om emissies van CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, en N<sub>2</sub>O naar de lucht en verliezen van N en P naar grond- en oppervlaktewater. Deze theoretische reducties worden veelal afgeleid van modelmatige extrapolaties op basis van de chemische en biologische processen die het gedrag van stikstof, koolstof en fosfor in het landbouwsysteem sturen.
- *Praktisch realiseerbare reducties* zijn gedefinieerd als emissiereducties die mogelijk zijn op basis van het huidige landbouwsysteem in Nederland, uitgaande van het jaar 2019, waarbij alle landbouwbedrijven de best beschikbare technieken en maatregelen inzetten die binnen vijf jaar beschikbaar zijn of komen om emissies van CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, en N<sub>2</sub>O naar de lucht en verliezen van N en P naar grond- en oppervlaktewater te verminderen.

Concreet is inzicht gevraagd in het innovatiepotentieel van de veehouderij (rundvee, kippen en varkens) op korte (1-5 jaar) en middellange termijn (5-10 jaar) in relatie tot de in 2024 gedefinieerde NPLG-doelen die te maken hebben met de beperking van stikstofemissies (ammoniak, lachgas, en nitraat), methaanemissies en fosfaatverliezen naar water en lucht. Om dit in perspectief te plaatsen is het belangrijk om vast te stellen in welke mate die doelen theoretisch haalbaar zijn bij de inzet van technische en sociale innovaties, uitgaande van de huidige emissies.

---

## 1.2 Doelstelling en afbakening

Om inzicht te krijgen in het innovatiepotentieel van de veehouderij, vraagt het IPLG om:

- Een overzicht van beschikbare innovaties uitgesplitst naar maatregelcategorieën (bijv: voermaatregelen, mestbewerking, stalmaatregelen, extensivering in combinatie met andere bedrijfsvoering etc.).
- Cijfermatig inzicht in de impact van innovaties in relatie tot de beoogde emissiereducties en daarbij rekening te houden met en/of onderscheid te maken naar ruimtelijke schaalniveaus (bedrijf, regio, Nederland) waarop innovaties impact hebben. Op bedrijfsniveau gaat het om de daadwerkelijke werking van een maatregel terwijl op regio/nationaal niveau rekening gehouden moet worden met de huidige situatie (een deel van de innovaties wordt al toegepast) en aanwezige interacties tussen veehouderij en akkerbouw (rond bijv. mestaanwending).
- Een inschatting te maken van de financiële kosten die gepaard gaan met het verder optimaliseren van de veehouderij. De detaillering van deze uitwerking moet aansluiten op de eerder gebruikte schaalniveaus van implementatie en passend zijn voor het bestuurlijk gesprek.
- Een risicobeoordeling te geven van mogelijke afhankelijkheden en lock-ins rondom de implementatie van bovengenoemde (categorieën van) maatregelen.
- Mogelijke trade-offs en synergiën te benoemen zoals fijnstof, geur en dierenwelzijn.

De voorliggende studie is een technisch inhoudelijke analyse van de mogelijkheden van innovaties om emissies van ammoniak, methaan en lachgas naar de lucht en emissies van stikstof en fosfor naar grond- en oppervlaktewater te verminderen. Aanpalend zijn een aantal andere studies uitgevoerd door zowel het IPO als kennisinstellingen rondom de mogelijkheden om via doelsturing de doelen voor natuur, water, bodem en luchtkwaliteit te realiseren, en wat de daarvoor benodigde (beleids)instrumenten zijn. De resultaten van de voorliggende studie moeten worden gezien binnen deze context. Het benodigde beleidsinstrumentarium om innovaties daadwerkelijk te implementeren, effecten te monitoren en te borgen wordt hier dan ook niet verder uitgewerkt. Ook wordt er niet ingegaan op de rol van overheden, markt en agrarische sector om de noodzakelijke dan wel gewenste doelen te realiseren.

De voorliggende studie startte voor de zomer van 2024 op het moment dat landelijke en provinciale overheden werkten aan de invulling van het Nationaal Programma Landelijk Gebied. Gedurende de looptijd van deze studie is de uitvoering van het NPLG tot stilstand gekomen. Ook zijn onderliggende doelen voor ammoniak-emissiereductie aangescherpt vanwege de wetenschappelijke update van de Kritische Depositie-waarde. Deze studie gaat in de analyse uit van de opgave zoals deze in het voorjaar van 2024 werd gedefinieerd in de *'Handreiking voor de gebiedsprogramma's NPLG. Versie februari 2024'*. In de praktijk betekent dit dat hiermee de opgave naar alle waarschijnlijkheid wordt onderschat en dat in de toekomst (afhankelijk van de te nemen keuzes door het kabinet) een grotere emissiereductie van ammoniak en broeikasgassen nodig is. Ook het benodigde tijdspad om deze te realiseren, kan wijzigen. Desalniettemin blijven de inzichten van deze studie relevant in relatie tot het gewenste doelbereik.

De analyse van het innovatiepotentieel in de voorliggende studie richt zich op de rundveehouderij, de varkenshouderij en de pluimveehouderij. De andere grondgebonden sectoren (tuinbouw, akkerbouw, boomteelt, en vollegrondsgroente) zijn bij de inventarisatie van innovaties expliciet buiten beschouwing gelaten. Innovaties rondom de toepassing van dierlijke mest, en daarmee op de bemestingspraktijk in de grondgebonden teelten en de daarbij optredende verliezen naar lucht en water zijn wel meegenomen.

## 1.3 Leeswijzer

In de voorliggende publicatie wordt inzicht gegeven in het innovatiepotentieel van maatregelen om de emissies van ammoniak en broeikasgassen naar de lucht te verminderen als ook de emissies van stikstof en fosfor naar grond- en oppervlaktewater. Hoofdstuk 2 beschrijft de gevolgde methodiek om bestaande en verwachte innovaties te identificeren en de methode om het theoretisch maximale en praktisch realiseerbare innovatiepotentieel te kwantificeren. Hoofdstuk 3 beschrijft de opgaves waar deze innovaties aan bij moeten dragen conform de doelstellingen van het Nationaal Programma Landelijk gebied. Hoofdstuk 4 beschrijft in grote lijnen de resultaten van de inventarisatie uit de literatuur, met verwijzingen naar uitgebreide tabellen per maatregel in bijlagen I en II. Hoofdstuk 5 en 6 kwantificeren en evalueren respectievelijk het theoretisch maximale en



---

praktisch realiseerbare innovatiepotentieel van de geïdentificeerde maatregelen in relatie tot de landelijke en provinciale opgaves. In hoofdstuk 7 worden diverse aspecten benoemd die relevant zijn bij de daadwerkelijke implementatie van maatregelen in de Nederlandse landbouwpraktijk, met nadruk op de bijbehorende kosten. Hoofdstuk 8 vat de belangrijkste resultaten samen.

## 2 Methodebeschrijving

### 2.1 Inventarisatie innovatiepotentieel en referentiesituatie

Er zijn de afgelopen jaren tientallen publicaties verschenen rondom de impact en kosten van maatregelen gericht op de verlaging van emissies van methaan en broeikasgassen naar de lucht en uit- en afspooling van nutriënten naar grond- en oppervlaktewater. Op basis van deze kennis is voor deze studie een overzicht gemaakt van maatregelen die op korte (1-5 jaar) dan wel middellange termijn (5-10 jaar) beschikbaar zijn en komen om de emissie van ammoniak, methaan, lachgas, nitraat en fosfor vanuit de veehouderij te verminderen (Bijlage I). Per maatregel is de volgende informatie geïdentificeerd / geanalyseerd (Bijlage II):

- De impact van de maatregel: hoeveel is de absolute dan wel relatieve reductie van emissies?
- De aanwezigheid van pollution-swapping: treden er onvoorziene / nadelige bijeffecten op richting een andere milieukundige opgave? Eventuele meerwaarde in relatie tot diergezondheid of andere opgaven wordt hierbij ook geïdentificeerd.
- De inpasbaarheid binnen de huidige agrarische bedrijfsvoering: hierbij wordt een inschatting gemaakt van de impact van locatietekenen, zoals grondsoort en landgebruik op de implementatiegraad.
- Het schaalniveau waarop de maatregel inzetbaar is.
- Een indicatie van de zogenaamde Technology Readiness Level (TRL), wat aangeeft in welke fase de ontwikkeling van een nieuwe technologie zich bevindt (zie bijlage II voor de gehanteerde 9 niveaus).
- De kosten die nodig zijn om de maatregel te implementeren.

In dit rapport wordt een samenvatting gegeven van de potentiële emissiereductie ten opzichte van de huidige situatie op een gemiddeld agrarisch bedrijf (zie Bijlagen I en II voor meer informatie) voor zowel de melkveehouderij (als grootste bron van NH<sub>3</sub> en CH<sub>4</sub> in de rundveehouderij), de varkenshouderij en de pluimveehouderij. De reducties worden hierbij uitgedrukt als een relatieve reductie van de emissies, uitgesplitst naar de bron van de emissie (huisvesting, mestopslag, dier, en mesttoediening, en in sommige gevallen voor het hele bedrijf). De emissiereducties in procenten gelden in principe ten opzichte van een referentiesituatie waarbij in Tabel 2.1. ter indicatie een overzicht wordt gegeven van kenmerkende emissies voor veehouderijbedrijven uit het jaar 2021 (Van Bruggen et al., 2023). Deze referentiesituatie wordt overigens niet gebruikt voor de provinciale opschaling waarbij het innovatiepotentieel per provincie wordt gekwantificeerd (zie hiervoor sectie 2.3).

**Tabel 2.1** Referentiesituatie veehouderijbedrijven in Nederland in 2021.

Bedrijfskenmerk <sup>1</sup>	Eenheid	Melkveehouderij	Varkenshouderij	Pluimveehouderij
Ammoniak totale bedrijf	(kg NH <sub>3</sub> per dierplaats jaar	13 kg	3,4 kg	6-90 gram
Ammoniak stal en mestopslag	%	55	76	94
Ammoniak mestaanwending	%	43	24	6
Ammoniak beweiding	%	2	0	0
Methaan totale bedrijf	kg CH <sub>4</sub> per dierplaats per jaar	186	15,7	-
Methaan pensfermentatie	% totale broeikasgasemissie	73	18	-
Methaan en lachgas mestopslag	% totale broeikasgasemissie	22	73	3
Lachgas	% van excretie (drijfmest)	0,2	0,2	0,1
Mesttoediening <sup>1</sup>	% drijfmest zodenbemester	70-84	70-84	-
	% vaste mest onderwerken	97	97	97

<sup>1</sup> Voor een verdere uitsplitsing per diercategorie, landgebruik en toedieningstechniek, zie van Bruggen et al. (2023)

De gebruikte referentie voor een melkveehouderijbedrijf is een emissie van ammoniak uit stallen en mestopslagen van 13 kg NH<sub>3</sub> per dierplaats per jaar. Gemiddeld komt 55% van de emissie uit de stal en mestkelder, 2% via beweiding en 43% emitteert tijdens de aanwending van mest. Per dierplaats per jaar wordt uitgegaan van een referentiewaarde voor de emissie van 186 kg CH<sub>4</sub> per dierplaats per jaar, waarvan ca 80% afkomstig is van enterische pens-emissie en ca 20% uit mest(opslag). Rekening houdend met de totale emissie

---

van zowel methaan als lachgas komt 73% van de totale emissie voor rekening van pensfermentatie (methaan), 22% uit mestopslag en eventuele bewerking (methaan en lachgas) en het resterende deel via bemesting (lachgas).

De gebruikte referentie voor een varkenshouderijbedrijf (vleesvarkens) is een emissie van ammoniak van 3,4 kg NH<sub>3</sub> per jaar. Gemiddeld emitteert er 76% van de ammoniak in de stal en vanuit de mestopslag, en het resterende deel emitteert na aanwending van mest. Per dierplaats per jaar wordt uitgegaan van een referentiewaarde voor de emissie van 15,7 kg CH<sub>4</sub> per dierplaats per jaar, waarvan 80% van de emissie afkomstig is uit de mest en 20% uit het dier. Rekening houdend met de totale emissie van zowel methaan als lachgas komt 18% van de totale emissie voor rekening van pensfermentatie (methaan), 73% uit mestopslag en eventuele bewerking (methaan en lachgas) en het resterende deel via bemesting (lachgas).

De referentie voor een pluimveebedrijf is een emissiearme stal en per dierplaats mag een bedrijf met opfokhennen en -hanen 6 tot 30 gram NH<sub>3</sub> per dierplaats per jaar emitteren voor dieren jonger dan 18 weken afhankelijk van het stalsysteem (Ellen et al., 2017). Voor dieren ouder dan 18 weken varieert de referentie van 25 tot 90 gram NH<sub>3</sub> per dierplaats per jaar. In NEMA wordt dit overigens per diercategorie verder uitgesplitst (Van Bruggen et al., 2023). Gemiddeld emitteert 94% van de ammoniak in de stal en het resterende deel na mestaanwending. Emissie van broeikasgassen (lachgas) ontstaat bij de toediening van mest.

De resultaten van deze inventarisatie zijn op 2 oktober 2024 bediscussieerd met stakeholders vanuit de wetenschap, sector en bedrijfsleven. Een verslag van deze stakeholdersessie is opgenomen in Bijlage III. Aanvullend op deze stakeholdersessie zijn de bevindingen besproken met bestuurders van de Bestuurlijke Adviescommissie (6 november 2024), de veehouderijsectoren (14 november 2024, 20 december 2024), en heeft er afstemming plaatsgevonden met het regieorgaan versnellen innovatie emissiereductie duurzame veehouderij.

## 2.2 Theoretisch maximale innovatiepotentieel

Theoretisch maximale reducties betreffen emissiereducties die in theorie mogelijk zijn als alle omstandigheden optimaal zijn om verliezen van koolstof en nutriënten in een landbouwsysteem te voorkomen, en het beheer van bodem, gewas, mest en water op een optimale manier worden uitgevoerd. Deze theoretische reducties worden veelal afgeleid van modelmatige extrapolaties op basis van de chemische en biologische processen die het gedrag van stikstof, koolstof en fosfor in het landbouwsysteem sturen.

Voor de huidige studie is hiervoor gebruik gemaakt van inzichten uit de studies van de Vries et al. (2023), Gies et al. (2023) en Schulte-Uebbing & De Vries (2021). De studie van De Vries et al. (2023) gebruikte het INITIATOR-instrumentarium om inzicht te geven in de mogelijke effecten van technische maatregelen (huisvesting, diervoeding, bemesting, bodembeheer en gewasbeheer) door die maatregelen in combinatie met elkaar door te rekenen voor alle landbouwbedrijven in Nederland. Hierbij is uitgegaan van de maximale impact van maatregelen voor zover deze afgeleid konden worden vanuit wetenschappelijke studies. Op een vergelijkbare manier hebben Gies et al. (2023) met een combinatie van modellen de impact berekend van een integraal maatregelenpakket om de doelen van het NPLG te realiseren. Hiervoor zijn combinaties doorgerekend van structuurmaatregelen (extensivering, bufferstroken, vernatten), managementmaatregelen (verruiming bouwplannen, meer beweiden, voeradditieven, lagere en efficiëntere bemesting, etc.) en technische maatregelen zoals emissiearme stallen en snelle afvoer van mest naar opslagen. Uitgaande van de gewenste doelen voor nitraatconcentraties in grond- en oppervlaktewater hebben Schulte-Uebbing & de Vries (2021) voor alle landen in Europa in kaart gebracht wat dit betekent voor de maximaal acceptabele stikstofbodemoverschotten, en de daaraan gekoppelde vereiste stijging in N-benutting om hieraan te voldoen.

De resultaten van deze studies worden samengevat en waar nodig specifiek toegepast op de situatie in Nederland en bediscussieerd. De berekende maximale emissiereducties worden vervolgens gemiddeld als een voorzichtige schatting van de maximale reductie die in Nederland mogelijk is via innovaties.

## 2.3 Praktisch haalbare innovatiepotentieel

Praktisch realiseerbare reducties betreffen emissiereducties die mogelijk zijn via de implementatie van innovaties in het huidige landbouwsysteem, waarbij alle landbouwbedrijven de best beschikbare technieken en maatregelen inzetten die binnen vijf jaar beschikbaar zijn of komen om emissies van CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, en N<sub>2</sub>O naar de lucht en verliezen van N en P naar grond- en oppervlaktewater te verminderen. Bij innovaties gaat het hierbij om sociale en technische innovaties in huisvesting (stal en mestopslag), bedrijfsvoering (diervoeding, gewasbeheer en bemesting) of innovaties in de landbouwstructuur. Hierbij is in deze studie de emissiereductie gekwantificeerd in relatie tot de uitgangssituatie in 2019.

Op basis van een gedegen analyse van gepubliceerde studies rond de impact van innovaties in de veehouderij (rundvee, varkens en pluimvee) is per maatregel in kaart gebracht wat de potentiële impact is van de maatregel op de emissie van ammoniak, broeikasgassen of het N- en P-bodemoverschot als maat voor een de emissies naar grond- en oppervlaktewater (zie sectie 2.1.). Vervolgens is per provincie en sector in kaart gebracht in welke mate de emissie van ammoniak en broeikasgassen naar de lucht en de verliezen van N en P naar het watersysteem kan worden vermindert. De belangrijkste bronnen per sector worden weergegeven in tabel 2.2 voor de landelijke emissies.

**Tabel 2.2** *Totale emissies voor ammoniak, lachgas en methaan voor heel Nederland in 2019 zoals deze gebruikt wordt als referentie in deze studie (bron: Emissieregistratie, 2023).*

Element <sup>1</sup>	Emissiebron	Rundveehouderij	Varkenshouderij	Pluimveehouderij
Ammoniak	Totale emissie (kton NH <sub>3</sub> )	58,4	18,3	12,5
	Bemesting (kton NH <sub>3</sub> )	25,2	4,3	0,8
	Huisvesting (kton NH <sub>3</sub> )	32,0	13,1	11,6
	Mestbewerking (kton NH <sub>3</sub> )	0,1	0,9	0,1
	Beweiding (kton NH <sub>3</sub> )	0,8	0,0	0,0
Lachgas	Totale emissie (kton CO <sub>2</sub> -eq)	3294	909	475
	Bemesting en beweiding (kton CO <sub>2</sub> -eq)	2988	820	451
	Huisvesting (kton CO <sub>2</sub> -eq)	236	40	23
	Mestbewerking (kton CO <sub>2</sub> -eq)	69	50	0
Methaan	Totale emissie (kton CO <sub>2</sub> -eq)	10266	2474	81
	Pensfermentatie (kton CO <sub>2</sub> -eq)	8071	513	0
	Bemesting en beweiding (kton CO <sub>2</sub> -eq)	19	0	0
	Huisvesting (kton CO <sub>2</sub> -eq)	2159	1556	78
	Mestbewerking (kton CO <sub>2</sub> -eq)	17	406	3,8

<sup>1</sup> Voor een verdere uitsplitsing per diercategorie, landgebruik en toedieningstechniek, zie van Bruggen et al. (2023)

Om het innovatiepotentieel van de geïdentificeerde maatregelen te kwantificeren kiezen we hier voor een eenvoudige opschalingsmethode<sup>4</sup>. Op basis van de emissies per sector (rundvee, varkens, pluimvee) en bron (stal en mestopslag, beweiding, bemesting, gewasbewerking, kunstmest en mestbewerking) uit 2019 (Emissieregistratie, 2024) is in beeld gebracht in welke mate de huidige en verwachte innovaties in staat zijn om de NPLG-opgaven per provincie te realiseren. Hierbij maken we gebruik van de volgende uitgangspunten:

- In de evaluatie is uitgegaan van het gemiddelde innovatiepotentieel zoals gekwantificeerd in de onderzochte studies. Het is bekend dat de huidige emissies als ook de effecten van maatregelen sterk beïnvloed worden door de specifieke bedrijfskenmerken als grondsoort, geohydrologie, landgebruik, klimaat en bedrijfsintensiteit. Omdat het grootste deel van de onderliggende studies waarin innovaties worden beschreven zijn uitgevoerd op een beperkt aantal locaties zijn deze effecten niet goed te kwantificeren en is derhalve uitgegaan van een gemiddelde per beschreven studie.
- De evaluatie gaat uit van de huidige populatie aan landbouwbedrijven, en neemt de emissies uit het jaar 2019 (Emissieregistratie, 2024) als uitgangspunt voor de evaluatie van effecten van innovaties. Vanuit lopende beleidstrajecten zal naar verwachting de dierintensiteit afnemen met bijbehorende

<sup>4</sup> Door de inzet van landelijke modellen zoals INITIATOR is het mogelijk om deze uitwerking ruimtelijke expliciet per regio en in potentie zelfs per bedrijf te visualiseren. Voor het huidige doel is dit niet nodig. Mocht een verdere concretisering dan wel onderbouwing van benodigde investeringen nodig zijn, dan is deze verdiepingsslag wel aan te bevelen.

---

gevolgen voor de provinciale opgaven (Gies et al., 2023). Anderzijds kan ook de opgave groter worden door bijvoorbeeld de recente wetenschappelijke inzichten dat de KDW-waarde naar beneden moet worden bijgesteld (PBL, 2024). De veranderingen van de huidige emissies als ook de opgaven als gevolg van lopende beleidsontwikkelingen valt buiten het kader van deze studie.

- De evaluatie is beperkt tot innovaties in de veehouderij. Omdat het grootste deel van de pluimvee- en varkensbedrijven niet-grondgebonden zijn, worden ammoniakemissies van kunstmest toegerekend aan rundvee (als ook het bijbehorende innovatiepotentieel van maatregelen gericht op emissies van kunstmest). De reductie van toedieningsemissies van dierlijke mest wordt wel berekend en toegekend aan de verschillende sectoren, terwijl deze verliezen in de praktijk ook optreden op akkerbouw en groentebedrijven. Voor de emissie van lachgas is per provincie bekend wat de verliezen zijn die optreden tijdens het gebruik van dierlijke mest, kunstmest, het onderwerken van gewasresten en indirecte verliezen die optreden later in het bodem- en watersysteem. Voor lachgas zijn deze verliezen naar rato van de huidige inzet van dierlijke mest toegekend aan de drie veehouderijsectoren. Methaanverliezen tijdens de toediening van mest zijn nihil.
- De evaluatie gaat uit van een goede implementatie van de innovaties / maatregelen. Eerdere studies hebben laten zien dat luchtwassers en emissiearme stalvloeren na enkele jaren aan effectiviteit inboeten als ook goed onderhouden moeten worden om effectief te zijn en blijven. Dat betekent ook dat bij maatregelpakketten rekening wordt gehouden met *pollution swapping*: als er meer nutriënten in de mest blijven door een betere mestscheiding en minder verliezen in de stal en mestopslag, dan betekent dit ook dat de hoeveelheid bemesting naar beneden wordt bijgesteld (d.w.z. de aanvoer van werkzame nutriënten op het bedrijf blijft gelijk en de mestafzet naar buiten het bedrijf neemt toe).
- De evaluatie houdt bij de berekening van emissiereducties rekening met het feit dat de adoptie van emissiearme stallen niet gelijk is in alle provincies. Effecten van innovaties zijn groter in provincies waar de implementatiegraad van emissiearme stallen nog beperkt is. Landelijke gegevens hierover ontbreken echter in bestaande en openbaar beschikbare databases. Voor emissies vanuit stallen en mestopslagen wordt daarom aangenomen dat maatregelen meer effectief zijn in die provincies waar de emissies per dier(plaats) groter zijn dan gemiddeld<sup>5</sup>. Bij de provinciale doorrekening wordt daarnaast vooral ingezet op maatregelen die nog niet gangbaar zijn en daarmee een additioneel effect hebben op de voorkomende emissies. Denk bijvoorbeeld aan diepe injectie van drijfmest op minerale gronden; een oude techniek die anno 2024 niet meer wordt gebruikt.
- De impact van maatregelen is additief zodra deze ingrijpen op een ander proces dan wel emissiebron. Voor de huidige studie maken we allereerst onderscheid in de effecten van maatregelen / innovaties op de emissies voor ammoniak en broeikasgassen naar de lucht en emissies naar het watersysteem, waarbij we het bodemoverschot gebruiken als proxy voor deze verliezen. Daarnaast maken we onderscheid in maatregelen gericht op i) huisvesting en mestopslag, ii) dierrassen, diervoeding en beweiding, en iii) bemesting (van dierlijke mesten kunstmest, en van mestbewerking).

Om het effect van innovaties op de emissie van ammoniak en broeikasgassen te berekenen, is op basis van data uit de Emissieregistratie per provincie de totale emissie per bron en per sector in kaart gebracht. Dit geeft de totale emissie vanuit huisvesting (stallen en mestopslag), pensfermentatie en beweiding, kunstmest, mestbewerking en overige bronnen (compost, slib, onderwerken grasland, indirecte emissies, veenafbraak). De totale emissiereductie als gevolg van een maatregel wordt berekend door een reductie toe te kennen aan de emissiebron, daarbij rekening houdend met het aanwezige landgebruik (grasland, mais en bouwland) en het aantal bedrijven (per sector). De relatieve theoretische daling in emissies als gevolg van een innovatie is in elke provincie even groot, maar de actuele daling hangt dus af van de huidige emissie(bronnen) per provincie. Met uitzondering voor de innovaties in huisvesting- en mestopslagsystemen houden we dus in deze opschaling geen rekening met de huidige implementatie van de maatregelen. Gegeven het innovatieve karakter van deze maatregelen én de huidige emissies is het realistisch om te veronderstellen dat deze maatregelen nog niet grootschalig zijn ingezet.

---

<sup>5</sup> Per provincie is hiervoor de gemiddelde emissie per dier berekend. De laagste emissie per dier (van alle provincies) wordt gebruikt als grenswaarde. Alle maatregelen / innovaties zijn maar voor de helft effectief onder deze grenswaarde. Alle emissies boven deze grenswaarde kunnen worden gereduceerd door innovaties / maatregelen die voor 100% effectief zijn. Deze inschatting is daarmee dus indicatief. Een nauwkeurige inschatting kan worden afgeleid van bedrijfsgegevens uit de GIAB-database (zoals verwerkt in INITIATOR) of de KLV-database, waarbij de impact kan worden afgeleid van de emissie per bedrijf en beter rekening kan worden gehouden met bedrijven met een (te) hoog ruw eiwitgehalte die daarmee meer emitteren dan de 13 kg NH<sub>3</sub> per dierplaats aan stalemissie.



---

Omdat de uit- en afspoeling van nutriënten voor een heel groot deel optreden op bouwlandgronden (en daarmee maar beperkt toerekenbaar zijn aan de veehouderij), en het grootste deel van de beoogde maatregelen onderdeel zijn van de Goede Landbouwpraktijk (en dus geen innovatieve oplossingen behoeven), is voor de analyse in dit rapport gebruik gemaakt van de eerdere modelberekeningen van Gies et al. (2023) en de Vries et al. (2023). Hierbij zijn allerlei maatregelen doorgerekend in relatie tot hun effect op de uit- en afspoeling van stikstof en fosfor naar grond- en oppervlaktewater. Als er al sprake is van innovatie is dat in dit geval een sociale innovatie waarbij alle bedrijven het beheer van bodem, gewassen en meststoffen optimaliseren met het oog op een hoge stikstof- en fosforbenutting. Wel is het zo dat grootschalige uitrol van deze maatregelen een grote impact op alle onderdelen van de agrarische bedrijfsvoering veronderstellen. Er is niet getoetst of de voorgetelde combinatie van maatregelen voor alle bedrijfstypen door Gies et al. (2023) management-technisch haalbaar zijn. Hetzelfde geldt voor de veranderingen in de landbouwstructuur.

Er is voor deze studie geen bedrijfseconomische analyse uitgevoerd. De kosten en baten als ook de bedrijfseconomische gevolgen zijn afgeleid van bestaande studies. Omdat de onderliggende methodiek tussen deze studies sterk kan verschillen, zijn de gebruikte schattingen van kosten per kilogram emissiereductie indicatief.

Vooraf de bespreking van deze innovaties benoemen we nog een aantal aandachtspunten:

- Allereerst zijn de reducties in de emissies van ammoniak, broeikasgassen (methaan en lachgas) en de uit- en afspoeling van stikstof en fosfor naar grond- en oppervlaktewater in kaart gebracht per maatregel (dan wel maatregel-categorie). Deze effecten zijn niet per definitie additief. Een combinatie van maatregelen heeft daarmee een kleiner effect dan de som van de effecten van de individuele maatregelen. Het is belangrijk om hierbij een agrarisch bedrijfssysteem als uitgangspunt te gebruiken. Een emissiearm stalsysteem leidt bijvoorbeeld tot een lagere emissie in de stal, maar ook tot hogere stikstofgehalten in de mest. Dit betekent dat er dus vervolgens ook goed omgegaan moet worden met de opslag en toediening om te vermijden dat later alsnog de emissie optreedt. Een lager ruw-eiwitgehalte in een geoptimaliseerd rantsoen leidt tot lagere N-uitscheiding, wat weer leidt tot lagere ammoniakemissie in de stal en tijdens de toediening van mest. Een emissiearme vloer heeft in deze situatie in absolute zin minder effect dan bij rantsoenen met een duidelijk hoger ruw-eiwitniveau.
- Ten tweede wordt er voor de geïdentificeerde maatregelen / innovaties een bandbreedte gegeven van de beschikbare effecten op de emissies zoals deze zijn waargenomen onder praktijksituaties. Op basis van expertkennis (van de betrokken auteurs) is vervolgens een kwalitatief oordeel toegevoegd in relatie tot de betrouwbaarheid van deze effecten (zie Tabellen I.1.1 tot I.1.5); het aantal daadwerkelijke observaties is voor veel maatregelen nog te beperkt of de impact van lokale omstandigheden is dermate groot dat het nog niet mogelijk is om kwantitatief een nauwkeurige schatting van de betrouwbaarheid (onzekerheid) van het effect te maken.
- Ten derde zijn de inschattingen van emissiereducties gebaseerd op een goede implementatie en werking van de innovaties. Hoe deze innovaties uitwerken in de praktijk van elk agrarisch bedrijf is sterk afhankelijk van de precieze uitvoering, van het precieze management van het complete systeem en van het noodzakelijke onderhoud van de technische onderdelen van het systeem. Omdat vooral de reductie van gasvormige verliezen sterk afhankelijk is van de uitvoering en het management van het systeem, verdient het aanbeveling om de emissie te monitoren.

De exacte berekeningswijze voor het innovatiepotentieel voor reductie van ammoniak en broeikasgassen is gegeven in een spreadsheet en opvraagbaar bij de hoofdauteur van dit rapport.

---

## 3 De opgaven voor emissiereductie

### 3.1 De landelijke context

De context van deze studie is de landelijke implementatie van het Nationale Programma Landelijk Gebied. Het NPLG heeft als doel om het landgebruik in Nederland weer in balans te brengen met wat het milieu nodig heeft en kan dragen. Nationale doelen op het terrein van natuur, water en klimaat zijn hiervoor regionaal verdeeld, waarbij de doelen zijn gebaseerd op nationale en internationale verplichtingen. Realisatie van de doelen wordt beschouwd als noodzakelijk en daarom onontkoombaar om de balans te herstellen tussen het landgebruik en de grenzen van de natuurlijke systemen. Zo moet de uitstoot van bijvoorbeeld stikstof, broeikasgassen en de uitspoeling van schadelijke stoffen naar het water en de bodem worden beperkt. En is er meer ruimte nodig voor bomen, bossen en natuur. Conform de doelstelling van deze verkenning richten we ons op de doelen voor ammoniakreductie (voor natuurkwaliteit), broeikasgassen (voor klimaat) en uit- en afspoeling van nutriënten (ondersteunend aan de verplichtingen vanuit de KRW). Een inhoudelijke analyse van de provinciale opgaven zoals uitgewerkt in de Handreiking voor de gebiedsprogramma's NPLG (versie februari 2024) valt buiten de context van de voorliggende studie. Omdat de landelijke reducties leidend zijn voor de opgave, heeft dit weinig invloed op het innovatiepotentieel van de veehouderij om deze te realiseren.

Specifiek voor de waterkwaliteit en de beschikbaarheid van grondwater gelden de verplichtingen van de Kaderrichtlijn Water (KRW), een Europese richtlijn. Uiterlijk in 2027 moeten in Nederland alle maatregelen genomen zijn, om te komen tot een goede ecologische en chemische kwaliteit van grond- en oppervlaktewater. Het NPLG richt zich daarbij op de kwaliteit van oppervlakte- en grondwater "voor zover beïnvloed door landbouw (nutriënten en gewasbeschermingsmiddelen)". Uitgaande van een evenredige opgave voor de landbouw ten opzichte van de andere sectoren, dan zou dit een emissiereductie van 2 tot 59% voor stikstof en van 4 tot 60% voor fosfaat naar het oppervlaktewater betekenen<sup>6</sup>. De doelen voor grondwater zijn binnen vrijwel alle provincies binnen bereik (Gies et al., 2023) als gevolg van het nieuwe mestbeleid (inclusief alle maatregelen vanuit het 7e Stikstofactieprogramma en het verlies van derogatie). Het nationale klimaatdoel voor 2030 is dat 55% van de emissie van broeikasgassen wordt gereduceerd ten opzichte van 1990. Het kabinetsbeleid richt zich op 60% emissiereductie in 2030 en per economische sector zijn hiervoor indicatieve restemissiedoelen afgesproken. In het NPLG wordt dit verder uitgewerkt voor landbouw en landgebruik. Dit betekent ook dat er na 2030 nog een grote opgave voor het landelijk gebied overblijft. Voor ammoniak is het landelijke doel om 74 procent van het areaal met stikstofgevoelige habitats binnen Natura 2000-gebieden onder de (oude) Kritische Depositiewaarden moet zijn gebracht in 2035 (Hazelhorst et al., 2024), waarvan 50% moet zijn gerealiseerd in 2030. Hiervoor is voor de landbouw een reductiedoelstelling opgenomen van 39 kiloton ammoniak, die globaal over de provincies is verdeeld.

### 3.2 De provinciale opgaven

Milieuproblemen verschillen per regio (Erisman et al., 2021). Conform de aanpak van het (voormalige) NPLG is een provinciale benadering voorgesteld, waarbij landbouwbedrijven integraal en gebiedsgericht bijdragen aan het oplossen van de verschillende opgaven, waarbij de opgave veelal proportioneel is toegekend op basis van de huidige emissies (LNV, 2024). Emissies van de broeikasgassen methaan en lachgas komen vooral voor bij intensieve veehouderijgebieden in het midden- en zuidoosten van Nederland. De grootste uitdagingen voor het klimaat liggen in het veenweidegebied, waar door bodemdaling en veenoxidatie veel broeikasgassen worden geproduceerd en de bodem verdwijnt. Hiervoor zijn vooral de provincies Utrecht, Zuid- en Noord-Holland, Friesland en in mindere mate ook Flevoland aan zet. In de provincies met droge zandgronden en löss zijn er grote uitdagingen voor grondwaterkwaliteit. Met name zandgronden zijn gevoelig voor nitraatuitspoeling, en dan in het bijzonder wanneer er ondiep wortelende gewassen worden geteeld, zoals mais, aardappel, uien en groenten. In deze gebieden moet het stikstofbodemoverschot dalen om de nitraat-

---

<sup>6</sup> De focus op stikstof en fosforbelasting in het NPLG betekent overigens niet dat hiermee de doelen van de KRW worden gerealiseerd.

uitspoeling substantieel te verlagen. De opgaves voor het oppervlaktewater zijn groot in vrijwel alle regio's waarbij de problematiek varieert per provincie en regio. Droogteproblemen komen vooral voor op droge zandgronden in Zuidoost Nederland en zorgen voor opbrengstderving en een slechtere benutting van nutriënten met een aantoonbaar hogere nitraatgehalte in het grondwater (CDM, 2022). De huidige diepe grondwaterstanden in deze regio zorgen vaak voor een snelle afvoer van water waardoor er snel sprake is van verdroging in de directe omgeving van landbouwbedrijven, zeker in de zomermaanden. De provincies Flevoland, Zeeland, (Noord) Friesland en Groningen omvatten akkerbouwgebieden met veel klei- en minerale gronden. De opgaven voor ammoniak, natuur, oppervlaktewater, en bodemkwaliteit zijn in deze provincies beperkter, en grote wijzigingen in bedrijfssystemen en de landbouwstructuur lijken niet noodzakelijk.

