



Innovatieprogramma
mesttoediening

Bemest op z'n Best: Nevenaspecten innovatieve mest toedieningstechnieken



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

Bemest op z'n Best: Nevenaspecten innovatieve mest toedieningstechnieken

Potentiële neveneffecten van toepassen van innovatieve technieken voor mesttoediening met lagere ammoniakemissie

Het onderzoeksprogramma 'Bemest op z'n Best' is in opdracht van LVVN uitgevoerd door een consortium van de Stichting Wageningen Research (WR), Nutriënten Management Instituut (NMI), Stichting Louis Bolk Instituut (LBI), Delphy B.V., TNO, RIVM, EV ILVO in het kader van beleidsondersteunend onderzoeksthema 2D Veerkrachtige dierhouderijsystemen (projectnummer BO-43-209-002).

WR is een onderdeel van Wageningen University & Research, samenwerkingsverband tussen Wageningen University en de Stichting Wageningen Research.

Wageningen, november 2025

© 2025 Wageningen, Stichting Wageningen Research, Wageningen Plant Research, Postbus 16, 6700 AA Wageningen; T 0317 48 07 00; www.wur.nl/plant-research

KvK: 09098104 te Arnhem
VAT NL no. 8113.83.696.B07

Stichting Wageningen Research. Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, in enige vorm of op enige wijze, hetzij elektronisch, mechanisch, door fotokopieën, opnamen of enige andere manier zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van Stichting Wageningen Research.

Stichting Wageningen Research is niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen die kunnen ontstaan bij gebruik van gegevens uit deze uitgave.

Rapport Bemest op z'n Best: <https://edepot.wur.nl/703877>

Foto omslag: Niels van der Boom

Eindrapportage¹

Het doel van het 'Bemest op z'n Best' onderzoek is om zowel de effectiviteit van de innovaties in het reduceren van ammoniakemissie te beoordelen, als de mogelijke neveneffecten in beeld te brengen die mogelijk met deze innovaties gepaard gaan. Binnen de werkgroep Nevenaspecten zijn de verschillende onderzochte ideeën en kennisvragen geëvalueerd op neveneffecten. De gevolgde werkwijze staat beschreven in Bijlage F. Nevenaspecten waarvan de impact beoordeeld is, zijn: i) stikstofwerking, koolstofvastlegging, fosfaat uit- en afspoeling, nitraat uitspoeling, stikstof afspoeling en aanvoer van (extra) nutriënten of hulpstoffen; ii) stank en/of geur, lachgas- en methaanemissie; iii) bodemverdichting, schade aan zode, bodemleven en broedende vogels; iv) energieverbruik, kostprijs en waterverbruik. Bij de analyse van nevenaspecten zijn de kennisvragen 'Instantaan beregenen bij toediening van mest' (paragraaf 3.7.1) en 'Effect Sleufafstand' (paragraaf 5.7) buiten beschouwing gebleven.

¹ Verloop, Koos, Marieke Rinsema, Jan Huijsmans, Zwier van der Vegte, Roy Wichink Kruit, Wim Bussink, Jeroen Pijlman & Monique Paes (2025). *Bemest op z'n Best* (Ben Verwijs & Jan Huijsmans, eds). Wageningen Research, Rapport WPR-1501, <https://doi.org/10.18174/702950>

Bemest op z'n Best: Nevenaspecten innovatieve mest toedieningstechnieken

Potentiële neveneffecten van toepassen van innovatieve technieken voor mesttoediening met lagere ammoniakemissie

Sander Gerritsen¹, Jeroen Pijlman², Herman van Schooten¹, Derk van Balen¹, Koos Verloop¹

¹ Wageningen University & Research

² Louis Bolk Instituut

Inhoud

Woord vooraf	5
Samenvatting	7
1 Inleiding	9
1.1 Achtergrond	9
1.2 Doelstelling	10
2 Opzet van het onderzoek	11
2.1 Overzicht	11
2.2 Analyse kader	11
2.2.1 Nevenaspect en neveneffect	11
2.2.2 Uniform scoringssysteem	12
2.2.3 Referentiesituaties	12
2.2.4 Definities nevenaspecten	15
2.2.5 Innovaties	17
2.3 Opmerkingen over de uitwerking van de analyse	19
2.3.1 Bijzonderheden met betrekking tot het scoringsschema	19
2.3.2 De zodenbemester als dominante referentie en overige referentiesituaties als afgeleide	19
2.3.3 Indicatoren voor neveneffecten als onderdeel van uitwerking in hoofdstuk 3	20
2.3.4 Bemesting bij besparing op verliezen door toepassing van de innovaties	20
3 Resultaten	21
3.1 Indicatoren voor het kwantificeren van effecten	21
3.1.1 Stikstofwerking	21
3.1.2 Organisch stof	23
3.1.3 Bodemverdichting	24
3.1.4 Schade aan zode	25
3.1.5 Bodemleven	27
3.1.6 Weidevogels	30
3.1.7 Stikstofuitspoeling	33
3.1.8 Fosfaatuitspoeling	33
3.1.9 Stikstofafspoeling	34
3.1.10 Fosfaatafspoeling	35
3.1.11 Stank en geur	35
3.1.12 Lachgas	36
3.1.13 Energieverbruik	37
3.1.14 Kostprijs	38
3.1.15 Waterverbruik	38
3.1.16 Aanvoer van (extra) hulpstoffen	39
3.2 Verwachte effecten van innovaties op nevenaspecten	40
3.2.1 Stikstofwerking	40
3.2.2 Organische stof	41
3.2.3 Bodemverdichting	43
3.2.4 Schade aan zode	45
3.2.5 Bodemleven	47
3.2.6 Weidevogels	49
3.2.7 Afspoeling van stikstof en fosfaat	51
3.2.8 Uitspoeling van fosfaat	53
3.2.9 Uitspoeling van stikstof	55

	3.2.10	Stank en geur	57
	3.2.11	Lachgas	59
	3.2.12	Energieverbruik	61
	3.2.13	Kostprijs	62
	3.2.14	Waterverbruik	64
	3.2.15	Aanvoer van hulpstoffen	65
	3.3	Synthese; nevenaspecten per innovatie	68
4		Discussie	71
5		Conclusies en aanbevelingen	73
		Literatuurlijst	75

Woord vooraf

Deze verkenning bevat een inventarisatie van potentiële nevenaspecten van nieuw ontwikkelde mesttoedieningstechnieken. Het onderwerp raakt aan tal van disciplines en vraagt om expertise die het bereik van ons als auteurs overstijgt. Daarom zijn we veel dank verschuldigd aan de mensen die via review van conceptversies of door deelname aan een workshop hebben bijgedragen aan de totstandkoming van dit rapport. In het bijzonder bedanken we: Bert Vermeulen, Gertjan Holshof, Wim van Dijk, Wim Bussink, Jan Huijsmans, Zwier van der Vegte, Herman Krebbers, Sjon de Leeuw, Gerard Velthof, Piet Groenendijk, Co Daatselaar, Julio Mosquera, Colin Dekker, Nyncke Hoekstra, Joachim Deru, René Rietra en Roy Wichink-Kruit.

Hoewel we in de eindredactie niet op alle visies en commentaren konden ingaan, zijn de vele suggesties en inzichten zeer gewaardeerd en zorgvuldig meegewogen in onze overwegingen.

Het in kaart brengen van nevenaspecten bij mesttoedieningstechnieken is geen eenvoudige opgave. Het vraagt om een helder analysekader dat consequent wordt toegepast, om overzicht te houden over een breed veld van kennis en technologie. Daarnaast vereist het vermogen om, op basis van soms beperkte informatie over werkingsmechanismen en technische prototypes, het wezenlijke van het bijkomstige te onderscheiden. Dit maakt het werk uitdagend, maar naar onze overtuiging ook waardevol.

We hopen dat deze verkenning een wezenlijke bijdrage levert aan de ontwikkeling en toepassing van optimale, toekomstgerichte mesttoedieningstechnieken.

Sander Gerritsen
Herman van Schooten
Jeroen Pijlman
Derk van Balen
Koos Verloop

Samenvatting

Het programma *Bemest op z'n Best* onderzoekt innovatieve mesttoedieningstechnieken die de ammoniakemissie kunnen verlagen ten opzichte van gangbare technieken in Nederland. Deze technieken beïnvloeden ook andere landbouw- en milieuaspecten, zoals de mestbenutting, bodem- en waterkwaliteit en grondstoffengebruik, die in deze verkenning 'nevenaspecten' zijn genoemd. Doel van deze verkenning is om per onderzochte techniek in *Bemest op z'n Best* een inschatting te maken van de orde van grootte van nevenaspecten, en op basis daarvan relevante aandachtspunten aan te duiden die van belang zijn bij doorontwikkeling, vervolgonderzoek of eventuele implementatie van de onderzochte technieken. De analyse is gebaseerd op bestaande kennis en literatuur; er zijn in dit onderzoek geen metingen verricht om deze effecten te kwantificeren. Deze analyse is niet bedoeld om de geschiktheid van een techniek definitief vast te stellen; daarvoor is nader onderzoek nodig.

Voor elke innovatie is nagegaan welke nevenaspecten - dat wil zeggen effecten op *andere* aspecten dan op NH₃ emissie - mogelijk optreden in vergelijking met referentietechnieken: de zodenbemester en de sleepvoet/sleufkouter. Daarbij zijn verschillende toepassingssituaties onderscheiden, op basis van bodemtype (zand, klei, veen), gebruik (grasland en bouwland) en bemestingsniveau (25 m³ mest per ha of jaargiften afgeleid van generieke stikstofgebruiksnormen). Praktisch alle innovaties hebben betrekking op grasland; één innovatie heeft betrekking op bouwland.

De (onderliggende) effecten op nevenaspecten zijn geïnventariseerd met een uniform waarderingssysteem, met de varianten licht gunstig, gunstig, neutraal, licht ongunstig en ongunstig. De scores van onderliggende effecten zijn niet gemiddeld, maar integraal weergegeven (de uiterste uitslagen in de score zijn dus onverkort meegenomen).

Nevenaspecten meegenomen in de analyse zijn

- Stikstofwerking, organisch stofgehalte in de bodem, bodemverdichting, schade aan graszode, bodemleven, weidevogels
- Fosfaat uit- en afspoeling, stikstof uit- en afspoeling, stank en geur, afwentelingen op lachgas, methaanemissie, energieverbruik,
- Kostprijs, waterverbruik, aanvoer van nutriënten en hulpstoffen.

Belangrijkste bevindingen per onderzochte techniek

1. *Afdekken mestsleden met krijt, magnesiumchloride, zwavelzuur of polyhaliet*
Licht ongunstig gescoorde nevenaspecten zijn kostprijs en energieverbruik, mogelijk schade aan zode indien gras wordt besmeurd met toevoegmiddel, mogelijk negatief effect op bodemleven en weidevogels en aanvoer van hulpstoffen die in bodem kunnen ophopen en/of bij besmeuring van gras.
2. *Plasmabehandeling*
Gunstig gescoorde nevenaspecten zijn stikstofwerking en stank en geur. Licht ongunstige nevenaspect zijn het organische stofgehalte in de bodem (m.u.v. veengronden), bodemleven en weidevogels. Ongunstig gescoorde nevenaspecten zijn energie, kostprijs en lachgas.
3. *Betere uitvoering zodenbemesten*
Deze innovatie is gericht op het waarborgen van de kwaliteit van de zodenbemesting zoals voorgeschreven. De techniek in deze analyse is per definitie niet beter of slechter dan een zodenbemester omdat een goed uitgevoerde zodenbemesting als referentietechniek geldt voor de analyse van neveneffecten. De winst zit vooral in het voorkomen van fouten bij onzorgvuldige toepassing in de praktijk.
4. *Afdekken met gronddeeltjes op bouwland*
Een gunstig gescoord nevenaspect is stikstofwerking. Licht gunstige nevenaspecten zijn afspoeling van stikstof en fosfaat. Licht ongunstige nevenaspecten zijn mogelijk bodemverdichting, bodemleven, weidevogels.

5. *Schuin insnijden van de bodem*

Licht gunstige nevenaspecten zijn mogelijk stikstofwerking, stank & geur.

Licht ongunstige nevenaspecten zijn schade aan zode, mogelijk bodemverdichting, bodemleven, weidevogels.

6. *Diepinjectie*

Gunstig gescoorde nevenaspecten zijn stikstofwerking en stank & geur. Licht gunstig gescoord zijn nevenaspecten met betrekking tot bodemverdichting en afspoeling van stikstof en fosfor. Licht ongunstige nevenaspecten zijn lachgas en kostprijs, en mogelijk organische stof. Ongunstig gescoorde nevenaspecten zijn mogelijk bodemverdichting, schade aan zode, bodemleven, weidevogels, nitraatuitspoeling en energie.

Aspecten kunnen - afhankelijk van de omstandigheden en exacte uitvoering (detaillering) van de techniek - zowel gunstig als ongunstig zijn. Daarom komen aspecten voor dezelfde innovatie soms in meer beoordelingscategorieën voor.

Algemene conclusies

Voor alle innovaties geldt een verwachte kostprijs verhoging t.o.v. een zodenbemester. Methaanemissie en fosfaatuitspoeling laten naar verwachting voor alle innovaties geen significante verschillen zien ten opzichte van de huidige gebruikte technieken.

De resultaten geven aan dat het essentieel is bij verdere innovatie rekening te houden met effecten op organische stof, bodemverdichting, schade aan zode, bodemleven en weidevogels. Een zorgvuldige technische vormgeving kan deze effecten beperken.

Tot slot: ook praktische aspecten zoals robuustheid van de werking, onderhoudsbehoefte, gebruiksgemak en breedte van de inzetbaarheid zijn cruciaal voor succesvolle toepassing van de onderzochte technieken, maar deze aspecten zijn in deze analyse buiten beschouwing gelaten. Een nadere verkenning van ook deze aspecten is wenselijk om een goede aansluiting op de praktijk te waarborgen.

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Dierlijke mest bevat stikstof (N) in de minerale vorm (ammonium ($\text{NH}_4\text{-N}$) en ammoniak ($\text{NH}_3\text{-N}$)) en in organische vorm. Ammoniak is vluchtig en kan vanuit mest verloren gaan naar de atmosfeer. Ammonium is niet vluchtig, maar kan na omzetting in ammoniak ook uit mest verloren gaan. Ammoniakemissie kan met name optreden bij blootstelling van dierlijke mest aan lucht. Hierdoor gaat het uitrijden van dierlijke mest gepaard met ammoniakemissie naar de atmosfeer. Ammoniakemissie is in Nederland een belangrijk probleem, onder andere doordat geëmitteerde stikstof leidt tot stikstofdepositie in natuurgebieden. Daarnaast heeft het verlies van ammoniak op landbouwbedrijven nadelige gevolgen, omdat er stikstof verloren gaat voor gewasgroei.

In 1991 is emissiearme mesttoedieningstechniek geïmplementeerd als onderdeel van de Meststoffenwet (Anoniem, 1991) met als doel de ammoniakemissie verregaand te reduceren. Bepaalde werkresultaten werden voorgeschreven. Op grasland dient men de mest in sleufjes in de grond te verwerken of in strookjes op de grond. Met een zodenbemester kan men de mest in sleufjes in de grond aanwenden, terwijl sleepvoetbemesters strookjes op de grond kunnen aanwenden. In de loop van de jaren is er ook nog een tussenvorm ontstaan, namelijk de sleufkouterbemester, die ondieper werkt dan een zodenbemester en gelijkwaardig is aan een sleepvoetbemester (overzicht in Figuur 1). De sleepvoet- en sleufkouterbemesters zijn alleen toegestaan op veen- en kleigrond wanneer mest gemengd wordt met water in een verhouding van één deel mest en half deel water (RVO, 2019). Op onbegroeid bouwland dient de mest ook direct in sleufjes in de grond gebracht te worden, of direct in één werkgang ondergewerkt te worden. Direct onderwerken kan gedaan worden door middel van injectie, terwijl het uitrijden van mest in sleufjes middels zodenbemesting kan worden uitgevoerd.



Sleepvoet

Sleufkouter

Zodenbemester

Figuur 1. Overzicht van beschikbare emissiearme mesttechnieken op grasland die geïmplementeerd zijn als onderdeel van de meststoffenwet.

Sinds de implementatie van emissiearme mesttoedieningstechnieken in de vorige eeuw is er weinig verdere progressie geboekt om ammoniakemissie bij mesttoediening te beperken, terwijl de doelstellingen voor ammoniakemissie verder aangescherpt zijn (PBL, 2023). Daarom is het programma Bemest op z'n Best

opgestart. Dit programma is primair gericht op het ontwikkelen en onderzoeken van technieken waarmee de ammoniakemissie gehalveerd kan worden ten opzichte van de emissie die nu plaatsvindt in de praktijk.

Het programma Bemest op z'n Best heeft als doel om innovatieve mesttoedieningstechnieken te onderzoeken waarmee de ammoniakemissie verder verminderd kan worden ten opzichte van de huidige gangbare technieken (bemesten met zodenbemester of sleepvoet/sleufkouter) in Nederland. De technieken in onderzoek betreffen:

- 1) het afdekken van de mestsleuven met verschillende materialen
- 2) toedienen dunne mestfractie die is aangezuurd door opwekken van de plasmafase in de mest
- 3) betere uitvoering van zodenbemesting middels real time controle
- 4) het afdekken van de mestsleuven met gronddeeltjes
- 5) het schuin insnijden van de zode waardoor het contactoppervlak met de atmosfeer wordt beperkt
- 6) het diep injecteren van mest zonder open sleuven

De toepassing van deze nieuwe toedieningstechnieken heeft mogelijk niet alleen effect op de ammoniakemissie, maar ook op andere aspecten met betrekking tot landbouw en milieu zoals de mestbenutting, bodem- en waterkwaliteit en grondstoffengebruik. In dit rapport duiden we deze aan als nevenaspecten.

In het programma 'Bemest op zijn Best' zijn geen metingen voorzien om het effect van nevenaspecten te kwantificeren. In eventueel vervolgonderzoek zouden dergelijke metingen echter wel degelijk waardevol en nuttig kunnen zijn. Het is dan ook van belang om bij ontwikkeling van innovatieve toedieningstechnieken van mest ook na te gaan welke nevenaspecten bijzondere aandacht verdienen bij doorontwikkeling of bij toepassing van de technieken in de praktijk.

1.2 Doelstelling

Het doel van deze verkenning is om voor elke innovatieve techniek die in onderzoek is in Bemest op z'n Best een schatting te maken van de orde van grootte van potentiële nevenaspecten. De volgende nevenaspecten komen aan bod:

- Stikstofwerking
- Organisch stofgehalte in de bodem
- Bodemverdichting
- Schade aan graszode
- Bodemleven
- Weidevogels
- Fosfaat uit- en afspoeling
- Stikstof uit- en afspoeling
- Stank en geur
- Afwentelingen op lachgas
- Methaan emissie
- Energieverbruik
- Kostprijs
- Waterverbruik
- Aanvoer van (extra) nutriënten en hulpstoffen

De resultaten van dit onderzoek kunnen gebruikt worden om een risico op afwentelingen te bepalen en aanbevelingen te doen om een nevenaspect diepgaander te onderzoeken of een innovatieve techniek door te ontwikkelen. Bestaande en toegestane bemestingstechnieken gelden als referenties in dit onderzoek. Het onderzoek naar nevenaspecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken richt zich op de situatie in Nederland.

2 Opzet van het onderzoek

2.1 Overzicht

Binnen het programma 'Bemest op z'n Best' wordt onderzoek gedaan naar de ammoniakemissie die te verwachten zijn bij gebruik van nieuwe toedieningstechnieken voor mest. Vooruitlopend op de definitieve uitkomsten van dit onderzoek worden in dit onderzoek de effecten op nevenaspecten verkend.

Het beoogd resultaat van deze verkenning is inzicht in welke nevenaspecten van belang zijn bij doorontwikkeling, vervolgonderzoek of implementatie van innovatieve mesttoedieningstechnieken. De verkenning wordt uitgewerkt door per innovatie na te gaan welke neveneffecten kunnen optreden bij toepassing van de innovatieve toedieningstechniek. Het gaat hierbij om de effecten ten opzichte van toepassing van de toegestane techniek op een gangbare, zorgvuldige wijze. Om deze vraag te beantwoorden is een analysekader opgesteld (paragraaf 2.2) met een aantal afbakeningen en definities als uitgangspunt, te weten:

1. Definities voor de begrippen neveneffecten en nevenaspecten.
2. Definitie van een uniform scoringsschema voor de beoordeling van potentiële nevenaspecten.
3. Definitie en beschrijving van referentiesituaties waarmee toepassing van innovatieve technieken worden vergeleken.
4. Afbakening en definitie van de nevenaspecten die bij de verkenning betrokken worden.
5. Afbakening en definitie van de innovatieve toedieningstechnieken in de analyse.

In de analyse wordt uitgegaan van verwachtingen van de reductie van ammoniakemissie bij gebruik van innovatieve technieken; tevens wordt uitgegaan van verwachte kenmerken van de technieken, waarbij deze kenmerken zijn afgeleid van prototypes van de technieken.

In dit hoofdstuk is beschreven welk analysekader is gebruikt, inclusief de hiervoor genoemde afbakeningen en definities (paragraaf 2.2). In paragraaf 2.3 zijn een aantal opmerkingen gemaakt over de uitwerking van de analyse, d.w.z. de toepassing van het analysekader.

2.2 Analyse kader

2.2.1 Nevenaspect en neveneffect

Met *nevenaspect* bedoelen we in deze verkenning: een thema, proces of fenomeen met betrekking tot landbouw, natuur of milieu, *anders* dan ammoniakemissie, waar in principe rekening mee gehouden moet worden bij ontwikkeling of implementaties van innovaties. Nevenaspecten zijn gedefinieerd in paragraaf 2.3.

Met *neveneffect* bedoelen we in deze verkenning: het effect van toepassing van een innovatieve toedieningstechniek ten opzichte van een referentiesituatie.

Nevenaspecten kunnen nadere aandacht verdienen vanwege de mogelijkheid van ongewenste of juist gewenste effecten.

Voor deze begripsaanduidingen is gekozen om duidelijk uit te kunnen drukken wat het doel is van deze verkenning en wat haalbaar is in deze verkenning. Het doel is om aan te wijzen welke nevenaspecten aandacht verdienen, bijvoorbeeld voor nader onderzoek, en dit zien we als haalbaar. Het doel is niet om neveneffecten vast te stellen; dit zien we als niet haalbaar.

2.2.2 Uniform scoringssysteem

Om verschillende nevenaspecten in één kader te kunnen opnemen is een uniform scoringssysteem nodig. Omdat neveneffecten in het algemeen niet gekwantificeerd kunnen worden (zie Paragraaf 2.2.1), is een kwalitatief scoresysteem toegepast, waarbij de effecten zijn geclassificeerd met een schaal van -- (ongunstig effect) tot ++ (gunstig effect). De score 0 staat voor 'geen effect', terwijl + en - respectievelijk een 'licht gunstig' en 'licht ongunstig' effect aangeven. Ten slotte betekent +/- een 'verwaarloosbaar gunstig' effect en -/0 een 'verwaarloosbaar ongunstig' effect.