Deze ruimtelijke variatie laat zien dat het niet noodzakelijk is om op elke locatie in Nederland te werken aan alle opgaves. Een prioritering van doelen, sectoren en bijbehorende maatregelen als afgeleide van de eigenschappen van het gebied is daarom logisch. Gegeven de wettelijke doelen en opgaven, moet de emissie van ammoniak en broeikasgassen en de uit- en afspoeling van stikstof en fosfaat op vrijwel alle bedrijven omlaag. De mate daarin verschilt echter want er zijn grote verschillen in emissies tussen provincies (Gies et al., 2022), tussen landbouwsectoren en tussen individuele bedrijven (Silva et al., 2021). Voor een deel zijn deze verschillen afhankelijk van regionale of lokale gebiedskenmerken en voor een deel hangen deze verschillen samen met het type bedrijf en het vakmanschap van de agrarische ondernemer.

De beoogde reductiedoelstelling van ammoniak, broeikasgassen en emissies van nutriënten per provincie vanuit het NPLG worden samenvattend weergegeven in Tabel 3.1 (LNV, 2024). Hieruit wordt concreet zichtbaar dat de provinciale emissies moeten dalen met 24-52% voor ammoniak, met 23-32% voor broeikasgassen N<sub>2</sub>O en CH<sub>4</sub>, met 2-60% voor af- en uitspoeling van stikstof naar het oppervlaktewater, en met 4-60% voor af- en uitspoeling van fosfaat naar het oppervlaktewater. Aanvullend ligt er in de provincies met veengebieden nog een extra opgave om gezamenlijk 1 Mton CO<sub>2</sub>-eq veenoxidatie te voorkomen. Om de grondwaterkwaliteit te verbeteren moet op 2-76% van de percelen de uitspoeling omlaag om zo onder de 50 mg NO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup> te komen. Als deze reductiedoelstellingen worden gerealiseerd wordt hiermee voldaan aan de wettelijke doelen voor natuur, klimaat en waterkwaliteit.

**Tabel 3.1** Reductiedoelstelling voor milieukundige opgaven in het NPLG voor ammoniak in 2035 (in kton en %), broeikasgassen in 2030 (BKG, in kton en %), veenafbraak in 2030 (kton) en verliezen van nutriënten naar grond- en oppervlaktewater in 2027 (in % percelen boven de 50 mg nitraat per liter, en emissie in kg N of P per ha per jaar en in procenten), afgeleid van het achtergronddocument NPLG (LNV, 2024) en de landelijke modelstudie van Gies et al. (2023).

Provincie	NH <sub>3</sub> reductie		BKG reductie		Veenafbraak kton	Nutriënten				
	kton	%	kton	%		NO <sub>3</sub> (% percelen)	kg N/ha/yr	%	kg P/ha/yr	%
Drenthe	2,45	43	300	25	-	34	0,50	3	0,03	4
Flevoland	0,44	24	100	23	-	5,2	1,10	3	0,15	9
Friesland	4,70	34	800	29	450	7,5	1,61	10	0,10	6
Gelderland	7,51	42	700	26	-	21	0,98	13	0,03	6
Groningen	1,45	25	300	26	60	19	0,34	2	0,21	14
Limburg	3,04	52	300	32	-	76	4,71	59	0,25	60
Noord-Brabant	6,96	42	800	26	-	48	6,39	29	0,21	19
Noord-Holland	1,80	41	300	31	90	7,8	4,37	14	0,57	17
Overijssel	5,74	41	700	27	100	34	2,09	17	0,04	5
Utrecht	2,36	46	300	31	90	7,5	0,78	5	0,13	7
Zeeland	0,63	32	100	24	-	2,3	1,18	5	-	-
Zuid-Holland	1,95	41	300	27	210	2,6	1,60	5	0,54	11

### 3.3 De opgave vertaalt naar bedrijfsniveau

Om bovenstaande opgaven te realiseren moeten ingrijpende maatregelen worden genomen. In 2023 en 2024 zijn diverse studies uitgevoerd om te onderzoeken of het mogelijk is om deze emissiedoelen te realiseren met eenvoudige dan wel ingrijpende maatregelen (de Vries et al., 2023; Gies et al., 2023). De onderzoekers hebben

---

daarbij integraal naar verschillende pakketten van *bestaande* maatregelen gekeken zonder een uitgebreide inventarisatie van maatregelen die op korte of langere termijn beschikbaar komen voor verdere emissie-reductie. Hoewel beide modelstudies voor de huidige situatie al uitgaan van volledige implementatie van de Goede Landbouwpraktijk voor wat betreft de verdeling en het gebruik van meststoffen en vaste emissiefactoren per dierplaats per diercategorie, en daarmee de werkelijke variatie tussen bedrijven negeren, blijft de belangrijkste conclusie staan dat de gewenste emissiereducties voor ammoniak en broeikasgassen dermate groot zijn dat grootschalige inzet van extra maatregelen nodig is. Alleen bij deze grootschalige inzet van maatregelen is het mogelijk om de landelijke opgaven voor natuur-, lucht- en waterkwaliteit te realiseren.

De geanalyseerde pakketten omvatten onder meer een veestapelreductie van 20 procent, geen derogatie, verdergaande aanpassing van stallen, 600 uur meer weidegang per koe, minder eiwit en voeradditieven voor alle varkens en rundvee, volledige naleving van de mestwetgeving en fors efficiëntere toediening van mest. Beide studies hebben niet gekeken of de implementatie van maatregelen ook management-technisch haalbaar zijn en ook bedrijfseconomisch haalbaar zijn. De studie van Jongeneel et al. (2024) concludeert daarentegen dat het volledig doorvoeren van grootschalige maatregelenpakketten zeer negatieve inkomensgevolgen hebben, en daarmee de bedrijfscontinuïteit ernstig bedreigen.

Om een indruk te krijgen van de zwaarte van de NPLG-opgave voor een individueel bedrijf hebben Ros et al. (2023) gewerkt aan de vertaalslag van regionale doelen naar doelen per bedrijf, waarbij de opgaven qua orde grootte aansluiten bij de regionale doelen uit het NPLG. Uitgaande van een proportionele verdeling over de sectoren en bijbehorend landgebruik, varieert de toelaatbare ammoniakemissie van 16,6 kg NH<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> voor bouwland tot 21,5 kg NH<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> voor grasland en mais. De emissies vanuit de grondgebonden veehouderij zijn hierbij toegekend aan het areaal landbouwgrond en de emissies van niet-grondgebonden bedrijven (inclusief vleeskalveren) zijn toegekend aan het aantal dieren. De berekende toelaatbare NH<sub>3</sub> emissie per dier op basis van deze aanpak is 1,16 kg NH<sub>3</sub> per dier voor vleeskalveren, 0,51 kg NH<sub>3</sub> per dier voor varkens, 0,05 kg NH<sub>3</sub> per dier voor pluimvee en 0,22 kg NH<sub>3</sub> per dier voor overige dieren. Voor het halen van klimaatdoelen op lange termijn (50% reductie, dus groter dan de doelen van het NPLG) varieert de toelaatbare lachgasemissie van 6,4 tot 9,2 kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> en de toelaatbare methaanemissie voor de grondgebonden bedrijven is 148 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>. De totale broeikasgasemissie per dier varieert van 0,38 kg CO<sub>2</sub>-eq per dier voor pluimvee tot 106 kg CO<sub>2</sub>-eq per dier voor varkens en overige diersoorten en tot 360 kg CO<sub>2</sub>-eq per dier voor vleeskalveren. Omdat de opgaves in NPLG overeenkomen met een reductie van 27%, betekent dit ook dat de toelaatbare N<sub>2</sub>O emissie ligt op 1,8 tot 2,5 kg N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> en 40 kg CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>. Voor vermindering van de nitraatuitspoeling naar het grondwater wordt gestuurd op een verlaging van het N-bodemoverschot. Deze aanpak bouwt voort op de voorstellen van Remkes (2020) voor een afrekenbare stoffenbalans als ook de ontwikkelde KPI-set voor kringloop-landbouw (Van Doorn et al., 2021). Een toelaatbaar N-bodemoverschot kan worden gedefinieerd als het verschil tussen de aangevoerde stikstof (via mest, depositie en fixatie) en de afgevoerde stikstof (via het geoogste gewas en ammoniakverliezen) per gewas(groep), grondsoort en grondwatertrap, waarmee wordt voorkomen dat het nitraatgehalte in het grondwater de norm overschrijd (Van Dijk & Ros, 2022). Dit toelaatbaar N-bodemoverschot varieert van 50 tot 125 kg N ha<sup>-1</sup> voor bouwland en van 80 tot 125 kg N ha<sup>-1</sup> voor grasland, waarbij het toelaatbare N-overschot gemaximaliseerd is op 125 kg N ha<sup>-1</sup> (Ros et al., 2023).

Wanneer we de toelaatbare emissies die op bedrijfsniveau nodig zijn om de provinciale opgaven voor het NPLG te realiseren vergelijken met de huidige situatie op landbouwbedrijven, dan wordt opnieuw zichtbaar dat de opgave groot is (Tabel 3.2). In Tabel 3.2 wordt weergegeven welk percentage van landbouwbedrijven voorkomt per klasse van gemiddelde emissies naar de lucht (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, en CH<sub>4</sub>) en het N-bodemoverschot (als proxy voor nitraatuitspoeling naar het grondwater). Het merendeel van de veehouderijbedrijven wordt gekenmerkt door een ammoniakemissie van 40-80 kg NH<sub>3</sub> per hectare per jaar (uit stal en mesttoediening), lachgasemissie van 2-4 ton CO<sub>2</sub>-eq en meer dan 4 ton CO<sub>2</sub>-eq aan methaanemissie. Het N-bodemoverschot is op het grootste deel van de bedrijven groter dan 130 kg N ha<sup>-1</sup>. Agrarische sectoren buiten de veehouderij worden gekenmerkt door structureel lagere emissies. Dit betekent dat op het merendeel van de veehouderijbedrijven extra maatregelen nodig zijn om de regionale en sectorale doelen te realiseren.

**Tabel 3.2** Procentuele verdeling van emissies ammoniak, lachgas, methaan en het N-bodemoverschot over vijf klassen vanuit verschillende typen landbouwbedrijven voor heel Nederland. Berekening met INITIATOR op basis van het jaar 2018.

Type landbouw bedrijf	Verdeling NH <sub>3</sub> emissies (kg / ha) per klasse				
	0 - 20	20-40	40-80	80-120	>120
Alle bedrijven (n = 51790)	25	28	35	4	8
• Melkveehouderij (n = 14677)	0	7	83	8	1
• Veehouderij (n = 16607)	5	35	31	6	23
• open teelten (n = 20506)	57	37	5	0	0
	Verdeling N <sub>2</sub> O (ton CO <sub>2</sub> -eq / ha) per klasse				
	0 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 4,0	4,0 - 5,0	> 5
Alle bedrijven (n = 51790)	1	33	49	5	13
• Melkveehouderij (n = 14677)	0	8	73	4	15
• Veehouderij (n = 16607)	1	14	52	10	22
• open teelten (n = 20506)	1	66	29	2	3
	Verdeling CH <sub>4</sub> (ton CO <sub>2</sub> -eq / ha) per klasse				
	0 - 2,0	2,0 - 4,0	4,0 - 8,0	8,0 - 10	> 10
Alle bedrijven (n = 51790)	49	8	14	12	17
• Melkveehouderij (n = 14677)	3	1	26	38	32
• Veehouderij (n = 16607)	35	20	18	3	24
• open teelten (n = 20506)	94	3	2	0	1
	Verdeling N-bodemoverschot (kg N/ ha) per klasse				
	0-50	50-90	90-130	130-170	>170
Alle bedrijven (n = 51790)	4	11	29	23	32
• Melkveehouderij (n = 14677)	0	7	32	28	33
• Veehouderij (n = 16607)	2	9	25	24	39
• open teelten (n = 20506)	8	16	31	18	26



---

## 4 Inventarisatie innovatiepotentieel

Dit hoofdstuk geeft een korte samenvatting van het innovatiepotentieel van innovaties die op korte (1-5 jaar) beschikbaar komen voor toepassing in de veehouderij. De analyse maakt daarbij gebruik van de resultaten zoals die per maatregel zijn samengevat in Tabellen I.1.1. tot I.1.5. Een gedetailleerde analyse van de effecten, de toepasbaarheid, het schaalniveau, de kosten en de TRL is per maatregel opgenomen in bijlage II.

### 4.1 Innovaties rundveehouderij

De rundveehouderij een belangrijk aandeel in de ammoniakemissie uit de Nederlandse landbouw, en is daarmee een sleutelsector om tot realisatie van de doelen in de stikstofwet te komen. De rundveehouderij heeft ook meer dan de helft van de landbouwbodems in beheer, en drijfmest van runderen wordt grootschalig ingezet in de open teelten. Diverse onderzoeken en praktijkbedrijven laten zien dat er nog veel mogelijkheden zijn om de ammoniak- en methaanemissie te verminderen. Zowel huisvesting (stal en mestopslag) als bedrijfsvoering (voeding en bemesting) kunnen worden geoptimaliseerd.

Voor de rundveehouderij zijn 36 innovaties gedefinieerd die geclusterd zijn op de thema's *dier(voeding) en beweiding, huisvesting en mestopslag, bemesting en bodemmaatregelen* (Tabel I.1.1). Maatregelen rondom diervoeding zijn gedeeltelijk ook innovatieve bronmaatregelen waarmee de input van stikstof wordt verlaagd of de lokale kringloop van nutriënten wordt versterkt. Van deze 36 innovaties zijn er 29 binnen vijf jaar inzetbaar op bedrijfsniveau. Veel van deze maatregelen zijn gericht op emissiereductie van ammoniak en broeikasgassen, terwijl er minder innovaties beschikbaar zijn voor vermindering van uit- en afspoeling naar grond- en oppervlaktewater. Voor een deel hangt dat samen met het huidige mestbeleid waarbinnen veel maatregelen al worden voorgeschreven binnen de context van een "Goede landbouwpraktijk". Het is daarom bediscussieerbaar of deze maatregelen als innovaties kunnen worden beschouwd. Dit is zeker het geval voor de lange lijsten aan maatregelen die sturen op een verbeterd bodem- en gewasbeheer (o.a. geïmplementeerd in het BedrijfsBodemWaterPlan) binnen de context van het Deltaplan Agrarisch Waterbeheer. Van deze maatregelen is overigens vaak wel kwalitatief bekend dat ze bijdragen aan vermindering van emissies naar grond- en oppervlaktewater, maar een kwantitatieve onderbouwing ontbreekt, mede door de grote invloed van lokale bodemeigenschappen.

Voor de langere termijn (5-10 jaar) zijn er zeven innovatieve maatregelen geïdentificeerd (Tabel I.1.2.) die vooral gericht zijn op nieuwe landbouwsystemen en stalsystemen die de huidige emissies sterk kunnen reduceren. Deze maatregelen grijpen gedeeltelijk in op de landbouwstructuur. In welke mate dit potentieel gerealiseerd kan worden is veelal nog onduidelijk.

Bij de maatregelen rond huisvesting en mestopslag (stalmaatregelen) gaat het bijvoorbeeld om diverse varianten waarbij mest frequent en zo volledig mogelijk wordt verwijderd uit de stal, meestal in combinatie met een techniek die ervoor moet zorgen dat gasvormige emissies uit mestopslagen wordt vermindert (bijvoorbeeld zo veel mogelijk afsluiten, spoelen, aanzuren). De emissiereductie uit de stal en mestopslagen als gevolg van de te nemen maatregelen varieert tussen de 40-50% ten opzichte van de referentiesituatie. De benodigde investeringen per dier kennen een grote spreiding: per techniek varieert dit van gemiddeld circa €200 tot €780 per dierplaats (Durlacher, 2023). Er zijn ook nieuwe stalsystemen in ontwikkeling, variërend van spoelen van roostervloeren tot een systeem waarin de urine wordt opgevangen voordat het in aanraking komt met vaste mest en technieken waarbij de ammoniak uit de urine of uit de afgezogen lucht wordt gehaald. De verwachte emissiereducties variëren hierbij van circa 35 tot 60% en de benodigde investeringen variëren in de orde van grootte van €75 tot €900 per dier (Durlacher, 2023).

Bij maatregelen in de bedrijfsvoering (beweiding, rantsoenen, bemesting) gaat het bijvoorbeeld om het optimaliseren van rantsoenen waardoor de stikstofbenutting toeneemt, toevoegingen aan de mest en innovatieve toedieningstechnieken. Het mogelijke reductiepercentage is sterk afhankelijk van de uitgangssituatie maar inschattingen variëren tussen van 5-70% van de ammoniakemissie van het bedrijf. Een internationale meta-analyse van 98 maatregelen voor methaanreductie in de veehouderij (Arndt et al., 2021)

---

bevestigt daarnaast dat methaanemissies met 12-21% zijn te verlagen via voeraanpassingen. Zowel voermaatregelen als ook het aanzuren van mest werken door op stalemissies en de emissie bij uitrijden. Meer weidegang toepassen verlaagt de ammoniakemissie in de stal: bij een ureumgehalte van 23 mg per dL in melk vermindert de ammoniakemissie van 13 kg NH<sub>3</sub> per GVE per jaar in een situatie zonder beweiding tot 11 kg NH<sub>3</sub> per GVE per jaar als er 2160 uur per jaar wordt beweid (Verbeek-Schilder en Verhoeven, 2024). In 2019 was het aantal weide-uren gemiddeld 1019 uur per dier per jaar. Door verbeterd mestmanagement kunnen NH<sub>3</sub>-emissies zo met 5% tot 25% dalen, en hogere reducties zijn mogelijk door verbeterde technologie en netjes werken (Bussink, 2019; Appendix II)<sup>7</sup>.

## 4.2 Innovaties varkenshouderij

In tabel I.1.3. wordt een overzicht gegeven van het innovatiepotentieel van 16 maatregelen om de emissies van NH<sub>3</sub> en CH<sub>4</sub> te verlagen in de varkenshouderij. Hieruit blijkt dat de kansrijke innovaties worden gekenmerkt door één en of een combinatie van huisvestingsmaatregelen: korte opslagduur van mest in de stal (dagontmesting), mestverwijdering via schuiven, spoelen of met een mestband, klein emitterend oppervlak, goed doorlatende roostervloeren, koelen of verdunnen van mest en mestscheiding (schuifsystemen, mestbanden). Deze maatregelen zijn in staat om de ammoniak- en methaanemissie met ten minste 70% te reduceren. De geuremissie wordt naar verwachting met 50% of meer gereduceerd. Fijnstof wordt in het algemeen maar zeer beperkt gereduceerd. De investeringskosten zijn in het algemeen hoger (5-10 euro per kg NH<sub>3</sub> reductie) dan voor een standaardstal met luchtwasser (<5 euro per kg NH<sub>3</sub> reductie), en kunnen zelfs oplopen tot >20 euro per kg NH<sub>3</sub> reductie. De jaarlijkse onderhoudskosten zijn vergelijkbaar (Aarnink et al., 2021). Naast de huisvestingsmaatregelen is er daarnaast nog een serie aan innovaties beschikbaar om via diervoeding en bemesting de emissies te verlagen. Omdat het merendeel van de varkenshouderij geen eigen grond bezit, zijn er vrijwel geen innovaties specifiek ontwikkeld voor het beperken van verliezen van N en P naar het grond- en oppervlaktewater (zie hiervoor tabel I.1.1.).

Integrale systemen die over meer dan vijf jaar beschikbaar komen (Tabel I.1.4.), geven naar verwachting een integrale reductie van zowel NH<sub>3</sub> als CH<sub>4</sub>. Alleen wordt met het systeem van luchtrecirculatie geen methaanreductie bereikt. Dit kan alleen bereikt worden in combinatie met een andere maatregel, b.v. het dagelijks verwijderen van de mest uit de stal. Fijnstof lijkt bij alle vermelde systemen ook gereduceerd te worden. De kosten zijn veelal nog niet goed aan te geven en vaak hoger dan voor de standaard stal met luchtwasser.

Om te voorkomen dat ammoniak verderop in de bedrijfsvoering alsnog emitteert uit de mest is het belangrijk dat deze mest vrijwel luchtdicht wordt opgeslagen en emissiearm wordt aangewend of wordt verwerkt tot mestproducten. In tegenstelling tot ammoniak is methaan vrijwel niet oplosbaar in mest. Dit betekent dat wanneer het gevormd wordt dit ook gaat emitteren, tenzij de mestopslag echt luchtdicht wordt afgesloten, b.v. in een biogasinstallatie waarbij het geproduceerde biogas wordt benut als energiebron. Om methaanproductie in de mest buiten de stal te voorkomen is het belangrijk om de mest zo kort mogelijk op te slaan en direct te gebruiken op het land of te verwerken tot producten waarin geen methaan meer kan worden gevormd.

Het grote voordeel van huisvestingsmaatregelen om emissies te beperken is dat het stalklimaat hiermee duidelijk wordt verbeterd. Aangezien veel van deze maatregelen zijn gericht op een snelle verwijdering van de mest uit de stal, wordt de methaanemissie hiermee ook sterk gereduceerd. Het voordeel van luchtwassers als nageschakelde techniek is dat deze vooral de NH<sub>3</sub>-emissie sterk kunnen reduceren, variërend van 70 tot 95%. Biologische en gecombineerde luchtwassers geven daarnaast ook een redelijke geurreductie (30 - 45%) en een hoge fijnstofreductie (60 - 80%). Door een aantal van deze innovaties te combineren, is er een sterke reductie mogelijk voor ammoniak, geur, methaan en fijnstof. Een belangrijk nadeel hiervan is echter wel dat met elke extra maatregel de kosten toenemen.

---

<sup>7</sup> Dit is met name relevant voor zodebemesting tijdens de eerste snede bij bemesting op grasland. Op klei en löss blijkt in de praktijk dat de toplaag van de bodem vaak te hard is gedurende de zomermaanden om de mest via zodebemesting netjes op voldoende diepte aan te brengen.

---

## 4.3 Innovaties pluimveehouderij

Een stal voor pluimvee moet emissiearm zijn met betrekking tot fijnstof en ammoniak. Dit betekent dat de uitstoot van ammoniak en fijnstof minder is dan uit een traditionele stal. Deze eisen staan in paragraaf 4.82 van het Besluit activiteiten leefomgeving. Hierdoor is de emissie van ammoniak vanuit de pluimveehouderij in de laatste jaren sterk gedaald. Desondanks zijn er nog een aantal innovaties die op een groot aantal bedrijven de emissie nog verder kunnen verlagen. De vier tot vijf maatregelen die inzetbaar zijn, zijn vooral huisvestingsmaatregelen om de condities in de stal zo aan te passen dat ammoniakverliezen ingeperkt worden. Omdat het merendeel van de pluimveehouderij geen eigen grond bezit, zijn er vrijwel geen innovaties specifiek ontwikkeld voor het beperken van verliezen van N en P naar het grond- en oppervlaktewater (zie hiervoor tabel I.1.1.).

---

## 5 Theoretisch maximale innovatiepotentieel

Theoretisch maximale reducties betreffen emissiereducties die in theorie mogelijk zijn als alle omstandigheden optimaal zijn om verliezen van koolstof en nutriënten in een landbouwsysteem te voorkomen, en het beheer van bodem, gewas, mest en water op een optimale manier worden uitgevoerd. Deze theoretische reducties worden veelal afgeleid van modelmatige extrapolaties op basis van de chemische en biologische processen die het gedrag van stikstof, koolstof en fosfor in het landbouwsysteem sturen. Op basis van de wetenschappelijke literatuur is in kaart gebracht wat de maximale reductie en emissies kan zijn voor ammoniak (sectie 5.1) en broeikasgassen (sectie 5.2) naar de lucht en verliezen van stikstof en fosfor (sectie 5.3) naar het watersysteem. De resultaten worden samengevat in sectie 5.4.

### 5.1 Innovatiepotentieel voor ammoniak

De studie van de Vries et al. (2023) gebruikte het INITIATOR-instrumentarium om inzicht te geven in de mogelijke effecten van technische maatregelen (huisvesting, diervoeding, bemesting, bodembeheer en gewasbeheer) in combinatie met elkaar door te rekenen voor alle landbouwbedrijven in Nederland. Hierbij is uitgegaan van de maximale impact van maatregelen voor zover deze afgeleid konden worden vanuit wetenschappelijke studies. Hieruit bleek dat de emissie kon worden verlaagd met 53% voor  $\text{NH}_3$ . De berekende emissiereductie voor ammoniak kan 5-15% hoger zijn zodra de toedieningsemissies verder worden verlaagd via grootschalige uitrol van diepe injectie of via het aanzuren van mest dan wel de inzet van vergisting.

Op een vergelijkbare manier hebben Gies et al. (2023) met een combinatie van modellen de impact berekend van een integraal maatregelenpakket om de doelen van het NPLG te realiseren. Hiervoor zijn combinaties doorgerekend van structuurmaatregelen (extensivering, bufferstroken, vernatten), managementmaatregelen (verruiming bouwplannen, meer beweiden, voeradditieven, lagere en efficiëntere bemesting, etc.) en technische maatregelen zoals emissiearme stallen en snelle afvoer van mest naar opslagen. De landelijke ammoniakemissie kon met deze maatregelen met 30-35% worden verlaagd. Ook hier is gebruik gemaakt van voorzichtige schattingen van emissiereducties van een selectie van maatregelen. De auteurs gaven aan dat met name op het gebied van technische innovaties in de mestbewerking, -verwerking- en -vergisting ontwikkelingen worden verwacht die de emissies verder kunnen verlagen. Ook kunnen maatregelen uit deze studie scherper worden toegepast, zoals een lagere stikstofbemesting of een grotere verandering van de gewasrotatie. Op basis van een vergelijking van de gebruikte emissiereducties door Gies et al. (2023) met de gemiddelde reducties gebruikt in deze studie (zie hoofdstukken 6.1 en bijlage I.) nemen we aan dat de berekende emissiereducties van Gies et al. (2023) nog met 10-20% zouden kunnen toenemen.

### 5.2 Innovatiepotentieel voor broeikasgassen

De studie van de Vries et al. (2023) liet zien dat de emissie van  $\text{N}_2\text{O}$  in de Nederlandse landbouw kon worden gereduceerd met 21% en de emissie van  $\text{CH}_4$  met 46%. Ter vergelijking, een halvering van de veestapel vermindert de emissie van methaan met 50% en de emissie van  $\text{N}_2\text{O}$  met 19%. De studie van Difford et al. (2018) toonde daarnaast aan dat de pensfermentatie met 13% per generatie dieren kan worden verlaagd via een innovatief fokprogramma gericht op diergenetica als ook aanpassingen van het microbiom in de pens van de koe. De studie van Gies et al. (2023) liet vergelijkbare resultaten zien. De broeikasgasemissie kon namelijk met 23 tot 25% worden verlaagd. Ter vergelijking, een halvering van de veestapel vermindert de emissie van methaan met 50% en de emissie van  $\text{N}_2\text{O}$  met 19%.

---

## 5.3 Innovatiepotentieel voor waterkwaliteit

Door maximale inzet van maatregelen die sturen op verbetering van de N-benutting door een betere bemestingspraktijk, gewasmanagement en bodembeheer kan 40% van het stikstofbodemoverschot worden verminderd en daarmee ook de verliezen naar grond- en oppervlaktewater (de Vries et al., 2023). Stikstofverliezen naar grond- en oppervlaktewater kunnen worden verlaagd met 39 tot 46%, terwijl met de uitrol van maatregelen de verliezen voor fosfaat maximaal met 6% kunnen worden verlaagd. In vrijwel alle provincies is de gemiddelde nitraatconcentratie onder landbouwpercelen door een gecombineerde inzet van maatregelen te verlagen tot onder de 50 mg NO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>, met uitzondering voor Limburg (Gies et al., 2023). Voor de stikstofuitspoeling naar het oppervlaktewater is via een gecombineerde inzet van maatregelen een reductie van 5 tot 55% te realiseren, waarmee in een groot deel van de provincies de opgaves voor de KRW zijn te realiseren. In provincies met veel klei- en veengronden is dit helaas niet het geval omdat maatregelen gericht op bemesting weinig invloed hebben op het voorkomen van verliezen naar het oppervlaktewater.

Uitgaande van de gewenste doelen voor nitraatconcentraties in grond- en oppervlaktewater hebben de Vries & Schulte-Uebbing (2021) in kaart gebracht wat dit betekent voor de maximaal acceptabele stikstofbodemoverschotten en de daaraan gekoppelde vereiste stijging in N-benutting om hieraan te voldoen. Zij concludeerden dat de N-benutting in Europa met 13% moest stijgen van de huidige 61% naar 74% om zo de kwaliteit van het oppervlaktewater te beschermen. De benodigde stijging in de N-benutting en daaraan gekoppelde reductie in N-aanvoer was daarbij veelal stringenter dan de benodigde reductie om de doelen voor ammoniakemissie in relatie tot biodiversiteit in natuurgebieden te realiseren. Voor Nederlandse melkveehouders ligt de benuttingsgraad gemiddeld op 64-69% in de jaren 2020 tot 2022, met een bandbreedte die varieert van 53 tot 86% (Agrimatie, 2024). Op akkerbouwbedrijven lag de stikstofbenutting met gemiddeld 54-58% structureel lager. Een stikstofbenutting van 90% wordt in de wetenschappelijke literatuur beschreven als het (gewenste) maximum: hogere waarden zijn wel mogelijk op korte termijn, maar betekent op de lange termijn dat de bodem mogelijk wordt verschaald met alle negatieve gevolgen van dien (EU Nitrogen Expert Panel, 2024).

Uitgaande van een N-benutting van 90% is ook een maximale emissie voor lachgas en uit- en afspoeling te berekenen voor stikstof. Uitgaande van een N-gewasproductie van 231 kg N ha<sup>-1</sup> jaar (de Vries et al., 2023) en een N-benutting van 90% voor bemesting betekent dit dat de totale gewenste N-bemesting gelijk is aan 257 kg N ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup>. Als we aannemen dat de gasvormige verliezen lineair afhankelijk zijn van de N-input, dan betekent dit ook dat er in deze situatie 5,8 kg N<sub>2</sub>O per hectare en 13,4 kg NH<sub>3</sub> per hectare emitteert; een reductie van 40% ten opzichte van de huidige situatie in 2019. Het gemiddelde N-bodemoverschot daalt hierdoor tot 25 kg N ha<sup>-1</sup>, aannemend dat de depositie en fixatie gelijk blijven. Als gevolg daarvan daalt de nitraatuitspoeling met circa 85%. Dit effect is overigens afhankelijk van landgebruik, grondsoort en diepte van grondwaterstand. Grasland en granen hebben bijvoorbeeld minder nitraatverliezen dan ondiep wortelende gewassen als uien, wortels en prei. Kleigronden hebben door hun hogere vruchtbaarheid gemiddeld een hogere gewasopbrengst en door de lagere doorlatendheid voor regenwater stroomt er ook meer water naar het oppervlaktewater. Nattere bodems worden daarnaast gekenmerkt door een lage nitraatuitspoeling omdat de aanwezige stikstof denitrificeert.

Uitspoeling van fosfaat naar het grondwater is vrijwel nihil omdat fosfaat aan ijzer- en aluminiumdeeltjes in de bodem wordt gebonden. Door ondiepe uitspoeling, drainage en afspoeling spoelt er echter 1 tot 5 kg P ha<sup>-1</sup> jaar<sup>-1</sup> uit naar het oppervlaktewater. Een deel daarvan wordt vanuit landbouwkundig perspectief beschouwd als "onvermijdelijk" in combinatie met het landbouwkundig gebruik (in het huidige mestbeleid wordt uitgegaan van een onvermijdelijk verlies van 5 kg P ha<sup>-1</sup> waarbij verlies is gedefinieerd als niet beschikbaar zijnde voor het gewas, en dat omvat zowel vastlegging in de bodem als uitspoeling uit de bewortelbare zone). Milieukundig beschouwd mogen de verliezen niet hoger zijn dan 1 tot 1,7 kg ha<sup>-1</sup> om bij een neerslagoverschot van 300 mm per jaar de grenswaarden voor een gewenst ecologische waterkwaliteit (die variëren van 0,15 – 0,25 mg P L<sup>-1</sup>) niet te overschrijden. In theorie is de uitspoeling van fosfaat naar het oppervlaktewater volledig te neutraliseren / te beperken door het hydrologisch isoleren van gebieden, de inzet van end-of-pipe maatregelen (bijvoorbeeld het binden met ijzer en bufferstroken, regelmatig baggeren, oeverbescherming, voorkomen van plasmavorming, etc.), en het verlagen van de fosfaattoestand van de bodem door een negatief fosfaatbodemoverschot. Er zijn anno 2024 in Nederland vooral economische beperkingen en randvoorwaarden die de inzet van deze middelen beperken. Belangrijk hierbij is dat er sprake is van een groot na-ijleffect, waarbij het jaren (> 50 jaar) kan duren voordat de beoogde daling in emissies via bronmaatregelen (minder P-aanvoer)



kan worden gerealiseerd. Vanuit het perspectief van de ecologische en chemische waterkwaliteit is daarom een combinatie van hydrologische, landbouwkundige en ecologische maatregelen effectief.

## 5.4 Theoretisch maximale emissiereducties

De resultaten van deze analyse zijn samengevat in Tabel 5.1. Ter vergelijking is ook een inschatting toegevoegd gebaseerd op de best presterende innovaties die in deze studie zijn geïdentificeerd (zie hoofdstuk 4 en Bijlage I). Uit dit totaaloverzicht blijkt dat de ammoniakemissie met 34 tot 85% kan dalen, de emissie van methaan met 22 tot 90%, de emissie van lachgas met 10 tot 55%, en de uit- en afspoeling van stikstof met 18 tot 90% en van fosfor met 5 tot 95%. Voortbouwend op de aannames van Gies et al. (2023) en de Vries et al. (2023) kan de emissiereductie voor NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O en N-water in de praktijk circa 15% hoger uitvallen als rekening wordt gehouden met nieuwe innovaties die in deze beide studies niet zijn meegenomen. Wanneer we dan de vijf inschattingen van de maximale reductie middelen als een voorzichtige schatting van de maximale innovatiepotentieel van innovaties (zie de laatste rij in Tabel 5.1), dan betekent dit dat de landelijke emissies gereduceerd kunnen worden met 61% voor ammoniak, met 72% voor methaan, met 42% voor lachgas en met 60% voor de N-uitspoeling naar grond- en oppervlaktewater. Gegeven de geringe rol van de bemestingspraktijk op de emissie van fosfor naar het oppervlaktewater is bij de huidige dan wel verbeterde landbouwpraktijk een potentiële reductie mogelijk van 10%; een reductie hoger dan 90% is alleen mogelijk na ingrijpende hydrologische maatregelen.

**Tabel 5.1** Maximale relatieve reducties (%) in emissies van ammoniak (NH<sub>3</sub>), broeikasgassen (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) naar de lucht en uit- en afspoeling van stikstof (N) en fosfor (P) naar het grond- en oppervlaktewater, ten opzichte van de landelijke emissies voor een gegeven referentiejaar (die varieert per bron).

Methoden	Bron <sup>1</sup>	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	N-water	P-water
Max. reductie van emissies via technische innovaties alle bedrijven (%)	1	53	46	21	39-46	6
Max. reductie via halvering van veestapel (%)	1	36	50	19	26-36	5
Max. reductie van emissies via combinatie van maatregelen (%)	2	34	22-24	10-12	18-19	7-8
Een N-benutting van 90% <sup>2</sup> en inzet van end-of-pipe maatregelen voor fosfor	3, 4	40	-	40-45	85-90	90-95
Max. impact geschat op combinatie van "beste innovaties" (zie bijlage I)	-	85	90	55	40-60	5-30
<b>Inschatting van max. haalbare reductie</b>	<b>-</b>	<b>61</b>	<b>72</b>	<b>42</b>	<b>60</b>	<b>10</b>

<sup>1</sup>1) de Vries et al. (2023), 2) Gies et al. (2023), 3) Schulte-Uebbing & de Vries (2021), 4) Koopmans et al. (2011)

<sup>2</sup> berekend op basis van de landelijke N-balans (de Vries et al., 2023) en een ongewijzigde verdeling van emissies naar lucht en water, uitgaande van een NUE van 90%.