Bij de meeste nevenaspecten komt het voor dat een integrale score voor het effect van een innovatie gebaseerd is op sub-scores van meer dan één indicator. In die gevallen worden de uiterste uitslagen van de sub-scores meegenomen in de integrale score. Een score op indicator 1 van - en een score op indicator 2 van + leidt dus tot een integrale score - tot +. Een score -- en 0 leidt tot integrale score -- tot 0; een score + en + leidt tot integrale score +. Er is niet gekozen voor bepaling van een integrale score door berekening van een gemiddelde of gewogen gemiddelde omdat het meenemen van de uiterste uitslagen in een integrale score beter past bij het aanwijzen van aandachtspunten.

2.2.3 Referentiesituaties

Om een inschatting te maken van de effecten van het gebruik van een andere nieuwe manier van mesttoediening moet vastgesteld worden met welke referentiesituaties de innovaties vergeleken worden. Van belang hierbij is dat een innovatie die is ontworpen voor toepassing in een bepaalde situatie wordt vergeleken met een referentie die betrekking heeft op dezelfde toepassingssituatie. Zo wordt voorkomen dat bijvoorbeeld een innovatie voor drijfmest toepassing op zand, zou worden vergeleken met een standaard voor klei, wat een vertekend beeld zou opleveren. In deze paragraaf wordt uiteengezet hoe deze referenties zijn gedefinieerd.

2.2.3.1 Overzicht

Tabel 1 geeft een overzicht van de referentiesituaties. De referentiesituaties zijn onderscheiden naar bodemtype (klei/zand/veen) en grondgebruik (grasland/bouwland). Bovendien is de bemesting een onderdeel van de referentie. Bij elke referentie is uitgegaan van een werkwijze die overeenkomt met de wettelijke voorschriften (voorschriften worden kort behandeld in onderdeel 2.2.3.4). Er zijn geen referenties ontwikkeld voor toepassing van andere mestsoorten dan drijfmest.

Tabel 1. Aspecten van de referentiesituaties (tussen haakjes de onderdelen in deze paragrafen met meer specifieke toelichting).

Bodemtypen (2.2.3.2)	Grondgebruik (2.2.3.3)	Machine (2.2.3.4)	Bemesting per snede (2.2.3.5)
Zand	Gras	Zodenbemester	RVM*/25m ³ ha ⁻¹ /Gebruiksruimte zand
	Bouwland	Zodenbemester	RVM* /25m ³ ha ⁻¹
Klei	Gras	Zodenbemester	RVM* /25m ³ ha ⁻¹ /Gebruiksruimte klei
	Bouwland	Zodenbemester	RVM* /25m ³ ha ⁻¹
Veen	Gras	Sleepvoet/Sleufkouter	RVM* /25m ³ ha ⁻¹ /Gebruiksruimte veen
	Bouwland	Geen	

* Rundveedrijfmest

2.2.3.2 Bodemtypen

Er is onderscheid gemaakt tussen de verschillende bodemtypen vanwege verschillen in de daarop toegepaste toedieningsmethodes. Bovendien is het onderscheid naar bodemtypen van belang omdat neveneffecten van een innovatie verschillend kunnen zijn voor verschillende bodemtypen – ook als dezelfde machine wordt toegepast. Vanuit dit oogpunt is het onderscheid naar 3 bodemtypen nog vrij algemeen, zo is denkbaar dat een neveneffect zoals nitraatuitspoeling op een zandgrond met een hoge grondwaterspiegel niet hetzelfde is als op een diep gedraineerde zandgrond. Er is echter niet gekozen voor verdere differentiatie in de referenties omwille van het overzicht.

2.2.3.3 Grondgebruik

Hoewel in de analyse het accent ligt op toepassing van innovaties op grasland is er ook een innovatie voor mesttoediening op bouwland. Daarom zijn beide gewassen onderdeel van de referentie. Voor grasland is uitgegaan van gebruik van rundveedrijfmest, omdat op grasland vooral rundveemest wordt toegepast (Nema 2023). Voor bouwland is geen specifieke mestsoort gedefinieerd. Voor de zwaarte van de mestgift wordt verwezen naar onderdeel 2.2.3.5.

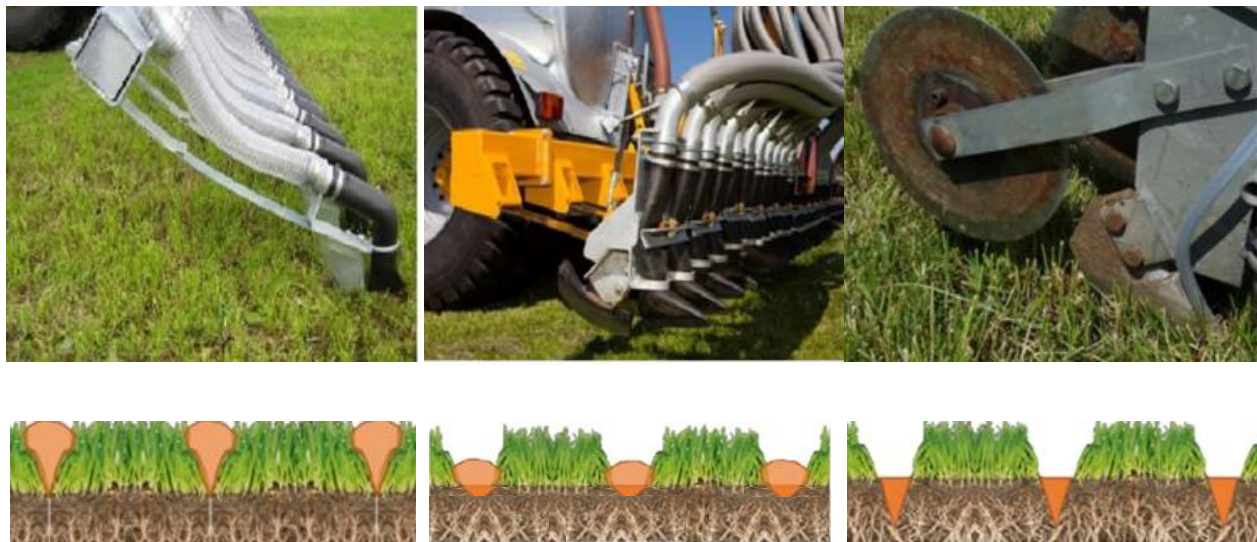
2.2.3.4 Machines en voorgeschreven werkresultaat

Als referenties zijn voor grasland gehanteerd de toepassing van de zodenbemester op zand, toepassing van de zodenbemester op klei en toepassing van de sleepvoet of de sleufkouter op veen (zie ook het schema in Figuur 2). Bij gebruik van de zodenbemester gaat het om toediening van mest in sleufjes van maximaal 5 cm breed, in de grond. Bij gebruik van een sleevoet of sleufkouter wordt de mest in strookjes van maximaal 5 cm breed tussen het gras op de grond aangebracht. De zodenbemester kan in principe op alle bodemtypen toegepast worden, maar op veengrond wordt meestal een sleepvoet of sleufkouter gebruikt. De toepassingsvoorschriften waarvan uitgegaan is in de referentiesituaties zijn weergegeven in Tabel 2. Toepassing van de sleepvoet en de sleufkouter worden als inwisselbaar beschouwd en zijn daarom samengevoegd in één referentie. Op grond van de voorkomende bodemtypen, grondgebruik en machines kunnen 7 referentiesituaties worden onderscheiden. Deze 7 varianten komen in de analyse echter niet expliciet als verschillende referentiesituaties naar voren. Dit wordt toegelicht in paragraaf 2.3.2.

Tabel 2. Toepassingsvoorschrift waarvan uitgegaan is in de verschillende referentiesituaties.

Ref.nr	Bodemtypen (2.2.3.2)	Grondgebruik (2.2.3.3)	Machine (2.2.3.4)	Voorschrift drijfmesttoediening
1	Zand	Gras	Zodenbemester	In sleufjes in de grond van max 5 cm breed (onderlinge afstand tenminste 15 cm)
2		Bouwland	Zodenbemester	In sleufjes in de grond van max 5 cm breed
3	Klei	Gras	Sleepvoet/Sleufkouter	In strookjes tussen het gras van max 5 cm breed (onderlinge afstand tenminste 15 cm), waarbij mest is verdund met water (verhouding: 2 mest/1 water)
4			Zodenbemester	In sleufjes in de grond van max 5 cm breed (onderlinge afstand tenminste 15 cm)
5		Bouwland	Zodenbemester	In sleufjes in de grond van max 5 cm breed
6	Veen	Gras	Sleepvoet/Sleufkouter	In strookjes tussen het gras van max 5 cm breed (onderlinge afstand tenminste 15 cm), waarbij mest is verdund met water (verhouding: 2 mest/1 water)
7			Zodenbemester	In sleufjes in de grond van max 5 cm breed (onderlinge afstand tenminste 15 cm)
-		Bouwland	NVT	

Bij sommige nevenaspecten vraagt de analyse om een verdere specificatie van het type machine dat gebruikt wordt. Gedetailleerde specificaties zijn: De referentie zodenbemester heeft 5 kouters per meter werkbreedte, dus een kouterafstand van 20 cm, de mest wordt 2-5 cm diep aangewend en de sleuven zijn maximaal 5 cm breed. Voor de sleepvoetbemester worden dezelfde waardes gehanteerd behalve de diepte, want de sleepvoet legt de mest oppervlakkig neer i.p.v. dieper.



Sleepvoet

Sleufkouter

Zodenbemester

Figuur 2. Schematisch overzicht van referentiemachines, waarbij het werkresultaat ook schematisch is weergegeven.

2.2.3.5 Bemesting

Ten aanzien van bemesting zijn referenties gedefinieerd op het niveau van:

1. de uitvoering van een enkele bemesting en
2. het totaal van de bemesting met N in het gehele bemestingsseizoen (jaargift N)

Ad. 1

Voor zowel grasland als bouwland is de referentiesituatie dat de bemesting van 25 m³ rundveedrijfmest voor een enkele snede plaatsvindt binnen het uitrijseizoen.

Ad. 2

Bij sommige innovaties ligt het voor de hand om met minder bemestingsrondes in gras te werken. Dit heeft effecten op jaarbasis die in analyses pas aan het licht komen als de analyse op de tijdschaal van een volledig bemestingsjaar wordt gericht. Ook kunnen innovaties effecten hebben op de totale jaargift, wat zich ook slechts toont in een analyse op jaarbasis. Daarom is bemesting over een geheel seizoen als referentie toegevoegd aan de referentie die gebaseerd is op een enkele bemesting.

Referentiejaargiften zijn afgeleid van de wettelijke plaatsingsruimte van dierlijke mest N en totaal N. Er is uitgegaan van het bemesten op grasland bij verschillende grondsoorten, waarbij is aangenomen dat de plaatsingsruimte volledig wordt benut. Dit houdt in dat de dierlijke plaatsingsruimte volledig wordt ingevuld (170 kg N met ongeveer 42,5 m³) met rundveedrijfmest. Bij rundveedrijfmest wordt uitgegaan van een directe werking van 35%, een nawerking bij de volgende snede van 15% en een nawerking van de daaropvolgende snede van 10%, dus een totale werking van 60% in één jaar (RVO, 2025).