Gegeven de provinciale opgave om de emissie van ammoniak met 24-52% te verlagen, de emissie van broeikasgassen met 23-31%, de stikstofuitspoeling met 2 tot 59% en de fosforafspoeling met 4 tot 60% (zie tabel 3.1) laat deze inventarisatie van theoretische maximale reducties zien dat de opgaven in theorie realiseerbaar zijn voor ammoniak en broeikasgassen, maar vrijwel onmogelijk zijn voor fosfor en waterkwaliteit. Uit deze analyse blijkt ook dat een volledige reductie van emissies onmogelijk is. Het realiseren van deze maximale reducties voor met name broeikasgassen heeft als risico dat er ook innovaties worden geïmplementeerd met mogelijk nadelige gevolgen voor dierenwelzijn (bijv. continue toediening van Bovaer). Vrijwel alle innovaties leiden tot hogere kosten en deels ook tot lagere opbrengsten. Grote uitdagingen zijn er voor de provincies met hoge dieraantallen; de opgave ligt daar dicht in de buurt van de maximale haalbare reductie.

---

## 6 Praktisch haalbare innovatiepotentieel

In welke mate de beoogde opgaves realiseerbaar zijn in het landelijk gebied hangt sterk samen met politieke en bestuurlijke keuzes rondom de toekomst van de landbouw in Nederland. De huidige studie gaat verder niet in op de lopende ontwikkelingen rondom doelsturing op provinciaal of bedrijfsniveau (zie hiervoor Ros et al., 2023; 2024; Jongeneel, 2024). In dit hoofdstuk wordt het praktisch realiseerbaar innovatiepotentieel in kaart gebracht voor de emissiereductie van ammoniak (sectie 6.1) en broeikasgassen (sectie 6.2) als ook de vermindering van emissies van nitraat en fosfaat naar het grond- en oppervlaktewater (sectie 6.3). De resultaten worden vervolgens samengevat in sectie 6.4.

Praktisch realiseerbare reducties betreffen emissiereducties die mogelijk zijn via de implementatie van innovaties in het huidige landbouwsysteem, waarbij alle landbouwbedrijven de best beschikbare technieken en maatregelen inzetten die binnen vijf jaar beschikbaar zijn of komen om emissies van CH<sub>4</sub>, NH<sub>3</sub>, en N<sub>2</sub>O naar de lucht en verliezen van N en P naar grond- en oppervlaktewater te verminderen. Bij innovaties gaat het hierbij om sociale en technische innovaties in huisvesting (stal en mestopslag), bedrijfsvoering (diervoeding, gewasbeheer en bemesting) of innovaties in de landbouwstructuur. Hierbij is in deze studie de emissiereductie gekwantificeerd in relatie tot de uitgangssituatie in 2019.

### 6.1 Innovatiepotentieel voor ammoniak

In tegenstelling tot de maximaal haalbare reducties gaat het hier om verwachte maximale reducties gegeven de volledige implementatie van de meest effectieve en zinvolle innovaties in de veehouderij. Voor de berekende emissiereductie voor ammoniak is hierbij uitgegaan van de gemiddelde werking van de beste innovaties die binnen vijf jaar beschikbaar zijn of komen. De maatregelen zijn hierbij gecategoriseerd in drie zogenoemde maatregelsporen, dat wil zeggen maatregelen rond diervoeding en diermanagement (spoor 1), huisvesting en mestopslag (spoor 2) en toediening van mest (spoor 3). Heel concreet gaat het om de volgende sporen met bijbehorende maatregelen en gekoppelde ammoniakemissiereducties (zie Tabellen I.1.1. tot I.1.5.):

1. **Spoor diervoeding en diermanagement:** 5-20% reductie van ammoniak via optimalisatie van het ruw eiwitgehalte in het rantsoen, grasraffinage en / of de beweidingstrategie. Uitgesplit per sector gaan we uit van een gemiddelde reductie van 5% voor pluimvee, 15% voor varkens, en 20% voor rundvee.
2. **Spoor huisvesting en mestopslag:** 40-70% reductie van ammoniak via (biologisch) aanzuren van de mest in de stal (eventueel in combinatie met vergisting), de inzet van luchtwassers, schoonhouden van vloeren, dagontmesting in combinatie met bewerkingstechnieken, en / of de inzet van plasmatechnologie om drijfmest om te zetten in een NEO-meststof. Uitgesplit per sector gaan we daarmee uit van een potentiële reductie van 40% voor rundvee, en 70% voor pluimvee en varkens (ten opzichte van de referentiesituatie).
3. **Spoor mesttoediening:** 20-60% reductie van ammoniak via inzet van precisiebemesting, gebruik van toevoegingsmiddelen, het aanzuren van mest en / of inzet van diepe injectie. Uitgesplit per sector gaan we daarmee uit van een reductie van 15% voor kunstmest, 10% voor pluimveemest, 20% voor rundveemest (op veengrond), 60% voor rundveemest (op minerale grond), en 50% voor varkensmest. De emissiereductie wordt toegekend aan alle landbouwgrond dus ook de open teelten buiten de veehouderij.

Voor de berekening van realistische reducties zijn we er van uitgegaan dat innovaties rondom diervoeding in staat zijn de ammoniakemissie met 5% (voor pluimvee) tot 20% (voor rundvee) te reduceren (Tabel I.1.1.). Deze reductie is te bereiken is via optimalisatie van het ruw eiwitgehalte als ook een aanpassing van beweidingstrategieën. Voor het maatregelspoor gericht op huisvesting en mestopslag zijn de meest perspectiefvolle maatregelen het (biologisch) aanzuren, eventueel in combinatie met vergisting, de inzet van luchtwassers, dagontmesting plus bewerking en de inzet van plasmatechnologie om drijfmest om te zetten in een NEO-meststof. Al deze innovaties leveren een reductie van de stalemissie van gemiddeld 70% of meer (Tabel I.1.1.). We nemen hierbij ook aan dat bij de toediening van mest goed rekening wordt gehouden met

de hogere stikstofgehalte in de mest (dan wel de eigenschappen van de geproduceerde mestproducten) door een verminderde kunstmestgift. Voor het maatregelspoor mesttoediening gaat de analyse uit van een reductie van 10 tot 60% (Tabel I.1.1.) waarbij dit, afhankelijk van grondsoort, gerealiseerd kan worden via de toepassing van aangezuurde mest, toevoegings-middelen aan de mest (zoals DMPP), de inzet van precisiebemesting (de juiste meststof op de juiste plek met de juiste gift op het juiste moment) en diepe injectie van drijfmest. De verschillende maatregelen binnen het maatregelspoor van mesttoediening zijn voor een groot deel inwisselbaar, waarbij netjes werken het uitgangspunt vormt.

Uitgaande van een goede implementatie van een combinatie van maatregelen voor deze drie sporen kan in het merendeel van de provincies de beoogde NPLG-opgave voor NH<sub>3</sub> worden gerealiseerd (Tabel 6.1). De eerste drie kolommen geven aan hoeveel de ammoniakemissie kan worden gereduceerd in kton per jaar ten opzichte van het jaar 2019 door innovaties in huisvesting en mestopslag ("stal"), diermanagement en -voeding ("(dier)"voeding), en innovaties tijdens de toediening van mest ("bemesting"). Daarna wordt aangegeven welk percentage van de emissie in 2019 kan worden gereduceerd (in procenten) en hoe groot de bijdrage is van de rundveesector (met melkveehouderij als grootste sector) aan het innovatiepotentieel (in procenten). Als laatste wordt aangegeven of via de drie maatregelsporen de ammoniakopgave van het NPLG kan worden gerealiseerd. Een waarde groter dan 100 betekent dat de berekende emissiereductie groter is dan de gewenste emissiereductie uit het NPLG.

**Tabel 6.1** Het innovatiepotentieel van NH<sub>3</sub>-reducerende innovaties (die binnen vijf jaar beschikbaar zijn) per provincie (in kton), uitgesplitst per type maatregel, en de bijdrage van de rundveehouderij (rvh) als ook de realisatie van de NPLG-opgave.

Provincie	Innovatiepotentie NH <sub>3</sub> reductie in kton t.o.v. 2019			Bijdragen aan NH <sub>3</sub> opgaven (%)		
	Stal <sup>1</sup>	(Dier)voeding <sup>1</sup>	Bemesting <sup>1</sup>	Totaal <sup>2</sup>	Bijdrage mvh <sup>3</sup>	Realisatie NPLG <sup>4</sup>
Drenthe	1,01	0,49	1,19	44	74	110
Flevoland	0,42	0,16	0,92	44	67	341
Friesland	1,78	1,10	2,89	45	92	123
Gelderland	3,75	1,70	2,60	48	60	107
Groningen	0,85	0,44	1,82	43	79	215
Limburg	2,06	0,62	0,67	50	29	110
Noord-Brabant	4,52	1,89	1,95	48	43	120
Noord-Holland	0,45	0,31	1,24	42	92	111
Overijssel	2,77	1,36	2,12	48	68	109
Utrecht	0,75	0,41	0,80	44	79	83
Zeeland	0,35	0,13	1,21	41	59	268
Zuid-Holland	0,49	0,33	1,21	41	74	104
Nederland	19,2	8,9	18,6	46	65	120

<sup>1</sup> Totale reductie in NH<sub>3</sub> a.g.v. de implementatie van innovaties in de stal, via diervoeding en bemesting conform de methodiek beschreven in 2.3.

<sup>2</sup> Totaal berekende reductie (in %) ten opzichte van de huidige situatie (referentie conform uitgangspunten in Hoofdstuk 2.3).

<sup>3</sup> Berekende bijdrage van de rundveehouderij (rvh) van de totaal berekende potentiële ammoniakreductie.

<sup>4</sup> Deling van het berekende totale emissiereductie voor ammoniak ten opzichte van de gewenste reductie vanuit de NPLG-opgave in Tabel 3.1.

De grootste bijdrage wordt in vrijwel alle provincies geleverd door maatregelen in de rundveehouderij. De gemiddelde totale reductie per provincie ten opzichte van de emissie in 2019 ligt rond de 40-50%. Het ligt daarmee in dezelfde orde van grootte als de eerdere modelmatige schattingen (van 35% emissiereductie) voor een realistische implementatie als 50% van de bedrijven maatregelen implementeert (de Vries et al., 2023). Op bedrijfsniveau kan de variatie uiteraard groter zijn omdat daar zowel de uitgangssituatie als ook de impact van innovaties kan variëren. Resultaten vanuit het Netwerk Praktijkbedrijven, een project waarin zo'n 110 melkveehouders de uitstoot van ammoniak en methaan substantieel proberen te verlagen, laten zien dat met een combinatie van voer- en managementmaatregelen de ammoniakemissie met zeker 30 tot 40% kon worden gereduceerd ten opzichte van het referentiejaar 2018. Investeren veehouders daarnaast in aanpassingen in de stal, dan is een reductiepercentage tot wel 70 procent haalbaar (artikel Veeteelt, september 2022). Een vergelijkbare reductie van 40-50% kan overigens ook worden gerealiseerd door aanpassingen van de landbouwstructuur (lees: minder dieren of minder inputs). In de onderliggende berekening is uitgegaan van de gemiddelde reductie van een combinatie van de innovaties uit de drie maatregelsporen. Hiermee wordt integraliteit nagestreefd en wordt voorkomen dat het effect wordt overschat omdat maatregelen binnen een

maatregelspoor vaak niet optelbaar zijn. Dit betekent ook dat er een zekere mate van keuzevrijheid is om per maatregelspoor de meest geschikte innovatie op bedrijfsniveau te implementeren.

Bij implementatie van deze combinatie van maatregelen dragen stalmaatregelen voor 21 tot 61% bij aan de beoogde reductie, met de hoogste bijdrage in Gelderland, Limburg en Noord-Brabant (data niet weergegeven). Maatregelen gericht op diervoeding en beweiding dragen voor 8 tot 23% bij aan de beoogde reductie, met de hoogste bijdrage in Overijssel en Noord-Brabant. Mesttoediening draagt voor 20 tot 72% bij aan de beoogde emissiereductie met de hoogste bijdrage in Zeeland, Groningen, en Zuid- en Noord-Holland.

Voor de maatregelen die op langere termijn inzetbaar worden (na 5 jaar), is het de verwachting dat een nog grotere reductie in ammoniak realiseerbaar is. Er is echter nog weinig bekend over hun potentie om de ammoniakemissie te verlagen, en de onzekerheden op bestaande schattingen zijn dermate hoog dat een kwantificering van hun potentiële bijdrage aan de reductieopgave weinig zin heeft. Dit temeer omdat de landelijke opgave vrijwel te realiseren is met de huidige set aan innovaties met uitzondering van provincie Utrecht (het reductiepotentieel is veelal dus groter dan de opgave).

Waar het merendeel van de melkveehouderij nog bestaat uit open stallen, is dat niet het geval voor de varkens en pluimvee. Ruwweg 15-20% van de varkens en pluimvee wordt op dit moment nog in traditionele open stallen gehuisvest, wat betekent dat het merendeel al een emissiearme stal heeft. De helft van de traditionele stallen zit in de stoppersregeling en zal daardoor herbestemd of gesloopt worden. Ongeveer 50-60% van het aantal dierplaatsen (vleesvarkens en dragende zeugen, biggen en kraamzeugen) is daarnaast voorzien van een luchtwasser. Voor een verdere reductie van ammoniak uit de varkenshouderij en pluimveehouderij is daarom vooral extra aandacht nodig voor bedrijfsvoering. Alle huisvestingsmaatregelen kunnen in principe gecombineerd worden met een nageschakelde techniek als luchtwassers. Hiermee is het mogelijk om de emissies van ammoniak, geur en fijnstof te reduceren. Deze technieken zijn vooral aanvullend ten opzichte van elkaar voor methaan en fijnstof. Luchtwassers doen niets aan methaan en huisvestings-maatregelen doen vrijwel niets aan fijnstof.

*Inzet van "beste innovaties" per maatregelspoor voor ammoniak*

Om de bijdrage van de verschillende maatregelsporen apart van elkaar te evalueren is aanvullend in kaart gebracht wat er potentieel met een goede implementatie van maatregelen kan worden bereikt per maatregelspoor (zie Tabel 6.2; met dezelfde maatregelen als gebruikt voor Tabel 6.1).

**Tabel 6.2** *Het innovatiepotentieel van de beste NH<sub>3</sub>-reducerende maatregelen (die binnen 1-5 jaar beschikbaar zijn) om de emissie per provincie te verlagen. Reducties in procenten uitgedrukt als percentage van de totale NH<sub>3</sub>-emissie in 2019. Combinaties van maatregelen binnen een maatregelspoor zijn niet meegenomen.*

Provincie	Stal	(Dier)voeding	Bemesting	Totaal <sup>§</sup>
Drenthe	16	8	19	44
Flevoland	12	5	27	44
Friesland	14	9	22	45
Gelderland	22	10	15	48
Groningen	12	6	25	43
Limburg	31	9	10	50
Noord-Brabant	26	11	11	48
Noord-Holland	9	7	26	42
Overijssel	21	10	16	48
Utrecht	17	9	18	44
Zeeland	8	3	29	41
Zuid-Holland	10	7	24	44
Nederland	19	8,7	18	46

§ de totale emissiereductie ten opzichte van 2019 is identiek aan de reductie opgenomen in Tabel 6.2.

Opnieuw is hierbij uitgegaan van de gemiddelde effectiviteit van de beste maatregelen per maatregelspoor die op korte termijn, dat wil zeggen binnen vijf jaar, beschikbaar zijn voor grootschalige implementatie. Uit deze analyse blijkt dat maatregelen rondom diervoeding (spoor 1), zoals de optimalisatie van eiwit in rantsoenen, inzet van gras raffinage en voeradditieven voor de ammoniakemissie kan verlagen met 0.1 tot 1.9 kton per jaar, en daarmee de totale emissie met 3 tot 11% kan verminderen. Door grootschalige implementatie van maatregelen in huisvesting en mestopslag kan de ammoniakemissie worden verminderd met 0,4 tot 4,5 kton

---

per jaar (afhankelijk van de provincie, zie Tabel 6.1). Dit is mogelijk via het (biologisch) aanzuren van mest in de stal, het vergisten van mest, en inzet van luchtwassers. Dit betekent dat hiermee 8 tot 31% van de totale emissie kan worden verlaagd (Tabel 6.2). Hierbij wordt aangenomen dat ook de gekoppelde bemestingspraktijk wordt aangepast zodra er maatregelen zijn genomen die de emissie van ammoniak en daarmee ook de samenstelling van geproduceerde mest(producten) wijzigen. Maatregelen gericht op emissiereductie tijdens de toediening van mest (spoor 3) zorgen voor een vergelijkbare reductie als de maatregelen in huisvesting en mestopslag en kunnen 10 tot 29% van de emissie verlagen. Deze berekende reducties zijn een realistische inschatting van enkelvoudige effecten van deze innovatiesporen. Combinaties van maatregelen binnen een maatregelspoor zijn hierbij niet meegenomen; hiervoor is de inzet van gedetailleerde (proces)modellen nodig omdat maatregelen invloed hebben op elkaar.

## 6.2 Innovatiepotentieel voor broeikasgassen

Ook voor de praktisch realiseerbare emissiereducties van broeikasgassen is voor elke provincie gekozen voor een gemiddeld effect van de beste maatregelen per maatregelspoor. Voor elk maatregelspoor zijn er daarmee verschillende maatregelen inzetbaar om de gewenste reductie in broeikasgassen te realiseren (zie tabellen I.1.1. tot I.1.5. voor de emissiereducties per maatregel). De meest effectieve innovaties zijn hierbij het gecombineerd (biologisch) aanzuren en vergisten of de inzet van plasmatechnologie om drijfmest om te zetten in een NEO-meststof. Door een goede landbouwpraktijk (de vier juistheden van bemesting) is de hoeveelheid lachgas via mesttoediening vrijwel te halveren. Voor deze studie zijn de volgende beste maatregelen geclusterd per maatregelspoor:

1. **Spoor diervoeding en diermanagement:** 11-20% reductie van methaan via optimalisatie van de verteerbaarheid van het rantsoen, de leeftijd van de veestapel, en inzet van voeradditieven. Uitgesplit per sector gaan we daarmee uit van een reductie van 20% voor rundvee en 11% voor varkens. Op langere termijn zal via fokkerij ook een structurele bijdrage kunnen leveren voor de reductie van methaan, maar dit effect is in de huidige analyse niet meegenomen.
2. **Spoor huisvesting en mestopslag:** 60-80% reductie van methaan en lachgas via de vergisting van mest (eventueel in combinatie met biologisch aanzuren), inzet van dagontmesting of stalvloer-aanpassingen, en / of de inzet van plasmatechnologie om drijfmest om te zetten in een NEO-meststof. Affakkelen van methaan wordt niet als gewenst beschouwd. Uitgesplit per sector gaan we daarmee uit van een methaanreductie van 60% voor rundvee, 80% voor varkens en <1% voor pluimvee. Voor lachgas gaan we uit van een reductiepotentieel van 2,5% voor rundvee en 1% voor de overige sectoren. De verliezen uit mestbewerking zijn met 40% te verminderen voor varkens tot 70% te verminderen voor rundvee.
3. **Spoor mesttoediening:** 1-5% reductie van lachgas via inzet van precisiebemesting en gebruik van toevoegingsmiddelen zoals DMPP van dierlijke mest. Voor kunstmest gaan we uit van een gemiddelde reductie van 10%, en zitten daarmee bewust aan de lage kant gegeven de potentie van nitrificatieremmers die de emissie van lachgas (onder de juiste weersomstandigheden) met 50% kan verminderen.

In tabel 6.3 is vervolgens per provincie het innovatiepotentieel in kaart gebracht voor de broeikasgassen lachgas en methaan voor die innovaties die op korte termijn (1-5 jaar) beschikbaar zijn of komen. De eerste drie kolommen aan hoeveel de emissie van broeikasgassen kan worden gereduceerd in kton per jaar ten opzichte van het jaar 2019 door innovaties in huisvesting en mestopslag ("stal"), diermanagement en -voeding ("(dier)"voeding), en innovaties tijdens de toediening van mest ("bemesting"). Daarna wordt aangegeven welk percentage van de emissie in 2019 kan worden gereduceerd (in procenten) en hoe groot de bijdrage is van de rundveehouderijsector aan het innovatiepotentieel (in procenten). Als laatste wordt aangegeven of via de drie maatregelsporen de reductieopgave voor broeikasgassen van het NPLG kan worden gerealiseerd. Een waarde groter dan 100 betekent dat de berekende emissiereductie groter is dan de gewenste emissiereductie uit het NPLG.



**Tabel 6.3** Het innovatiepotentieel van broeikasgas-reducerende innovaties per provincie (in kton) voor innovaties die op korte termijn (1-5 jaar) beschikbaar komen, uitgesplitst per type maatregel, en de bijdrage van de rundveehouderij (rvh) als ook de realisatie van de NPLG-opgave.

Provincie	Innovatiepotentie BKG reductie in kton t.o.v. 2019			Bijdragen aan BKG opgave (%)		
	Stal <sup>1</sup>	(Dier)voeding <sup>1</sup>	Bemesting <sup>1</sup>	Totaal <sup>2</sup>	Bijdrage rvh <sup>3</sup>	Realisatie NPLG <sup>4</sup>
Drenthe	305	140	11	44	93	147
Flevoland	99	44	8	35	91	146
Friesland	776	355	26	48	99	144
Gelderland	674	385	23	39	83	153
Groningen	290	131	16	42	95	143
Limburg	289	103	6	43	49	132
Noord-Brabant	941	388	17	43	61	167
Noord-Holland	230	106	13	41	99	114
Overijssel	750	352	18	46	87	159
Utrecht	245	119	8	45	95	123
Zeeland	72	32	12	27	86	109
Zuid-Holland	241	109	13	42	97	119
Nederland	4912	2265	173	43	83	147

<sup>1</sup> Totale reductie in NH<sub>3</sub> a.g.v. de implementatie van innovaties in de stal, via diervoeding en bemesting conform de methodiek beschreven in 2.3.

<sup>2</sup> Totaal berekende reductie (in %) ten opzichte van de huidige situatie (referentie conform uitgangspunten in sectie 2.3).

<sup>3</sup> Berekende bijdrage van de rundveehouderij (rvh) van de totaal berekende potentiële ammoniakreductie.

<sup>4</sup> Deling van het berekende totale emissiereductie voor broeikasgassen ten opzichte van de gewenste reductie vanuit de NPLG-opgave in Tabel 3.1.

Over de verschillende provincies kan de grootste reductie worden gerealiseerd met huisvestingsmaatregelen gevolgd door maatregelen rond aanpassingen van diervoeding en diermanagement (Tabel 6.3). De grootste impact wordt gerealiseerd in de melkveehouderij vanwege het feit dat zij de grootste bron is van methaan (via pensfermentatie en mestopslag) en dat de huidige huisvestingssystemen nog maar heel beperkt in staat zijn om CH<sub>4</sub> te verminderen. De bijdrage vanuit het spoor van huisvesting en stalmaatregelen hebben gemiddeld twee keer zo veel invloed als maatregelen op het vlak van diermanagement en -voeding. Door de verschillende maatregelen te combineren (voor zover ze additief zijn) is het mogelijk om de emissie met 27 tot 48% te verlagen (Tabel 6.3), en daarmee kan de huidige NPLG-opgave tot 2030 worden gerealiseerd (zie Tabel 3.1).

#### *Inzet van "beste innovaties" per maatregelspoor voor broeikasgassen*

De bijdrage van de verschillende maatregelsporen aan de reductie van broeikasgassen per provincie verschilt ten opzichte van die van ammoniak (zie Tabel 6.4).

**Tabel 6.4** Het innovatiepotentieel van broeikasgas-reducerende innovaties, die op korte termijn (1-5 jaar) beschikbaar komen, per provincie om de emissie per provincie te verlagen. Reducties in procenten uitgedrukt als percentage van de totale emissie van broeikasgassen (CH<sub>4</sub> en N<sub>2</sub>O) in 2019. Combinaties van maatregelen zijn hierbij niet meegenomen.

Provincie	Stal	(Dier)voeding	Bemesting	Totaal <sup>§</sup>
Drenthe	31	14	1	46
Flevoland	24	11	2	37
Friesland	32	15	1	48
Gelderland	25	14	1	40
Groningen	28	13	2	43
Limburg	31	11	1	43
Noord-Brabant	31	13	1	44
Noord-Holland	27	13	2	41
Overijssel	31	15	1	47
Utrecht	30	14	1	45
Zeeland	17	8	2	28
Zuid-Holland	28	13	2	42
Nederland	29	13	1	44

§ de totale emissiereductie ten opzichte van 2019 is identiek aan de reductie opgenomen in Tabel 6.3.

Het verschil in innovatiepotentie ten opzichte van ammoniak komt omdat methaan vooral samenhangt met de emissie van dieren in de stal (pensfermentatie) en de emissie die optreedt gedurende mestopslag. Een verbeterde mestpraktijk (spoor 3) heeft daarom weinig tot geen invloed op de emissie van broeikasgassen, dit in tegenstelling tot ammoniak. Wanneer de verschillende maatregelensporen met elkaar worden vergeleken dan hebben maatregelen rond huisvesting en mestopslag een twee keer grotere impact dan maatregelen gericht op (dier)voeding (Tabel 6.4). Wel zijn de maatregelen rondom diervoeding en diermanagement veel goedkoper dan innovaties in huisvestingsystemen.

### 6.3 Innovatiepotentieel voor waterkwaliteit

Maatregelen en innovaties om de uit- en afspoeling van nutriënten te verminderen, behoren vrijwel allemaal tot de goede landbouwpraktijk (Groenendijk et al., 2021ab; Velthof & Groenendijk, 2021). Dit betreft maatregelen rondom efficiënter toedienen van mest, verlaging van de dierlijke mestgift, verhoging van de leeftijd van grasland, verruiming van het bouwplan, het toepassen van vanggewassen, en de inzet van bufferstroken (zie Tabel I.1.1). Deze maatregelen zorgen ofwel voor een verlaging van het N- en P-bodemoverschot ofwel voor een hogere retentie (en daarmee minder verliezen) in de bodem. Het betreft hier maatregelen in alle landbouwsectoren, dus ook de akkerbouw, vollegronds-groenteteelt en boomteelt. Gezien de afbakening van deze studie is geen inventarisatie uitgevoerd voor innovaties in deze sectoren om de uit- en afspoeling verder te verminderen. Met andere woorden: er zijn niet zozeer nieuwe innovaties nodig, maar het is gewenst dat in de huidige landbouwpraktijk meer en beter gebruik wordt gemaakt van de goede landbouwpraktijk. Ten opzichte van de genoemde grondgebonden sectoren is de emissie naar grond- en oppervlaktewater vanuit de grondgebonden melkveehouderij relatief klein en voor fosfaat gekoppeld aan de landbouwkundige doelen voor de fosfaattoestand zoals deze in de mestwetgeving zijn vastgesteld. Het innovatiepotentieel van de hierboven beschreven maatregelen wordt samengevat in Tabel 6.5 met betrekking tot de nitraatuitspoeling naar het grondwater en de uit- en afspoeling van N en P naar het oppervlaktewater.

**Tabel 6.5** Het innovatiepotentieel van bodem- en bemestingsmaatregelen om de nitraatconcentratie in het grondwater te verlagen (reductie in mg/L) en de emissie van N en P naar het oppervlaktewater te verminderen (in kg / ha) en het bijbehorende doelrealisatie (in % voor oppervlaktewater, en ja/nee voor grondwater), per provincie (bron: Gies et al., 2023).

Provincie	Innovatiepotentie voor vermindering nitraatuitspoeling en verliezen van N en P naar het oppervlaktewater					
	Nitraat (mg/L)	Realisatie NPLG (ja/nee)	Stikstof (kg / ha)	Realisatie NPLG (%) <sup>§</sup>	Fosfor (kg / ha)	Realisatie NLG (%) <sup>§</sup>
Drenthe	3	Ja	1,5	305	0,06	170
Flevoland	1	Ja	-	-	-	-
Friesland	1,8	Ja	4,1	254	0,06	57
Gelderland	8	Ja	0,6	61	0,03	116
Groningen	2	Ja	1,0	280	-	1
Limburg	33	Nee	4,4	94	0,11	44
Noord-Brabant	31	Ja	10,7	167	0,20	96
Noord-Holland	0	Ja	0,7	17	0,04	7
Overijssel	11	Ja	2,3	109	0,06	157
Utrecht	3,5	Ja	1,9	248	0,09	70
Zeeland	0,2	Ja	-	-	0,02	-
Zuid-Holland	0,3	Ja	0,8	50	0,12	21

<sup>§</sup> een percentage hoger dan 100% betekent dat de adaptie van de goede landbouwpraktijk zorgt voor een grotere emissiereductie dan de doelen zoals deze zijn opgenomen in het NPLG.

Vanuit de studie van Gies et al. (2023) blijkt dat in alle provincies (met uitzondering van Limburg) de gemiddelde nitraat-concentratie in het uitspoelingswater lager is dan de drinkwaternorm van 50 mg nitraat per liter (Tabel 6.5). De uit- en afspoeling van stikstof naar het oppervlaktewater kan door de inzet van maatregelen uit de goede landbouwpraktijk met 2 tot 55% worden verlaagd, waarbij de effecten kleiner zijn dan 10% in provincies met veel klei en veenbodems (Zeeland, Zuid-Holland, Noord-Holland, Groningen, Flevoland en Friesland) en groter zijn in de overige provincies. Fosfaatemissies dalen veel minder: er zijn reducties berekend variërend van <1 tot 8%, met twee uitschieters groter dan 10% voor de provincies Limburg en Noord-Brabant. Dat laatste is vooral het effect van verminderde bemesting in de 3-m bufferzones in beekdalen. Om de

fosforemissie naar het oppervlaktewater te verlagen is een verdere verlaging van de fosfaatbemesting nodig (en daarmee een aanpassing van de gebruiksnormen, en mogelijk dieraantallen). Of dit nodig is om de doelen van de KRW te realiseren hangt samen met keuzes rondom de sociaal economische gevolgen van deze verlaging (Ecologische Sleutelfactor 9); vanuit de ecologische onderbouwing van de doelstellingen van de KRW mag (en moet) er namelijk rekening worden gehouden met de sociaal economische functie van het watersysteem en het omliggende landelijk gebied in het vaststellen van gewenste stikstof- en fosforbelasting van het watersysteem.

Onderhavig onderzoek richt zich op milieu-emissies vanuit de landbouw. Om uiteindelijk doelen te bereiken voor verbetering van de waterkwaliteit zullen ook andere sectoren (incl. buitenland) reducties van emissies moeten bewerkstelligen om de doelen voor met name waterkwaliteit, klimaat en natuurkwaliteit te halen. Denk bijvoorbeeld aan het voorkomen van overloop van ongezuiverde rioolwater in oppervlaktewater, vermindering van resten van gewasbeschermingsmiddelen en medicijnen in grond- en oppervlaktewater, reductie van broeikasgas- en stikstofemissies uit industrie, verkeer en zeevaart en natuurherstel in de natuurgebieden. In de integrale gebiedsgerichte uitwerking is het belangrijk om deze maatregelen ook in ogenschouw te nemen om uiteindelijk het doelbereik te bepalen.

## 6.4 Praktisch haalbare emissiereducties

De resultaten van berekende praktisch haalbare emissiereducties worden samengevat in Tabel 6.6. Voor ammoniak kan de emissie via drie maatregelsporen worden verminderd. De grootste impact is hierbij te realiseren via maatregelen in de stal en mestopslag en via verbeterde mesttoediening. Via maatregelen in de stal en mestopslagen kan de emissie van ammoniak met 19,2 kton worden gereduceerd, via maatregelen rondom diermanagement en diervoeding met 8,9 kton en via mesttoediening met 18,6 kton per jaar. Voor broeikasgassen kan de grootste bijdrage worden gerealiseerd via maatregelen in de stal (4912 kton CO<sub>2</sub>-eq per jaar) als ook via diermanagement en diervoeding (2265 kton CO<sub>2</sub>-eq per jaar). Via bemestingsmaatregelen kan de emissie van broeikasgassen met 173 kton CO<sub>2</sub>-eq worden verlaagd ten opzichte van 2019. Uit- en afspoeling van stikstof en fosfor kan alleen worden verminderd via bemesting, bodembeheer en gewasbeheer. De uitspoeling van nitraat naar het grondwater kan via maatregelen in zowel de veehouderij als de grondgebonden sectoren worden gereduceerd zodat het gemiddelde nitraatgehalte in vrijwel alle provincies lager is dan 50 mg per liter. Voor het oppervlaktewater is een emissiereductie mogelijk die op kan lopen tot 49% (voor stikstof) en 26% (voor fosfor). De NPLG-doelen voor beide nutriënten kunnen voor deze verliezen slechts in 6 provincies voor stikstof en 3 provincies voor fosfor worden gerealiseerd.

**Tabel 6.6** *Praktisch haalbare reducties (%) in emissies van ammoniak (NH<sub>3</sub>), broeikasgassen (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) naar de lucht en uit- en afspoeling van stikstof (N) en fosfor (P) naar het grond- en oppervlaktewater, ten opzichte van de landelijke emissies in 2019. Ranges geven de variatie aan in provinciale emissiereducties.*

Maatregelspoor	NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub> en N <sub>2</sub> O	N-water	P-water
Diervoeding en diermanagement	3 – 11	8 - 15	-	-
Huisvesting en mestopslag	8 – 31	17 – 31	-	-
Mesttoediening (en bodembeheer)	10 – 29	1 – 2	2 – 55	1 – 8
Totale reductie via combinatie van maatregelen	41 – 50	27 – 48	2 – 55	1 – 8

# 7 Realisatie van opgaven en kosten

## 7.1 Kosten van innovaties

Voor de verschillende innovaties is op basis van gegevens uit Verdoes et al. (2021), Gollenbeek et al. (2021ab; 2022) en Oltmer et al. (2023) in kaart gebracht wat de jaarkosten zijn. De jaarkosten voor technische maatregelen zijn over het algemeen kosten voor afschrijving en rentekosten, verzekering, onderhoud en reparatie, benodigde input en dergelijke. In theorie zijn deze kosten bij gelijkblijvend prijsniveau oneindig omdat na einde van de economische levensduur, als de techniek volledig is afgeschreven is, opnieuw moet worden geïnvesteerd, waardoor er weer dezelfde jaarkosten ontstaan. Bij een aantal maatregelen ontstaan na implementatie opbrengsten en/of besparingen, zoals de opbrengsten uit biogas bij monovergisting of de besparingen op boxenstrooisel als de dikke fractie van het digestaat hiervoor wordt gebruikt. Deze zijn bij de huidige analyse niet meegenomen. Ook diverse andere posten die voor een boer op bedrijfsniveau wel relevant zijn, zijn hier buiten beschouwing gelaten. Voorbeelden hiervan zijn subsidies of toeslagen, of een verandering in de mestafzetkosten. De geschatte jaarkosten zijn indicatief, omdat goed onderbouwde economische analyses voor de verschillende sectoren op dit moment ontbreken.

In deze studie maken we gebruik van vier kostenniveaus gebaseerd op de jaarkosten in euro per kilogram ammoniakreductie: 0-5, 5-10, 10-20 en >20 euro per kg reductie. Aanvullend daarop is een vijfde optie toegevoegd voor maatregelen die jaarlijks geld opleveren. Voor de provinciale berekeningen nemen we aan dat de praktijk kiest voor relatief goedkope innovaties, dat wil zeggen voor maatregelen vanuit de sporen (dier)voeding en bemesting. De gemiddelde jaarkosten voor deze innovaties liggen op 5 euro per kg reductie. Voor de innovaties in huisvesting en mestopslag nemen we aan dat de jaarkosten gemiddeld 20 euro per kg reductie bedragen. Dat betekent dat voor realisatie van de NPLG-opgave allereerst ingezet wordt op maatregelen in het spoor diervoeding en bemesting, en de resterende gebiedsopgave wordt ingevuld met maatregelen gericht op emissiereductie in stal en mestopslag. De totale jaarkosten per maatregelspoor wordt weergegeven in tabel 7.1 (en omvat dezelfde maatregelen als besproken voor tabel 6.1).