Voor het overige deel van de plaatsingsruimte is aangenomen dat deze zal worden opgevuld met kalkammonsalpeter (KAS, 27%). Waarbij ervanuit is gegaan dat 3,7 kg KAS gelijk is aan 1 kg werkzame N. Tenslotte is het noodzaak aan te nemen hoeveel stikstof er per snede wordt gegeven. In het geval van de referentie is er rekening gehouden met vijf snedes, waarbij de eerste twee snedes worden bemest met rundveedrijfmest, de overige alleen met kalkammonsalpeter. Een verdeling van het hele groeiseizoen is te zien in tabel 3 en 4.

Tabel 3. Verdeling van de stikstofgift over de verschillende snedes waarbij het percentage het deel van de totale gebruiksruimte aangeeft.

1 ^e snede	35%
2 ^e snede	25%
3 ^e snede	20%
4 ^e snede	15%
5 ^e snede	5%

De gebruiksnormen voor de verschillende grondsoorten zijn bij alleen maaien 385 kg werkzame N per ha op kleigrond, 320 kg werkzame N per ha op zandgrond en 300 kg werkzame N per ha op veengrond. Dit betekent bij het uitgangspunt van alleen maaien met een werking van 60% voor dierlijke mest dat er voor kleigrond $385 \text{ kg} - 0,6 \cdot 170 = 283 \text{ kg}$ werkzame N aan ruimte overblijft voor kunstmest. Op basis van deze aannames zijn de onderstaande giften per seizoen opgesteld voor de referentiesituatie per grondsoort (Tabel 4).

Tabel 4. Gebruiksnormen, dosering dierlijke mest en KAS voor klei, zand en veen waarbij het uitgangspunt is dat de gebruiksruimte volledig wordt benut voor zowel dierlijke mest als kunstmest.

klei 385 kg	N verdeling (rdm + km, kg N per ha)	Dosering dierlijke mest (m ³ per ha, kg N per ha)	Werkzaam N uit dierlijk (kg)	Kg KAS	Kg werkzame N uit KAS
1 ^{ste} snede	135	25 m ³ (100 kg N)	35	369	100
2 ^e snede	96	17,5 m ³ (70 kg N)	39.5	210	57
3 ^e	77	-	20.5	209	56
4 ^e	58	-	7	188	51
5 ^e	19	-	-	71	19
Totaal klei	385	42,5 m³ (170 kg N)	102	1047	283
zand (320 kg)					
1 ^{ste} snede	112	25 m ³ (100 kg N)	35	285	77
2 ^e snede	80	17.5 m ³ (70 kg N)	39.5	150	41
3 ^e	64	-	20.5	161	43
4 ^e	48	-	7	152	41
5 ^e	16	-	-	59	16
Totaal zand	320	42,5 m³ (170 kg N)	102	807	218
veen (300 kg)					
1 ^{ste} snede	105	25 m ³ (100 kg N)	35	259	70
2 ^e snede	75	17.5 m ³ (70 kg N)	39.5	131	35
3 ^e	60	-	20.5	146	39
4 ^e	45	-	7	141	38
5 ^e	15	-	-	56	15
Totaal veen	300	42,5 m³ (170 kg N)	102	733	198

2.2.4 Definities nevenaspecten

Om tot een eenduidige analyse van nevenaspecten te kunnen komen, zijn de nevenaspecten als volgt gedefinieerd (zie kader 2.1) met de definitie gevolgd door [de grootheid waarin het aspect wordt uitgedrukt]:

Stikstofwerking: Als indicator voor de stikstofwerking wordt uitgegaan van de stikstofwerkingscoëfficiënt (NWC) van de dierlijke mest. Deze geeft aan welk deel van de in de mest aanwezige stikstof (N) eenzelfde effect heeft als kunstmest-N [NWC, uitgedrukt als percentage].

Organisch stof: Het effect van de toedieningstechniek op het organisch stofgehalte in landbouwbodems, waarbij zowel naar negatieve als positieve effecten wordt gekeken, bijvoorbeeld versnelde afbraak (negatief voor organisch stofgehalte) of verbeterde verdeling van mest wat opname en daarmee ontwikkeling van biomassa bevordert (positief voor organisch stofgehalte) [kg EOS/ha].

Bodemverdichting: is een verzamelterm die gebruikt wordt om de fysische veranderingen in de boven- en ondergrond aan te duiden. Deze veranderingen manifesteren zich in parameters zoals een verminderd poriënvolume, een verhoogde bulkdichtheid, een lagere infiltratiesnelheid van water, verlaagde capillaire werking van de grond en een toegenomen indringingsweerstand (BLN 2023). Het gaat hierbij specifiek om verdichting van de ondergrond als gevolg van mesttoediening. Relevante meeteenheden zijn onder andere de [dry bulk density (g/cm³) en de indringingsweerstand (MPa)].

Schade aan zode: Het effect van de toedieningstechniek op zowel de grasmat. Dit omvat schade aan de zoden, zoals veranderingen in de botanische samenstelling, zodedichtheid en het aandeel gewenste grassen, maar ook risico op verdroging langs de sleufrand. De indicator beschrijft de mate waarin de kwaliteit van de grasmat wordt aangetast door de gebruikte techniek [Zodekwaliteit (dichtheid en botanische samenstelling)].

Bodemleven: Het totaal aan bodemorganismen (bacteriën, schimmels, regenwormen etc.), vertaald naar de hoeveelheid schade en of hinder die aangericht wordt door de toegepaste toedieningstechniek. Die schade is uitgedrukt in de hoeveelheid regenwormen en de biomassa van bacteriën en schimmels in bodem (BLN 2023). [Hoeveelheid biomassa schimmels, bacteriën en regenwormen/m²]. Het gaat hierbij om structurele effecten die zich over langere termijn voordoen en dus niet om effecten die na één of enkele dagen verdwenen zijn.

Weidevogels: Schade en of hinder die weidevogels ondervinden van de toedieningstechniek, direct maar ook indirect op systeemniveau. Bijvoorbeeld, een achteruitgang in bodemleven (regenwormen) kan ook een achteruitgang in de voedselbeschikbaarheid voor vogels betekenen (indirect effect). Daarnaast zou een nieuwe toedieningstechniek bijvoorbeeld voor een verplaatsing van de toedieningsperiode naar in het broed- of kuikenseizoen kunnen zorgen, of juist voor minder uitrijmomenten kunnen zorgen. Ook kan bijvoorbeeld de afstand van elementen een invloed hebben op de kans van vogelverstoring. Kortom: het risico wordt aangegeven door de combinatie van tijdstip, frequentie en beroering van oppervlak (deze kenmerken bepalen samen een direct effect) [risicocombinatie van tijdstip, frequentie en mate van verstoring].

Fosfaatafspoeling: Oppervlakkige afspoeling van mest en of nutriënten naar oppervlaktewateren [Uitgedrukt als flux: kg P per ha per jaar].

Stikstofafspoeling: Oppervlakkige afspoeling van mest en of nutriënten naar oppervlaktewateren [Uitgedrukt als flux: kg N per ha per jaar].

Stikstofuitspoeling: Uitspoeling van stikstof naar oppervlakte- en grondwater [Uitgedrukt als flux: kg NO₃-N per ha per jaar].

Fosfaatuitspoeling: Uitspoeling van fosfaat naar oppervlakte- en grondwater [Uitgedrukt als flux: kg P per ha per jaar].

Stank en geur: De hoeveelheid geur die geëmitteerd wordt tijdens of vlak na het aanwenden van dierlijke mest, waarbij uit wordt gegaan van het principe hoe kleiner het emitterende oppervlak hoe kleiner de geuremissie Agnew *et al.* 2010 [geurbelasting in odour units, ouE/m³].

N₂ en/ of N₂O-emissie: Hoeveelheid lachgas (N₂O), Stikstofoxide(NO_x) of stikstof(N₂) die emitteert naar de atmosfeer, tijdens of vlak na toediening [flux: kg N per ha per jaar].

Methaanemissie: Hoeveelheid methaan die emitteert uit de aangewende mest, tijdens of vlak na het aanwenden [g CH₄ per ha].

Energieverbruik: Hoeveelheid energie die gebruikt wordt tijdens het aanwenden van de mest, maar ook het verbruik van voorbereidende werkzaamheden voor het aanwenden, die vereist zijn om aan te wenden. Denk hierbij bijvoorbeeld aan extra N-fixatie om de pH te verlagen. Het energieverbruik rekenen we toe aan een innovatie mesttoedieningstechniek als de energie gebruikt wordt op het moment van bemesting of vlak daarvoor. Het energiegebruik van aanwenden zal beïnvloed worden door de weerstand die de toedieningstechniek ondervindt en het gewicht van de gebruikte combinatie die de mest aanwendt [MJ per ton mest].

Kostprijs: Deze is opgebouwd uit de kosten die worden gemaakt om de toedieningstechniek te laten functioneren. Het gaat hierbij niet alleen om de afschrijving van de machine zelf, maar om alle andere benodigde inputs zoals energie, arbeid en tractor. Maar ook (extra) water of zwavelzuur [€/ ha].

Waterverbruik: Hoeveelheid water die wordt toegevoegd om de toedieningstechniek binnen de wetgeving te laten vallen dan wel werkzaam te krijgen [L/ha].

Aanvoer van (extra) stoffen: Gaat over welke stoffen en over de hoeveelheden van extra (hulp) stoffen die worden aangevoerd om de toedieningstechniek te laten functioneren. Het kan hierbij gaan om extra nutriënten, maar ook bijvoorbeeld zwavelzuur om de pH te verlagen van mest [kg / ha].

2.2.5 Innovaties

In deze paragraaf zijn de innovaties die in onderzoek zijn in Bemest op z'n Best beknopt beschreven. Afdekken met gronddeeltjes (nummer 2) is alleen toepasbaar op bouwland. De genoemde ammoniakemissie reductie percentages zijn eerste inschattingen, die gebaseerd zijn op lab metingen of expert inschatting, en nog niet op een serie van veldemissiemetingen. Het betreft de volgende innovaties:

1) Afdekken mestsleuven

Door bij toediening een afdeklaagje met bepaald materiaal boven de mest aan te brengen wordt de emissie van ammoniak beperkt (Figuur 3). Dit laagje wordt tijdens het bemesten over de sleuf aangebracht door middel van spuitnozzels (bij vloeistoffen) of een uitlooppijpje (bij suspensies) die achter het element hangen (zie ook figuur 3). De afdeklaag wordt apart opgeslagen op de bemestingstank middels een extra reservoir. Er zijn in totaal vier verschillende afdekmiddelen meegenomen in het onderzoek:



Bemester met 2 uitlaten



Pomp met reservoir voor toevoegmiddel

Figuur 3. Beelden van de techniek voor afdekken van mestsleuven.

a) Krijtsuspensie (calciumcarbonaat)

Bij deze methode wordt krijtsuspensie (calciumcarbonaat) over de mest aangebracht als barrière en door fysisorptie die de uitstoot van ammoniak vermindert. In de experimenten zijn meerdere concentraties getest, variërend van 0,7% tot 1,3% van de totale hoeveelheid mest. Dit komt overeen met 163 tot 325 kg calciumcarbonaat per hectare bij een gift van 25 m³.

b) Polyhaliet (mineraal)

Bij deze methode wordt polyhaliet over de mest aangebracht die en als barrière en door fysisorptie die de uitstoot van ammoniak vermindert. Polyhaliet is een natuurlijk mineraal dat bestaat uit 4% kaliumoxide, 19,2% zwavel, 6% magnesiumoxide en 17% calciumoxide en ingezet wordt als meststof. In de experimenten zijn meerdere concentraties getest, van 0,5% tot 1% van de totale hoeveelheid mest. Dit komt overeen met 125 tot 250 kg polyhaliet per hectare bij een gift van 25 m³ mest.

c) Magnesiumchloride

Bij deze methode wordt magnesiumchloride (of calciumchloride) over de mest aangebracht waarmee het fysisch chemisch gedrag van de toplaag van mest beïnvloed wordt en zo een soort barrière vormt die de uitstoot van ammoniak vermindert. Er wordt gewerkt met een verdunde oplossing waarbij 32% van de oplossing uit magnesiumchloride bestaat. Tijdens het experiment is er gewerkt met één concentratie in de mest, namelijk 0,3% van de totale hoeveelheid mest. Dit komt overeen met 28,8 kg magnesiumchloride per hectare bij een gift van 25 m³.

d) **Zwavelzuur**

Bij deze methode wordt zwavelzuur over de mest aangebracht, waardoor de pH van de mesttoplaag daalt en daarmee de dampdruk van ammoniak (tijdelijk) daalt en zo een soort barrière geeft ter vermindering van de uitstoot van ammoniak. In de experimenten zijn meerdere concentraties getest, van 0.4M tot 0.8M. Dit komt overeen met 0.98 tot 1.96 kg zwavelzuur per hectare bij een gift van 25 m³.