**Tabel 4.7.** Het innovatiepotentieel van ammoniak-reducerende innovaties per provincie, uitgesplitst per type maatregel (in %), en de totale jaarkosten benodigd voor realisatie van de NPLG-opgave (in miljoen euro).

Provincie	Bijdrage aan totale reductiepotentieel t.o.v. 2019 (%)			Totale jaarkosten (M€ per jaar) om NPLG-doelen te realiseren			Totaal
	Stal <sup>1</sup>	(Dier)voeding <sup>1</sup>	Bemesting <sup>1</sup>	Huisvesting <sup>2</sup>	Dier(voeding) <sup>2</sup>	Bemesting <sup>2</sup>	
Drenthe	37	18	44	15,6	2,4	6,0	24
Flevoland	28	11	61	0,4	0,1	2,2	3
Friesland	31	19	50	15,3	5,5	14,4	35
Gelderland	47	21	32	64,8	8,5	13,0	86
Groningen	27	14	59	0,9	0,1	7,3	8
Limburg	61	18	20	35,4	3,1	3,4	42
Noord-Brabant	54	23	23	63,8	9,5	9,8	83
Noord-Holland	22	16	62	5,1	1,6	6,2	13
Overijssel	44	22	34	45,7	6,8	10,6	63
Utrecht	38	21	41	15,0	2,1	4,0	21
Zeeland	21	8	72	0,4	0,1	3,2	4
Zuid-Holland	24	16	60	8,2	1,7	6,1	16

1 de relatieve bijdrage van innovaties in de stal, via diervoeding en bemesting aan de totale emissiereductie conform de methodiek in sectie 4.1.

2 Berekende jaarkosten conform een gemiddelde prijs per kg NH<sub>3</sub>-reductie, zoals beschreven in de tekst. De kosten voor managementmaatregelen houden geen rekening met eventuele opbrengsten. Gegeven de onzekerheid op de gebruikte aannames zijn de geschatte jaarkosten hiervoor niet gecorrigeerd.

In tabel 7.1 wordt ook aangegeven hoe huisvestingsmaatregelen, maatregelen rondom diervoeding als ook een verbeterde bemestingspraktijk kunnen bijdragen aan de potentiële emissiereductie. Verschillen tussen provincies worden veroorzaakt door de aanwezigheid van de drie sectoren (rundveehouderij, varkenshouderij en pluimveehouderij), de huidige adoptie van emissiearme huisvestingssystemen, en het landgebruik.

---

Innovaties in huisvestingssystemen zijn in staat om 21 tot 61% van de ammoniakemissie te reduceren. Een vergelijkbare bijdrage kan worden gerealiseerd via maatregelen rondom toediening van dierlijke mest. Innovaties rondom diervoeding zijn relatief kleiner, maar dragen nog steeds substantieel (8-23%) bij aan de vermindering van emissies.

De jaarkosten voor innovaties in huisvestingssystemen kosten gemiddeld 20 euro per kg NH<sub>3</sub>-reductie, terwijl investeringen in (dier)voeding en bemesting veelal gerealiseerd kunnen worden voor 5 euro per kg NH<sub>3</sub>-reductie. Uitgaande van deze (versimpelde) uitgangspunten betekent dit dat voor heel Nederland een jaarlijkse investering nodig is van 270 Meuro voor innovaties in stalsystemen, 86 Meuro voor innovaties in (dier)voeding en 41 Meuro voor innovaties om verliezen tijdens mesttoediening te verlagen tot aan doelrealisatie van het NPLG. De totale jaarkosten zijn hiermee gelijk aan circa 400 miljoen euro. Als alle maatregelen worden geïmplementeerd, en daarmee de totale reductie voor ammoniak hoger is dan de NPLG-opgave, zijn de jaarkosten gelijk aan 521 Meuro. We nemen hierbij aan dat investeringen voor ammoniak en methaan voor een groot deel gelijk oplopen, en dat maatregelen voor schoon grond- en oppervlaktewater al onderdeel zijn van het huidige beleidsinstrumentarium dan wel onderdeel zijn van de Goede landbouwpraktijk. De financiële kosten die hiermee samenhangen zijn beperkt voor zover het gaat om de Goede Landbouwpraktijk.

## 7.2 Effecten van inkomstenverlies

De stapeling van maatregelen vanuit bestaande beleid (vastgestelde maatregelen in het kader van het 7<sup>e</sup> Actieprogramma voor de Nitraatrichtlijn, de verlaging van de GLB hectaretoeslagen) en de beoogde maatregelen om de NPLG-doelen te realiseren leidt tot een forse daling van het inkomen van veehouderij-bedrijven. Deze zijn zodanig dat de bedrijfscontinuïteit en het economisch perspectief, zonder een adequaat flankerend beleid, voor heel veel bedrijven in het gedrang komt. Gemiddeld stijgen de kosten voor de standaardbedrijven in de melkveehouderij, ten opzichte van de situatie 2021, met circa 73.500 euro, wat overeen komt met ongeveer 95% van hun inkomen (op bedrijfsniveau). In 2023 is door Jongeneel et al. (2023) verkend welke mogelijkheden er zijn om het inkomensverlies waar bedrijven mee zullen worden geconfronteerd als er maatregelen / innovaties moeten worden geïmplementeerd, te verkleinen en/of eventueel op te heffen. Daarbij is het totale inkomensverlies als uitgangspunt genomen (dat ontstaat bij een standaardbedrijf inclusief maatregelpakketcombinaties). Een gedetailleerde bedrijfseconomische analyse valt buiten de context van deze studie, en we maken daarbij dankbaar gebruik van de eerder genoemde studie van Jongeneel et al. (2023).

Er zijn verschillende sporen om een transitie met een economisch perspectief te faciliteren. Op basis van de "instrumentenkoffer" van LNV hebben Jongeneel et al. (2023) een overzicht gemaakt van instrumenten die inzetbaar zijn om de benodigde emissiereductie te realiseren. Daarbij zijn vijf hoofdgroepen van instrumenten van belang: de markt, subsidiering van niet productieve investeringen, betalingen voor ecosysteemdiensten, afwaardering van grond en overige instrumenteninstrumenten. Uit deze verkenning komt naar voren dat een combinatie van deze instrumenten mogelijkheden biedt om een economisch perspectief te creëren. Daarbij zijn er ook vrijheidsgraden om met de instrumentenmix te variëren en gericht ontwikkelpaden te ondersteunen. Er zijn veel onzekerheden en onduidelijkheden met betrekking tot allerlei keuzes ten aanzien van maatregel-pakketten en aanvullend beleidsinstrumentarium. Deze studie laat zien dat de urgentie van de transitie flinke inspanningen vergt van de (melk)veehouderij en de akkerbouw. Juist daarom is het voor de voortgang van cruciaal belang dat maatregelen die emissies reduceren en beleid dat economisch perspectief creëert zich parallel ontwikkelen. Er ligt daarmee een grote publiek private opgave waaraan komende jaren gewerkt moet worden.

Meer algemeen geldt dat er op milieu, water-, biodiversiteit- en klimaatgebied concrete doelstellingen en opgaven liggen, en ook tijdspaden waarlangs de doelstellingen gerealiseerd moeten worden. Voor het faciliterend beleidsinstrumentarium is dit veel minder het geval. Waar de instrumenten wel meer concreet zijn, bijvoorbeeld de GLB ecoregeling en het ANLb, gaat het om maatregelen die waardevol zijn, maar die ook maar een beperkte potentie hebben. Als dat ertoe leidt dat de economische dimensie onderbelicht blijft en het economisch perspectief en toekomstig verdienmodel onduidelijk blijft, dan belemmert dat de transitiebeweging en daarmee de verduurzaming van de landbouw.

---

## 7.3 Risico's en afhankelijkheden

Het beschreven overzicht van oplossingsrichtingen voor emissiereductie (zie hoofdstuk 4) is belangrijk om zicht te krijgen op het innovatiepotentieel in de veehouderijsector. De vraag is vervolgens welke van deze oplossingen passen bij de maatschappelijke wensen t.a.v. de veehouderij van de toekomst. Het is aan te bevelen om in de daadwerkelijke beleidsvorming te gaan werken vanuit een heldere visie: hoe ziet de veehouderij van de toekomst er uit? Als dit beeld duidelijker is, kan beter worden geanalyseerd welke oplossingsrichtingen passend zijn en welke hiaten er nog zijn. De huidige studie zet de agrarische ondernemer centraal en neemt daarmee aan dat elke oplossing die bijdraagt aan emissiereductie even wenselijk is. Of dat ook daadwerkelijk zo is, is nog onderdeel van het maatschappelijke debat over de toekomst en de financiering van de Nederlandse landbouw. Een eerdere studie van Jongeneel et al. (2024) laat zien dat een integrale adoptie van maatregelen in de landbouw tot substantiële emissiereducties zal leiden, maar ook samengaat met inkomensverliezen in de melkveehouderij van 28% tot 201% vergeleken met het huidige inkomen (uit het jaar 2021). De cijfers laten zien de continuïteit van een flink aantal bedrijven ernstig wordt bedreigd als de doorgerekende maatregelen zonder hulp van de overheid worden ingevoerd. Belangrijk is dat een visie helder maakt welke investering nodig is, en ook kan voorkomen dat veehouders investeren in oplossingen op het gebied van stal- en mestsystemen die achteraf als minder wenselijk worden ervaren.

Hierop voortbordurend geven met name kostbare technische innovaties een risico op lock-in voor de agrarische bedrijven. In het bijzonder geldt dit voor innovaties rondom stalsystemen (Rougoo et al., 2023). De aanpassingen van bestaande bedrijfssystemen vergen namelijk grote investeringen, met als gevolg een aanzienlijke stijging van kosten. Gezien de grootte van de NPLG-opgave (Gies et al., 2023) zal een combinatie van maatregelen nodig zijn, met maatregelen die ingrijpen op zowel de emissies in de stal en mestopslagen dan wel de emissies die optreden bij toediening van mest. De jaarkosten voor innovaties in huisvestingssystemen zijn vaak in de orde grootte van 10-30 euro per kg NH<sub>3</sub>-emissiereductie, terwijl de jaarkosten voor innovaties in bedrijfsvoering minder dan 5 euro per kg NH<sub>3</sub>-reductie vragen (Tabellen I.1.1, I.1.2, I.1.3 en I.1.4) of zelfs geld kunnen opleveren. Om kostbare innovaties te implementeren zullen bedrijven hun schaal vergroten en of bedrijfsvoering intensiveren. Of deze ontwikkeling gewenst is, staat en valt met de hierboven genoemde lange-termijn visie op de Nederlandse landbouw.

De landbouw staat voor de uitdaging om in de volle breedte te verduurzamen. Naast de stikstofproblematiek spelen ook vraagstukken en doelstellingen met betrekking tot het klimaat en de waterkwaliteit. Ook thema's als fijnstof, diergezondheid, volksgezondheid, waterkwantiteit, natuur en landschap vragen aandacht (Ros et al., 2023; Gies et al., 2023; Van Doorn et al., 2022). Uit die studie, en de beschreven inventarisatie van innovaties in bijlage II, blijkt dat maatregelen gericht op de landbouwstructuur (bijvoorbeeld, minder dieren, meer biologisch, bouwplanextensivering) bijdragen aan meerdere doelen en ook potentie bieden naast meer technisch georiënteerde innovaties gericht op huisvesting en bedrijfsvoering. Het vergroten van het areaal biologische melkveehouderij verlaagt de emissie van ammoniak per hectare met bijna 50% vanwege de lagere stikstofinput (geen kunstmest, minder krachtvoer, minder bemesting) en door meer weidegang (Migchels et al., 2023). Het bevordert de biodiversiteit en mogelijk ook het dierenwelzijn, maar dat laatste is nooit goed onderzocht. De enterische methaanemissie is per kg melk vaak echter hoger, terwijl de methaanemissie uit mest afneemt door een lagere mestproductie en meer weidegang. Op sectorniveau en rekening houdend met emissies die optreden in de keten (energiegebruik voor kunstmest en krachtvoer) kan de totale emissie van broeikasgassen tot 33% lager liggen (Migchels et al., 2023).

In de categorie bedrijfsvoering zijn ook maatregelen denkbaar die bijdragen aan meerdere doelen (zoals weidegang bijvoorbeeld). Technische innovaties zijn echter veelal gericht op een specifiek onderdeel of aspect van de bedrijfsvoering (bijv. vermindering van de ammoniakemissie) en dragen daardoor minder bij aan een integrale verduurzaming van het bedrijf of de veehouderij. Innovaties in de bedrijfsvoering (diervoeding, bemesting) vereisen meestal minder investeringen door de veehouder dan staloplossingen. In sommige gevallen kunnen de voer- en dieroplossingen ook gepaard gaan met een efficiëntere bedrijfsvoering en betere verdiensten. Op het gebied van onderzoek naar emissiereductie in de veehouderij wordt (terecht) nadrukkelijk gekeken naar voer- en dier-oplossingsrichtingen. Dergelijke oplossingen zijn kansrijk, omdat er vaak geen grote investeringen nodig zijn en de veehouder geld kunnen opleveren (Zie tabellen in bijlage I).

Het innovatiepotentieel van een maatregel is hier gedefinieerd als het effect onder optimale omstandigheden. Het feitelijke effect is afhankelijk van de snelheid waarmee een maatregel kan worden toegepast, het aantal bedrijven dat een maatregel toepast (implementatiegraad) en de zekerheid dat met een maatregel de

---

genoemde emissiereductie wordt gerealiseerd. De zekerheid van de emissiereductie is onomkeerbaar groot bij innovaties in de landbouwstructuur als ook het stoppen van een bedrijf, waarvan vergunningen zijn ingetrokken. De zekerheid van managementmaatregelen is kleiner als ook niet tegelijkertijd wordt zorggedragen voor de juiste incentives; maatregelen kunnen in principe van de ene op de andere dag worden doorgevoerd, maar ook weer worden gestopt. Naast de onomkeerbaarheid van de maatregel speelt ook de borging een rol. Bij maatregelen die juridisch vastliggen in een vergunning (zoals een stalsysteem) of wetgeving (zoals emissiearme mestaanwending) is de naleving *vooralsnog* sterker geborgd dan bij management-maatregelen. Op bedrijfsniveau kan een deel van de maatregelen wel geborgd worden via instrumenten zoals de KringloopWijzer voor de melkveehouderij, aangevuld met bedrijfseigen metingen of observaties, al dan niet geautomatiseerd. Zeker als integraal gestuurd wordt op meerdere bedrijfsparameters nemen de mogelijkheden om te manipuleren snel af (Migchels, persoonlijke mededeling).

Het implementeren van innovaties gericht op emissiereductie is voor een belangrijk deel afhankelijk van factoren waar de individuele veehouder zelf geen invloed op heeft. Dit heeft met name betrekking op wet- en regelgeving, vergunningvoorschriften, beleidsvoornemens, imago en tijdspaden die in principe bepalen of een techniek en/of managementmaatregel wel of niet toepasbaar is op het bedrijf van de veehouder. Aanbeveling is om te bezien hoe positieve prikkels voor praktijkimplementatie georganiseerd kunnen worden. Een belangrijke factor is daarnaast het weer: ervaringen uit het Netwerk Praktijkbedrijven lieten zien dat het effect van extra managementinspanningen om de emissies te reduceren in 2022 en 2023 niet tot een lagere emissie leidde dan in 2021 als gevolg van warmer weer en meer wind (Migchels, persoonlijke mededeling).

Een veehouder zal in de praktijk altijd kiezen voor een combinatie van maatregelen als hij of zij de emissie op zijn bedrijf wil verminderen. De keuze voor het type maatregelen hangt onder meer af van de affiniteit van de veehouder met de maatregelen, de bedrijfskenmerken, de investeringsruimte, de ruimte in vergunningen en het vakmanschap van de veehouder. Maatwerk per bedrijf is belangrijk waarbij mestafzetkosten en bedrijfsgrootte een rol spelen. Er is niet één optimale oplossing voor alle veehouderijbedrijven. In 2023 heeft Rodriguez een analyse uitgevoerd naar de belangrijkste adoptiefactoren van nieuwe technieken en maatregelen. Dit omvat de technische toepasbaarheid in bestaande stallen, de huidige bedrijfsopzet (leeftijd, intensiteit), het type ondernemer (stoppers, bedrijfsstijl), mogelijke risico's, de inpasbaarheid (met effecten op emissie, gevolgen voor vergunningen, mestopslag, diergezondheid, arbeid, etc.), de bedrijfsfinanciën (investering, operationele kosten en baten, waardeontwikkeling, ontwikkelruimte, etc.), en maatschappelijke acceptatie. Ter illustratie, de leeftijd van de huidige stal werkt remmend bij technieken gebaseerd op dagontmesting van drijfmest vanaf dichte vloeren en bij methaanoxidatie. Dit omdat het voor deze innovaties om relatief grote investeringen gaat en deze goed gecombineerd kunnen worden met nieuwbouw of aanpassingen aan een recent gebouwde stal. Voor oudere stallen zijn goedkopere innovaties beter passend. De leeftijd werkt stimulerend (past goed in bestaande stal) bij koelen van drijfmest, drijfmest mixen of beluchten en drijfmest frequent verwijderen uit de kelder. Mestafvoer in de bestaande situatie is gunstig voor maatregelen met compostering of scheiding.

Ten tweede, het merendeel van de innovaties zal niet snel worden toegepast door stoppers. De uitzonderingen hierop zijn relatief eenvoudig te implementeren maatregelen zoals het continu mixen of beluchten door middel van een mechanisch systeem. Ook kan gebruik worden gemaakt van sproeien met water gedurende de weideperiode omdat de kosten beperkt zijn en het op bedrijfsniveau de emissie met circa 10% kan verminderen (Migchels, persoonlijke mededeling). Bedrijfsstijl (met name affiniteit met technologie) speelt ten derde vooral een rol bij technieken waar relatief complexe technologie wordt toegevoegd (scheiding, compostering), in het bijzonder voor vergisting en het aanzuren van mest. Deze technieken vragen specifieke interesse en vaardigheden en zijn daardoor niet voor iedereen geschikt. Ook is het belangrijk om rekening te houden met aanwezige neveneffecten die op kunnen treden. Bij verzuring met  $H_2SO_4$  is er bijvoorbeeld een verhoogd risico op materiaalschade, en onnodige uitspoeling van zwavel. Hoewel alle genoemde aspecten relevant zijn bij de daadwerkelijke beoogde doelrealisatie van het NPLG, laten de grote aantallen innovaties (in deze studie geclusterd) zien dat er per bedrijf voldoende keuzemogelijkheden zijn om per maatregel-categorie de best passende te selecteren.

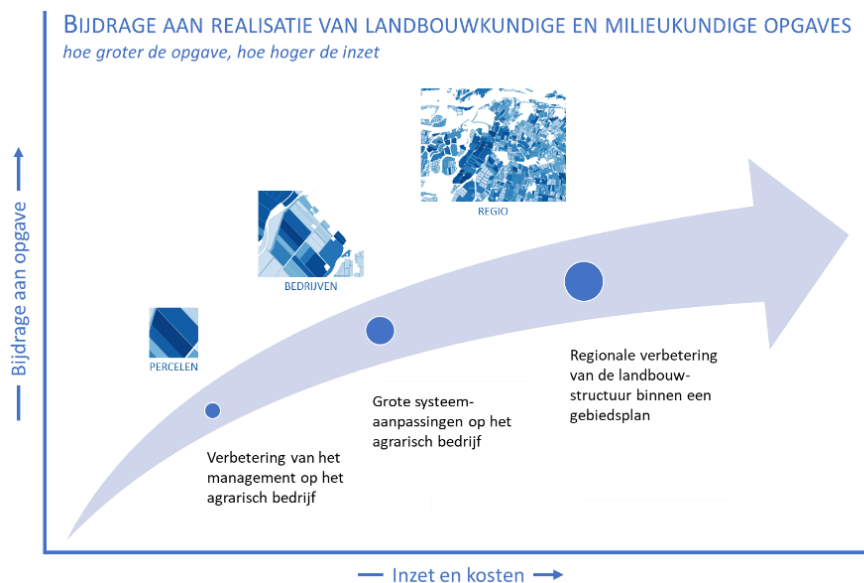


## 7.4 Regionaal maatwerk

De complexiteit van de aanwezige opgaven en de grote variatie tussen landbouwbedrijven vereist maatwerk per sector- en bedrijfstype, waarbij de inzet van maatregelen toeneemt met de grootte van de opgave. We onderscheiden daarbij maatregelen op drie niveaus (Figuur 7.1):

- relatief eenvoudige aanpassingen van het management van boeren richting een Goede Landbouwpraktijk die per direct kunnen worden geïmplementeerd,
- systeemaanpassingen aan het bedrijf die veelal een forse investering en meerdere jaren vragen ter realisatie en terugverdienen en
- gebiedsgerichte veranderingen in de landbouwstructuur waarvoor veel geld en gebiedsprocessen nodig zijn.

In elke provincie zal een gelijktijdige implementatie van deze maatregelen nodig zijn gegeven de grootte van de opgaven (De Vries et al., 2023; Gies et al., 2023).



**Figuur 7.1** Provinciale interventies om te sturen op de kwaliteit van de leefomgeving in relatie tot de grootte van de opgaves. Bron: Ros et al. (2023).

Per bedrijfstype zijn er verschillende mogelijkheden om bij te dragen aan de realisatie van opgaves. Heel concreet gaat het om een verbeterd management (Goede Landbouw Praktijk; GLP) van meststoffen, bodem, en gewassen. Een deel van deze GLP is gedefinieerd in generieke regels en uitgangspunten zoals geïmplementeerd in het Nederlandse mestbeleid. Goede landbouwpraktijk is er op gericht nutriënten zo efficiënt mogelijk te benutten en zo emissies naar het water te voorkomen. Dit betekent in de praktijk dat er wordt bemest volgens het 4-J-principe: de juiste mestsoort met de juiste dosis op het juiste tijdstip met de juiste techniek. Een voorbeeld hiervan is dat er wordt bemest op het moment dat een gewas de nutriënten het meest nodig heeft. Als deze goede landbouwpraktijk nog niet overal wordt gevolgd, moet landelijke wetgeving ervoor zorgen dat dit gebeurt. Deze principes gelden voor alle landbouwkundige sectoren en stromingen binnen de landbouw. Daarnaast houdt de GLP ook in dat een ondernemer op een integrale manier naar de milieu-impact op zijn bedrijf kijkt en dit mee laat wegen in het strategisch en operationeel management van bodem, gewas, water en meststoffen. Dit laatste is maatwerk waarbij geen generieke middelen kunnen worden voorgeschreven.

Als de opgave groter is dan wat met verbeterd management kan worden gerealiseerd, en dat is de opgave voor ammoniak en broeikasgassen, dan zijn meer structurele wijzigingen in de bedrijfsvoering nodig. Structurele systeemveranderingen in bedrijven kosten tijd en geld, maar hebben op lange termijn een positief effect op zowel het landbouwkundig als milieukundig functioneren van een bedrijf. Denk hierbij aan het vergroten van de gewasdiversiteit, de transitie naar extensieve vormen van landbouw, het goed en duurzaam beheren van slootoevers en slootkanten (wat anno 2023 nog geen gangbare praktijk is), innovaties in stallen

---

en grote aanpassingen in de rantsoenen van dieren om uitstoot van NH<sub>3</sub> en CH<sub>4</sub> te beperken, een versterkte samenwerking tussen melkveehouders en akkerbouwers, en een extra verlaging van bemestingsnormen, afname van gewasbeschermingsmiddelen of aantallen dieren. In een separate publicatie voor het IPO is uitgewerkt dat hiervoor wenselijk is om een landelijk systeem van normeren en beprijzen in te voeren om zo geborgd te sturen op lagere emissies.

Binnen elke provincie kunnen er daarnaast regio's zijn waar de opgaves zo groot zijn dat (kostbare) gebiedsprocessen nodig zijn om het gebied planologisch opnieuw in te richten en het landbouwsysteem aan te passen. Deze regionale veranderingen in de landbouwstructuur omvatten bijvoorbeeld het (verplicht) verhogen van de grondwaterstanden (waarmee specifieke gewassen verdwijnen), teeltverboden, verplichte arealen natuur en de verplaatsing dan wel uitkoop van bedrijven. Gegeven de voorliggende analyse van het innovatiepotentieel van technische maatregelen, lijkt deze optie niet generiek nodig te zijn om de doelen van het NPLG te realiseren.

## 7.5 Aandachtspunten

In de voorliggende studie wordt weinig aandacht geschonken aan de benodigde context om de innovaties daadwerkelijk te implementeren. Denk hierbij aan de juridische context, de sociaaleconomische context (o.a. de financiering van de innovaties) als ook de daadwerkelijke uitrol van deze innovaties. Voor veel technologische investeringen geldt dat er ook een bepaalde maximale capaciteit bij producenten zal zijn, die op hun beurt ook afhankelijk zijn van de marktvraag, de beschikbaarheid van subsidies en stabiel beleid. Een stabiel beleid gebaseerd op een lange-termijn perspectief is cruciaal om boeren als ook omliggende partijen die innovaties ontwikkelen in te zetten om de doelen van het landelijk gebied ook daadwerkelijk (op tijd) te realiseren.

Waar de focus van deze analyse ligt op het realiseren van doelbereik, zal de aanwezigheid van positieve bijeffecten mede van invloed zijn op de keuze voor mogelijke innovaties. Deze effecten zijn waar mogelijk per maatregel samengevat in Bijlage II. Met name maatregelen die een economisch voordeel opleveren en bijdragen aan andere maatschappelijk opgaven (zoals de productie van groengas via vergisting, of de inzet van regionale gewassen en reststromen om de kringloop van nutriënten te sluiten) dan wel diergezondheid (stalklimaat) zijn te prefereren boven enkelvoudige maatregelen die alleen effectief zijn voor één doel. Een integrale bedrijfsaanpak heeft daarbij de voorkeur.

Vanwege de grootte van de opgaven voor ammoniak, broeikasgassen en waterkwaliteit is het niet mogelijk om dit te realiseren via maatregelen gericht op nog resterende opgaven in het landelijk gebied zoals het sluiten van regionale kringlopen, de verbetering van bodemkwaliteit en biodiversiteit dan wel het vergisten van biomassa voor energie. De reden hiervoor is dat de opgaven voor ammoniak, broeikasgassen en het N-bodemoverschot simpelweg te groot zijn. De voorliggende analyse laat zien dat er nog veel maatwerk mogelijk is binnen elke provincie, maar wel moeten vrijwel op alle bedrijven substantiële reducties worden gerealiseerd. Maatregelen en innovaties die tegelijkertijd bijdragen aan meerdere opgaven zijn hierbij overigens wel te prefereren. Juist vanwege de gewenst integrale aanpak, als ook het bijbehorende kostenplaatje is een combinatie van maatregelsporen aan te bevelen waarbij per gebied de synergiën met de daar aanwezige opgaven kan worden gemaximaliseerd.

Deze studie brengt de benodigde jaarkosten in beeld voor innovaties waarmee het mogelijk is om de doelen van het NPLG te realiseren. De jaarkosten zijn over het algemeen kosten voor afschrijving en rentekosten, verzekering, onderhoud en reparatie, benodigde input en dergelijke. Jaarkosten geven daarmee geen concrete inzicht in de indicatoren CAPEX (uitgaven aan kapitaalgoederen) en OPEX (operationele kosten inclusief opbrengstderiving). Een eerdere analyse van Agrifirm (2022) liet zien dat er een investering nodig is van circa 2 miljard euro voor alle veehouderijsectoren gezamenlijk terwijl er jaarlijks 558 miljoen euro nodig zou zijn per jaar voor terugkerende kosten in de veehouderijsector. Ook Oltmer et al. (2023) komt voor een combinatie van meerdere maatregelen in veehouderijsectoren, waarmee 95% van de benodigde NH<sub>3</sub>-emissiereductie kan worden gerealiseerd, uit op jaarkosten die variëren tussen 640 en 800 mln. euro. Wel gaan beide studies uit van maatregelen uit het spoor van huisvesting en mestopslagen, en innovaties via dier en voermanagement en bemesting krijgen weinig tot geen aandacht. Gezien de orde grootte van deze inschattingen in relatie met de in kaart gebrachte jaarkosten in deze studie (circa 400 miljoen euro per jaar) is het zinvol om de economische analyse van innovaties via een specifieke vervolgstudie nader te onderbouwen.

---

## 8 Conclusies

In dit rapport wordt het innovatiepotentieel van maatregelen in de veehouderij (rundvee, kippen en varkens) op korte (1-5 jaar) en middellange termijn (5-10 jaar) in beeld gebracht in relatie tot de NPLG-doelen voor de gewenste reducties in ammoniak, lachgas, methaan naar lucht en in mindere mate van nitraat en fosfaatverliezen naar water. Maatregelen gericht op de toediening van meststoffen hebben daarbij een bredere impact richting alle grondgebonden sectoren. Om dit innovatiepotentieel te kwantificeren is op basis van bestaande literatuur een inventarisatie gedaan van het effect, de inzetbaarheid, de toepasbaarheid en de kosten van bestaande en verwachte innovaties. Op basis van deze inventarisatie is vervolgens een schatting gemaakt van de theoretisch maximale en praktisch haalbare reducties in bovengenoemde emissies en verliezen per provincie, uitgaande van 100% implementatie, berekend ten opzichte van de emissies in 2019, en afgezet tegen de opgaven vanuit het NPLG. Bij de provinciale doorrekening wordt hierbij vooral ingezet op maatregelen die nog niet gangbaar zijn en daarmee een additioneel effect hebben op de voorkomende emissies in 2019.

Uit deze analyse blijkt:

- Dat er veel innovaties voor rundveehouders inzetbaar zijn om de emissies te beperken via maatregelen in de stal en mestopslagen, dierfokkerij en voeding, bemesting en bodembeheer. Geclusterd op het onderliggend mechanisme, zijn er 31 innovaties inzetbaar op korte termijn en komen er op middellange termijn nog 7 innovaties beschikbaar. In de varkenshouderij zijn er 16 innovaties op korte termijn inzetbaar en 5 innovaties op middellange termijn. In de pluimveehouderij is het aantal innovaties beperkt en zijn in totaal 5 maatregelen geïdentificeerd. Dit aantal weerspiegelt de huidige verdeling in emissies als ook de urgentie om met name emissies van ammoniak en broeikasgassen te beperken. Innovaties in relatie tot waterkwaliteit (in relatie tot het grondgebruik voor de veehouderij) zijn veelal onderdeel van de Goede Landbouwpraktijk.
- Dat op basis van onze huidige kennis van het landbouwsysteem in Nederland de emissies *in theorie* gereduceerd kunnen worden (als alle omstandigheden optimaal zijn om emissies te voorkomen) met 61-72% voor ammoniak en methaan, 42% voor lachgas, 60% voor uitspoeling van stikstof en 10% voor afspoeling van fosfor. Dit zijn indicatieve getallen die toepasbaar zijn op het landbouwsysteem in Nederland als geheel, en niet te vertalen zijn naar de situatie van een individueel bedrijf. Dit suggereert dat de beschreven opgaven in het NPLG realiseerbaar zijn, met uitzondering voor fosforverliezen naar het oppervlaktewater.
- Dat via innovaties de emissie van ammoniak met 41-50% kan worden gereduceerd ten opzichte van de emissie van 2019 wanneer alle landbouwbedrijven de best beschikbare technieken en maatregelen inzetten die binnen vijf jaar beschikbaar zijn of komen om emissies te beperken. Dit betreft een praktisch haalbare emissiereductie door volledige uitrol van innovaties in alle veehouderijsectoren. De grootste bijdrage komt van innovaties die zich richten op emissiereductie in de stal en mestopslag, gevolgd door innovaties die ammoniakemissie beperken tijdens mesttoediening. In vrijwel alle provincies kan via innovaties, uitgaande van 100% implementatie, de NPLG-opgave worden gerealiseerd. De melkveehouderij heeft het grootste innovatiepotentieel.
- Dat via innovaties de emissie van broeikasgassen ( $N_2O$  en  $CH_4$ ) kan worden gereduceerd met 27 tot 48% ten opzichte van de situatie in 2019. Ook dit betreft praktisch haalbare emissiereducties. De grootste bijdrage komt van innovaties die methaanemissies via pensfermentatie en mestopslag weten te verlagen. In alle provincies kan hiermee de NPLG-opgave worden gerealiseerd. Wel blijven er uitdagingen om de gewenste reductie op lange termijn (50% in 2050) te realiseren.
- Dat de verliezen van nitraat naar het grondwater via de inzet van duurzaam bodembeheer en precisiebemesting in zowel de veehouderij als de grondgebonden sectoren kan worden gereduceerd zodat het gemiddelde nitraatgehalte in 11 van de 12 provincies lager is dan 50 mg per liter. Voor het oppervlaktewater is een reductie mogelijk die op kan lopen tot 49% (voor stikstof) en 26% (voor fosfor). De NPLG-doelen voor deze verliezen kunnen slechts in 6 provincies (voor stikstof) en 3 provincies (voor fosfor) worden gerealiseerd.

Om de opgaves in het landelijk gebied te realiseren is een combinatie van innovaties noodzakelijk, waarbij maatregelen nodig zijn in zowel de huisvesting (stal en mestopslagen) als in de bedrijfsvoering (met

---

maatregelen voor dierrantsoenen, mestbewerking en mesttoediening) waarbij alle bedrijven de maatregelcombinaties ook nog eens optimaal inzetten. Omdat het moeilijk voorstelbaar is dat aan al deze voorwaarden voldaan zal worden, zal er naast technologische innovaties ook noodzaak zijn tot gedeeltelijke extensivering of veestapelreductie. Maatregelen op het gebied van voer en management zijn vaak niet duur en kunnen soms geld opleveren. De innovaties in stalsystemen vragen veelal om grote investeringen (>20 euro per kg NH<sub>3</sub>-reductie) waardoor de totale jaarkosten voor landelijke uitrol van *deze innovaties indicatief* oplopen tot 270 miljoen euro per jaar. De jaarkosten voor maatregelen uit de andere twee sporen (mesttoediening en diervoeding) worden geschat op 127 miljoen euro per jaar. Als er per bedrijf innovaties voor de drie sporen tegelijkertijd worden geïmplementeerd - waardoor de reductie groter is dan de huidige NPLG-opgave - dan lopen de jaarkosten op tot 521 miljoen euro per jaar. De beoogde maatregelen om de NPLG-doelen te realiseren leidt overigens ook tot een forse daling van het inkomen van veehouderijbedrijven, waarbij er mogelijkheden zijn om via een combinatie van instrumenten economisch perspectief te bieden.

Investeringen in huisvesting, met name in de rundveehouderij, vergroten het risico op lock-in (voor agrarische bedrijven) omdat eenmaal gemaakte investeringen om blijvend onderhoud vragen. Indirect draagt deze investering daarmee bij aan verdere schaalvergroting en intensivering. Ook in dit kader lijkt een gedeeltelijke veestapelreductie, met bijbehorend flankerend beleid, relevant om dergelijke trends af te remmen. Het risico op lock-ins hangt overigens samen met het type investering; in enkele situaties zoals de inzet van vergisting en aanzuren kan ook vorm worden gegeven via lokale en regionale samenwerking van bedrijven. In dat laatste geval is het risico op een lock-in substantieel kleiner. In welke mate de inzet van technische innovaties rond stalsystemen te prefereren zijn boven sociale- of systeeminnovaties waarmee de landbouwstructuur wijzigt (bijv. extensivering, inzet van nieuwe gewassen en dierrassen, etc.) staat en valt met de lange-termijn visie op de positie van de landbouw in Nederland.

---

# Literatuur

- Aarnink A, De Groot J & M Booijen (2021) Analyse beschikbare technieken voor integrale emissiereductie in varkensstallen. WLR-rapport 1332, 38 pp.
- Aarnink A, de Groot J & Ogink N (2019). Brongerichte maatregelen voor beperking emissies uit bestaande varkensstallen. Livestock Research, Wageningen. Rapport 1205, 29 pp.
- Agrifirm (2022) Perspectief voor de boer. De kracht van bewezen innovaties voor een duurzame agrarische sector. Agrifirm rapport, 61 pp.
- Akiyama H, Yan X & K Yagi (2010) Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N<sub>2</sub>O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. *Global Change Biology* 16, 1837-1846.
- Amon B, Kryvoruchko V, Amon T & Moitzi G (2004). Ammonia, Methane and Nitrous Oxide Emissions During Storage of Cattle and Pig Slurry and Influence of Slurry Additive „Effective Micro-Organisms (EM)“. [Online beschikbaar](#).
- Anonymus (1998) Adviesbasis bemesting grasland en voedergewassen. Commissie bemesting Grasland en voedergewassen. Themaboekje 1998. PR Lelystad. 53 pp.
- Anonymus (2019). Voerstrategie verbetering N-benutting en verlaging ammoniakemissie bij melkkoeien. Schothorst Feed Research, Actueel 19-33. Lelystad. 3 pp.
- Arndt C et al. (2022) Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 C target by 2030 but not 2050. *PNAS* 119, e2111294119.
- Assinck FBT, Heinen M & JW van Groenigen (2006) Schatting van denitrificatie in grasland volgens verschillende methoden. Vergelijking van methoden voor een droog en nat perceel van proefbedrijf 'De Marke'. *Alterra-rapport 1300*, 44 pp.
- Bakker R, Klijberg S, Verhoeven M & Saaltink R (2020). Additieven voor dierlijke mest. HAS Kennistransfer en Bedrijfsopleidingen. 131 pp.
- Berntsen P, Menkveld N, Rougoor C & F van der Schans (2022). Pragmatische aanpak stikstofcrisis. Effectiviteit en kosten van stikstof reducerende maatregelen in de melkveehouderij. ABN-publicatie, 35 pp.
- Bobrowski AB, Van Dooren HJ, Ogink N, Hagenkamp-Korth F, Hasler M & Hartung E (2021) Reduction of ammonia emissions by using a urease inhibitor in a mechanically ventilated dairy housing system. *Biosystems Engineering*. 204 p 115-129.
- Boezeman D, Silvius B, Vink M, Kuindersma W, Breman B, Hoogvliet M & J van den Roovaart (2024) Ex ante analyse Nationaal Programma Landelijk Gebied: provinciale programma's en rijksmaatregelen. PBK-rapport 5411, 121 pp.
- Bruggen, C. van, A. Bannink, A. Bleeker, D.W. Bussink, H.J.C. van Dooren, C.M. Groenestein, J.F.M. Huijsmans, J. Kros, L.A. Lagerwerf, K. Oltmer, M.B.H. Ros, M.W. van Schijndel, L. Schulte-Uebbing, G.L. Velthof en T.C. van der Zee (2023). *Emissies naar lucht uit de landbouw berekend met NEMA voor 1990-2021*. Wageningen, WOT Natuur & Milieu, WOT-technical report 242.
- Brusselman E, Beck B, De Campeneere S, Demeyer P, Goossens K, Kerselaers E, Maertens L, Millet S, Reubens B, Riebbels G, Vandaele L, Vangeyte J & Zwervaegeher I (2016). Screening van maatregelen die kunnen leiden tot de reductie van ammoniakemissie afkomstig van landbouw. ILVO, 123 pp.
- Bussink DW & M Bruins (1992). Beperking ammoniakemissie bij toediening van dunne mest op grasland. *Praktijkonderzoek 1*, 51-55.
- Bussink DW, Holshof G, Vergeer WN, Schils RLM & Bakker RF (2002). Efficiënter stikstofgebruik bij lage bemestings-niveaus op grasland. Gezamenlijke studie van NMI en PV. NMI, Wageningen, 139 pp.

- 
- Bussink DW & Van Rotterdam-Los AMD (2012). Perspectieven om broeikasgas- en ammoniak-emissies te reduceren door het aanzuren van mest. NMI rapport 1426.N11. Wageningen, 57 pp.
- Bussink DW & AMD Van Rotterdam-Los (2013). Perspectieven om broeikasgas- en ammoniakemissie te reduceren door het aanzuren van mest. NMI-rapport 1426.N.11, 61 pp.
- Bussink DW, Van Rotterdam-Los AMD, Vermeij I, Van Dooren HJC, Bokma S, Ouwerkerk GJ, Van der Draai H & Wenzl W (2014). Reducing NH<sub>3</sub> emissions from cattle slurry by (biological) acidification: experimental proof and practical feasibility. NMI Report 1422.N.12. Wageningen
- Bussink DW, Doppenberg G, Ros GH & CL van Duijvendijk (2017). Minder ammoniak door betere voeding. Deel B: Emissiemetingen, modelberekeningen en evaluatie in de praktijk. NMI-rapport 1531.N.15.
- Bussink DW (2019). <https://www.zuivelnlprojecten.nl/show/Onderzoek-emissiearmer-bemesten-met-gebruik-vankalksuspensie.htm>
- Bussink DW (2019). Ammoniakemissie in de melkveehouderij. Perspectieven voor het verlagen van de ammoniakemissie via mesttoediening. V-focus (in voorbereiding)
- Bussink DW & van Rotterdam-Los AMD (2023). Mest biologisch aanzuren. Minder emissie, meer biogas. V-focus november 2023, 15-17.
- CBGV (2018) Benut N-meststoffen optimaal, te beginnen in het voorjaar. Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen, 2 pp.
- CDM (2017). Advies beoordeling emissiereductie alternatieve mesttoedieningstechnieken Commissie Deskundigen Meststoffenwet. Wageningen, 30 pp.
- CDM (2020). Advies Stikstofverliezen uit mest in stallen en mestopslagen. CDM, Wageningen, 44 pp.
- Damborg VK, Jensen SK, Johansen M, Ambye-Jensen M & MR Weisbjerg (2019) Ensiled pulp from biorefining increased milk production in dairy cows compared with grass-clover silage. J. Dairy Sci 102, 8883-8897.
- De Bode MJC (1990) Ammoniakemissie-onderzoek bij mengmestaanwending. Meetploegverslag 34506-1100 pp. 15.
- De Mol RM & MA Hilhorst (2003) Methaan-, lachgas- en ammoniakemissies bij productie, opslag en transport van mest. Rapport beschikbaar op <https://edepot.wur.nl/25361>
- Den Boer DJ, Holshof G, Bussink DW, & van Middelkoop JC (2011). Type en toedieningsvorm van N-kunstmest; Effecten op gewas- en eiwitproductie en -kwaliteit. NMI-rapport 1364. Wageningen 95 pp.
- De Vries W, Kros J, Voogd JCH, Louwagie G & LF Schulte-Uebbing (2021). Spatially explicit boundaries for agricultural nitrogen inputs in the European Union to meet air and water quality targets. Science of the total Environment 786 (2021) 147283.
- De Vries W, Römkens PFAM, Kros J, Voogd JC & L.F Schulte-Uebbing (2022). Impacts of nutrients and heavy metals in European agriculture. Current and critical inputs in view of air, soil and water quality. ETC-DI Report 2022/01, 72 pp.
- De Vries W, Kros J, Voogd JC & GH Ros (2023). Integrated assessment of agricultural practices on the loss of ammonia, greenhouse gases, nutrients and heavy metals to air and water. Science of the total Environment 857.
- Difford et al. (2018) Host genetics and the rumen microbiome jointly associate with methane emissions in dairy cows. PLOS Genetics 14, e1007580.
- Durlacher C (2023) Mogelijkheden om NH<sub>3</sub>-emissie uit de melkveehouderij te verlagen. WEcR-notitie, 30 pp.
- Ellen HH, Groenestein CM & NWM Ogink (2017) Actualisering ammoniak emissiefactoren pluimvee. Advies voor aanpassing in de Regeling ammoniak en veehouderij. Wageningen Livestock Research, rapport 1015. 29 pp.
- Evers A, De Haan M, Migchels G, Joosten L & van Leeuwen M (2019). Effecten van ammoniak reducerende maatregelen in bedrijfsverband. Livestock Research, Wageningen. Rapport 1161. 29 pp.
- Flamand I, Prins U, De Buck A & P Keijzer (2024) en overzicht van de maatschappelijke impact van het telen van eiwitrijke gewassen in Nederland, op het gebied van bodemkwaliteit, biodiversiteit, water, gezondheid en klimaat. LBI-rapport, 11 pp.

- 
- Fraters B, van Leeuwen TC, Hooijboer A, Hoogeveen MW, Boumans LJM en JW Reijs (2012). De uitspoeling van het stikstofoverschot naar grond- en oppervlaktewater op landbouwbedrijven. Herberekening van uitspoelfracties. RIVM-rapport 680716006/2012, 35 pp.
- Gies E, Cals T, Groenendijk P, Kros H, Hermans T, Lesschen JP, Renaud L, Verlthof G & J-C Voogd (2023) Scenariostudie naar doelen en doelrealisatie in het kader van het Nationaal Programma Landelijk Gebied; een integrale verkenning van regionale water-, klimaat- en stikstofdoelen en maatregelen in de landbouw. WEnR-rapport 3236, 112 pp.
- Gollenbeek L, Van Gastel J, Casu F & N Verdoes (2021). Emissies en kosten van verschillende scenario's voor verwaarding van varkensmest. NL Next Level Mestverwaarden. Wageningen Livestock Research, Rapport 1331.
- Gollenbeek L, Van Gasterl J, Casu F, Huisman I & N Verdoes (2022) Berekeningen emissies en economie voor verschillende scenario's voor verwaarding van rundveemest. WLR-rapport 1372, 130 pp.
- Groenendijk P, van Gerven L, Schipper P, Jansen S, Buijs S, van Loon A, Lukacs S, Verhoeven F, Housmans B, van Rotterdam R, Ros GH, Verloop K & G-J Noij (2021a). Maatregel op de Kaart (Fase 2). Identificeren van kansrijke perceelsmaatregelen voor schoner grond- en oppervlaktewater. STOWA-rapport 2021-26, 44 p.
- Groenendijk P, van Gerven L, van Boekel E & P Schipper (2021b) Maatregelen op en rond landbouwpercelen ter vermindering van de nutriëntenbelasting van water: achtergrondinformatie effectiviteit landbouwmaatregelen ten behoeve van de Nationale Analyse Waterkwaliteit. STOWA-rapport 2021-54, 146 pp.
- Groenestein K, Bikker P, van Bruggen C, Ellen H, van Harn J, Huijsmans J, Ogink N, Şebek L & Vermeij I (2019). PAS Aanvullende reservemaatregelen Landbouw: uitwerking van een Quick scan. Livestock Research, Wageningen. Rapport 1145, 53 pp.
- Habewold JGR, Sokolov V, Van der Zaag A, Wagener-Riddle C & K Dunfield (2018) Reduction in Methane Emissions From Acidified Dairy Slurry Is Related to Inhibition of Methanosarcina Species. Front Microbiol. 2018 Nov 20;9:2806.
- Hanskamp (2024) Vrijlevenstal. Hand-out versie 1.0, februari 2024. 19 pp.
- Hazelhorst SB, van der Maas CWM & P Romeijn (2024) Effecten van nieuwe inzichten op het bereiken van de NPLG stikstofdoelen. RIVM-briefrapport 2024-0054, 60 pp.
- Holtkamp F, Clemens J & Trimborn M (2023). Calcium cyanamide reduces methane and other trace gases during long-term storage of dairy cattle and fattening pig slurry. Waste Management 161 61–71.
- Hoving I, Holshof GJ, Migchels G, van der Gaag MA & M Plomp (2014) Reductie ammoniakemissie bij maximalisatie weidegang op biologische melkveebedrijven. Wageningen Livestock Research, rapport 792, 32 pp.
- Huijsmans JFM, Hol JMG, & Hendriks MMWB (2001). Effect of application technique, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to grassland. Netherlands Journal of Agricultural Science 49: 323-342
- Huijsmans JFM, Hol JMG & DW Bussink (1997). Reduction of ammonia emission by new slurry application techniques on grassland. In: Jarvis SC & BF Pain (Eds.) Gaseous Nitrogen Emissions from Grasslands. CAB International, Wallingford, pp. 281-285.
- Huijsmans JFM, Hol JMG en Van Schooten HA (2015). Toediening van aangezuurde mest met een sleepvoetenmachine op grasland. Plant Research International, rapport 629, Wageningen pp.45
- Jongeneel, R. (2022) Notitie WUR ; Verdienmodel agrarisch ondernemers: Principes en praktijken met de melkveehouderij als illustratie. Wageningen Economic Research, 10 maart 2022. (Deze notitie is gemaakt als bijdrage voor het rondetafelgesprek Tweede Kamer Commissie Landbouw en Voedsel 'Verdienmodel agrarisch ondernemers', 17 maart 2022).
- Jongeneel R (2024) Doelsturing: wat het is, hoe het werkt en waaraan moet worden gedacht bij implementatie. Wageningen Economic Research, 2024-116.

- 
- Kager H, Meijerink M, Jansen L & T Broeze (2021) Oplossingsrichtingen emissiereductie melkvee- en varkenshouderij. Overzicht van huidige mogelijke maatregelen, technieken en oplossingen voor reductie van methaan en ammoniak in de melkvee- en varkenshouderij. Schuttelaar & Partners, 69 pp.
- Kager H, Hooiveld S & I Bouwers (2023) Stikstofmaatregelen akkerbouw provincie Zuid-Holland. Schuttelaar & Partners, 41 pp.
- Koopmans G, Chardon W, Belder P & BJ Groenenberg (2011) Verwijdering van fosfaat uit bodemwater met ijzerzand: de omhulde drain. H2O 2011, 35-39.
- Lamkaddam IU, Blázquez E, Pelaz L, Llenas L, Ponsá S, Colón J, Vega E & Mora M (2021). Application of ion-exchange-based additive to control ammonia emissions in fattening pig barns with slatted floors. *Environmental Technology & Innovation* 22 101481.
- LNV (2024) Handreiking voor de gebiedsprogramma's NPLG versie februari 2024, 112 pp.
- Loonen JWGM, Geurink JH, Hoekstra H, Huijsmans JFM & Snijders P (1992). Praktijkonderzoek vermindering ammoniakemissie veehouderijbedrijven. Eindrapport werkgroep mestinjectie onderzoekresultaten 1989-1991, PROPRO Noord-Brabant. 90 pp.
- Migchels G, I de Jonge, M Bracke, TV Vellinga & W Sukkel (2023) De toekomst van biologisch elandbouw: kansen en belemmeringen; Duurzaamheidsprestaties voor klimaat, natuur en dierenwelzijn. Wageningen Livestock Research, rapport 1417, 64 pp.
- Mosquera J, Phillipsen B, Van Bruggen C, Groenestein CM & Ogink NWH (2016). Passend beweiden. *Livestock Research, Wageningen*. Rapport 983, 23 pp.
- Mosquera J, Aarnink AJA, Ellen H, van Dooren HJC, van Emous RA, van Harn J & NWM Ogink (2017) Overzicht van maatregelen om de ammoniakemissie uit de veehouderij te beperken. Geactualiseerde versie 2017. WLR-rapport 645, 78 pp.
- Nieuwenhuizen, W., C. Walther, W. Kuindersma, M. Berkhof (2024) Natuurinclusief loont; Een verkenning van de (on)mogelijkheden om met doelsturing op basis van KPI's 50 procent natuurinclusief landbouwareaal in Nederland te realiseren. Wageningen, Wageningen Environmental Reserach, Rapport 3323.
- Nyvold M & P Dörsch (2024) Complete elimination of methane formation in stored livestock manure using plasma technology. *Front. Sustain. Food Syst.* 8, 1370542.
- Oenema J & K Verloop (2018). CDM Advies: Effecten van beweiding en mesttoediening op ammoniakemissies. *Plant Research Wageningen*, 16 pp.
- Oenema O, et al. (2018) Review of measures to decrease nitrae pollution of drinking water sources. *Wageningen Research, FAIRWAY report*, 127 pp.
- Ogink NVM & Melse RW (2020). Beoordeling mogelijke PAS maatregelen: plausibiliteit van werking AgriMestMix systeem. *Wageningen Livestock Research, Rapport* 1233.
- Oltmer K, Luesink H & T Koeijer (2023) Verkenning kosteneffectiviteit van potentiële technische innovaties voor de reductie van de ammoniakemissies; WEcR rapport 2023-089, 66 pp.
- Overmeyer V, Trimborn M, Clemens J, Hölscher R & W Büscher (2023) Acidification of slurry to reduce ammonia and methane emissions: Deployment of a retrofittable system in fattening pig barns, *Journal of Environmental Management*, Volume 331, 2023, 117263.
- Peixoto L& Petersen SO (2023). Efficacy of three nitrification inhibitors to reduce nitrous oxide emissions from pig slurry and mineral fertilizers applied to spring barley and winterwheat in Denmark.
- Plomp M & G Migchels (2021) Quick scan stikstofproblematiek en biologische veehouderij : Mogelijke bijdrage van de biologische sector aan oplossingsrichtingen voor ammoniakproblematiek. WLR-rapport 1306, 38 pp
- Puente-Rodriguez D, Bos AP & J Vonk (2023) Milieutechnologieën in de melkveehouderij tegen klimaatverandering; Testen en bemeten van (bijna) praktijkrijpe combinaties van technieken om methaanemissie uit mest in bestaande melkveestallen te verminderen. *Wageningen Livestock Research, Rapport* 1419, 84 pp.
- Puente-Rodriguez D, Gollenbeek LR, Verdoes N & AP Bos (2022) Perspectief van het aanzuren van mest in Nederland om methaan- en ammoniakemissies te reduceren. WLR-rapport 1375, 36 pp.



- 
- Reinds GJ, van Dijk WFA, 't Hoen MJJ, Stammes IH, Stroeken DP, Cals TCA, van Os J, Marra WA & SB Hazelhorst (2024) Voortgang stikstofbronmaatregelen en verwachte effecten in 2030. PBL-rapport 5204, 136 pp.
- Ros GH, De Vries W, Jongeneel R & M van Ittersum (2023) Gebieds- en bedrijfsgerichte handelingsperspectieven voor een duurzame landbouw in Nederland. WUR-publicatie, 80 pp.
- Ros GH, De Vries W, van Ittersum M & R Jongeneel R (2023) Reflectie op IPO verkenning doelsturing. Bijlage bij IPO (2024) Verkenning doelsturing. Een zoektocht naar een route voor invoering. IPO-rapport, 33 pp.
- Rougoor C, Mul M & F van der Schans (2021) Kansen, kosten en draagvlak van klimaatmaatregelen in de varkenshouderij. CLM-rapport 1075, 37 pp.
- Rougoor C & F van der Schans (2022) Stikstofmaatregelen in de veehouderij. Overzicht van 'laaghangend fruit'. CLM-rapport 1133, 26 pp.
- Schep CA, Vermeulen EDW, Van Dooren HJC, Keuskamp JA, Van Weil EAP & K van Deest (2024) Emissies van ammoniak en methaan uit melkveestallen in het Netwerk Praktijkbedrijven. Tussenresultaten van praktijkmetingen op 15 onderzoeksbedrijven. WLR-rapport 1487, 54 pp.
- Schils RLM & Snijders PJM (1988). Stikstofwerking van runderdrijfmest op grasland. Proefstation voor de Rundveehouderij, Schapenhouderij Paardenhouderij. Lelystad, Publicatie 60, pp. 51.
- Schoumans OF et al. (2011) Mitigation options for reducing nutrient emissions from agriculture. A study amongst European member states of Cost action 869. Alterra report 2141, 147 pp.
- Schulte-Uebbing L & W de Vries (2021) Reconciling food production and environmental boundaries for nitrogen in the European Union. *Science of the Total Environment* 786, 147427.
- Serra E, Lynch MB, Gaffey J, Sanders JPM, Koopmans S, Markiewicz-Keszycka MM, Bock MH, McKay ZC & KM Pierce (2023) Biorefined press cake silage as feed source for dairy cows: effect on milk production and composition, rumen fermentation, nitrogen and phosphorus excretion and in vitro methane production. *Livestock Science* 267, 105135.
- Søgaard, HT, Sommer SG, Hutchings NJ, Huijsmans JFM, Bussink DW & Nicholson F (2002). Ammonia volatilization from field-applied animal manure-the ALFAM model. *Atmospheric Environment* 36: 3309-3319.
- Smit A, de Ruijter FJ, de Haan JJ & JGM Paauw (2011) Maatregelen ter vermindering van de nitraatuitspoeling; de mate van toepassing in de sector boomkwekerij. Alterra-rapport 2239.5, 14 pp.
- Tapio I, Snelling TJ, Strozzi F & RJ Wallace (2017) The ruminal microbiome associated with methane emissions from ruminant livestock. *Journal of Animal Science and Biotechnology* 8, 2-11.
- Van Bruggen C et al. (2019). Emissies naar lucht uit de landbouw in 2017. Berekningen met het model NEMA. WOt-technical report 147, 131 pp.
- Van den Pol – Dasselaar, Blonk H, Dolman M, Evers A, de Haan M, Reijs J, Sebek L, Vellinga T & H Wemmenhove (2013) Kosteneffectiviteit reductiemaatregelen emissie broeikasgassen zuivel. WLR-rapport 725, 53 pp.
- Van Schooten HA, Van Houwelingen KM & Huijsmans JFM (2015). Effect van alternatieve mestaanwendingsmethoden op mestbenutting door het gras. Resultaten van twee oriënterende veldproeven. *Livestock Research, Wageningen*. Rapport 912, 43 pp.
- Venema A, Embregts L, Knol T & B Strootman (2024) Natuurpositieve eiwitteelt. Het geografisch potentieel van droog te oogsten vlinderbloemige eiwitgewassen, om bij te dragen aan het oplossen van de ruimtelijke opgaven in Nederland. Strootman Landschapsarchitecten, 41 pp.
- Velders et al., 2018. Grootschalige concentratie- en depositiekaarten Nederland. RIVM DOI 10.21945/RIVM-2018-0104.
- Velthof G et al., 2020. Identification of most promising measures and practices. FAIRWAY report, 74 pp.
- Velthof GL & P Groenendijk (2021) Landbouw en waterkwaliteit. WEnR-rapport 3070, 92 pp.
- Verbeek-Schilder Y & F Verhoeven (2024). De emissiearme bedrijfsvoering. Een praktische en onderbouwde aanpak om ammoniakemissie te reduceren op grondgebonden melkveebedrijven. Rapport Boerenverstand.

- 
- Verdoes, N., R. Maasdam, R. Melse, J. van Gastel, L. Gollenbeek, P. Bussmann, J. Schellekens & J Roefs (2021). Overzicht en beoordeling van technologie voor verwaarden van mest: Rapportage WP2 NL Next Level Mestverwaarden. Wageningen Livestock Research, Rapport 1290.
- Verloop K, Verhoeff T, Oenema J, Hoving I, Meerkerk B, Huijsmans J, Migchels G, de Haan M & N van Eekeren (2018) Minder ammoniakemissie uit de melkveehouderij in het veenweidegebied. WLR-rapport 1129, 36 pp.
- Vermeulen E, Van Well E, Rougoor C, van de Geest W & A van den Pol – van Dasselaar (2023) Draagvlak ammoniak- en methaanreducerende maatregelen in de melkvee- en varkenshouderij. CLM-rapport 1158, 103 pp.
- Wang S, & Y Peng (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chem. Eng. J.*, 156, 11–24.
- Weimer PJ (2015) Redundancy, resilience, and host specificity of the ruminal microbiota: implications for engineering improved ruminal fermentations. *Frontiers in Microbiology*.
- Wopereis FA (1991). Bodemgeschiktheid voor emissie-arme mesttoedieningstechnieken van grasland in zandgebieden. DLO-Staring Centrum, Wageningen, Rapport 159, 37 pp.

# Bijlage I. Innovatiepotentieel maatregelen

**Tabel I.1.1** Maatregelen / innovaties die inzetbaar zijn op korte termijn (1-5 jaar) op bedrijfsniveau in de rundveehouderijsector (met focus op melkveehouderij).

Nr	Maatregel	Categorie	TRL	Emissiebron	Emissiereductie (%) t.o.v. de huidige situatie voor de gegeven emissiebron (NH3, CH4 en N2O) en na bemesting (water)					Kosten	Referentie	Betrouwbaarheid
					NH3	CH4	N2O	N-water	P-water			
1	Optimalisatie van dierrantsoenen (eiwit, verteerbaarheid)	(Dier)voeding	8-9	dierexcretie	10-20	5-15	0-10	5-10	0-10	5	1, 3, 13, 14, 19	hoog
2	Optimalisatie beweiding	(Dier)voeding	8-9	dierexcretie	4-50	0-10	0-20			5	3, 5, 6, 12, 13, 18, 19, 33	hoog
3	Voeradditieven	(Dier)voeding	2-3/8-9	dierexcretie	5-30/90	20-25				4	6, 8, 14	hoog
4	Verhoog leeftijd dieren	Dier(voeding)	9	dierexcretie	0-5	0-5		0-10	0-10	4, 5	6, 13	hoog
5	Gras raffinage (en vlinderbloemigen, minder import)	Dier(voeding)	7-9	stal, mestopslag, toediening	5-30					4, 5	28,29	hoog
6	Aanzuren van mest in stal / opslag	Stal en mestopslag	8-9	stal en mestopslag	40-70	50-90				3	3, 6,23,24,25	matig tot hoog
7	Biologisch aanzuren in combinatie met vergisting	Stal, mestopslag en toediening	3	stal, mestopslag, en toediening	40-70	50-90				4-5	3, 6, 23, 24	hoog
8	Stalvloeraanpassingen (nieuwe mestschuiven, rubberen toplaag, extra robot, Koetoilet, VrijLevenStal)	Stal en mestopslag	8-9	stal en mestopslag	0-50					1-2	1, 3, 6, 16, 17, 19, 21	variabel
9	Methaanoxidatie (affakkelen of biofilter)	Stal en mestopslag	4-6	stal en mestopslag		50-90				3-4	7, 14	hoog
10	Vergisten van mest i.c.m. mestbewerking	Stal en mestopslag	9	stal, mestopslag en toediening	40-50	60-80				1, 5	6, 7, 12, 17, 26	hoog
11	Water sproeien op stalvloeren en spoelen van roosters	Stal en mestopslag	8-9	stal en mestopslag	13-40					2	3, 6, 10, 19	hoog
12	Plaatsing windsingels en herinrichting erf	Stal en mestopslag	2-3	stal en mestopslag	0-20			5-10	0-1	4	1, 4, 8	matig
13	Luchtwassers	Stal en mestopslag	8-9	stal en mestopslag	70-90					4	16	hoog
14	Dagontmesting plus bewerking	Stal en mestopslag	7-8	stal en mestopslag	30-85	60-80				1	17	hoog
15	Koelen van mest	Stal en mestopslag	2-3	mestopslag	-	40-80				1-2	6	matig
16	Mixen / beluchten van mest	Stal en mestopslag	2-3	mestopslag	0-70	50-60	?			1	3, 7, 8	matig
17	Beperken ventilatiedebiet	Stal en mestopslag	3	stal	0-15					4	32	hoog
18	Netjes werken bij mesttoediening	Mesttoediening	9	toediening	8-25		0-5	0		5	1,2,3,19	hoog
19	Mestinjectie op bouwland	Mesttoediening	9	toediening	95		0-5	0	0	4, 5	3, 5	hoog
20	Aanzuren van mest bij toediening	Mesttoediening	9 / 2-3	toediening	25-40	50-90				3	5, 6	matig tot hoog

21	Toevoegmiddelen aan mest	Mesttoediening	2-9	toediening	15-25	65-85	0-10	5-40		3-4	7, 12, 14, 15	hoog
22	Gebruik van DMPP stikstof stabilisator	Mesttoediening	9	toediening			42-55	10-40		4	15, 22	hoog
23	Verdunnen van mest bij mestopslag en bij aanwending via sleepvoeten op klei en veen	Mestopslag en Mesttoediening	8-9	toediening	5-36					3	3, 9, 11	hoog
24	Mest besproeien met suspensies	Mesttoediening	2-3	toediening	20-30					4	3, 5	matig
25	Precisiebemesting kunstmest	Mesttoediening	9	toediening	10-35		10-50	0-5	0-10	4, 5	3, 8, 12, 13	hoog
26	Kunstmest vervanging door biobased fertilizers plus injectie ervan	Mesttoediening	9	toediening	95		0-5			4	1,2,3,19	hoog
27	Omzetten drijfmest in NEO-meststof (N2 Applied)	Mestopslag en mesttoediening	8-9	stal en toediening	95	99				1	20, 27	hoog
28	Graslandbeheer (klaver, scheuren) plus bemesting	Bodem	9	toediening	0-20		50-100	0-45	Risico op < 0	5	12, 13	matig
29	Bufferstroken	Bodem	9	toediening	0-5		0-5	5-60	5-30	2	4, 15, 13	matig
30	Bodembeheer (ploegen, vanggewassen, uitmijnen)	Bodem	9	toediening			0-40/0-5	15-20/0-5	5-50/0-5	5, 1	4, 12, 13, 15	variabel
31	Omschakeling naar biologisch	Landbouwsysteem	9	bedrijf	40-50	15-35	50-100	0-10		4, 5	33	hoog

1) Bussink et al. (2021), 2) Kager et al. (2023), 3) Landbouwcollectief (2019), 4) Velthof et al. (2018), 5) Bussink et al. (2019), 6) Kager et al., 2021, 7) Rodriguez et al. (2023), 8) Brusselman et al. (2016), 9) Oltmer et al. (2023), 10) Verloop et al. (2022), 11) Rougoor et al. (2022), 12) Kuikman et al (2004), 13) Oenema et al. (2018), 14) Rougoor et al. (2022), 15) Velthof et al (2020), 16) Zessen (2022), 17) Oltmer et al. (2023), 18) Verloop et al. (2022), 19) netwerk praktijkbedrijven, 20) website N2 Applied en aangeleverde documentatie, 21) Hanskamp (2024), 22) Akiyama et al. (2010), 23) Overmeyer et al. (2010), 24) Habtewold et al. (2018), 25) Puente-Rodriguez et al. (2022), 26) Gollenbeek et al. (2022), 27) Nyvold M & P Dörsch (2024), 28) Serra et al., (2023), 29) Damborg et al. (2019), 30) Weimer et al., 2010, 31) Tapio et al. (2017), 32) Schep et al (2024), 33) Migchels et al. (2024). \* maatregelen zijn gecategoriseerd in relatie tot de kosten: (4) 0-5, (3) 5-10, (2) 10-20 en (1) >20 euro per kg emissiereductie voor NH<sub>3</sub>. Indicatie van kosten zijn afgeleid van Oltmer et al. (2023), Landbouwcollectief (2019) en ABN-AMRO (2023). Noot dat de gebruikte methodiek van deze studies niet gelijk is. De categorieën zijn daarom indicatief. Maatregelen die potentieel voor netto opbrengsten kunnen zorgen vallen in categorie 5. <sup>5</sup>de betrouwbaarheid van de impactinschattingen is door de auteurs van dit rapport kwalitatief beoordeeld op basis van het aantal studies en de mate van onderbouwing van deze cijfers, de gepresenteerde bandbreedte in effecten, de toepasbaarheid onder verschillende omstandigheden, en de onderliggende procesmechanismen.

**Tabel I.1.2** Maatregelen / innovaties die inzetbaar zijn op middellange termijn (5-10 jaar) op bedrijfsniveau in de rundveehouderijsector (met focus op melkveehouderij).

Nr	Maatregel	Categorie	TRL	Emissiebron	Emissiereductie (%) t.o.v. de huidige situatie voor de gegeven emissiebron (NH <sub>3</sub> , CH <sub>4</sub> en N <sub>2</sub> O) en na bemesting (water)					Kosten*	Referentie *	Betrouwbaarheid *
					NH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	N-water	P-water			
												Expertinschatting
1	Beïnvloeden microbiom rundvee	Dier(voeding)	1-3	stal en mestopslag	?	?	?			-	2, 30, 31	onbekend
2	Nieuwe stalsystemen	Stal en mestopslag	7-8	stal en mestopslag	8-50					1	2	onbekend
3	Fokken dieren met minder emissies	Stal en mestopslag	1-3	stal en mestopslag	0-10	1-15 per jaar				4	6, 7, 12	onbekend
4	Maximaliseren aantal GVE	Stal, mestopslag en toediening	9	stal, mestopslag en toediening	?	?	?			1, 4	13, 14	hoog
5	Alternatief landgebruik	Stal, mestopslag en toediening	1-3	stal, mestopslag en toediening	?	?	?			-		hoog
6	Wijziging landbouwsysteem	Stal, mestopslag en toediening	1-3	stal, mestopslag en toediening	-	-	-			-		hoog
7	Diepe mestinjectie	Bemesting	4-6	toediening	95		0-10			4	1,2,3,5	Hoog

\* voor referenties en toelichting op categorieën, zie voetnoten bij tabel I.1.1.

**Tabel I.1.3** Maatregelen / innovaties die inzetbaar zijn op korte termijn (1-5 jaar) op bedrijfsniveau in de varkenshouderij.

Nr	Maatregel	Categorie	TRL	Emissiebron	Emissiereductie (%) t.o.v. de huidige situatie voor de gegeven emissiebron (NH3, CH4 en N2O) en na bemesting (water)					Kosten	Referentie	Betrouwbaarheid
					NH3	CH4	N2O	N-water	P-water			
1	Optimalisatie RE in rantsoen	(Dier)voeding	8-9	excretie	0-30					5	2, 4	hoog
2	Voeradditieven (o.a. benzoëzuur)	(Dier)voeding	8-9	excretie	8-16	3-5				4	2, 4	hoog
3	Gras raffinage (en vlinderbloemigen, minder import)	(Dier)voeding	7-9	stal, mestopslag, toediening	5-30					4, 5	16	hoog
4	Aanzuren van mest in stal / opslag	Stal en mestopslag	2-3 / 8-9	stal en mestopslag	40-65	65-90				3	1,4	hoog
5	Stalvloeraanpassingen (div. opties)	Stal en mestopslag	8-9	stal en mestopslag	64-84	30-90				1-2	1	hoog
6	Methaanoxidatie (affakkelen of biofilter)	Stal en mestopslag	4-6	stal en mestopslag	90	70-98				1-2	4	hoog
7	Vergisten van mest i.c.m. mestbewerking	Stal en mestopslag	9	stal en mestopslag	40-65	65-90				1, 5	4	hoog
8	Luchtwassers	Stal en mestopslag	8-9	stal en mestopslag	70-90					4	4	hoog
9	Dagontmesting plus bewerking	Stal en mestopslag	7-8	stal en mestopslag	70-90	70-90				1	1, 4	hoog
10	Koelen van mest	Stal en mestopslag	8-9	stal en mestopslag	40	40				-	4	matig
11	Directe mestscheiding	Stal en mestopslag	8-9	stal en mestopslag	70					4	1, 4	hoog
12	Omzetten drijfmest in NEO-meststof (N2 Applied)	Mestopslag en mesttoediening	8-9	Stal en toediening	95	99				1	20, 27	hoog
13	Netjes werken bij mesttoediening	Bemesting	9	toediening	8-25					5	1,2,3, 4	hoog
14	Mestinjectie op bouwland	Bemesting	9	toediening	95					4, 5	4	hoog
15	Aanzuren van mest bij toediening	Bemesting; stal	9 / 2-3	toediening	40-65					3	1,4	hoog
16	Toevoegmiddelen aan mest	Bemesting	2-9	toediening	-	-				3-4	1,2,3,4	hoog

1) Aarnink et al. (2021), 2) Landbouwcollectief (2019), 3) Bussink et al. (2019), 4) Kager et al. (2021), 16) Zessen (2022), 20) website N2 Applied en aangeleverde documentatie, 27) Nyvold M & P Dörsch (2024),

\* omdat mesttoediening vooral in de akkerbouw plaatsvindt en niet gezien wordt als een emissie vanuit de varkenshouderij, zijn bodem en bemestingsmaatregelen hier niet opgenomen. Zie hiervoor de tabel voor melkveehouderij.

**Tabel I.1.4** Maatregelen / innovaties die inzetbaar zijn op middellange termijn (5-10 jaar) op bedrijfsniveau in de varkenshouderij.