2) Afdekken sleuf met gronddeeltjes

Deze machine is een zodenbemester of sleufkouter/sleepvoet die wordt ingezet op bouwland, waarna in dezelfde werkgang de sleuven worden afgedekt met teeltgrond. Dit wordt gedaan door een additioneel krabbertje achter de zodenbemester. Bij het volledig afdekken van sleuven met grond wordt een ammoniakemissie behaald die vergelijkbaar is met een bouwlandinjecteur. Door het toevoegen van krabbers zal er een kleine meerprijs zijn t.o.v. een gangbare zodenbemester.

3) Mest in sleuven met minimaal luchtcontact door schuin insnijden

Het contact van drijfmest met lucht wordt beperkt door de mest in schuine sleuven in de grond te brengen, door middel van schuin geplaatste snijkouter. De snijdiepte ligt tussen de 5-7 cm en er worden geen toevoegmiddelen gebruikt. Bij de testmachine gebruikt in BoB was de hoek van de snijkouter ten opzichte van de rijrichting 10°, welke de sleufwijdte bepaalt. De hoek van de snijkouter ten opzichte van een denkbeeldige verticale lijn vanaf de bodem was 70° (i.p.v. 90° bij een reguliere zodenbemester). Dan ontstaat een sleuf met genoeg ruimte die aangedrukt kan worden met een nog te ontwikkelen aandrukmechanisme. De kosten van deze machine zijn naar schatting te vergelijken met een normale zodenbemester.

4) Diepe injectie

Het emitterende oppervlak wordt volledig gereduceerd door een sleuf te snijden in de grasmat (diepte ca. 14 cm) met een schijf (600 mm doorsnede) met daarachter een ganzenvoet op ca. 12 cm diepte. De sleuf wordt dichtgedrukt door aandrukwielen. Door het geringe emitterende oppervlak wordt de ammoniakemissie gereduceerd tot ongeveer 2% (Bussink, Klarenbeek, Huijsmans, & Bruins, 1990). Er verandert niets aan de samenstelling van de mest. De kosten van een injecteur worden gelijk geschat aan de kosten van een bouwland-injecteur, en de capaciteit zal ook vergelijkbaar zijn per uur (30 tot 40 m³/uur) bij een rijsnelheid van 5 tot 6 km/uur. Deze innovatie is niet toepasbaar op veengrond.



Figuur 4. Voorbeelden van diepinjectiemachine die in Bemest op z'n Best worden bekeken.

5) Betere uitvoering zodenbemesten

Cameratechnieken en dieptesensoren borgen dat de uitvoering van de zodenbemesting onder alle omstandigheden goed is en aan de normen voldoet door de breedte en diepte van de sleuf te controleren. Er wordt geen NH₃ verlaging behaald t.o.v. de EF die wordt gehanteerd voor zodenbemesten of sleepvoet/sleufkouter, en het werkingsprincipe van deze machines verandert ook niet. Er zal wel een kleine verhoging zijn van de aanschafprijs vanwege de additionele cameratechnieken.

6) Aanzuren mest door opwekken plasmafase

Door een bliksem in mest op te wekken, ontstaat een plasmafase. Hierdoor wordt luchtvrrije stikstof

gebonden als nitraat in de mest. Dit proces gaat gepaard met verlaging van de pH van mest. Tot nu toe wordt er alleen gewerkt met dunne fracties. Werken met ruwe mest is wellicht mogelijk als dikkere leidingen wordt gebruikt, zodat er geen verstopping plaatsvindt. Door de toevoeging van nitraat komt er extra stikstof in de mestproducten, door het verlagen van de pH is er een NH₃ emissie reductie behaald ten opzichte van onbewerkte mest of onbewerkte effluenten (dikke & dunne fractie die niet zijn behandeld door de plasmamachine). De machine verbruikt ongeveer 30 – 40 kWh per kg stikstof in het eindproduct. De machine die de mest bewerkt kost ca. €200.000, waarna er met een zodenbemester, sleepvoet of sleufkouter gewerkt kan worden om de producten uit te rijden.

Zoals gezegd wordt er op dit moment enkel gewerkt met dunne fractie, wat betekent dat er voor het gebruik van de innovatie eerst mest gescheiden moet worden. Dit kan gebeuren met bijvoorbeeld een schroefpers of een centrifuge. Het scheidingsrendement is afhankelijk van de mestsamenstelling, en de kwaliteit van de scheidingsmachine (Schröder, de Buissonjé, Kasper, Verdoes, & Verloop, 2009). In dit rapport wordt niet ingegaan op de dikke fractie, omdat deze niet te vergelijken is met de referentie die in deze studie wordt gebruikt. Echter kan er wel wat opgetekend worden over het gebruik van dikke fractie en de effecten daarvan:

- Bij het gebruik van dikke fractie is het van belang dat dit op bouwland plaatsvindt indien een boer dit heeft, waarna het z.s.m. ondergewerkt wordt om de ammoniakemissie te beperken. Hierdoor is de ammoniakemissie beperkt tot 15% van TAN. Gebruik op grasland zorgt voor een verhoogde ammoniakemissie, tot ongeveer 40% van TAN (Nema, 2023).
- Dikke fractie bevat relatief veel organisch stof waardoor het zeer geschikt is als bodemverbeteraar van met name bouwland, en een gunstig effect heeft op het organisch stof niveau (www.handboekbodemenbemesting.nl).

2.3 Opmerkingen over de uitwerking van de analyse

Omwillen van de leesbaarheid van dit verslag en om de stap van methodiek naar uitvoering van de analyse voldoende compleet te beschrijven, zijn in deze paragraaf hier een aantal bijzonderheden en specifieke toelichtingen weergegeven die betrekking hebben op de uitvoering van de analyse.

2.3.1 Bijzonderheden met betrekking tot het scoringsschema

In de analyse is gebruikt gemaakt van een uniform kwalitatief scoringsschema (2.2.2). Bij uitwerking van de analyse zijn er enkele bijzonderheden en uitzonderingen op deze aanpak te noemen:

- De nevenaspecten met betrekking tot stikstof zijn gebaseerd op berekeningen van de N werking uit drijfmest die zijn uitgevoerd met het WOGWOD-model (Werkgroep Onderbouwing Gebruiksnormen – Werkgroep Onderbouwing Derogatie). Als tussenstap op het toepassen van het uniforme scoringsschema zijn eerst de verwachte effecten van innovaties op de N werking weergegeven. Daarna zijn deze pas vertaald in de scoringssystematiek. Overigens betekent dit niet dat de berekende effecten op de N werking direct wetenschappelijk betrouwbaar zijn. De berekeningen zijn namelijk gebaseerd op tentatieve aanduidingen van de besparing op ammoniakemissie.
- Voor het waterverbruik zijn de kwantitatieve effecten geschat en uitgedrukt in hoeveelheid water.
- Ook voor de aanvoer van hulpstoffen zijn kwantitatieve effecten geschat en uitgedrukt in hoeveelheden. De achtergrond van deze keuze was dat deze waarden meer betekenis hebben dan de vertaling van deze waarden in het uniform scoringssysteem.

2.3.2 De zodenbemester als dominante referentie en overige referentiesituaties als afgeleide

In de analyse van nevenaspecten is zodenbemesting op grasland op zand en klei de belangrijkste pijler. Na de expliciete beschrijving van de analyse voor deze situatie zijn, als dat nodig was vanwege het toepassingsgebied van een innovatie of vanwege bijzonderheden van innovaties, opmerkingen opgenomen over andere referentiesituaties. Deze ietwat ondergeschikte positie van deze 'overige referentiesituaties' (zie ook Tabel 1 en Tabel 2 voor het volledige overzicht) houdt ermee verband dat er geen enkele innovatie is

geanalyseerd die specifiek voor veengrond is ontworpen en dat er slechts één innovatie is geanalyseerd die specifiek voor bouwland is ontworpen (afdekken met grond).

2.3.3 Indicatoren voor neveneffecten als onderdeel van uitwerking in hoofdstuk 3

Voor de meeste nevenaspecten is het nodig om, aanvullend op de definitie van de nevenaspecten, specifieke indicatoren te kiezen om schatting van effecten herleidbaar mogelijk te maken. Daarom zijn voor de nevenaspecten ook indicatoren vastgesteld en is beschreven hoe een nevenaspect kan worden gekwantificeerd en hoe een effect in werking treedt. Daarna is pas het verwachte effect beschreven. Dit voorwerk kan op zichzelf beschouwd worden als een stap die behoort bij de (beschrijving van de) onderzoeksmethode en die in de verslaglegging dan ook eerder in dit hoofdstuk 2 verwacht zou worden. We hebben dit onderdeel als aspect van uitwerking meegenomen in hoofdstuk 3 om de inhoudelijke bespreking van elk aspect en het resultaat van het scoren niet al te zeer uit elkaar te trekken.

2.3.4 Bemesting bij besparing op verliezen door toepassing van de innovaties

Toepassing van de innovaties heeft gevolgen voor ammoniakverliezen en andere gasvormige N verbindingen. Deze veranderingen werken door in de N werking van de toegediende mest. In de analyse is ervan uitgegaan dat bij toepassing van de innovaties het gebruik van kunstmest-N wordt aangepast aan de veranderingen van de N werking. De achtergrond van deze keuze is dat deze goed past bij het beginsel van de Goede Landbouw Praktijk en bij het uitgangspunt dat zowel in de referentie als in de situatie met innovatie de bemesting wordt uitgevoerd conform de gebruiksnormen. Dit vertrekpunt is van principieel belang voor het resultaat van de analyse van veel nevenaspecten. De consequentie van deze benadering is dat het zuivere effect van minder ammoniakemissie op bijvoorbeeld nitraatuitspoeling slechts aan te geven is op basis van een systeembenadering gericht op vergelijking van jaargiften van stikstof (zie ook 2.2.3.5). Het aanpassen van het kunstmest N gebruik wordt geïnterpreteerd als neveneffect op het gebruik van grond- en hulpstoffen.

3 Resultaten

3.1 Indicatoren voor het kwantificeren van effecten

In deze paragraaf is beschreven met welke indicator(s) effecten op de nevenaspecten worden gekwantificeerd.