Nr	Maatregel	Categorie	TRL	Emissiebron	Emissiereductie (%) t.o.v. de huidige situatie voor de gegeven emissiebron (NH3, CH4 en N2O) en na bemesting (water)					Kosten	Referentie	Betrouwbaarheid
					NH3	CH4	N2O	N-water	P-water			
1	Deens systeem van aanzuren	Stal en mestopslag	5-6	stal en toediening	80	90				-	1	hoog
2	Koude plasmatechnologie	Stal en mestopslag	5-6	stal en mestopslag	70	70				-	1	hoog
3	Pig on the moon (Denemarken)	Stal en mestopslag	5-6	stal en mestopslag	75	50				3	1	Hoog
4	Luchtcirculatie	Stal en mestopslag	5-6	stal en mestopslag	90	0				3	1	matig
5	Strotaal zeugen	Stal en mestopslag	5-6	stal en mestopslag	70	70				3	1	matig

1) Aarnink et al. (2021), 2) Landbouwcollectief (2019), 3) Bussink et al. (2019), 4) Kager et al. (2021)

\* omdat mesttoediening vooral in de akkerbouw plaatsvindt en niet gezien wordt als een emissie vanuit de varkenshouderij, zijn bodem en bemestingsmaatregelen hier niet opgenomen. Zie hiervoor de tabel voor melkveehouderij.

**Tabel I.1.5** Maatregelen / innovaties die inzetbaar zijn op korte termijn (1-5 jaar) op bedrijfsniveau in de pluimveehouderij.

Nr	Maatregel	Categorie	TRL	Emissiebron	Emissiereductie (%) t.o.v. de huidige situatie voor de gegeven emissiebron (NH3, CH4 en N2O) en na bemesting (water)					Kosten	Referentie	Betrouwbaarheid
					NH3	CH4	N2O	N-water	P-water			
1	Optimalisatie RE in rantsoen / voerfasen	(Dier)voeding	8-9	excretie	0-10					5	1,2	hoog
2	Luchtwassers	Stal en mestopslag	8-9	stal	70-90					4	1,2	hoog
3	Dagontmesting plus bewerking	Stal en mestopslag	7-8	stal	14					3	1,2	hoog
4	Inzet van turf/ snijmais silage als strooisel	Stal en mestopslag	8-9	stal	25-40					3	1,2	variabel
5	Toevoegingsmiddelen aan voer / strooisel	Stal en mestopslag	3	stal	?					4	3	onbekend

1) Landbouwcollectief (2019), 2) Mosquera et al. (2017), 3) Proefbedrijf Pluimveehouderij (2024)

\* omdat mesttoediening vooral in de akkerbouw plaatsvindt en niet gezien wordt als een emissie vanuit de varkenshouderij, zijn bodem en bemestingsmaatregelen hier niet opgenomen. Zie hiervoor de tabel voor melkveehouderij.



# Bijlage II. Literatuuroverzicht maatregelen

## Innovaties rundveehouderij

Op basis van een literatuurstudie zijn relevante innovaties / maatregelen geselecteerd en beschreven in relatie tot hun impact op de emissies van ammoniak, lachgas en methaan naar de lucht als ook de uit- en afspoeling van nitraat en fosfaat naar het grond- en oppervlaktewater. Maatregelen zijn hierbij geclusterd op basis van sector (rundvee, varkens en pluimvee), categorie (mesttoediening, stal, dier(voeding) en bodem) en inzetbaarheid (binnen 5 of 5-10 jaar). Per type maatregel kunnen meerdere innovaties voorkomen. Er zijn alleen maatregelen opgenomen die toepasbaar zijn in de veehouderijsector.

Hieronder wordt per innovatie / maatregel een korte omschrijving gegeven als ook het innovatiepotentieel in relatie tot de doelen van het NPLG (emissies van NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O en N- en P-verliezen naar grond- en oppervlaktewater). Daarna wordt aangegeven of er een risico is van pollution swapping, waar (op welke grondsoorten) deze maatregel toepasbaar is en hoe inpasbaar ze is binnen de huidige landbouwbedrijven, het schaalniveau waarop de maatregel inzetbaar is (perceel, bedrijf, regio of sector) een indicatie van het zogenaamde Technology Readiness Level (TRL), wat aangeeft in welke fase de ontwikkeling van een nieuwe technologie zich bevindt en een indicatie van de mogelijke kosten (uitgedrukt in euro's per kg gerealiseerde emissiereductie voor ammoniak). Voor de TRL zijn 9 niveaus gebruikt, conform de door de NASA ontwikkelde methode<sup>8</sup>, te weten

*Verkennen: TRL 1, 2 en 3*

Level 1: Fundamenteel onderzoek: Onderzoek naar innovatief idee en de basisprincipes van de innovatie: fundamenteel onderzoek en deskresearch.

Level 2: Toegepast onderzoek: Formulering van het technologisch concept en de praktische toepassingen: experimenteel en/of analytisch onderzoek.

Level 3: Toetsing (Proof of concept): Onderzoek naar de toepasbaarheid van het concept op experimentele basis: toetsen en valideren van hypotheses.

*Ontwikkelen: TRL 4, 5 en 6*

Level 4: Implementatie en test prototype: proof-of-concept van de innovatie op labschaal testen.

Level 5: Validatie prototype: onderzoek naar de werking van het technologisch concept in een relevante omgeving. Dit is de 1e stap in de demonstratie van de technologie.

Level 6: Demonstratie prototype in testomgeving: uitgebreid testen en demonstreren van concept in een relevante testomgeving.

*Demonstreren: TRL 7 en 8*

Level 7: Demonstratie prototype in operationele omgeving:

U gaat het concept testen en demonstreren in een gebruikersomgeving om werking in een operationele omgeving te bewijzen. De demonstratie van het concept in een praktijkomgeving levert nieuwe inzichten op voor de definitieve markttoepassing van uw innovatie.

Level 8: Product/dienst is compleet en operationeel: In deze fase krijgt de innovatie zijn definitieve vorm. De technologische werking getest en het is bewezen dat het voldoet aan gestelde verwachtingen, kwalificaties en normen (certificering).

Level 9: Marktintrouctie product/dienst/procedé: de innovatie is technisch en commercieel gereed; productierijp en klaar voor lancering in de gewenste marktomgeving.

---

<sup>8</sup> <https://www.rvo.nl/onderwerpen/trl#4-fasen%2C-9-technology-readiness-levels>



### Netjes werken bij mesttoediening

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en lachgas (N <sub>2</sub> O)
Omschrijving	Op 80% van het grasland op minerale gronden wordt rundermest met de zodenbemester toegediend. Met een zode-injecteur wordt, nadat de mest op 5-10 cm diepte is aangebracht, de sleuf ook dichtgedrukt. De emissie vermindert daardoor van 19% tot slechts 2% met de zode-injecteur (Bussink en Bruins, 1992). NEMA gaat anno 2023 uit van een emissie van 17% voor een zodebemester. De zode-injecteur is een bewezen technologie, maar brede(re) toepassing vereist aanpassing van machines. Op grasland is de techniek vooral toepasbaar voor de eerste snede en op alle minerale grondsoorten. De emissie van NH <sub>3</sub> stijgt sterk wanneer bij het bemesten met de zodenbemester de mest boven de sleuf uitkomt, wat voorkomt bij te hoge giften. Bij voorkeur moeten bij het gebruik van de zodenbemester de giften daarom niet hoger dan 20-25 m <sup>3</sup> per ha zijn.
Innovatiepotentieel	8-25% reductie toedieningsemissie NH <sub>3</sub> ; 0-5% reductie in N <sub>2</sub> O
Pollution swapping	geen
Toepasbaarheid	alle minerale grondsoorten, en vooral in de eerste snede. Bij toediening in latere sneden kan de bodem te droog zijn.
Inpasbaarheid	goed
Schaalniveau	perceel en bedrijf
TRL	Praktijkrijp (TRL9)
Kosten	Categorie 5 (levert 0-5 euro op per kg N-NH <sub>3</sub> )

### Mestinjectie op bouwland

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en lachgas (N <sub>2</sub> O)
Omschrijving	Voor het aanwenden van mest worden verschillende soorten mest en machines gebruikt. Afhankelijk van het type mest, het type machine en de wijze van aanwending, heeft de mest een bepaalde emissiefactor. Op 15% van het bouwland wordt echter zodenbemesting of in één werkgang mestonderwerken toegepast. Door ook op deze bedrijven mest te injecteren in de bodem daalt de emissie van deze percelen van ruim 20% naar 2% (Bruggen et al., 2023). Door gebruik te maken van emissiearme toedieningsmethoden kan de emissie met 95% worden verlaagd. Ook hier blijft netjes werken een belangrijke randvoorwaarde
Innovatiepotentieel	95% reductie toedieningsemissie NH <sub>3</sub> ; 0-5% reductie in N <sub>2</sub> O als bij de N-bemesting met de N-benutting rekening wordt gehouden.
Pollution swapping	geen
Toepasbaarheid	alle minerale grondsoorten. Op de minder draagkrachtige gronden is mestinjectie echter niet toepasbaar.
Inpasbaarheid	goed
Schaalniveau	perceel en bedrijf
TRL	Praktijkrijp (TRL9)
Kosten	Categorie 4 (< 5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> )

### Aanzuren van mest bij toediening

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	Door het toevoegen van zuren (meestal zwavelzuur) wordt de pH van mest verlaagd. Afhankelijk van het zuur en de hoeveelheid, kan een beperkte tot sterke reductie van NH <sub>3</sub> worden gerealiseerd. De effecten van aanzuren zijn beschreven in verschillende wetenschappelijke publicaties in Nederland en in Denemarken / Baltische staten (en in mindere mate Duitsland) is er veel praktijkervaring met het aanzuren van mest. Potentiële belemmeringen voor implementatie in Nederland zijn corrosie-gevaar, overschot S-bemesting en veiligheid.
Innovatiepotentieel	25-40% reductie toedieningsemissie NH <sub>3</sub>
Pollution swapping	Hoge zwavelaanvoer (bij inzet H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> als zuur)
Toepasbaarheid	alle grondsoorten
Inpasbaarheid	Lastig. Risico's rondom opslag en veiligheid (bij inzet H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ) en beschikbaarheid gemakkelijk afbreekbare organische stof (bij biologisch aanzuren). Het is daardoor lastig inpasbaar binnen de huidige bedrijfsvoering, maar zou op specifieke locaties uitkomst kunnen bieden. Biologisch aanzuren is gemakkelijker inpasbaar, maar vereist nog doorontwikkeling i.v.m. schuimvorming en stabilisatie van pH.
Schaalniveau	perceel en bedrijf
TRL	Praktijkrijp buiten Nederland (TRL9), maar in Nederland is een aangepaste variant in onderzoek (TRL1-3)
Kosten	Categorie 3 (5-10 euro per kg N-NH <sub>3</sub> )

## Toevoegmiddelen aan mest

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), methaan (CH <sub>4</sub> ) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	Bij het toedienen van mest kunnen stikstofverliezen optreden via NH <sub>3</sub> -emissie en denitrificatie, waarbij het broeikasgas lachgas (N <sub>2</sub> O) vrijkomt. Deze veldverliezen zijn te beperken door mest netjes toe te dienen; de juiste hoeveelheid, op het juiste moment met de juiste techniek. Een aanvullend spoor om verliezen te beperken, kan het gebruik van toevoegmiddelen aan mest zijn. Er zijn meer dan 30 toevoegmiddelen voor mest op de markt. De werking varieert van chemisch, fysisch tot biologisch. Chemische toevoegmiddelen bestaan uit zuren of chemische componenten die bepaalde biologische processen sterk remmen, zoals de omzetting van ureum naar NH <sub>4</sub> . Of de omzetting van NH <sub>4</sub> naar NO <sub>3</sub> , waarmee ook N <sub>2</sub> O onderdrukt wordt. Ook kunnen het middelen zijn die NH <sub>4</sub> deels chemisch binden. Fysische toevoegmiddelen zijn vaak kleimineralen die NH <sub>4</sub> uit mest kunnen adsorberen. Bekende voorbeelden zijn zeoliet-houdende mineralen. Ook het toevoegen van zouten aan mest kan een effect hebben op de NH <sub>3</sub> -emissie. Biologische toevoegmiddelen bevatten mengsels van micro-organismen en/of enzymen soms aangevuld met mineralen. Deze hebben deels effect op NH <sub>3</sub> en op CH <sub>4</sub> . Veel van op de markt zijnde producten zijn niet wetenschappelijk getoetst
Innovatiepotentieel	15-25% voor NH <sub>3</sub> , 65-85 voor CH <sub>4</sub> , 0-10% voor N <sub>2</sub> O, 5-40% voor N-emissies naar het water. Effecten sterk afhankelijk van het type product. Zie hiervoor de studie van Bakker et al. (2020). Positieve effecten zijn er voor Piadin, Top Flow Entec, Vizura, Nytrapyrin, Enimex, Actieve NS, AMFA, MgCl <sub>2</sub> , Multikraft EM en Product K. Geen effecten zijn er voor AgriMestMix, MicroFerm & Pro-mest, Berkana, BioHumat Mest, BVP-M, Optizec-Zeolite, Triune, Zeofarm Stable, Fir, Animal Life Plus – Sprayu, Bactériolit, BioAktiv-MZ, Biobac, BioMest, Bio-Mix, Kopros, ManurePro, Proferta, Progerss, Slurry Kind Cattle & Pig, GierO2
Pollution swapping	Beperkt als bij toediening rekening wordt gehouden met hogere stikstofwerking
Toepasbaarheid	Alle bedrijven en grondsoorten
Inpasbaarheid	Groot voor de producten die bewezen effectief zijn. Vergt beperkt extra werkzaamheden. Sommige producten leveren risico's op voor verstoppingen van installaties als mengen is geautomatiseerd. Omdat de werking van veel factoren afhankelijk is (weer, voer, diermanagement) is het vaststellen van een concrete emissiereductie lastig.
Schaalniveau	Bedrijf
TRL	Varieert per product van TRL2-3 (proof of principle) tot TRL9 (praktijkrijp)
Kosten	Categorie 3 of 4. Kosten variëren van 2-10 euro per kg N-NH <sub>3</sub>

## Verdunnen van mest bij mestopslag en aanwending bij sleepvoet

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	Verdunnen van drijfmest met water bij toediening verlaagt de ammoniumconcentratie waardoor er minder NH <sub>3</sub> emitteert bij bemesten met de sleepvoetemachine op klei en veen. Het gebruik van verdunde mest met de zodenbemester heeft geen significant effect op NH <sub>3</sub> . De mate van verdunnen bepaalt het effect van de maatregel. Een halvering van de NH <sub>4</sub> -concentratie in de mestopslag, door de mest 1 op 1 met water te verdunnen, zorgt voor een reductie van NH <sub>3</sub> uit de kelder met circa 50%. Gezien het feit dat 30-50% van de stalemissie uit de kelder komt en 50-70% vanaf de roosters, kan het gelijktijdig spoelen van de roosters en daarmee verdunnen van de drijfmest in de opslag, de emissiereductie vergroten.
Innovatiepotentieel	5-36% voor NH <sub>3</sub>
Pollution swapping	Mogelijk een toename in N <sub>2</sub> O emissies tot 1,1% van de N-gift door nattere omstandigheden. Ook meer transport (en CO <sub>2</sub> ). Effecten op bodemleven zijn verwaarloosbaar.
Toepasbaarheid	Alle minerale grondsoorten. Noot: sinds 1 januari 2019 is het verplicht om bij het gebruik van sleepvoeten op veen- en kleigrasland de mest te verdunnen in de verhouding 2:1 (twee delen mest en een deel water). Nadeel is er wel dat er meer mest moet worden uitgereden. Op veen kan het eenvoudig worden gecombineerd met de sleepslang. In delen van het land is onvoldoende water beschikbaar, en zullen putten moeten worden geslagen. Dat is kostbaar (al gauw € 30.000 per put) en vereist een vergunning. Alternatief: regenwater op het staldak opvangen.
Inpasbaarheid	Groot. Bedrijven op droog zand in Oost-Nederland hebben risico's op hogere kosten door tekorten aan water.
Schaalniveau	perceel en bedrijf
TRL	Praktijkrijp (TRL9), waarbij het effect nog kan variëren (lopend onderzoek)
Kosten	Categorie 3 (5-10 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ) uitgaande dat voldoende opslagcapaciteit aanwezig is en kosten variëren van 1,5 tot 2 euro per m <sup>3</sup> onverdunde mest. Mogelijk hogere opbrengsten door betere benutting van verdunde mest door het gewas, maar dit is niet aangetoond op zand. Er was wel een effect in droge jaren op klei en veen.

### Mest besproeien met suspensies

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	Door bepaalde vloeistoffen of suspensies te sprayen over de mest tijdens het uitrijden daalt de emissie van ammoniak. Een recente proef van het NMI liet zien dat sproeien met een krijtsuspensie de emissie met 20% verlaagde (Bussink, 2019). Emissiereducties tot 30% zijn mogelijk. Metingen naar het effect van sproeien zijn vooralsnog maar beperkt beschikbaar. Het is toepasbaar op alle grondsoorten en biedt perspectief zowel in combinatie met sleepvoeten als zodenbemesting. Meerkosten zijn rond de 1,5 € per m <sup>3</sup> mest, mede afhankelijk van de sproeivloeistof.
Innovatiepotentieel	20-40% NH <sub>3</sub>
Pollution swapping	Geen
Toepasbaarheid	Alle grondsoorten
Inpasbaarheid	Groot. Vergt aanpassing van toedieningsmachines.
Schaalniveau	perceel en bedrijf
TRL	In onderzoek en sommige producten proof of principle (TRL2-3)
Kosten	Categorie 3 (5-10 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ) op basis van ingeschatte kosten van 1,5 euro per m <sup>3</sup> onverdunde mest.

### Precisiebemesting kunstmest en drijfmest

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), Lachgas (N <sub>2</sub> O), nitraat (NO <sub>3</sub> ) en fosfaat (H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )
Omschrijving	Dit omvat allerlei maatregelen die sturen op de vier juistheden van bemesting: de juiste meststof, in de juiste hoeveelheid, op de juiste plek en op het juiste moment. Een paar voorbeelden. Ureum kan bij gebruik op ongeschikte momenten tot een onnodig hoge NH <sub>3</sub> emissie leiden. Bij grasland is het aan te bevelen om na de eerste snede vooral gebruik te maken van ammoniumnitraat; dit geeft de hoogste N-werking en de laagste emissie (CBGV, 2018). Het gebruik van ammoniumsulfaat op kalkrijke klei is af te raden. In het relatief koude en natte voorjaar kunnen ureum en NH <sub>4</sub> -houdende meststoffen juist wel gunstig zijn, evenals meststoffen met urease- of nitrificatieremmers. Daarnaast heeft het weer in de dagen na uitrijden (temperatuur en windsnelheid) effect op de emissie van NH <sub>3</sub> (Huijsmans et al., 2001; Søgaard et al., 2002). Bij het uitrijden hier op inspelen kan de emissie met 25% verminderen (Groenestein et al., 2019), maar bij te weinig neerslag kan emissie ook stijgen. Nachts of avonds bemesten is ook effectief. Onder deze categorie scharen we ook innovaties die te maken hebben met plaats-specifieke toediening gebruik makend van robots, AI in bemestingsadvisering, fertigatie en geïntegreerde bemestingspraktijken.
Innovatiepotentieel	10-35% reductie NH <sub>3</sub> bij toediening, 10-50% voor N <sub>2</sub> O, 0-5% voor N-uitspoeling en 0-10% voor P-afspoeling. Onder specifieke omstandigheden kan het effect op bepaalde verliezen oplopen tot 100% (zoals bijvoorbeeld het gebruik van RENURE of ammonium houdende vloeibare meststoffen die als vloeistof wordt geïnjecteerd onder de graszode).
Pollution swapping	Geen mits de gegeven N-gift is afgestemd op de N-behoefte van het gewas
Toepasbaarheid	Alle grondsoorten
Inpasbaarheid	Groot. Weersafhankelijk bemesten is een zeer grote uitdaging want het moet passen met de andere werkzaamheden. De capaciteit van de loonwerker moet passen en de bodem moet geschikt zijn. Vereist vakmanschap van ondernemer.
Schaalniveau	perceel en bedrijf
TRL	Praktijkrijp (TRL9)
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ) De kosten zijn laag zolang er geen extra toedieningscapaciteit nodig is.

## Omzetten drijfmest in NEO-meststof, een stikstof-verrijkte N-meststof (N2 Applied)

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	Recent heeft het Noorse bedrijf N2 Applied een plasma-technologie ontwikkeld om stikstof in dierlijke mest om te zetten in nitraat en daarbij de pH van mest te verlagen. Hiermee kan de emissie van NH <sub>4</sub> bij toediening van mest met 90-95% worden verlaagd. De innovatie heeft een vergelijkbaar effect of CH <sub>4</sub> emissie.
Innovatiepotentieel	Tot 90% reductie van NH <sub>3</sub> bij mestopslag en mesttoediening, en 99% CH <sub>4</sub> emissiereductie.
Pollution swapping	Geen, mits de gegeven N-gift is afgestemd op de N-behoefte van het gewas. Er zijn nog twijfels rondom mogelijke effecten op N <sub>2</sub> O. Maatregel heeft positief effect op geurreductie. Er is ook sprake van eliminatie van pathogenen. Door plasmatechnologie wordt afhankelijkheid van kunstmest kleiner. Er is ook betere precisiebemesting nodig omdat de werking meer lijkt op dat van kunstmest. Hiermee kan ook uitspoeling worden verminderd.
Toepasbaarheid	Alle grondsoorten. De methodologie vergt nog afstemming met beleidsmatige categorieën van mest in relatie tot de inzetbaarheid ervan op bedrijven.
Inpasbaarheid	Groot.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Marktintroductie heeft plaatsgevonden en product is technisch en commercieel gereed (TRL 8-9). Er vindt nog wel verdere verbetering van efficiëntie plaats.
Kosten	Categorie 1-2. (10-20 ofwel >20 euro per kg N-NH <sub>3</sub> afhankelijk van afschrijvingstermijn). De investering is € 250.000 tot € 275.000 per unit, en een unit kan de mest van 100 tot 200 koeien verwaarden. Uitgaande van een periode van 5 jaar en een bedrijf van 150 koeien, komt de investering neer op 35 euro per kg NH <sub>3</sub> . Dit is nog exclusief de energievraag, waarbij 35 tot 40 kWh per kilo stikstof nodig is.

## Aanzuren van mest in stal / opslag

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	Mest is van nature basisch. Als de pH van de mest wordt verlaagd daalt de ammoniakemissie. Bij een pH van 5,5 is de NH <sub>3</sub> -emissie gering. Toevoegen van een (sterk) zuur verlaagt de NH <sub>3</sub> -emissie in de stal en bij toediening. Ook wordt methaan uit opgeslagen mest gereduceerd, met 50 tot 100%. Het gebruik van zwavelzuur brengt een risico voor de bodem- en grondwaterkwaliteit met zich mee zodra het wordt toegediend. Een te hoog zwavelgehalte in het gras, kan een negatief effect op de koeien hebben. Het remt de benutting van zowel selenium als koper. Ook kan te zure mest zorgen voor corrosie en aantasting van beton en machines.
Innovatiepotentieel	40-70% voor NH <sub>3</sub> en 50-90% voor CH <sub>4</sub> op bedrijfsniveau (reductie in zowel stal als bij mesttoediening)
Pollution swapping	Uitspoeling / accumulatie van zwavel in de bodem bij gebruik van zwavelzuur. Mest moet worden gemixt om ontstaan H <sub>2</sub> S te voorkomen.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven.
Inpasbaarheid	Groot. Vergt enige vakmanschap van de ondernemer, en is daardoor niet voor alle bedrijven daadwerkelijk geschikt.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Praktijkrijp buiten Nederland (TRL9), maar in Nederland in onderzoek (TRL2-3).
Kosten	Categorie 3 (5-10 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ). Jaarkosten kunnen oplopen door negatieve effecten op beton in kelders, en gebruikte materieel.

### Biologisch aanzuren van mest in stal / opslag (in combinatie met vergisten)

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	Mest is van nature basisch. Als de pH van de mest wordt verlaagd daalt de ammoniakemissie. Bij een pH van 5,5 is de NH <sub>3</sub> -emissie gering. Toevoegen van een (sterk) zuur verlaagt de NH <sub>3</sub> -emissie in de stal en bij toediening. Bij biologisch aanzuren produceren bacteriën melkzuur in de mest. Met makkelijk afbreekbare koolstofverbindingen en of organische zuren wordt het proces op gang gebracht. Dit biologisch aanzuren van mest biedt perspectief (Bussink & Rotterdam-Los, 2013) in het bijzonder in combinatie met vergisten tot groengas. Door de inkomsten uit de veel hogere gasproductie dan uit reguliere mest zijn de uiteindelijke kosten naar verwachting beperkt. Praktijkonderzoek is in uitvoering.
Innovatiepotentieel	40-70% voor NH <sub>3</sub> en 50-90% voor CH <sub>4</sub> op bedrijfsniveau (reductie in zowel stal als bij mesttoediening)
Pollution swapping	Positief effect op fosfaatverwerking.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven.
Inpasbaarheid	Groot. Vergt enige vakmanschap van de ondernemer, en is daardoor niet voor alle bedrijven daadwerkelijk geschikt.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Biologisch aanzuren zit in de praktijkonderzoekfase (TRL3).
Kosten	Categorie 4 (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ) en met subsidies op groen gas kan deze innovatie 5 tot 22 euro per m <sup>3</sup> mest opleveren (categorie 5). Deze innovatie vereist wel grote bedrijven (> 200 melkkoeien) of samenwerking tussen veehouders om de kosten betaalbaar te laten blijven.

### Stalvloeraanpassingen (mestschuiven, gescheiden opvang, extra robot, Koetoilet)

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	Door in de stal de contacttijd tussen feces en urine op de vloer te verkleinen, kan de emissie van NH <sub>3</sub> sterk worden verlaagd. Hiervoor zijn verschillende innovaties ontwikkeld en in ontwikkeling. Met <b>nieuwe mestschuiven</b> wordt urine en mest sneller verwijderd van de stalvloer. De maatregel is vooral toepasbaar voor de klassieke ligboxenstal (80 % van de bedrijven). Verwacht wordt een emissievermindering van 20% uit de stal. De maatregel is relatief duur (15 euro / kg NH <sub>3</sub> ; jaarkosten 20€ / koe). Effecten worden in de literatuur bediscussieerd en zijn daardoor onduidelijk. Mogelijk wel toepasbaar in combinatie met meer water over de vloer (is lopend onderzoek). Bestaande roostervloeren worden kunnen ook worden voorzien van een <b>rubberen topplaat</b> met een bolle vorm. Zo blijft er minder urine op de roosters staan, waardoor de emissie met 30% daalt. De maatregel is relatief duur (15 euro /kg NH <sub>3</sub> ; jaarkosten 32€ / koe). Het is goed voor de klauwgezondheid. Effectiviteit staat ook nog ter discussie. Het <b>koetoilet</b> is een zogenaamde krachtvoerbox waar een plasreflex bij de koe wordt opgewekt. De urine wordt direct onder de staart van de koe opgevangen en apart opgeslagen in een luchtdichte silo. Op die manier wordt ongeveer 1/3 van de urine, die een koe per dag uitscheidt, opgevangen; dat levert een ammoniakreductie op van 35%. Kosten bedragen 217 euro per kg NH <sub>3</sub> -reductie.
Innovatiepotentieel	0-50% emissiereductie voor NH <sub>3</sub> in de stal
Pollution swapping	Beperkt. Maatregelen die leiden tot minder NH <sub>3</sub> in de stal kunnen leiden tot een hogere emissie bij toediening omdat de mest meer TAN bevat.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven.
Inpasbaarheid	Groot. Is inzetbaar op alle gangbare ligboxenstallen.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Mestschuiven (TRL9), rubberen topplaat (TRL9) en koetoilet (TRL8-9).
Kosten	Categorie 1-2. (>10 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ). Bij renovatie redelijk kostbaar door kosten voor aanpassing aan vloer en extra mestschuiven. Bij nieuwbouw, afhankelijk van het gekozen stalsysteem, is de investering iets hoger dan gangbaar. Jaarlijks zijn er geringe onderhoudskosten om het stalsysteem blijvend te laten functioneren.

## VrijLevenStal

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	Door in de stal de contacttijd tussen feces en urine op de vloer te verkleinen, kan de emissie van NH <sub>3</sub> sterk worden verlaagd. In de VrijLevenStal wordt urine effectief afgevoerd via drainageslangen en door de bedding schoon te houden wordt de emissie van NH <sub>3</sub> verkleind (Hanskamp (2024)).
Innovatiepotentieel	22% emissiereductie voor NH <sub>3</sub> in de stal, potentie voor 0-5% voor CH <sub>4</sub> . Effect is onderbouwd op basis van beperkt aantal metingen, maar principe is procesmatig te onderbouwen (en vergelijkbaar met emissies in het veld). Betrouwbaarheid is voorsnog onbekend; er is geen emissiefactor bekend.
Pollution swapping	Mogelijk verhoging van N <sub>2</sub> O. Positieve winst op dierenwelzijn.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven.
Inpasbaarheid	Groot. Is inzetbaar op alle gangbare ligboxenstallen, maar vooral bij nieuwbouw.
Schaalniveau	Bedrijf
TRL	TRL9, direct inzetbaar
Kosten	Categorie 1-2. (>10 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## Methaanoxidatie

Stof	Methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	Opgeslagen mest produceert continu biogas, waarvan een groot deel uit methaan bestaat. Deze methaanemissie kan verminderd worden door het methaan te oxideren, oftewel door verbranding of omzetting door bacteriën. Methaan verandert hierdoor in koolstofdioxide. Oxideren van methaan door vuur (thermische oxidatie) staat bekend als 'affakkelen'. Hiermee kan 50 tot 90% van de methaanemissies worden verminderd. Voor de veehouderij bestaan nog geen praktijkrijpe installaties en er is een vergunning nodig. Oxidatie kan ook plaatsvinden met behulp van bacteriën. Deze bacteriën bevinden zich in de grond (bijv. in een bodemfilter) of kunnen bovengronds op dragermateriaal geplaatst worden (een <b>biofilter</b> ). Mest wordt in een gasdichte opslag opgeslagen; van daaruit wordt het geproduceerde biogas afgevangen en het biofilter in geblazen. Daar komen methaan en zuurstof samen in een filterbed, waar methanotrofe bacteriën het methaan omzetten in CO <sub>2</sub> . Hier is een groot grondoppervlak voor nodig en het is niet bij elke grondsoort mogelijk. Er zijn twee varianten: een veldfiltervariant en een variant in containers; deze laatste variant is het duurst.
Innovatiepotentieel	50-90% emissiereductie voor CH <sub>4</sub> in de stal
Pollution swapping	geen
Toepasbaarheid	Alle bedrijven.
Inpasbaarheid	Beperkt. Er zijn nog weinig praktijkrijpe installaties.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Methoden in onderzoek en ontwikkeling (TRL4-6)
Kosten	Categorie 3-4. (0-10 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## Vergisten van mest i.c.m. mestbewerking

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	Deze maatregel kan worden toegepast bij rundvee- en varkensmest. Door mestvergisting komt extra methaan uit de mest vrij die vervolgens wordt opgevangen (biogas) en omgezet in energie. Co-vergisting is mestvergisting met bijproducten waardoor de energieopbrengst wordt verhoogd. Via vergisten kan de emissie van methaan uit opslag afnemen met 60-95% (de Mol en Hilhorst, 2003), en de N-kunstmestgift kan bij gebruik met 10% worden verlaagd. Vergisting kan worden gecombineerd met allerlei mestbewerkings-technieken (zoals vergisting) om ook emissie van NH <sub>3</sub> te verminderen.
Innovatiepotentieel	60-80% voor CH <sub>4</sub> en 30-40 voor NH <sub>3</sub> (mits gekoppeld aan striptechnieken)
Pollution swapping	Geen. De vergiste mest moet wel afgedekt worden opgeslagen of worden gecombineerd met andere technieken (aanzuren, strippen) om hoge NH <sub>3</sub> -emissies te voorkomen. Door dagontmesting (het snel scheiden van mest en urine) kan ook NH <sub>3</sub> sterk worden verlaagd. Benutting van silage als stalstrooisel draagt bij aan dierwelzijn en aan opbrengst uit vergisting.
Toepasbaarheid	Op grote bedrijven of in samenwerking zodat er dagelijks voldoende verse mest beschikbaar is. De kleinste installatie verwerkt minimaal 15.000 ton drijfmest. Voor bedrijven is het rendabel vanaf 250 melkkoeien. Mestverwerking en mestvergisting is zeer kapitaal- en kennisintensief.
Inpasbaarheid	Gemiddeld. Het vereist samenwerking met derden, traject is vergunningsplichtig.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Praktijkrijp (TRL9)
Kosten	Categorie 1. (>20 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ) of 5 (<0 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ). Een monovergister kost ergens tussen € 200.000 tot € 500.000, afhankelijk van type vergister en het vermogen. Vergisting is al rendabel bij circa 250 koeien. Noot: de exploitatiekosten zijn niet hoog en de inzet van deze innovatie kan op termijn zelfs leiden tot extra opbrengsten (Gollenbeek et al., 2022).

## Water sproeien op stalvloeren en spoelen van mestput en roosters

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), methaan (CH <sub>4</sub> ) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	Het spoelen van vloeren in de stal met water, reduceert de ammoniakemissie op twee manieren. Ten eerste blijft minder mest en urine op de vloeren liggen, waardoor daar minder ammoniak gevormd wordt. Daarnaast wordt de mest in de kelder verdund. Dat levert bij roostervloeren ook minder emissie vanuit de kelder op. Voorwaarde is wel dat het water regelmatig wordt toegediend en niet in één keer in de kelder terecht komt. Niet alleen de emissie van de vloer maar ook vanuit de put neemt af. Afhankelijk van de hoeveelheid water is 20-40% emissiereductie uit de stal te verwachten. Tegelijk daalt ook de emissie bij toedienen van mest met 5 a 10% op klei en veen afhankelijk van de hoeveelheid water. De maatregel is vooral toepasbaar voor de klassieke ligboxenstal (80 % van de bedrijven). De maatregel kost 15-20 euro / kg NH <sub>3</sub> . Daarbij is er vanuit gegaan dat er geen extra opslagcapaciteit hoeft te worden gebouwd. Door te combineren met beweiding is geen extra mestopslag nodig. Druppelsystemen zijn de helft goedkoper dan sproeien vanuit installaties langs de ligboxen. Er is ook een innovatief systeem ontwikkeld ( <b>Total Circulair Farm concept</b> ) dat via spoelen van mestputten in combinatie met mestscheiding het mogelijk maakt om NH <sub>3</sub> in de stal met 80% te verlagen (wel met N-verliezen via N <sub>2</sub> ).
Innovatiepotentieel	13-40% emissiereductie in de stal
Pollution swapping	Geen
Toepasbaarheid	Groot, op klassieke ligboxenstal
Inpasbaarheid	Goed. Is ook eenvoudig te combineren met andere maatregelen.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Innovatie geschikt voor demonstratie en praktijkrijp (TRL8-9)
Kosten	Categorie 1-2. (>15 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ) of 3 (5 - 10 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ) afhankelijk van de gekozen systemen.

## Plaatsing windsingels en herinrichting erf

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), methaan (CH <sub>4</sub> ) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	In het verleden is in Nederland gekeken naar het effect van aanbrengen van windsingels rondom boerderijen. Van Dijk et al. (2005) concluderen dat de invang van ammoniak 10 procent of meer zou kunnen bedragen. Het planten van bomen rond de boerderij wordt in het Verenigd Koninkrijk gezien als een aanvullende maatregel om de emissies van ammoniak naar de atmosfeer te verminderen. Het duurt zeker tien jaar voordat substantiële effecten worden bereikt, maar die kunnen oplopen tot boven de 10 procent van de totale boerderijemissie.
Innovatiepotentieel	0-20% vastlegging NH <sub>3</sub> , potentieel 5-10% reductie N-uitspoeling en 0-1% P-afspoeling
Pollution swapping	Geen. Levert positieve bijdrage aan biodiversiteit en landschapsbeleving. In NL nooit van de grond gekomen omdat het de natuurlijke ventilatie van stallen zou beperken
Toepasbaarheid	Groot.
Inpasbaarheid	Goed. Is ook eenvoudig te combineren met andere maatregelen.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Onderzoek en proof of principle (in Nederland) of praktijkrijp (in het buitenland)
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## Dagontmesting plus mestbewerking

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), methaan (CH <sub>4</sub> ) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	Bij dagontmesting wordt de mest dagelijks verwijderd, vaak via een computergestuurd systeem. Dagontmesting heeft de potentie om een reductie van ammoniakemissie van zestig tot 85 procent te bewerkstelligen. Voor methaan kan dit oplopen tot een reductie van negentig procent. Na deze verwijdering kan de mest wordt bewerkt (gescheiden) of vergist. Mestbewerking is het behandelen van dierlijke mest, zodat deze beter als mest kan worden gebruikt, of voor andere functies geschikt wordt. Eindproducten zijn bijv. in-gedikte rundveemest en een stikstofkunstmestvervanger.
Innovatiepotentieel	30-85% reductie in NH <sub>3</sub> en 60-80% in CH <sub>4</sub> wanneer gecombineerd met vergisting.
Pollution swapping	Geen
Toepasbaarheid	Alle bedrijven
Inpasbaarheid	Goed. Mestverwerking en mestvergisting is zeer kapitaal- en kennisintensief.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Wordt in de praktijk geprobeerd. TRL level varieert 7-8 (demonstratie)
Kosten	Categorie 1. (>20 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## Luchtwassers

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), methaan (CH <sub>4</sub> ) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	Een luchtwasser bestaat uit een poreus dragermateriaal waar de stallucht doorheen wordt geleid waarbij het aanwezige NH <sub>3</sub> uit de lucht wordt verwijderd. Er zijn verschillende typen luchtwassers: chemische wassers waarin het water is aangezuurd om ammoniak te binden, biologische wassers waarin bacteriën de vervuiling afbreken en gecombineerde wassers. In de gecombineerde luchtwasser (of: combi-wasser) worden meerdere was-stappen gecombineerd (na elkaar geplaatst). Het te verwachten rendement voor de verwijdering van ammoniak hangt af van het type luchtwasser en de toepassing. Chemische luchtwassers hebben een ammoniakrendement 70-95% en biologische luchtwassers een rendement van 70%. Voor combi-wassers wordt uitgegaan van een rendement van 70-90%. Alle genoemde reductiepercentages gaan uit van een situatie van een dichte stal, waarbij nagenoeg alle stallucht langs de luchtwasser wordt geleid. De huidige melkveehouderij kent momenteel vooral open stallen. Luchtwassers hebben geen effect op CH <sub>4</sub> .
Innovatiepotentieel	70-90% vastlegging NH <sub>3</sub> bij goed functioneren
Pollution swapping	Geen.
Toepasbaarheid	Alle gesloten stalsystemen
Inpasbaarheid	Goed. Is ook eenvoudig te combineren met andere maatregelen. Vergt wel onderhoud om ze effectief te laten blijven.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Praktijkrijp (TRL9)
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).



## Koelen van mest

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), methaan (CH <sub>4</sub> ) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	Temperatuur is een van de knoppen waarmee emissiegerelateerde processen in de mest gestuurd kunnen worden. Bij een temperatuur van 8 graden Celsius zijn urease- en methaan-producerende bacteriën nagenoeg niet actief. Hiermee kan 50-85% van NH <sub>3</sub> en 40-80% van CH <sub>4</sub> worden verlaagd. Technologie zit in testfase en er wordt praktijkervaring opgedaan op praktijkbedrijven. In 2018-19 zijn op twee melkveebedrijven in de provincie Groningen testen uitgevoerd met twee melkveehouders (Zandhoeve Holsteins in Hellingum en Melkveehouderij Ballingheim VOF in Holwierde), ondersteund door een groep bedrijven (L'orèl Consultancy, Geothermica, en Agri-Comfort). Monitoringsresultaten lieten zien dat ammoniakemissie hoger was in de gekoelde dan in de niet-gekoelde mestkelder, terwijl de methaanemissie vrijwel halveerde (bedrijf 1) ofwel verdriedubbelde (bedrijf 2). De variatie in effecten hing sterk samen met de technische implementatie van het koelsysteem.
Innovatiepotentieel	40-80% in CH <sub>4</sub> bij goede uitvoering.
Pollution swapping	Geen
Toepasbaarheid	Alle bedrijven in potentie. Verdere uitwerking vergt nog onderzoek.
Inpasbaarheid	Goed.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Methodiek is nog in ontwikkeling (TRL2-3).
Kosten	In ontwikkeling

## Mixen / beluchten van mest

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), methaan (CH <sub>4</sub> ) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	De uitwisseling van NH <sub>3</sub> tussen de mest en de lucht hangt af van de fysische eigenschappen van de toplaag van de mest. Luchtmixen vermijdt laagvorming in de mest en beïnvloedt de chemie op het grensvlak van mest en lucht zodanig dat de emissie daalt (o.a. een pH daling). Emissiereducties van 30% lijken haalbaar (Groenestein et al., 2019). Het toevoegen van lucht moet op een gecontroleerde manier gebeuren, dan is er geen risico op N <sub>2</sub> O-emissie. Bijkomende voordeel is dat de CH <sub>4</sub> -emissie afneemt. De kosten zijn vrij hoog met ongeveer 20 euro per kg NH <sub>3</sub> . Door het beluchten van mest kan de methaanemissie (uit mest) in melkveestallen met 57% gereduceerd worden (Amon et al., 2006a; Šebek et al., 2016 en referenties daarin). Ten aanzien van ammoniakemissie heeft recent onderzoek laten zien dat het mixen van mest (met twee luchtsystemen en een mechanische dompelmixer) in een driejarig experiment niet tot reducties van NH <sub>3</sub> leidt (Van Dooren et al., 2019). In het verleden hadden Calvet et al. (2017) zelfs een toename van ammoniakemissie met 20% gerapporteerd. Op basis van deze data zou geconcludeerd kunnen worden dat hier aanvullende maatregelen vereist zijn t.a.v. de ammoniakemissie.
Innovatiepotentieel	0-70% reductie in NH <sub>3</sub> en 50-60% in CH <sub>4</sub> bij goede uitvoering.
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering. Mogelijk hogere NH <sub>3</sub> en N <sub>2</sub> O verliezen.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven in potentie. Verdere uitwerking vergt nog onderzoek.
Inpasbaarheid	Goed. Lijkt relatief eenvoudig te implementeren.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Methodiek is nog in ontwikkeling (TRL2-3).
Kosten	Categorie 1. (>20 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## Optimalisatie RE in rantsoen

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), methaan (CH <sub>4</sub> ) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	De emissie van NH <sub>3</sub> is direct gerelateerd aan het stikstofgehalte in urine en mest. Door verlaging van het eiwitgehalte – als ook een hoger zoutgehalte in het rantsoen – is het mogelijk om het ureumgehalte in de urine en daarmee de emissie van NH <sub>3</sub> te verlagen. Voederproeven door Schothorst Feed Research en modelberekeningen met DYNAM (Bussink et al., 2017) toegepast op diverse praktijkbedrijven laten zien dat een verlaging van het eiwitgehalte met 6 g kg <sup>-1</sup> zorgt voor 10% minder NH <sub>3</sub> . Zo lang het eiwitgehalte boven een bepaalde drempelwaarde blijft, zijn geen negatieve effecten van deze maatregel op de melkproductie te verwachten (resultaten proeftuin veenweide). De verteerbaarheid van het rantsoen is van belang voor de emissie van methaan. Vervanging van kuilgras door energierijke producten zorgt voor een betere energie/eiwit-balans en een betere verteerbaarheid. In de rantsoenen bij melkvee is 5% reductie aan eiwit mogelijk, zonder dat er risico ontstaat voor productie en gezondheid van de dieren Een dergelijke reductie leidt tot een vermindering van stikstof in de urine van 6-8%. Noot dat dit effect afhangt van de uitgangssituatie; bij een startwaarde van 175 RE kan het gehalte zeker dalen tot 145 zonder verlies aan melkproductie zolang er voldoende VEM in de kuil aanwezig is. Bij systemen met beweiding zitten rantsoenen vaak boven de 16,5%. Bij nacht en nacht opstallen en TMR zijn soms gehalten gemeten van 14,5% ruw eiwit. Er lopen vele project om het eiwitgehalte in het rantsoen te verlagen. Door optimalisatie van het rantsoen is ook de emissie van methaan te verlagen, waarbij CH <sub>4</sub> en NH <sub>3</sub> niet altijd tegelijkertijd verminderd kunnen worden.
Innovatiepotentieel	0-20% reductie in NH <sub>3</sub> , 5-15% in CH <sub>4</sub> en 0-10% voor N <sub>2</sub> O en N- en P-emissies naar water.
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering. Mogelijk hogere NH <sub>3</sub> en N <sub>2</sub> O verliezen.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven in potentie. De grootste uitdaging ligt bij bedrijven die alleen gras als ruwvoer hebben. Die hebben minder mogelijkheden om bij te sturen en zullen vooral scherp moeten sturen op de N-bemesting, rekening houdend met het weer en de groeiomstandigheden (dynamisch bemesten). Monitoring van de graskwaliteit met sensing systemen kan daarbij helpen of overschakelen naar dag en nacht opstallen in combinatie met TMR (maar at is ingrijpender in de bedrijfsvoering).
Inpasbaarheid	Goed. Deze maatregel kan snel worden ingevoerd, is vergeleken met andere maatregelen niet duur en kan al meteen in het eerste jaar effect sorteren. Wel vraagt invoering managementaandacht, een goede voorlichting en gerichte hulp.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp, en deels in demonstratie (TRL8-9)
Kosten	Categorie 5. (<0 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## Optimalisatie beweiding

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), methaan (CH <sub>4</sub> ) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	Bij beweiding infiltreert urine in de bodem en komt de omzetting van ureum naar ammoniak langzamer op gang dan op een stalvloer doordat er minder urease aanwezig is. De emissiefactor voor urinestikstof tijdens beweiding is 4%. Een stijging van het aantal weideuren kan daardoor de emissie op bedrijfsniveau met 5-10% doen dalen (Oenema en Verloop, 2018) omdat de stalemissie wordt verlaagd en ook de veldemissies dalen. Een voorwaarde is wel dat het RE-gehalte in het rantsoen niet gaat stijgen. Ammoniak kan door goede beweidingmanagement met 10-50% lager liggen, en emissies voor CH <sub>4</sub> (hoewel minder goed onderbouwd) kunnen met 0-10% dalen. Denk aan specifieke beweidingssystemen en uitgekiend graslandmanagement zoals stripgrazen of 'Nieuw NL-weiden'. Koeien die vers jong gras eten, produceren namelijk minder methaan dan koeien die ouder gras of kuilgras eten (maar wel meer NH <sub>3</sub> door het hoger eiwit). Toepassing van (meer) weiden is afhankelijk van beschikbaarheid van een voldoende beweibare oppervlakte.
Innovatiepotentieel	4-50% reductie in NH <sub>3</sub> , 0-10% in CH <sub>4</sub> en 0-20% voor N <sub>2</sub> O
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering. Beweiding in het najaar kan leiden tot ongewenste N <sub>2</sub> O emissies als ook uit- en afspoeling van nitraat (NO <sub>3</sub> ).
Toepasbaarheid	Alle bedrijven met mogelijkheden tot beweiding, met grond.
Inpasbaarheid	Goed. Deze maatregel kan snel worden ingevoerd, is vergeleken met andere maatregelen niet duur en kan al meteen in het eerste jaar effect sorteren. Wel vraagt invoering managementaandacht, een goede voorlichting en gerichte hulp.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp, en deels in demonstratie (TRL8-9)
Kosten	Categorie 5. (<0 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## Voeradditieven

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), methaan (CH <sub>4</sub> ) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	Er zijn voeradditieven beschikbaar die methaanvorming in de pens voorkomen en/of beperken. Het <b>product 3-NOP</b> (Bovaer, een additief van DSM) inactieveert het enzym dat in de pens van de koe, waterstof en koolstof omzet in methaan, wat een reductie van de enterische CH <sub>4</sub> van 30% oplevert. De <b>zeewiersoort Asparagopsis</b> spp bevat stoffen (broomchloormethaan, bromoform en chloroform), die ook het enzym inactiveren dat CH <sub>4</sub> produceert in de pens van de koe. Dit kan tot > 90% van het enterische methaan reduceren. Wel kan gewenning in de koe optreden, waardoor het effect verminderd wordt. Bromoform is giftig bij inademing en aanraking met de huid. De stof is terug te vinden in de melk en urine van de runderen. Ook kan bromoform zorgen voor schadelijke bijwerkingen voor de koe zelf. Mogelijk zijn er wel andere zeewieren waarvoor dit niet geldt; dit is in onderzoek
Innovatiepotentieel	5-30% reductie in NH <sub>3</sub> , 20-25% in CH <sub>4</sub>
Pollution swapping	Bovaer lijkt geen nadelige effecten te hebben. Praktische implementatie (qua frequentie, toediening, etc.) ligt nog onder discussie. Het gebruik van Asparagopsis kan mogelijk schadelijke gevolgen hebben voor diergezondheid.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven. Borging ten behoeve van vergunningsverlening is een uitdaging.
Inpasbaarheid	Goed. Het is gemakkelijk toe te passen in de bedrijfsvoering, mits de toepassing van een voeradditief is toegestaan. Indien een veehouder een voer-mengwagen heeft, is het additief gemakkelijk mee te mengen. Er is mogelijk weerstand tegen onnatuurlijke oplossingen bij boer en consument.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Bovaer is in productie (TRL9) terwijl dat voor ASparagopsis nog in demonstratiefase zit (TRL7-8) en deels zelfs in development (TRL4-6)
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## Verhoog leeftijd dieren

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), methaan (CH <sub>4</sub> ) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	Jongvee draagt bij aan emissie, maar is niet productief. Minder jongvee werkt dus emissie-reducerend zonder dat het productie beïnvloedt. Er is een sterke relatie tussen deze oplossing en levensduurverlenging van koeien. In de praktijk is het voor de veehouder zoeken naar een juiste balans tussen een lange levensduur, persistentere koeien, hoge productie, een uitgekiend selectiebeleid bij in-seminatie en jongvee dat wel of niet wordt aangehouden. Via deze maatregel is een beperkte reductie van NH <sub>3</sub> en CH <sub>4</sub> mogelijk. Als op bedrijfsniveau 10 tot 20% minder jongvee is, neemt de ammoniakemissie op bedrijfsniveau enkele procenten af (Rougoor en Van der Schans, 2022). Als er bij de bemesting de N-aanvoer goed wordt afgestemd op de beschikbare mest, kan het ook positieve gevolgen hebben voor waterkwaliteit (is indirect effect)
Innovatiepotentieel	0-5% reductie in NH <sub>3</sub> , 0-5% in CH <sub>4</sub> en 0-10% voor waterkwaliteit
Pollution swapping	geen
Toepasbaarheid	Alle bedrijven.
Inpasbaarheid	Goed. Het is gemakkelijk toe te passen in de bedrijfsvoering.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp (TRL9)
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## Graslandbeheer (klaver, scheuren) plus bemesting

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), methaan (CH <sub>4</sub> ) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	Door de teelt van klaver is minder N-kunstmest nodig, waardoor de emissie van N <sub>2</sub> O wordt verlaagd maar het risico op NO <sub>3</sub> verliezen wordt vergroot. Er is geen effect van klaver op de emissie van CH <sub>4</sub> . Goed graslandbeheer kan de N-bemesting met 10% verlagen, en daarmee ook de gekoppelde verliezen naar lucht (N <sub>2</sub> O) en water (nitraat). Door op het juiste moment te bemesten (rekening houdend met het weer en de bodemeigenschappen) kan de NH <sub>3</sub> -emissie sterk dalen. Door in het voorjaar te scheuren (en niet in het najaar) wordt de emissie met N <sub>2</sub> O gehalveerd. Bij pleksgewijs scheuren kan de N <sub>2</sub> O emissie met 90% worden verminderd, en via doorzaaien in plaats van scheuren kan de N <sub>2</sub> O emissie als gevolg van de ondergeploegde graszode vrijwel naar 0 worden teruggebracht. Een vergelijkbaar effect treedt op voor de N-uitspoeling naar het grondwater; door minder te scheuren wordt het risico op nitraatuitspoeling sterk gereduceerd.
Innovatiepotentieel	0-20% reductie in NH <sub>3</sub> bij toediening, 50-100% in N <sub>2</sub> O en 0-45% voor N-uitspoeling
Pollution swapping	Geen. Aanname is wel dat in de bemestingspraktijk rekening wordt gehouden met het effect van weer, en het vrijkomen van stikstof uit de graszode. Het rantsoen van melkvee kan hierdoor eiwitrijker worden met als gevolg hogere beweidingsverliezen. Hoewel studies emissiereducties voor NH <sub>3</sub> inschatten tot 50% is dat alleen realiseerbaar onder extreem positieve omstandigheden. Onder realistische omstandigheden is dit effect substantieel lager, en maximaal 20%.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven met gras in het bouwplan.
Inpasbaarheid	Goed. Het is gemakkelijk toe te passen in de bedrijfsvoering.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp (TRL9)
Kosten	Categorie 5. (<0 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## Bufferstroken

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O) en nitraat (NO <sub>3</sub> )
Omschrijving	Bufferstroken zijn delen van het perceel die niet worden bemest (en waarbij het beheer op een andere manier vorm krijgt met het oog op waterkwaliteit, biodiversiteit of weidevogels). Deze bufferstroken zorgen als end-of-pipe maatregel ook voor minder afspoeling van N en P naar het oppervlaktewater.
Innovatiepotentieel	0-5% voor NH <sub>3</sub> bij niet bemeste bufferstroken langs elk perceel, 0-5% in N <sub>2</sub> O bij toediening, en 0-60% voor N-emissie naar het watersysteem
Pollution swapping	Geen.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven. Is sinds 2023 verplicht op alle landbouwbedrijven tot 4% van het perceelsareaal. Is niet of beperkt effectief op gedraineerde percelen.
Inpasbaarheid	Goed. Het is gemakkelijk toe te passen in de bedrijfsvoering, maar is door de hoge grondprijs, en de gekoppelde korting op de gebruikruimte van meststoffen, een kostbare maatregel.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp (TRL9). Beheer van de bufferstrook is nog niet goed uitgewerkt.
Kosten	Categorie 2. (10-20 euro per kg N-uitspoeling). Exacte bijdrage hangt samen met kostprijs grond en grondgebondenheid melkveehouderijbedrijf.

## Bodembeheer (ploegen, vanggewassen, uitmijnen)

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), nitraat (NO <sub>3</sub> ) en fosfor (P)
Omschrijving	Een goed beheerde bodem zorgt voor optimale omstandigheden voor gewasgroei en bodemleven. In de praktijk betekent dit ook een hogere N-benutting, en daarmee lagere N-emissies naar lucht (N <sub>2</sub> O) en het watersysteem (nitraat, N-totaal). Een hogere gewasopbrengst zorgt bij een vergelijkbare bemesting (op langere termijn) ook voor een lagere P-belasting van het oppervlaktewater. Waar de berekende effecten in het verleden konden oplopen tot 50% zijn deze effecten anno 2023 vrijwel altijd kleiner dan 5% (Groenendijk et al., 2016). Het gaat hier om maatregelen als ondiepe grondbewerking, inzet van vaste rijpaden, het gebruik van ruige mest, inzet van diepwortelende gewassen, het gebruik van machines met lagere bandenspanning, het hergebruik van gewasresten, de inzet van vanggewassen, en de verbetering van de bodemkwaliteit.
Innovatiepotentieel	0-5% reductie in N <sub>2</sub> O en N- en P-emissies naar het watersysteem. Effecten op N zijn snel 5-10% hoger dan voor P in verband met het bufferend vermogen van de bodem.
Pollution swapping	geen
Toepasbaarheid	Alle grondgebonden bedrijven.
Inpasbaarheid	Goed.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp (TRL9). Beheer van de bufferstrook is nog niet goed uitgewerkt.
Kosten	Categorie 5. (<0 euro per kg N-verliezen). Maatregel is onderdeel van de Goede Landbouwpraktijk, en kan ook geld opleveren. Bij het uitmijnen lopen hier kosten rondom mestafzet vanwege de negatieve prijs van dierlijke mest.

Maatregelen die op middellange termijn (1-5 jaar) praktijkrijp zijn

## Nieuwe Stalsystemen met mestscheiding / bewerking

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	<p>Stalsystemen zijn volop in ontwikkeling, er wordt gewerkt aan veel innovaties. Voorbeelden hiervan zijn het CowToilet (HansKamp) en de Gazoo (JOZ) en de Lely Sphere (apart opgenomen als innovatie, zie hieronder).</p> <p>De beste stalsystemen geven tot 50% minder emissie dan de klassieke ligboxenstal. Doel van deze <b>systemen is om urine snel af te voeren</b> naar een afgesloten ruimte al dan niet gescheiden van de mest. De afgelopen jaren is veel geïnvesteerd in emissiearme stallen en zijn een deel van de stallen ook vernieuwd. Naast grootschalige vernieuwing zijn diverse kleinere maatregelen inzetbaar zoals het gebruik van afdichtflappen in de roosterspleten. Aanpassingen in stallen zijn relatief duur in vergelijking met de andere maatregelen; wel geeft borging van actieve stalsystemen meer inzicht en zekerheid.</p> <p><b>Verkleining van het emitterend mestoppervlak</b> is effectief om de vorming en daarmee de emissies van ammoniak te verminderen. In stallen met roostervloer zijn twee emitterende oppervlaktes: de (rooster)vloer en de onderliggende mestopslag. Hoe groter het oppervlak, hoe meer ammoniak zal worden gevormd. Een verkleining van het oppervlak met 10% zorgt voor 8-10% minder ammoniakemissie. Het principe wordt vooral toegepast in de varkenshouderij, maar gaat ook op in de melkveehouderij. Het is goed mogelijk om bij nieuwbouw bijvoorbeeld de oppervlakte van mestopslagen te beperken. Het beperken van het emitterend oppervlakte door het mestgedrag van dieren lijkt in de melkveehouderij beperkt t.o.v. de varkenshouderij.</p> <p><b>Mestbewerking</b> is het behandelen van dierlijke mest, zodat deze beter als mest kan worden gebruikt, of voor andere functies geschikt wordt. Frequente mestafvoer uit de stal en/of directe scheiding zijn in feite de eerste stappen in het mestbewerkingsproces, door afvoer van mest uit de stal is verdere bewerking mogelijk. Lucht afzuigen en de stikstof hieruit terugwinnen draagt bij aan verlaging ammoniakemissies. De volgende technieken kunnen potentieel worden gecombineerd: frequente verwijdering van drijfmest uit de stal, indamping en terugwinning van ammoniak. Eindproducten zijn ingedikte rundveemest en een stikstofkunstmestervanger.</p>
Innovatiepotentieel	8-50% reductie in NH <sub>3</sub>
Pollution swapping	geen
Toepasbaarheid	Alle bedrijven, vooral bij bedrijven die mogelijkheid hebben tot nieuwbouw.
Inpasbaarheid	Goed.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	In demonstratie (TRL7-8) en deels ook nog in ontwikkeling (TRL2-3 tot 4-6).
Kosten	Categorie 1. (>20 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## De Lely Sphere als nieuw stalsysteem

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	Stalsystemen zijn volop in ontwikkeling, er wordt gewerkt aan veel innovaties. De Sphere heeft een Rav-erkenning op emissiefactor 5 kg NH <sub>3</sub> per dierplaats per jaar (reductie gemiddeld 77% in de stal) rekening houdend met een onzekerheidsmarge benodigd voor vergunningsverlening. Dit gebeurt in de stal door snel scheiden van mest en urine, de inzet van luchtwassers. Aanpassingen in stallen zijn relatief duur in vergelijking met de andere maatregelen. Borging van actieve stalsystemen geeft inzicht en zekerheid.
Innovatiepotentieel	77% reductie in NH <sub>3</sub> in de stal (definitieve emissiefactor in maart 2023)
Pollution swapping	Geen
Toepasbaarheid	Alle bedrijven, ook in bestaande stallen voorzien van een roostervloer.
Inpasbaarheid	Goed.
Schaalniveau	Bedrijf
TRL	Praktijk toepasbaar, met 20 installaties in Nederland (TRL9).
Kosten	Categorie 1. (>20 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## Diepe mestinjectie

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en lachgas (N <sub>2</sub> O)
Omschrijving	Door mest op grasland te injecteren op een diepte van 15-20 cm daalt de emissie tot minder dan 2% (Huijsmans en Bussink 1990, Huijsmans et al., 1997). Injectie is een bewezen technologie (FOMA onderzoek, Loonen et al., 1992), maar brede(re) toepassing vereist aanpassing van huidige machines. Bijkomend voordeel van is dat meer mest in het voorjaar wordt toegediend. De N-benutting uit mest is het hoogst van alle technieken. De techniek vergt meer trekkracht en kan gecombineerd worden met sleepslangen. Injectie units kunnen relatief snel gebouwd worden. De meerkosten zijn zeer laag. Wordt de betere N-benutting meegerekend dan is deze maatregel gunstig voor het saldo. Bijkomend voordeel is dat de verdeling van de dierlijke mestgift verschoven kan worden naar een grotere gift in het voorjaar en lagere giften later in het jaar. Dit verhoogt de N-werking en beperkt de verliezen naar het milieu. De techniek is met name geschikt voor zand en (lichte) kleigronden (Bussink, 2019).
Innovatiepotentieel	95% reductie in NH <sub>3</sub> en 0-10% voor N <sub>2</sub> O als bij de bemesting rekening wordt gehouden met de hogere N-werking
Pollution swapping	Geen. Het effect op bodemleven is destijds beperkt onderzocht, en werden toen verwaarloosbaar geacht (Huijsmans et al, 2008).
Toepasbaarheid	Alle bedrijven op minerale gronden
Inpasbaarheid	Goed. Het is gemakkelijk toe te passen in de bedrijfsvoering. Vergt nog aanpassing van bestaande machines.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	In ontwikkeling (TRL4-6) en vroeger was het praktijkrijp (TRL9)
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

## Fokkerij

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	Uit eerder onderzoek bleek dat er koeien zijn die van nature minder methaan uitstoten. Door het selecteren op dieren die van nature minder methaan/ammoniak uitstoten dan soortgenoten kan een blijvend lagere emissie worden gerealiseerd. Er wordt daarbij gebruik gemaakt van de natuurlijke variatie in de veestapel. Dit zou op termijn kunnen leiden tot een reductie van methaanemissies van 1% per jaar tot 2050. Voor melkveeum zijn al fokwaardes beschikbaar en in de praktijk kan hier al door melkveehouders op worden gefokt.
Innovatiepotentieel	0-10% reductie in NH <sub>3</sub> en 1-15% voor CH <sub>4</sub>
Pollution swapping	Geen.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven
Inpasbaarheid	Goed. Vergt lange-termijn perspectief
Schaalniveau	Bedrijf en landbouwsector
TRL	In ontwikkeling (TRL4-6)
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ) in verband met geleidelijke ontwikkeling.

## Maximaliseren van aantal GVE per hectare

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	Het maximaliseren van het aantal toegestane Grootvee-eenheden (GVE) in de melkveehouderij kan bijdragen aan een krimp van de veestapel, en daarmee emissiereductie. De GVE-norm kan op verschillende manieren worden toegepast in relatie tot de intensiteit van het bedrijf, de diersector, of de locatie van het bedrijf in relatie tot nabijgelegen natuur.
Innovatiepotentieel	0-30% reductie in NH <sub>3</sub> en voor CH <sub>4</sub> afhankelijk van het aantal GVE
Pollution swapping	Beperkt. Het risico van een GVE-norm is dat dit maximalisatie van melkproductie per koe stimuleert, met mogelijk risico's voor diergezondheid en dierwelzijn tot gevolg mits de teruggang in financiële inkomsten wordt gecompenseerd.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven
Inpasbaarheid	Goed. Vergt lange-termijn perspectief
Schaalniveau	Bedrijf en gebied
TRL	Praktijkrijp (TRL9). Vergt omschakeling voor bedrijven die willen / moeten extensiveren.
Kosten	Categorie 1. (>20 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ) voor overgang naar extensievere bedrijfsvoering. De jaarkosten zijn daarna neutraal, dat wil zeggen er is een verdienmodel voor extensievere bedrijfssystemen waarbij de totale kosten verminderen.

## Alternatief landgebruik

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), methaan (CH <sub>4</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O, nitraat (NO <sub>3</sub> ) en fosfor (P)
Omschrijving	De veehouderij kan in de toekomst meer gebruik van innovatieve teeltsystemen waarbij het bedrijfsinkomen niet alleen meer afhangt van de geproduceerde melk of vlees, maar ook van alternatieve eiwitbronnen of landgebruik. Innovaties zijn: <b>Eiwitten brouwen met natuurlijke fermentatie</b> (Farmless). Wereldwijd blijft de vraag naar vlees, zuivel en andere dierlijke eiwitten de komende decennia doorgroeien. Door natuurlijke fermentatie van eiwitten op te schalen kan Nederland op een duurzame manier helpen om de wereld te voorzien in een toenemende vraag naar eiwitten. Via fermentatie kan elders ter wereld de eiwitproductie worden verlaagd, en de daarmee samenhangende emissies van CO <sub>2</sub> , stikstof en fosfaat. De bijdrage aan minder emissies in Nederland is onbekend. Telen van <b>vlinderbloemigen als alternatief eiwitgewas</b> voor humane consumptie (de Nieuwe Melkboer BV). De daadwerkelijke bijdrage aan minder emissies in Nederland is niet gekwantificeerd.
Innovatiepotentieel	onbekend
Pollution swapping	Onbekend, omdat het sterk afhangt van de specifieke casus, en de positie van het product in nationale en internationale markt.
Toepasbaarheid	Stoppende(?) bedrijven
Inpasbaarheid	Lastig. Vergt lange-termijn perspectief
Schaalniveau	Bedrijf en landbouwsector (gebied)
TRL	In onderzoek tot proof of principle in Nederland (TRL2-3)
Kosten	(nog) niet te definiëren

## Gras raffinage (Grassa)

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), methaan (CH <sub>4</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O, nitraat (NO <sub>3</sub> ) en fosfor (P)
Omschrijving	Gras is het grootste eiwitgewas van Nederland. Met de bewezen technologie van <b>gras raffinage</b> kan 50% van het graseiwit worden gewonnen en gebruikt worden als alternatief voor geïmporteerde soja in voedsel voor mens en dier. De voedingswaarde van graseiwit is hoger dan soja en de verteerbaarheid voor mensen is gelijk aan die van soja. Gebruik van eiwit gereduceerde ontsloten gras is een voerspoor maatregel en zorgt voor eiwitverlaging in het rantsoen. Het percentage inclusie van ontsloten gras bepaalt de verlaging van stikstof, maar met ca 50% vervanging van reguliere kuil kan tot 30% stikstof emissie worden gereduceerd. De gelijke kwantiteit en kwaliteit van de melk is in diverse onderzoeken en praktijkproeven (o.a. van de Dairy Campus, Zegveld, Ierland en Denemarken) aangetoond. Recente berekeningen van WU ten behoeve van de KLW maakten duidelijk dat bij 21% vervanging van de graskuil de stikstofexcretie met 5% afnam (Migchels, persoonlijk commentaar).
Innovatiepotentieel	10-30% NH <sub>3</sub> reductie
Pollution swapping	Bij 20% implementatie op bedrijven dan verdwijnt het mestoverschot. Door soja import te vervangen grote reductie van CO <sub>2</sub> uit krachtvoer.
Toepasbaarheid	Melkveehouderijbedrijven die gras inkuilen. Mogelijk ook akkerbouwbedrijven i.s.m. melkveehouders
Inpasbaarheid	Voor de melkveehouders wordt dit een managementmaatregel. Hiervoor moet een pers – raffinage infrastructuur opgezet worden.
Schaalniveau	Regio gebonden; decentrale persen (dicht)bij de boer; centrale raffinage faciliteiten a la melkfabrieken)
TRL	Persunit TRL 7-8; raffinage faciliteit TRL 9 (Deense faciliteit). Eerste Nederlandse faciliteit moet nog gebouwd worden. In 2025 worden in 4 verschillende provincies pers demonstraties gezet waarbij 100 boeren ca 300 ha verwerken tot ontsloten gras.
Kosten	Wordt een managementmaatregel voor de boer die geld oplevert op basis van vermeden eiwitaankoop, minder mestafzet en CO <sub>2</sub> reductie. Boer verdient ca €1700 per hectare: €700 betaald voor eiwit, €600 aan minder mest afzet (€15/m <sup>3</sup> x 40 m <sup>3</sup> ) en ca €400 CO <sub>2</sub> footprint reductie (25% van 19 ton CO <sub>2</sub> reductie x €85 /ton CO <sub>2</sub> ). Uitgaande van Gras raffinage complex welke 1,700 ha verwerkt, 2450 ton eiwit (70%) produceert per jaar welke wordt afgezet in de humane sector tegen een prijs van €4,- - Kosten pers – raffinage complex ca €25mln. Rendement raffinage complex ca 20% op geïnvesteerd vermogen. Stikstof import reductie van deze faciliteit 275,000 kg stikstof per jaar. (bron: Grassa, 2024)

## Beïnvloeden microbiom rundvee

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	De samenstelling van het microbiom speelt een grote rol in de enterische methaanemissie van de koe (Weimer,2015; Tapio et al., 2017). Verwachting van geraadpleegde experts is dat het microbiom ongeveer 40% van de verschillen in uitstoot verklaart tussen koeien: daarbij zou 15% genetisch bepaald zijn (zie fokkerij) en 85% komt tot stand door andere factoren. Verwacht wordt dat de methaanemissie met zo'n 25% gereduceerd kan worden, voor ammoniak is dit nog onbekend.  In Nieuw-Zeeland wordt gewerkt aan een vaccin dat methaanvorming kan reduceren. Door het vaccin worden antilichamen gevormd die gericht zijn op methaanvormende bacteriën. Mogelijke (bij-)effecten op productie en productiekwaliteit (samenstelling, kwaliteit, verwerkbaarheid) van de melk zijn nog onbekend. Effecten op NH <sub>3</sub> en CH <sub>4</sub> zijn vooralsnog niet bekend.
Innovatiepotentieel	onbekend
Pollution swapping	Onbekend.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven. Maatschappelijke acceptatie is onbekend.
Inpasbaarheid	Lastig. Vergt lange-termijn perspectief
Schaalniveau	Bedrijf en landbouwsector (gebied)
TRL	In ontwikkeling (TRL2-3)
Kosten	(nog) niet te definiëren



## Andere landbouwsystemen

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ), methaan (CH <sub>4</sub> ), lachgas (N <sub>2</sub> O), nitraat (NO <sub>3</sub> ) en fosfor (P)
Omschrijving	<p>De gemiddelde emissie bij bemesting van bouwland is lager dan bij bemesting op grasland. Ook zijn overige stikstofemissies uit de akkerbouw lager dan de emissies in de veehouderij. Om lokale of regionale ammoniakemissie te beperken, kan <b>omschakeling naar akkerbouw</b> in plaats van veehouderij, bijdragen aan lokale vermindering van ammoniakemissies. Uitspoeling van nutriënten naar grond- en oppervlaktewater zijn echter hoger onder akkerbouw en vollegrondsgroente dan onder grasland.</p> <p>Meer <b>biobased teelten</b> (met lagere bemesting). 'Biobased teelt' gaat over de teelt van agrarische grondstoffen die worden toegepast als vezels in de bouwsector. Voorbeelden hiervan zijn bijvoorbeeld hennep, vlas en lisdodde. Deze gewassen hebben een lagere toegestane stikstofgift dan andere akkerbouwgewassen. Hierdoor zijn de emissies van respectievelijk ammoniak en lachgas per hectare lager. Ook kan de teelt een potentieel positieve impact op waterkwaliteit hebben, aangezien er mogelijk minder nitraat uitspoelt. Zowel meer gewasdiversiteit in de regio heeft een positief effect op de biodiversiteit, als ook het zeer beperkte gebruik van gewasbeschermingsmiddelen. Natte teelten (lisdodde) kunnen mogelijk wel leiden tot een toename van methaanemissies. Afhankelijk van de locatie van de teelt, kunnen natte teelten in de zomer leiden tot een grote watervraag. Een nadeel van de genoemde teelten zijn de beperkte verwerkingscapaciteit en afzetmarkt.</p> <p>De teelt van zogenoemde '<b>eiwitgewassen</b>', zoals luzerne, veldbonen en sojabonen vraagt een lagere N-gift dan de teelt van veel andere akkerbouwgewassen. De genoemde gewassen zijn vlinderbloemigen en dat betekent daarnaast dat ze door een symbiose met bacteriën, in staat zijn om stikstof uit de lucht te binden. De lagere stikstofgift maakt dat de ammoniak- en lachgasemissies lager zullen zijn en de potentiële uit- en afspoeling van nitraat naar het water minder is dan bij andere gewassen. Verder is het zelfs zo dat vlinderbloemigen ingezet kunnen worden als stikstofbron, waardoor de effecten langjarig zijn. Meer gewasdiversiteit in de regio is ook positief voor de biodiversiteit. Op de lange termijn kunnen lokale eiwitbronnen mogelijk (een deel van) de soja-import van Nederland vervangen en zo dienen als lokale eiwitbron voor zowel veevoer als ook voor humane consumptie. Momenteel is de teelt van eiwitgewassen niet tot nauwelijks rendabel in Nederland</p> <p>Hetzelfde geldt voor de teelt en <b>oogst van zeewier</b> (North Sea Farmers). Zeewier biedt unieke voordelen in voedingswaarde en als natuurlijke smaakversterker, bindingsmiddel en conserveermiddel. Hierdoor kunnen hybride vleesproducten gemaakt worden die qua smaak, textuur en sappigheid gelijkwaardig zijn aan 100% vlees of zelfs beter. De zeewierindustrie wil samen met Nederlandse vleesproducenten deze volumemarkt ontwikkelen.</p> <p>Een <b>transitie naar biologische veehouderij</b> vraagt om zowel een extensivering als om een omschakeling van gangbare melkveebedrijven. Rougoor en Van der Schans (2022) berekenen dat de emissie op een biologisch melkveebedrijf per hectare 49% lager is, dan op een gangbaar melkveebedrijf. Daarbij is aangenomen dat de melkproductie per hectare bij omschakeling ongeveer halveert. De emissiereductie van Plomp en Migchels (2021) ligt op een vergelijkbaar niveau; zij komen tot een 22% lagere ammoniakemissie vanuit de stal en 53% lagere ammoniakemissie vanaf het land.</p>
Innovatiepotentieel	Sterk variabel
Pollution swapping	Variabel
Toepasbaarheid	Alle bedrijven. Vergt lange-termijn perspectief en economisch verdienmodel
Inpasbaarheid	Lastig; gebeurt alleen na politieke keuze of via innovaties van gebiedscollectieven.
Schaalniveau	Bedrijf en landbouwsector (gebied)
TRL	In ontwikkeling (TRL2-3)
Kosten	(nog) niet te definiëren

## Innovaties varkenshouderij

Innovaties beschikbaar op korte (<5 jaar) termijn

### Minder eiwit in voer

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	De emissie van NH <sub>3</sub> is direct gerelateerd aan het stikstofgehalte in urine en mest. Door verlaging van het eiwitgehalte is het mogelijk om het ureumgehalte in de urine en daarmee de emissie van NH <sub>3</sub> te verlagen. Deze maatregel is inzetbaar in heel Nederland. Effecten op methaan zijn nihil.
Innovatiepotentieel	0-30% reductie in NH <sub>3</sub> .
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven in potentie, maar in de praktijk wordt deze maatregel al grootschalig toegepast, vooral bij vleesvarkens
Inpasbaarheid	Goed. Deze maatregel kan snel worden ingevoerd, is vergeleken met andere maatregelen niet duur en kan al meteen in het eerste jaar effect sorteren.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp, en grotendeels al in productie (TRL9)
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> )

### Toevoegen van benzoëzuur: zeugenhouderij en vleesvarkens

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	Benzoëzuur is een organisch zuur, dat geproduceerd wordt door DSM; het wordt gebruikt als toevoeging in varkensvoer. Doordat benzoëzuur de urine zuurder maakt, wordt de vorming van ammoniak geremd. Zaak is wel dat plassen urine niet te lang op de stalvloer blijven liggen. Benzoëzuur kan ook een positief effect hebben op de darmgezondheid en voederconversie, zodat varkens minder stikstof uitscheiden. Er wordt een ammoniakreductie van 16% bij zeugen gezien, bij biggen is dit 8%. Een effect op CH <sub>4</sub> is nog niet aangetoond, mogelijk is een reductie van 3 tot 5%.
Innovatiepotentieel	8-16% reductie in NH <sub>3</sub> .
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven in potentie. Wordt in de praktijk veelal gebruikt bij zeugen en niet bij vleesvarkens
Inpasbaarheid	Benzoëzuur is opgenomen op de RAV-lijst. Goed inpasbaar. Wordt vrijwel uitsluitend bij zeugen toegepast (vanwege effect op darmgezondheid - terugverdiendtijd) en niet bij vleesvarkens.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp, en grotendeels al in productie (TRL9)
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ).