3.1.1 Stikstofwerking

Als indicator wordt uitgegaan van de stikstofwerkingscoëfficiënt (NWC) van de dierlijke mest. Deze geeft aan welk deel van de in de mest aanwezige stikstof (N) eenzelfde effect heeft als kunstmest-N. Voor de kwantificering wordt ervan uitgegaan van de systematiek die ook wordt gebruikt in het bemestingsadvies (www.bemestingsadvies.nl). De NWC wordt bepaald door de werking van de minerale N (Nm) en door de werking van de organische N (Norg) en de verhouding Nm en Norg in de mest. Bij de minerale N wordt onderscheid gemaakt tussen NH₄-N en NO₃-N. In het algemeen bevatten dierlijke mestproducten vrijwel geen NO₃-N, maar bij één van de beschouwde technieken (plasmatechniek) wordt NO₃-N toegevoegd aan de mest.

De NWC kan dan als volgt worden berekend:

$$\text{NWC} = \text{fractie NO}_3\text{-N} * \text{NWC-NO}_3\text{-N} + \text{fractie NH}_4\text{-N} * \text{NWC-NH}_4\text{-N} + \text{fractie Norg} * \text{NWC-Norg}$$

De gehanteerde NWC-waarden voor de drie fracties in de referentiesituaties (zodenbemesten en sleepvoet+verdunding) staan in Tabel 5. Voor NO₃-N wordt ervan uitgegaan dat deze eenzelfde werking heeft als kunstmest-N en wordt uitgegaan van een NWC van 100%. Er is geen rekening gehouden met eventuele denitrificatie, waardoor de aanwezige NO₃ in de mest verloren gaat via gasvormige verliezen. De werking van de NH₄-N is lager dan die van NO₃-N, omdat een deel van de NH₄-N verloren gaat via ammoniakemissie bij de toediening. De ammoniakemissie hangt af van de toedieningswijze. In deze studie is voor zand- en kleigrond voor de referentiesituatie uitgegaan van toediening met de zodenbemester en voor veengrond van de sleepvoet gecombineerd met verdunding van de mest met water (zie beschrijving referentie). In beide gevallen bedraagt de NWC van de NH₄-N 83% (www.bemestingsadvies.nl). Deze is afgeleid van een gemiddelde NH₄-N-emissie bij toediening van 17% (Van Bruggen et al., 2024). De werking van de Norg hangt af van het tijdstip van toediening. Hoe vroeger in het jaar de mest wordt toegediend hoe hoger de werking van de Norg. Dit komt omdat er bij vroegere toediening het resterende groeiseizoen van het gras na de toediening langer is en in het resterende groeiseizoen meer N beschikbaar komt via mineralisatie van de Norg. In deze studie wordt uitgegaan van toediening voor de eerste en voor de tweede snede (zie hoofdstuk 3.2.1). Bij de werking van de Norg is uitgegaan van de eerstejaars werking (de werking in het jaar van toediening). De werking van de Norg hangt niet af van de toedieningstechniek (zodebemester of sleepvoet + verdunnen).

Tabel 5. Gehanteerde N-werkingscoëfficiënten (% van toegediende N) voor de NO₃-N, NH₄-N en N-org in de mest in de referentiesituatie (voor NH₄-N en Norg: www.bemestingsadvies.nl).

Toedieningstechniek	NO ₃ -N	NH ₄ -N	Norg	
			1 ^e snede	2 ^e snede
Zodenbemester	100	83	20	17
Sleepvoet + verdunding	100	83	20	17

Voor het N-gehalte in de drijfmest is uitgegaan van gemiddelde waarden (Tabel 6, www.bemestingsadvies.nl). Bij de *plasmatechniek* wordt voorafgaand aan de behandeling de drijfmest eerst gescheiden in een dikke en dunne fractie en vervolgens wordt de dunne fractie behandeld. Voor een goede vergelijking is voor de referentie niet drijfmest, maar een onbehandelde dunne fractie genomen. Voor de samenstelling daarvan is ook uitgegaan van een gemiddelde waarde zoals vermeld in het bemestingsadvies. Voor de hoeveelheid toegevoegde nitraat is uitgegaan van de analyses van behandelde dunne fractie zoals

gebruikt bij de emissieproeven (zie hoofdstuk 3.2.1). Voor de NWC van de $\text{NH}_4\text{-N}$ bij toediening van de onbehandelde dunne fractie is uitgegaan van dezelfde NWC als voor drijfmest (83%).

Tabel 6. Gehanteerde waarden voor N-gehalte (kg/ton) in de drijfmest en dunne fractie

Mestproduct	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	Norg	Ntotaal
Drijfmest	0	1,9	2,1	4,0
Dunne fractie1, scheidingsrendement 30%	0	1,9	1,7	3,6
Dunne fractie2, scheidingsrendement 60%	0	2,0	1,1	3,1
Dunne fractie1, bewerkt met plasmatechniek	1,6	1,9	1,7	5,2
Dunne fractie2, bewerkt met plasmatechniek	1,6	2,0	1,1	4,7

De mestdoseringen waren 25 m³ per ha in de eerste snede en 17,5 m³ per ha in de tweede snede (zie beschrijving referentie). Deze doseringen zijn doorgerekend bij zowel de drijfmest als de dunne fractie.

De verwachte effecten van de beschouwde emissie-reducerende technieken hangen af van de verandering van de NWC van de minerale N. Bij de meeste technieken vloeien de effecten voort uit de vermindering van de ammoniakemissie. Dit leidt tot een verhoging van de NWC van $\text{NH}_4\text{-N}$. Bij de plasmatechniek is er aanvullend nog een effect van toevoeging van $\text{NO}_3\text{-N}$ aan de mest. Er is aangenomen dat de technieken geen effect hebben op de werking van de Norg.

Bepalend voor de uitkomsten zijn de gehanteerde reducties van de ammoniakemissie. Van veel technieken is nog onzeker wat de reductie van de ammoniakemissie is. Daarom is door een aantal experts binnen het project een bandbreedte aangegeven waarbinnen de emissiereductie zich naar verwachting zal bevinden (Tabel 7). De inschattingen zijn gebaseerd op uitkomsten van eerste metingen en expertkennis.

Bij de plasmatechniek is ervoor gekozen om de verwachte NWC te vergelijken met die van onbehandelde dunne fractie. Een eerlijke vergelijking met drijfmest is alleen mogelijk indien ook de NWC van de ontstane dikke fractie in beschouwing zou worden genomen. Omdat de dikke fractie ook vaak wordt toegediend op bouwland, zou dit meer een bedrijfsmatige analyse vergen.

Tabel 7. Geschatte NH_3 -emissiereducties van de verschillende innovatieve mesttoedieningstechnieken o.b.v. expert judgement binnen Bemest op z'n Best.

	NH ₃ -emissiereductie (%)	
	Min	Max
Afdekken mestsleden		
<i>Krijtoplossing</i>	12,5	50
<i>Magnesiumchloride</i>	12,5	50
<i>Zwavelzuur</i>	12,5	50
<i>Polyhaliet</i>	12,5	50
<i>Grond</i>	30	70
Plasmabehandeling	37,5	67,5
Beperking contact met lucht		
<i>Diepe injectie</i>	87,5	100
<i>Schuin insnijden</i>	25	50

3.1.2 Organisch stof

Organische stof is een verzamelnaam voor al het organisch materiaal in de bouwvoor of wortelzone dat afkomstig is van planten, dieren en micro-organismen, en bestaat uit levend en dood materiaal; onverteerde plantenresten, bodemleven, plantenwortels, etc. Grofweg 58% van de organische stof bestaat uit koolstof (Koopmans & Van Opheusden, 2019). Het organische stofgehalte van de bodem is niet stabiel maar kan veranderen door aanvoer via mest, compost en gewasresten en afbraak door bodemorganismen. Als in een bepaalde periode de aanvoer groter is dan de afbraak is er toename, als de afbraak groter is, is er afname van organische stof (Zwart et al., 2013). Grasland heeft een hoge aanvoer van organische stof uit gewasresten en wortels, en relatief tot bouwland een lage netto afbraak. Over het algemeen zorgt blijvend grasland voor een gestage toename van het organische stofgehalte in de bodem (de Wit et al. 2018), totdat er na enkele decennia een evenwicht is bereikt. Door bodemanalyses van verschillende jaren met elkaar te vergelijken kan in principe een toe- of afname van het organische stofgehalte bepaald worden, maar veranderingen tussen jaren zijn vaak relatief klein.

Het organische stofgehalte van de bodem kan bepaald worden uit een bodemmonster (gloeiverlies bepaling bij 550 graden Celsius) en is een vast onderdeel van de meeste bodemanalyses (van Eekeren & Bokhorst, 2009). Ook kan het organische stofgehalte bepaald worden met NIRS en C-elementair technieken. Deze drie methoden komen niet exact overeen. Daarnaast hebben alle methoden een relatief grote meetfout ten opzichte van de op korte termijn relatief kleine verschillen in organische stof, wat het vaak lastig maakt om kleine veranderingen in organische stofgehalten duidelijk te krijgen (Koopmans & Van Opheusden, 2019). Voor de berekening van de bodemkoolstof balans zijn veel modellen beschikbaar, zoals RothC of soilCASTOR (Coleman & Jenkinson, 1996; van der Voort, Verweij, Fujita, & Ros, 2023). Deze modellen kunnen de invloed van managementmaatregelen op de aanvoer en afbraak van organische stof berekenen. Deze modellen kunnen ook de invloed van een variërende mestsamenstelling meenemen, maar niet de techniek van toedienen (Lesschen et al., 2020).

Organische stof bestaat uit veel verschillende materialen. In het algemeen gaat het om gewasresten, mest, levende bacteriën en schimmels en humus (Zwart et al., 2013). Vanwege de verschillende vormen van organische stof zijn er ook veel verschillende mechanismen die invloed hebben op de opbouw en afbraak ervan. In deze paragraaf worden alleen de mechanismen die van belang zijn bij het vergelijken van verschillende bemestingstechnieken benoemd.

Voor de aanvoer van organische stof in de bodem wordt vaak gerekend met de effectieve organische stof (EOS). EOS is de organische stof die een jaar na aanvoer van mest, compost of gewasresten nog over is in de bodem (Zwart et al., 2013). Zonder de hoeveelheid of samenstelling van de toegediende mest te veranderen kan er mogelijk toch een verschil in EOS ontstaan met andere technieken van mesttoediening. Zo vond Huijsmans et al. (2008) dat N-werkingen en opbrengsten van mest het hoogst waren bij emissiearme toediening in de grond. Verschillen in toediening kunnen dus een verandering in grasgroei en daarmee een verandering in aanvoer van gewasresten naar de organische stofvoorraad in de bodem tot gevolg hebben.

Daartegenover staat dat zodenbemesten gepaard gaat met meer bodemberoering dan bijvoorbeeld bovengronds uitrijden. Dit stelt de bodem meer bloot aan lucht, wat de afbraak van organische stof kan versnellen. Ook stelt het in de grond brengen van de mest het bodemleven mogelijk in staat om de mest sneller af te breken. Dit zou een snellere afbraak van de organische stof in de mest tot gevolg kunnen hebben en is mogelijk negatief voor de koolstofvastlegging (van Eekeren & Rutgers, 2008). Zodenbemesting gevolgd door een droge periode kan op klei- en veengrond scheurvorming tot gevolg hebben. Dit kan mogelijk ook snellere afbraak van organische stof in de bodem tot gevolg hebben (Hoekstra et al., 2023). De Boer (2020) onderzocht het effect van zoutgehalte in mest op afbraak van organische stof uit mest en bodem. In principe remt een hoger zoutgehalte de C-mineralisatie, maar de Boer (2020) concludeerde dat er te complexe relaties tussen type mest, type bodem en mestdosering zijn om enkel het zoutgehalte van de mest als indicator voor de afbraaksnelheid te nemen.