### Dagontmesting

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	Dagontmesting betekent dat de mest frequent uit de stal wordt verwijderd, waarbij door de korte verblijftijd van mest in de stal emissies zomin mogelijk kans krijgen om zich te ontwikkelen. Momenteel zijn verreweg de meeste stallen uitgevoerd met mestopslagkelders (goedkoop te bouwen, eenvoudig). Mestkelders en rooster-vloeren zijn echter een bron van NH <sub>3</sub> en CH <sub>4</sub> . Methaan wordt gevormd door methaanvormende bacteriën onder anaerobe omstandigheden. Om emissie van methaan te voorkomen, is frequent afvoeren van mest uit de stal en dat daarna zo emissiearm mogelijk opslaan of de toepassing van nageschakelde technieken nodig.
Innovatiepotentieel	70-90% reductie in NH <sub>3</sub> en CH <sub>4</sub> , afhankelijk van gebruikte techniek en opslag.
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering. Vereist goede mestopslag. Als er meer stikstof in de mest blijft, betekent dit ook aanpassing van de mestaanwending
Toepasbaarheid	Niet in elke stal toepasbaar zonder (grote) investeringen
Inpasbaarheid	Er staan systemen met dagontmesting op de RAV-lijst. Nieuwe (betere) systemen met dagontmesting worden ontwikkeld. Bij nieuwbouw goed inpasbaar.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp, en getoetst onder praktijkomstandigheden (TRL5)
Kosten	Categorie 1. (>20 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ), maar hangt af van gekozen techniek

## Stal(vloer)maatregelen

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	<p>Ook binnen de varkenshouderij zijn nog veel stalmaatregelen mogelijk. Deze hebben betrekking op oplossingen om mest snel te verwijderen uit de stal en het verkleinen van het emitterend oppervlak. Maar ook oplossingen als mestkoeling, beluchten van mest en het realiseren van schone vloeren. Een deel van de oplossingsrichtingen bevindt zich in een onderzoekfase. Daarnaast is de verwachting dat de maatregelen duur zullen zijn. In het rapport van Aarnink et al. (2019) worden de diverse mogelijkheden nader beschreven. Dit omvat maatregelen zoals:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vlakke gecoate keldervloer met tandheugelschuifstelsel (kosten hoog)</li> <li>• Mestopvang in water in combinatie met een mestafvoersysteem (kosten hoog)</li> <li>• Mestopvang in en spoelen met aangezuurde vloeistof (kosten hoog)</li> <li>• Koelstelsel (kosten hoog)</li> <li>• Opfokhok met schuine putwand met spoelgoten (kosten laag)</li> <li>• Volledig rooster met water- en mestkanalen (kosten hoog)</li> <li>• Schuiven in mestgoot (kosten hoog)</li> <li>• Varkenstoilet (kosten hoog)</li> </ul> <p>Voorbeelden zijn de ZERO-STAL (Agrifirm), mestschuiven (vd Sande e.a., TRAC, Cooperl, JOZ, IM-Aces, Tribuenestal), Varkenstoilet (Pigster, Zonvarken), gekoelde mestpan (IC &amp; R&amp;R), mestband (Nooyen, Kempfarm / Wopereis), Wroetstal (Mts. De Jong, Bruns, Jansen, Tijink), mestgoten met schuif (Jovas, Duosep), en geperforeerde mestband (big dutchman, filterfloor).</p>
Innovatiepotentieel	Veel van de hierboven genoemde systemen maken het mogelijk om de ammoniakemissie met 64 tot 84% te verminderen. In combinatie met nageschakelde technieken zoals luchtwassers of biofilters kan de emissie van NH <sub>3</sub> met 70-95% worden verlaagd. De emissiereductie voor CH <sub>4</sub> varieert van 30 tot 90%.
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven in potentie, waarbij de inzet afhankelijk is van het systeem (gespeende biggen, kraamzeugen, dragende zeugen en vleesvarkens). Afhankelijk van de gekozen techniek zijn deze inzetbaar in bestaande stallen of beter geschikt voor nieuwbouw.
Inpasbaarheid	Veel van deze maatregelen staan al op de RAV-lijst.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp, en grotendeels al in productie (TRL9)
Kosten	Categorie 1 -4. (<5 tot > 20 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ). De investeringskosten als ook de onderhoudskosten variëren afhankelijk van het geselecteerde systeem / maatregel.

## Directe Mestscheiding

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	<p>Directe scheiding (of primaire scheiding) staat voor scheiding van urine en mest (feces) in de stal, zodat deze niet mengen. Over het algemeen levert een primaire scheiding betere (voor)scheiding op dan mechanische scheiding van drijfmest achteraf. Het scheiden bij de bron vermindert de ammoniakemissie vanuit de stal. Doordat er in veel gevallen ook geen diepe mestopslag meer is onder de roosters, zal afhankelijk van de opslag ook de methaanemissie verminderen. Met hulp van de SBV regeling worden komende jaren systemen ontwikkeld met mestgoten en schuif (Duosep), varkenstoilet (Kees Scheepens) en een bolle mestband (Susstable). Resultaten hiervan zijn nog niet voldoende bekend.</p>
Innovatiepotentieel	70% reductie in NH <sub>3</sub> en variabel voor CH <sub>4</sub> , afhankelijk van gebruikte techniek en opslag.
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering. Vereist goede mestopslag. Als er meer stikstof in de mest blijft, betekent dit ook dat bij mestaanwending hiermee rekening moet worden gehouden.
Toepasbaarheid	Voor alle varkenshouderijbedrijven
Inpasbaarheid	Niet in elke stal toepasbaar zonder (grote) investeringen
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is in de basis praktijkrijp (TRL9), maar diverse nieuwe innovaties worden nog beproefd
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ), maar hangt af van gekozen techniek

## Koelen van mest

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	In de varkenshouderij is al langer ervaring met een drijfdeksysteem om de mest te koelen in de mestopslag. Hoe koeler de mest, hoe minder ammoniak en methaan vrij komen. Bij een temperatuur van 8 graden Celsius zijn urease- en methaanproducerende bacteriën veel minder actief. Bij varkensdrijfmest wordt in de literatuur een methaanreductie van tussen de 47% en 99% gerapporteerd (Martinez et al., 2003; Thompson et al., 2004; Šebek et al., 2016 en referenties daarin). Recent onderzoek met beluchting van drijfmest van varkens bevestigde een reductie van 40% (Calvet et al., 2017).
Innovatiepotentieel	40% reductie in NH <sub>3</sub> en voor CH <sub>4</sub> .
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering.
Toepasbaarheid	Voor alle varkenshouderijbedrijven
Inpasbaarheid	Het koeldeksysteem staat op de RAV-lijst. Het systeem functioneert maar wordt weinig toegepast.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp (TRL9), maar de leverancier R&R heeft zich teruggetrokken uit de markt. Borging is een aandachtspunt.
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> )

## Luchtwassers

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	Luchtwassers halen ammoniak uit de lucht via transport van lucht door/over het zuur. Voor de werking, zie dezelfde maatregel bij melkveehouderij. Het te verwachten rendement voor de verwijdering van ammoniak hangt af van het type luchtwasser. Voor chemische luchtwassers geldt dat het ammoniakrendement 70-95%. Voor biologische luchtwassers wordt een ammoniakrendement van 70% aangenomen. Voor combi-wassers wordt uitgegaan van een 70-90% reductie voor ammoniak.
Innovatiepotentieel	70-90% reductie in NH <sub>3</sub>
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering.
Toepasbaarheid	Voor alle varkenshouderijbedrijven
Inpasbaarheid	Het gebruik van luchtwassers is een veelgebruikte techniek (en staat in de RAV). Wel vraagt het onderhoud.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp (TRL9)
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> )

## Overige maatregelen

Er zijn aanvullend nog een aantal praktijkrijpe innovaties die inzetbaar zijn binnen de veehouderij. Vanwege de brede inzet zijn ze ook al beschreven bij de innovaties in de melkveehouderij. Dit zijn:

- **Methaanoxidatie:** met een reductiepotentie van 90% voor NH<sub>3</sub> en 70-98% voor CH<sub>4</sub>
- **Mestadditieven:** effecten op NH<sub>3</sub> en CH<sub>4</sub> in de varkenshouderij zijn niet bekend.
- **Mono-vergisting:** met een reductiepotentie van 10% voor NH<sub>3</sub> en 60-80% voor CH<sub>4</sub>.
- **Aanzuren van mest:** met een reductiepotentie van 40-65% voor NH<sub>3</sub> en 65-90% voor CH<sub>4</sub>.
- **Mesttoediening:** in 15% van het bouwlandareaal is de emissie nog te verlagen met 0-15%

## Samenwerking

Een andere prachtige innovatie is het Akkervarken: varkens die in het voorjaar worden ingezet in de akkerbouw om het vanggewas weg te werken. Gratis voedsel voor het varken, gratis bemesting voor het land, een blij varken en besparing van bewerking met zware tractoren, diesel en grondverdichting. Deze zelfde varkens worden ook ingezet om invasieve exoten weg te werken, en besparen zo glyfosaat en daarmee milieu en gezondheidskosten. De impact op NH<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub> of NP verliezen is onbekend

### Innovaties beschikbaar op langere (> 5 jaar) termijn

Hieronder zijn een aantal systemen opgenomen die de afgelopen jaren zijn beproefd, deels in ontwikkeling zijn of en die mogelijk voor 2030 op de markt beschikbaar komen en /of waar zich in Nederland nog geen marktpartij mee bezighoudt.

#### Deens systeem van aanzuren

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	Door met te scheiden en de dunne fractie aan te zuren en terug te zetten in de mestput (en gebruik driekantroosters) kan de emissie van NH <sub>3</sub> als ook van CH <sub>4</sub> worden verminderd.
Innovatiepotentieel	80% reductie in NH <sub>3</sub> ; 90% voor CH <sub>4</sub> (indicatief)
Pollution swapping	Het gebruik van zuur zorgt mogelijk voor een zwavel-onbalans bij toediening van mest.
Toepasbaarheid	Alle varkensbedrijven in potentie. Het systeem is relatief betrouwbaar (3 op schaal van 1 tot 5).
Inpasbaarheid	Vergt aanpassing van opslagfaciliteiten, omgaan met zuren. En daarmee ook vakmanschap
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is in de praktijk getest (TRL5) en komt na 2025 beschikbaar (TRL9)
Kosten	Onbekend

#### Koude plasmatechnologie (Blue reactor, Blue Plasma)

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	Koude plasmatechnologie met interne circulatie voorkomt / vermindert ammoniakvorming door omzetten van stikstof en verlaging van de pH van mest.
Innovatiepotentieel	70% reductie in NH <sub>3</sub> ; 70% voor CH <sub>4</sub> (indicatief)
Pollution swapping	Het gebruik van zuur zorgt mogelijk voor een S-onbalans bij toediening van mest.
Toepasbaarheid	Alle varkensbedrijven in potentie. Het systeem is relatief betrouwbaar (3 op schaal van 1 tot 5).
Inpasbaarheid	Vergt inzet van nieuwe technologie en bijbehorende ondersteuning om dit goed in te passen binnen bestaande bedrijfsvoering.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is in het lab en deels in de praktijk getest (TRL5) en komt na 2025 beschikbaar (TRL9)
Kosten	Onbekend

#### Pig on the moon (Denemarken)

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	Mestpan met (gedeeltelijke) onderafzuiging lucht in combinatie met luchtwasser.
Innovatiepotentieel	75% reductie in NH <sub>3</sub> ; 50% voor CH <sub>4</sub> (indicatief)
Pollution swapping	geen
Toepasbaarheid	Alle varkensbedrijven in potentie. Het systeem is relatief betrouwbaar (3/4 op schaal van 1 tot 5).
Inpasbaarheid	Techniek is inpasbaar binnen huidige stallen als ook nieuwbouw.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is in de praktijk getest (TRL5) en komt na 2025 beschikbaar (TRL9)
Kosten	Categorie 3. (5-10 euro per kg N-NH <sub>3</sub> )

#### Luchtcirculatie

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	Gedeeltelijke recirculatie van lucht in combinatie met luchtzuivering en -conditionering .
Innovatiepotentieel	90% reductie in NH <sub>3</sub>
Pollution swapping	geen
Toepasbaarheid	Alle varkensbedrijven in potentie. Het systeem is relatief betrouwbaar (3/4 op schaal van 1 tot 5).
Inpasbaarheid	Goed inpasbaar in bestaande bedrijfssystemen
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is in de praktijk getest (TRL5) en komt na 2025 beschikbaar (TRL9)
Kosten	Categorie 3. (5-10 euro per kg N-NH <sub>3</sub> )

## Strostal zeugen

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	Strostal met gescheiden opvang mest en urine bij dragende zeugen, schuiven en sproeien.
Innovatiepotentieel	70% reductie in NH <sub>3</sub> ; 70% voor CH <sub>4</sub> (indicatief)
Pollution swapping	geen
Toepasbaarheid	Bij bedrijven met dragende zeugen. Het systeem is relatief betrouwbaar (3 op schaal van 1 tot 5).
Inpasbaarheid	Vergt aanpassing van bestaande stalsystemen
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is in de praktijk getest (TRL5) en komt na 2025 beschikbaar (TRL9)
Kosten	Onbekend

## Beïnvloeden microbiom varken / fokkerij

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> ) en methaan (CH <sub>4</sub> )
Omschrijving	De samenstelling van het microbiom speelt een grote rol in de enterische methaanemissie van dieren. Onduidelijk is in hoeverre het microbiom een rol speelt en in hoeverre het microbiom van een varken stuurbaar is om methaanvorming te voorkomen. Dat laatste zou kunnen door een gerichte voeding tijdens de opfokperiode. Door een gerichte fokkerij is (op termijn) mogelijk een veestapel te fokken met minder emissie uit het dier zelf. Tevens zou het kunnen dat het functioneren van het microbiom gedeeltelijk genetisch bepaald wordt. Effecten op NH <sub>3</sub> en CH <sub>4</sub> zijn vooralsnog niet bekend.
Innovatiepotentieel	onbekend
Pollution swapping	Onbekend.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven. Maatschappelijke acceptatie is onbekend.
Inpasbaarheid	Lastig. Vergt lange-termijn perspectief
Schaalniveau	Bedrijf en landbouwsector (gebied)
TRL	In ontwikkeling (TRL2-3)
Kosten	(nog) niet te definiëren

## Innovaties pluimvee

### *Innovaties beschikbaar op korte (<5 jaar) termijn*

De meest voorkomende huisvestingssystemen voor pluimvee zijn volierehuisvesting met en zonder mestbeluchting (56%) voor opfokhennen en -hanen en legrassen (met een emissiefactor van 0.05 kg NH<sub>3</sub> per dierplaats), terwijl het grootste deel van vleeskuikens in emissiearme stallen is gehuisvest met mestbanden die minimaal eenmaal per week afdraaien (met een emissiefactor van 0.03 tot 0.05 kg NH<sub>3</sub> per dierplaats). Hoe groot de emissies bij volièrestallen in de praktijk zijn is niet duidelijk: uit metingen bij biologische hennen in een volière kwam de uitstoot van NH<sub>3</sub> uit op 174 gram tegenover 25 tot 90 gram die in de Rav-staat.

In de huidige RAV-systematiek zijn diverse huisvestingssystemen opgenomen met een bewezen impact op ammoniakverliezen. De huisvestingssystemen kunnen worden ingedeeld op basis van de combinatie van reductieprincipes: mestdrogen, frequent verwijderen van mest, mestdrogen in combinatie met frequent verwijderen, mestkoelen, reductie van emitterend oppervlak en nageschakelde technieken. Door snel mest te drogen dan wel te koelen kan de afbraaksnelheid van urinezuur en organisch gebonden stikstof worden beperkt. Door mest frequent te verwijderen wordt het contact tussen mest en urine beperkt, en de afbraaksnelheid van urinezuur verminderd. Hierdoor wordt de ammoniakemissie uit de stal aanmerkelijk verlaagd waarbij het effect afhangt van de diercategorie. Naast huisvestingsmaatregelen in de stal zijn diverse zogenaamde nageschakelde technieken beschikbaar in de vorm van chemische en biologische luchtwassers of biofilters, met een verwijderingsrendement van 70 tot 90%.

## Minder eiwit in voer

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	<p><b>Minder eiwit</b> betekent minder uitscheiding van urinezuur en daarmee minder NH<sub>3</sub>. Op de langere termijn (na 2025) is bij vleeskuikens en leghennen het RE-gehalte in het rantsoen mogelijk nog met 25 á 30 g/kg ds te verlagen (Groenestein et al., 2019, Brusselman et al., 2016).</p> <p>Door <b>tarwe te gaan voeren</b> kan het RE-gehalte ook met 10g/kg ds worden verlaagd. Met tarwe voeren is een betere afstemming mogelijk tussen de behoefte en het aanbod van eiwit en aminozuren. De voerkosten dalen.</p> <p>Een kleine vermindering van het RE-gehalte kan ook worden bereikt via <b>fasevoeding</b> (van 4 naar 6 fasen). Zolang de beoogde daling in RE-gehalte kleiner is dan 10 g/kg ds, kan dit tegen weinig meerkosten worden gerealiseerd. Een grotere verlaging wordt al snel duur (een daling met 20 g/kg ds kost 58€/kg) omdat dan vrij aminozuren moeten worden toegevoegd. De totale emissievermindering is beperkt: respectievelijk 2 % bij een daling van 10 g/kg en 5% bij 30 g/kg).</p>
Innovatiepotentieel	2% reductie in NH <sub>3</sub> (tarwe), 0-10% NH <sub>3</sub> minder eiwit, en 2-5% bij fasevoeding
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering.
Toepasbaarheid	Alle bedrijven in potentie
Inpasbaarheid	Goed. Deze maatregel kan snel worden ingevoerd.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp (TRL9)
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ) voor tarwekorrel en Categorie 1 (>20 euro per kg N-NH <sub>3</sub> ) voor verdere verlaging eiwitgehalte.

## Dagontmesting met mestbandsystemen

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	<p>Dagontmesting is toepasbaar voor pluimveestallen met mestbandsystemen: kooi- en volièresystemen voor leghennen en opfokleghennen. Bij dagontmesting is er geen droging in de stal, maar wordt de mest binnen 24 uur via banden afgedraaid en in een droogtunnel gebracht. Daar wordt de mest gedroogd tot 80% drogestof. Deze maatregel vereist dus een droogtunnel als nageschakelde techniek. Deze veroorzaakt enige emissie waardoor de besparing op de stalemissie deels teniet wordt gedaan. Per saldo is er voor NH<sub>3</sub> wel een besparing van potentieel 14%.</p>
Innovatiepotentieel	14% reductie in NH <sub>3</sub>
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering. Vereist goede mestopslag. Als er meer stikstof in de mest blijft, betekent dit ook de mestaanwending hiermee rekening moet houden.
Toepasbaarheid	OP alle pluimveestallen met mestbandsystemen
Inpasbaarheid	Goed
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp, en getoetst onder praktijkomstandigheden (TRL8)
Kosten	Categorie 3. (5-10 euro per kg N-NH <sub>3</sub> )

## Turfstrooisel in vleeskuikenstallen

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	<p>Vleeskuikens worden gehouden op strooisel. Veelal bestaat dit uit houtkrullen of zaagsel. Door een zuur product te gebruiken kan de stalemissie substantieel dalen. Dit is aangetoond in proeven met maiskuil als strooisel. Ook turf is zuur. De stalemissie kan met 25% dalen op basis van de resultaten met mais. In onderzoek lopen nog opties om zaagsel / houtkrullen te "verzuren" om zo een vergelijkbaar effect te krijgen als turf. Binnen de huidige RAV systematiek wordt uitgegaan van 40% NH<sub>3</sub>-reductie. Qua kosten is snijmais ondanks kosten voor drogen goedkoper dan zaagsel (Brusselman et al., 2016).</p>
Innovatiepotentieel	25-40% reductie in NH <sub>3</sub>
Pollution swapping	De inzet van turf is maatschappelijk minder gewenst, waardoor de slaagkans van deze maatregel niet hoog is
Toepasbaarheid	Op alle vleeskuikenstallen
Inpasbaarheid	Goed
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp (TRL9)
Kosten	Categorie 3. (5-10 euro per kg N-NH <sub>3</sub> )

## Luchtwassers

Stof	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )
Omschrijving	Luchtwassers halen ammoniak uit de lucht via transport van lucht door/over het zuur. Voor de werking, zie dezelfde maatregel bij melkveehouderij. Het te verwachten rendement voor de verwijdering van ammoniak hangt af van het type luchtwasser. Voor chemische luchtwassers geldt dat het ammoniakrendement 70-95%. Voor biologische luchtwassers wordt een ammoniakrendement van 70% aangenomen. Voor combi-wassers wordt uitgegaan van een 70-90% reductie voor ammoniak.
Innovatiepotentieel	70-90% reductie in NH <sub>3</sub>
Pollution swapping	Geen bij goede uitvoering.
Toepasbaarheid	Voor alle varkenshouderijbedrijven
Inpasbaarheid	Het gebruik van luchtwassers is een veelgebruikte techniek (en staat in de RAV). Wel vraagt het onderhoud.
Schaalniveau	bedrijf
TRL	Maatregel is praktijkrijp (TRL9)
Kosten	Categorie 4. (<5 euro per kg N-NH <sub>3</sub> )



# Bijlage III. Verslag stakeholdersessie

Feedback Klankbordsessie 'Innovatiepotentieel NPLG doelen' gehouden op 2-10-2024

## Aanwezigen

Harry Kager	Gerben Boom	Wim de Vries
Gert Harm ten Bolscher	Elbert Roest	Bea van Golen
Niels Peters	Martijn Root	Lena Schuelte Uebbing
Patrica Rutter	Mark Vossen	Arjan Mager
Xander Pieterse	Gerrit van Schaick	Johan Sanders
Hendrik Jan van Doorn	Leon Jansen	Koen van den Berg
Herman Litjens	Anne Marie van Boekel	Henk Aarts
Hans Hanskamp	Maarten de Vries	Miranda Ebbekink
Henk Gerbert	Merlijn Schuurbijs	Herre Bartlema
Rob Messelink		Tamar de Jager

## Algemene feedback:

- Management en innovatie hoeft niet enkel geld te kosten maar kan ook wat opleveren (verwijzing naar de kostengrafiek (figuur 4.1 in het rapport))
- Beter beschrijven en terug laten komen dat akkerbouw als sector ook innovatiepotentieel heeft
- Enorm belangrijk dat er een juridisch geborgd vergunningsverleningskader wordt opgesteld waarbinnen de innovaties met grotere zekerheid geïmplementeerd kunnen worden.
- In het rapport komt de borging van de innovaties relatief weinig voor, wellicht aandacht aan besteden.
- Agrarische bedrijfsinputs (zoals kunstmest en soja) als bronmaatregel vormen een belangrijke rol in het halen van de NPLG doelen, komt onvoldoende terug in rapport.
- Beter beschrijven hoe er tot een emissiereductie potentieel is gekomen (tabel i.1.1. %)
- Beter beschrijven op welk deel van de emissies de percentages gebaseerd zijn -> voorstel is om de percentages te refereren naar het totaal van het bedrijf of perceel)
- Stapelingseffecten van innovaties beter beschrijven, als je gaat stapelen dan kun je nooit een optelsom maken van individuele emissiereductie percentages.

## Samenvatting feedback groep 1 (Ammoniak)

Gedeelde opmerkingen op het MIRO-bord:

- Hoe zorgen we (als provincies) dat innovaties genomen worden; is er voldoende vertrouwen en durf in de sector en bij overheden.
- Hoe gaan we om met innovaties in het buitenland
- Vergunningsverlening vaak voor nieuwe situaties; onderscheid maken in overzicht. Regelgeving en vergunning is per definitie nog lastig.
- Er is een grote spreiding in emissiereducties; onzekerheid is groter voor innovaties op langere termijn; wat zijn de gevolgen van onzekerheid op de eindconclusies van het rapport. Is het zinvol om een best case en worst case scenario op te nemen in het rapport
- Grote menu lijst; onduidelijk of het toepasbaar is
- Technieken variëren ook in mate van borgbaarheid; dit aspect is ook relevant om mee te nemen
- Stalsystemen zijn lastig op te nemen omdat het vaak een combinatie van innovaties omvat
- Water bij de mest werkt niet bij alle grondsoorten. Verdunnen bij sleepvoet op klei en veen werkt wel, bij zodenbemester op zand niet. Of sleepvoet op zand werkt weten we niet. Is in Nederland niet aan gemeten. Denk overigens ook aan geur, fijnstof en dierenwiltzijn.
- Brengt meer innovaties en technologische oplossingen ons wel in de goede richting of vergroot dat juist de problemen. Goede denkgroep voor natuurlijke oplossingen is nodig.
- Financiële prikkels zijn nodig voor goede implementatie
- Processen RAV duren veel en veel te lang en belemmeren een goede implementatie

- Missende innovaties: fossielvrij bemesten, nieuwe veehouderijsystemen, vrij leven stal, varkenstoilet in combinatie met dagontmesting, en technieken in de kalverhouderij.

### **Samenvatting feedback groep 2 (Broeikasgassen)**

- De 'bronmaatregelen' met betrekking tot de inputs in het agrarisch systeem (o.a. soja en kunstmest) worden niet of onvoldoende meegenomen in het rapport
- Het is belangrijk om iets te zeggen over de integraliteit en samenhang van de maatregelen. Bijvoorbeeld als het gaat om dagontmesting in relatie tot dierenwelzijn.
- In het rapport wordt aangegeven dat er vanuit de sector maximaal meegewerkt moet worden om de doelen te halen. Echter is het ook van cruciaal belang dat de overheid het mogelijk maakt om de investeringen te doen middels het verzorgen van een juridisch houdbaar vergunningskader waarbinnen de innovaties geborgd zijn.
- Toevoegingsmiddelen van mest (Nr 18 in tabel I.1.1) moet opgesplitst worden in verschillende subcategorieën. Het emissiereductiepotentieel is hoger dan in deze tabel staat.
- Bij de maatregel 'methaanoxidatie' het woord biofilter vervangen voor veldfilter
- Geen bedrijfsnamen zoals Lely terug laten komen in het rapport.
- Grasraffinage opnemen als aparte innovatie in de tabel

### **Samenvatting feedback groep 3 (nutriënten uitspoeling):**

Gedeelde opmerkingen op het MIRO-bord:

- Nergens staat minder bemesten; hier valt veel te winnen. Dit wordt ook helder uit resultaten van het Netwerk Praktijkbedrijven: door een lagere bemesting (of geen bemesting in bufferstroken) in zogenoemde nutriëntenverontreinigde gebieden zal de emissie dalen naar rato van de reductie in inputs.
- Snelheid van innoveren is erg kort ingeschat (TRL). Dit duurt waarschijnlijk langer.
- De bandbreedte qua effecten zijn breed; kan dit niet kleiner?
- Er is noodzaak voor visie, er zijn nu veel end-of-pipe oplossingen en we moeten meer naar bronmaatregelen (minder kunstmest en minder import veevoer)
- Verdienvermogen van agrariërs mist op lange termijn. Veel maatregelen zijn alleen betaalbaar door schaalvergroting en intensivering.
- Het is belangrijk om trade-offs goed te benomen.
- Nuancering naar bodemtypes is relevant zeker voor impact van maatregelen op waterkwaliteit; niet alles werkt overal op dezelfde manier.
- Waarom zijn er relatief weinig maatregelen voor verbetering van waterkwaliteit?
- Vergisting heeft impact in de stal maar ook bij toediening.
- Voor vergisting is samenwerking nodig lokaal; regels houden dit tegen.
- Omzetten drijfmest in N-meststof heeft meer voordelen dan nu opgenomen.
- Nieuwe innovaties: vlinderbloemigen inzetten, fertigatie, robotisering en AI voor precisiebemesting.

Opmerkingen t.b.v. aanpassingen in Tabellen Bijlage 1, op basis van feedback

1. Begin de innovaties met "Bron maatregelen" of "import vermijding" of wel minder krachtvoer of kunstmest. Punt is: dat komt overal wel terug met meer efficiëntie. Nadenken of die extra categorie dus wel moet. Belangrijkste innovaties die zorgen voor netto minder aanvoer van krachtvoer liggen in het dier en voerspoor. Begin daar dus qua volgorde meer want daar begint de verbetering. Dus dier, voer, stal, mest. Voorbeeld bron (voer) maatregel is Grassa
2. De maatregelen werden door sommigen gezien als end-of pipe maatregelen. Daarom ook benadrukken dat minder N verliezen (meer N in mest) betekent dat je ok minder kunstmest aan kunt voeren en dus efficiënter bent. En dat zou dan ook tot uiting moeten komen in minder Nuitspoeling (N-water). Die link wordt niet gemaakt in % reductie N-water. Moet er wel in.
3. Bij de dier, voer en stalmaatregelen is het niet duidelijk of de reducties alleen op de emissies in de stal slaan of dat er ook verdere reducties in het veld zijn (zie ook opmerking hierboven rond N-water). Dit aangeven (eventueel onderscheid maken in NH<sub>3</sub> en CH<sub>4</sub> reducties stal en veld).

4. Zet per maatregel ook een indicatie van de betrouwbaarheid van het reductiepercentage variërend van indicatief, redelijke betrouwbaar en betrouwbaar, gebaseerd op de onderbouwende literatuur.
5. Het TRL niveau (Technology Readiness Level), wat aangeeft in welke fase de ontwikkeling van een nieuwe technologie zich bevindt, wordt niet uitgelegd in het rapport (wat houden de gradaties 1-9 in). Nu toegevoegd. Er is ook kritiek op sommige TRL niveaus bv N2 applied. Is geüpdatet op basis van feedback.
6. Voorstel is om in bijlage I ook trade-offs (of synergie) per maatregel te geven, zoals benoemd in Bijlage II (bij diepe injectie werd bv ook genoemd dat het negatief is irt verdichting en CO2/N2O emissies)
7. NB: er zijn met name opmerkingen gemaakt vanuit Grassa, N2applied and kunstmest vervangers als het gaat om reductie percentages (bv dat plasma behandeling ook zorgt voor reduceren van 99% CH<sub>4</sub> emissies) en TRL niveau. Toegestuurde studies zijn verwerkt.

---

Wageningen Universiteit  
Postbus 47  
6700 AA Wageningen  
T 0317 48 07 00  
[www.wur.nl](http://www.wur.nl)

Wageningen Universiteit  
Rapport 2024.159  
ISSN 1566-7197



---

De missie van Wageningen University & Research is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen University & Research bundelen Wageningen University en gespecialiseerde onderzoeksinstituten van Stichting Wageningen Research hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 30 vestigingen, 7.600 medewerkers (6.700 fte) en 13.100 studenten en ruim 150.000 Leven Lang Leren-deelnemers behoort Wageningen University & Research wereldwijd tot de aansprekende kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen verschillende disciplines vormen het hart van de unieke Wageningen aanpak.