3.1.3 Bodemverdichting

3.1.3.1 Bodemstructuur

De bodemstructuur is de onderlinge rangschikking en samenhang van de vaste gronddeeltjes. De vaste gronddeeltjes bestaan uit mineralen (zand, klei en silt) en organische stof. De vaste gronddeeltjes zijn vaak samengekleefd tot aggregaten (kluitjes). In en tussen de aggregaten en vaste deeltjes zitten poriën, die met lucht of water gevuld kunnen zijn. In een goed gestructureerde grond is er een goede verhouding tussen kleine poriën die water kunnen vasthouden om de gewaswortels ook in relatief droge perioden van water te voorzien en grote poriën die belangrijk zijn om in natte tijden het overvloedige water snel te kunnen afvoeren en de plantenwortels en het bodemleven weer van zuurstof te kunnen voorzien. Bovendien moet de grond in relatief droge perioden niet te hard zijn, zodat nieuwe plantenwortels in de grond kunnen groeien (Boone, 1986).

3.1.3.2 Mesttoediening en bodemverdichting

Bodemverdichting leidt in het algemeen tot een verhoogde bulkdichtheid, verminderd poriënvolume, een lagere infiltratiesnelheid van water en een toegenomen indringingsweerstand (Soane en van Ouwerkerk, 1994, BLN 2023, Van den Akker, 2023). Deze bodemeigenschappen worden vaak gebruikt in onderzoek naar bodemverdichting (Van Eekeren & Bokhorst, 2009). Daarnaast worden ook indicatoren als worteldichtheid en visuele structuur op 10 en 20 cm diepte gebruikt (de Boer & van Eekeren, 2007; van Eekeren & Bokhorst, 2009) om verdichting in kaart te brengen.

Bodemverdichting treedt gewoonlijk op als de spanningen in de bodem onder een landbouwband groter worden dan de draagkracht van de grond op dat moment (Söhne, W., 1953; Vermeulen en Perdok, 1994; Herbert et al., 2023). Factoren die bepalen of in het bodemprofiel verdichting optreedt, zijn:

- De draagkracht (pre-compression stress) van de grond. De draagkracht van de bodem is heel variabel en hangt af van de grondsoort, bodemtextuur, het organische stof- en vochtgehalte van de grond (Horn en Lebert, 1994; van den Akker et al., 2013; Herbert et al., 2023). Omdat de bodem op grasland normaliter niet door grondbewerkingen losgemaakt wordt, is de aanvangsdichtheid van de grond op het moment van berijden ook zeer bepalend (Horn and Lebert, 1994; Vermeulen and Perdok, 1994). Op grasland draagt ook de graszode bij aan de draagkracht van de grond; op natte veengrond bepaalt de zode zelfs voor een groot deel de draagkracht (Vermeulen et al, 1993). In het voorjaar is de grond vaak nat en minder draagkrachtig dan later in het jaar. Daarom heeft het moment van uitrijden van mest invloed op de mate waarin bodemverdichting optreedt.
- De last op het wiel en de wijze waarop de last afgesteund wordt, d.w.z. de drukverdeling onder de band, vaak vereenvoudigd tot de gemiddelde bodemdruk. De gemiddelde bodemdruk wordt berekend als de wiellast gedeeld door het contactoppervlak van de band. Een lage gemiddelde bodemdruk wordt bereikt door te kiezen voor grote, brede banden met een zo laag mogelijke luchtdruk in de banden (banddruk). Een algemene vuistregel is dat onder vrijwel alle omstandigheden schadelijke bodemverdichting vermeden kan worden als de banddruk lager is dan 100 kPa (1 bar) (Perdok & Arts, 1986). Hierbij is het belangrijk om te weten dat een lage bodemdruk vooral helpt om de spanningen in de bovenlaag van de grond te verlagen en zo bodemverdichting te vermijden.
- In de ondergrond, dat wil zeggen op grotere diepte (zeg >50 cm), is vooral de wiellast bepalend voor de hoogte van de grondspanning., wat dus niet voorkomen kan worden door een groter contactoppervlak van de band maar enkel door het verlagen van de wiel- of aslast (Söhne, 1953; Håkansson and Petelkau, 1994; Herbert et al., 2023).
- Het is bekend dat een herhaalde belasting kort na elkaar een extra verdichtend effect kan hebben (Douglas, 1994). In die zin zijn meer keren door hetzelfde spoor rijden en uitbreiding van het aantal assen ongunstig.
- De trekkracht die geleverd moet worden door de aangedreven wielen. Bij het ontwikkelen van trekkracht wordt naast verticale bodemdruk ook horizontale krachten op de bodem uitgeoefend met afschuifspanningen in de bodem als gevolg (van den Akker, 2019). Dit kan extra verdichting en structuurschade teweeg brengen, alsook schade aan de zode (3.2.2).

Omdat bodemverdichting zeer plaatselijk optreedt onder de rijsporen van een machine, is het belangrijk om de proportie van het perceel dat bereiden wordt in acht te nemen. Op grasland wordt voor verschillende

soorten veldwerk meer keren per jaar gereden en ook door beweiding wordt de bodem belast. Uiteindelijk is het hele oppervlak weleens een aantal keer belast door vee of machines en heeft de bodem een tamelijk stabiele dichtheid gekregen. De steeds weer gebruikte machines goed kunnen dan goed rijden zonder de bodem verder te verdichten tenzij onder uitzonderlijk slechte (natte) omstandigheden gewerkt wordt. Dit principe zien we bijvoorbeeld terug in de meerjarige experimenten van Douglas (1994) en Arts et al. (1994), waarin de dichtheid van de bodem na het eerste jaar tamelijk stabiel wordt.

Tussen belastingsmomenten in kunnen bodems met een goede bodemstructuur zijn in staat zich redelijk snel te herstellen van een matige verdichting. Bijvoorbeeld bodems met een relatief hoog organische stofgehalte zijn elastisch en 'veren' als het ware terug. Op kleihoudende gronden kunnen krimp- en vorstscheuren en het bodemleven verdichting enigszins opheffen (van den Akker et al., 2013). Op zand- en zavelgrond kan het mechanisch woelen van de bodem helpen om verdichting tot op zekere diepte op te heffen (de Boer et al., 2016, 2018), maar naar het woelen is de draagkracht heel laag en is de bodem heel gevoelig voor herverdichting. Op grasland kan het toplaagje van de bodem niet extreem dichtgedrukt worden door de vele aanwezige graswortels.

3.1.3.3 Indicatoren met betrekking tot bodemverdichting

Om effecten van de innovatieve toedieningstechnieken op het risico van bodemverdichting in te schatten zijn de volgende indicatoren gebruikt:

- verandering van de maximale wiellast,
- verandering van de benodigde trekkracht en
- verandering van het aantal keren dat met hoge belasting door hetzelfde spoor wordt gereden.

Voor de volledigheid zei vermeld dat ook verandering van typische bodemomstandigheden (bijvoorbeeld chemische veranderingen in de bodem die effect hebben op aggregaat stabiliteit van bodemdeeltjes of significante verlaging van het organisch stofgehalte) relevant kunnen zijn als indicator voor bodemverdichting. De relatie met mesttoedieningstechnieken is voor deze indicator echter zodanig indirect dat deze buiten beschouwing gelaten wordt.

3.1.3.4 Interacties met andere nevenaspecten

Bodemverdichting heeft ook een sterke invloed op andere bodemkenmerken zoals bodemleven en beworteling. In een verdichte bodem is letterlijk minder plaats voor bodemleven en is de beworteling minder diep (de Boer et al., 2016).

3.1.4 Schade aan zode

Schade aan de zode omvat veranderingen in de botanische samenstelling, zodedichtheid en het aandeel gewenste grassen. De indicator beschrijft de mate waarin de kwaliteit van de grasmat wordt aangetast door berijding en/of betreding. Behalve opbrengstderving door bodemverdichting, via verminderde groei en/of verandering van de botanische samenstelling van de graszode, kunnen de wielen, bemesterelementen en gebruikte hulpstoffen bij de innovaties ook extra directe, mechanische schade veroorzaken aan de graszode, inclusief de top 5 cm van de bodem waarin zich de meeste graswortels bevinden.

3.1.4.1 Indicatoren

Schade aan de zode kan worden gemeten door de gewasopbrengst te bepalen (kg drogestof per ha), bijvoorbeeld met behulp van een grashoogtemeter. Deze methode is niet geschikt voor nauwkeurige bepaling van de absolute opbrengst, maar wel voor het onderzoeken van lokale productiever verschillen binnen percelen, bijvoorbeeld grasopbrengsten in het rijspoor ten opzichte van tussen de sporen. Er zijn omstandigheden waaronder schade aan de zode zich niet vertaalt in een lagere drogestofopbrengst. Bijvoorbeeld als schade wordt gecompenseerd door extra groei van de onbeschadigde zode (minder lichtcompetitie, meer nutriënten en water beschikbaar). Enerzijds kan dit tot de conclusie leiden dat de schade aan de zode in dat geval niet groot genoeg was om een negatief effect op groei te geven. Er kunnen echter wel gevolgen zijn voor de langere termijn. Bijvoorbeeld als er open plekken ontstaan waarin onkruid zich makkelijk kan vestigen. Dit kan consequenties hebben voor de opbrengst en graskwaliteit op de langere termijn. Aanvullend op opbrengstbepaling kunnen de volgende bepalingen inzicht bieden in dit soort schade:.

- Zodedichtheid: Door middel van visuele schatting van de (gras) bezettingsgraad, of gebruik van een point quadratmethode (Janssen et al., 2023) kan het ontstaan van open plekken in de zode in kaart worden gebracht.
- Botanische samenstelling: Hiermee kunnen verschuivingen over de meer lange termijn (> 1 jaar) in de botanische samenstelling als gevolg van onkruidvorming in open plekken of verschillen in N beschikbaarheid voor het gewas in kaart worden gebracht.

3.1.4.2 Werkingsmechanismen; mesttoediening en schade aan de zode

Er zijn verschillende manieren waarop directe schade aan de zode kan ontstaan bij bemesting: Rijschade, snijschade, scheurvorming, bedekking/besmeuring en verbranding/zoutschade. Deze punten worden hieronder verder toegelicht

- Beschadiging van de zode door rijschade: afhankelijk van de werkbreedte en de spoorbreedte kan een aanzienlijk deel van de zode worden beïnvloed door de wielsporen. De hoeveelheid schade die optreedt is afhankelijk van de draagkracht van de zode op het moment van bemesting (afhankelijk van grondsoort, vochttoestand, zodedichtheid, Janssen et al., 2023) en de wiellast en grondspanning van de machines. Dit kan resulteren in:
 - o Directe beschadiging van gras, met vertraagde groei als gevolg.
 - o Schade aan wortels (afschuiven van de zode door wielslip): deze schade is niet meteen zichtbaar, maar kan leiden tot een reductie in bovengrondse groei door verminderde capaciteit om water en nutriënten op te nemen en door compensatie groei van de wortels. Afschuifschade is zichtbaar door het ontstaan van fijne beworteling op 3-4 cm diepte in het rijspoor enige tijd na de belasting. Dit is het resultaat van het lostrekken en verschuiven van de zode.
- Directe schade door snijden: Het snijden in de bodem met een schijf, ganzenvoet, krabber of ander soort techniek kan ook directe schade veroorzaken aan graszode en wortels. De mate van schade hangt af van de manier waarop gesneden wordt. Afgesneden wortels kunnen mogelijk leiden tot groeivertraging, omdat planten eerst energie steken in het herstel van de wortels.
- Scheurvorming na snijden: Dit treedt met name op onder de volgende omstandigheden
 - o Hoog lutumgehalte bodem (>34%, Hoekstra et al., 2023b)
 - o Droge weersomstandigheden: scheurvorming treedt alleen op onder droge omstandigheden. Op een klei-op-veen perceel werd in het droge jaar 2022 sterke scheurvorming waargenomen na zodenbemesting, terwijl in het natte jaar 2021 helemaal geen scheurvorming plaatsvond (Hoekstra et al., 2023a,b). Het al dan niet optreden van scheurvorming varieert dus per jaar en zal in een normaal weerjaar vooral een probleem zijn in de zomer, maar kan zich ook voordoen in een droog voorjaar.
 - o Bij diepere insnijding: bij diepere insnijding van bijvoorbeeld een zodenbemester zal er eerder scheurvorming optreden dan bij ondiepe insnijding. De grondsoort waar de mesttoediening plaatsvindt (veen, klei of zand, zie ook het eerder genoemde lutumgehalte) en de weersomstandigheden spelen hierbij een grote rol. Vanwege de gevoeligheid van veengrond voor scheurvorming met nadelige gevolgen voor de zode zijn emissiearme technieken ontwikkeld met waarmee minder diepe of geen insnijding nodig is zoals de sleepvoet/sleufkouter met water verdunde mest.
 - o Anders dan verticaal in de bodem snijden met een enkele schijf: De wijze waarop gesneden wordt, zoals het type schijf (bolle of dubbele schijf), de hoek van insnijden of bijvoorbeeld een ganzenvoet kan impact hebben op scheurvorming.
- Bedekking/besmeuring
 - o Bedekking en besmeuring van de graszode met mest (en/of toevoegmiddelen) kan schade toebrengen aan de zode, kan de stikstofbenutting verlagen en heeft mogelijk een negatief effect op de groei en smakelijkheid van het gras.
 - o Bij een netjes afgestelde zodenbemester komt dit (bijna) niet voor.
 - o Bij sleepvoetbemesting is het idee dat de mest tussen het gras op de bodem wordt geplaatst. Echter, het kan voorkomen dat de mest toch bovenop het gras blijft liggen:
 - ☐ Onder droge weersomstandigheden (de mest komt maar deels op de bodem, en een resterend deel groeit mee omhoog met het gras)
 - ☐ Bij mestuitrijden in hoger gras kan het lastig zijn de mest "tussen" het gras op de bodem te leggen.

- Verbranding/zoutschade
 - o Ook voor verbranding geldt dat dit niet of nauwelijks plaatsvindt bij een correcte omstandigheden en een goed afgestelde zodenbemester, en dat het risico hierop iets groter is bij sleepvoetbemesting, zeker onder droge omstandigheden en bij toediening in langer gras.
 - o Het risico op verbranding van (besmeurd) gras is lager als het ammoniakale N gehalte van de mest lager is (Rougoor et al., 2023).
 - o Verbranding van gras kan voorkomen bij hoge concentraties van andere zouten zoals kalium. Daarentegen is het risico op brandschade groter bij zonnig warm weer en bij mechanisch beschadigd gras (Stewart, 1980).
 - o Daarnaast zou het inbrengen van drijfmest in geconcentreerde stroken in de grond tot wortelschade kunnen leiden. Echter, onderzoek lijkt er op te wijzen dat door de diepere en geconcentreerde plaatsing van drijfmest door injectie de (diepere) wortelgroei juist worden gestimuleerd (Deru et al., 2010; Laine et al., 1980; Murphy & Zaurov, 1994), met een robuuster wortelstelsel en een grotere droogte resistentie van het gras als gevolg. Ook is de werkingscoëfficiënt van diep geplaatste drijfmest het hoogste van alle toedieningstechnieken, namelijk 60%.

3.1.4.3 Samenvatting

Schade aan de zode kan zich dus op verschillende manieren manifesteren en kan zich voordoen op korte en langere termijn. De schade is vaak voornamelijk visueel waarneembaar en vrij lastig absoluut te kwantificeren. Grasgroei en botanische samenstelling zijn belangrijke meetparameters. De relatie van schade aan de graszode door wielen, bemesterelementen en de mest hangt samen met omstandigheden op het moment van bemesting i.r.t. vochttoestand en zodedichtheid, het bodemtype waarop bemest wordt, de toegepaste techniek en de uitvoering ervan. Voor deze analyse is vooral de relatie van zodenbeschadiging met de toegepaste techniek van belang.

3.1.5 Bodemleven

Bodemleven omvat alle in de bodem levende organismen (bacteriën, schimmels, regenwormen etc.). Het bodemleven kan gemeten worden aan de hand van (een combinatie van) indicator groepen:

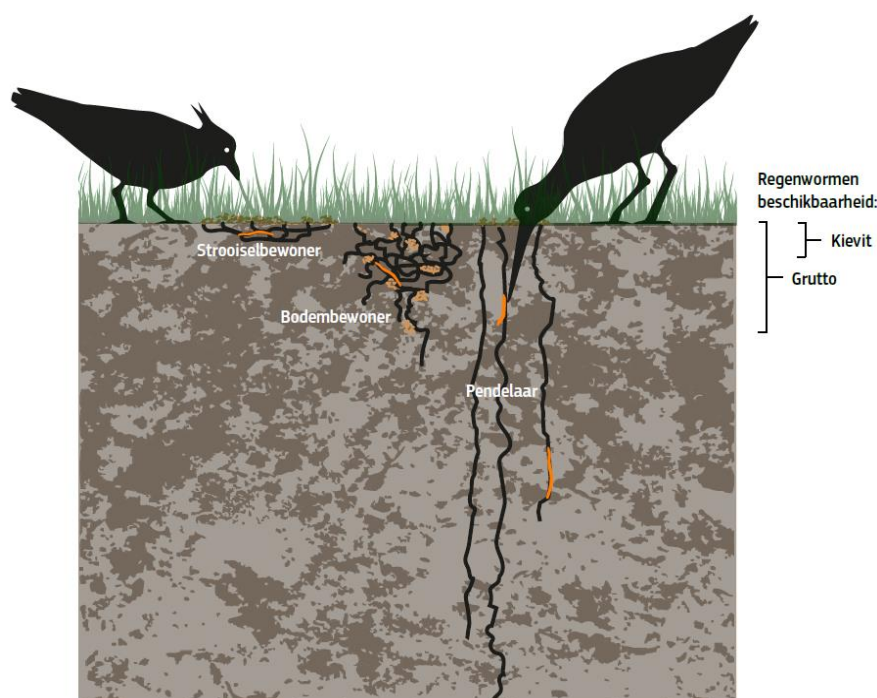
- Microbiologie (bacteriën en schimmels). Bacteriën en schimmels vormen de basis van het bodemvoedselweb. Zij hebben de grootste totale biomassa en bepalen in grote mate de omzetting en afbraak van organisch materiaal in de bodem. Parameters die gebruikt worden (Korthals en Rutgers 2021) zijn biomassa van bacteriën en schimmels en indicatoren van hun mate van activiteit. Een veel gebruikte methode is via fosfolipide vetzuren (PLFA's) (zie o.a. Deru et al., 2023). Daarnaast wordt aan activiteit gemeten door respiratiemetingen maar ook door de potentieel mineraliseerbare N.
- Nematoden (aaltjes). Zij spelen een centrale rol in het voedselweb en zijn een veelgebruikte bio-indicator om de gezondheid van de bodem te beoordelen (Coosemans, 2002; van Eekeren et al., 2002; Coleman et al., 2018; Korthals en Rutgers, 2021; Young and Unc, 2023). Gemiddeld komen ze voor in aantallen van 10 tot 20 miljoen per m² verdeeld over 30-60 verschillende soorten (van Eekeren et al., 2003). Nematoden bevinden zich voornamelijk in de waterfilm rond de bodemdeeltjes en in de poriën. Ze zijn afhankelijk van het bodemvocht voor hun voortbeweging. Naast voedselaanbod speelt de poriëngrootte van de bodem een rol bij het bepalen welke soorten nematoden op een bepaalde locatie voorkomen. Omdat de poriëngrootte verschilt tussen zand- en kleigronden, varieert ook de samenstelling van de nematodenpopulatie (van Eekeren et al., 2003). Nematoden worden op de volgende wijze gemeten: Vrijlevende nematoden worden geëxtraheerd uit een deelmonster van ongeveer 100 g veldvochtige grond met behulp van de Oostenbrink elutriator (Van Bezooijen, 2006; EPPO, 2013). De totale aantallen worden geteld en uitgedrukt per 100 g verse grond. Minstens 150 willekeurig gekozen nematoden uit elk monster worden geïdentificeerd tot op genus en, waar mogelijk, tot op soort. De geslachten en soorten aaltjes worden ingedeeld in trofische groepen volgens Yeates et al. (1993) en in cp-groepen volgens Bongers (1990) en Bongers et al. (1995). Er is een verscheidenheid aan parameters die uit de bepaling van de dichtheid en

soortensamenstelling via het programma NINJA kan worden ontsloten (<https://www.wur.nl/nl/product/ninja-nematode-indicator-joint-analysis-1.htm>).

- Regenwormen. Zij spelen een belangrijke rol in de bodemecologie en zijn een veelgebruikte indicator voor bodemkwaliteit en diversiteit. In graslanden is de dichtheid en de soortenrijkdom van regenwormen het grootst (van Eekeren et al., 2008). De meeste soorten en hoogste dichtheden worden aangetroffen in klei- en veenbodems, waarbij er gemiddeld 241 tot 540 wormen per vierkante meter zijn (Atlas Natuurlijk Kapitaal, 2018). Regenwormen worden gekwantificeerd aan de hand van de volgende parameters (van Eekeren et al., 2002; Korthals en Rutgers, 2021; Schouten et al., 2014):

- o Aantal per m² en gewicht per m²
- o Functionele groepen diversiteit op grond van hun voedselkeuze, gedrag en voorkomen (bodembewoners, pendelaars en strooiselbewoners) (van Eekeren et al., 2022, Figuur 5)
- o Samenstelling juveniele en adulte wormen (reproductie)

Regenwormen worden gemeten in bodemplaggen van 20 x 20 x 20 cm; specifiek voor het bemonsteren van de pendelaars worden andere methodes gebruikt. Hierin worden alle wormen uitgezocht, gewogen en bewaard op ethanol. Vervolgens worden de individuele wormen ingedeeld op basis van functionele groepen en leeftijdsgroep.



Figuur 5. Overzicht van de drie functionele regenworm groepen in relatie tot de beschikbaarheid voor verschillende soorten weidevogels (van Eekeren et al., 2022).

Het effect van mesttoediening met zodenbemesters, sleepvoeten en sleufkouters op het bodemleven is niet eenduidig vastgesteld. Dit komt doordat er weinig vergelijkend onderzoek van mesttoedieningstechnieken is gedaan, en omdat uit de beschikbare onderzoeken geen consistent beeld naar voren komt. Mogelijk is het inconsistente beeld een gevolg van verschillende andere factoren die ook een rol spelen, zoals weeromstandigheden, bodemkenmerken, bemestingsniveau en grondwaterstand (Blokhuys et al., 2020, CDM 2020, Rougoor et al., 2023).

Bacteriën en schimmels

Bemesting kan de populatie en diversiteit van bacteriën en schimmels beïnvloeden. In veenweidegebieden wordt de microbiële gemeenschap doorgaans gedomineerd door bacteriën. Bacteriën profiteren vooral van een hoge beschikbaarheid van stikstof (N) in de bodem (Deru et al., 2023). Schimmels verminderen vaak bij een hoger stikstofniveau. Deru et al. (2023) lieten zien dat alle meststoffen de hoeveelheid mycorrhizale schimmels verminderden t.o.v. een onbemeste controle. Deze afname varieerde van 40% tot 88% bij verschillende meststoffen. Schimmels worden gestimuleerd door producten met een hoog C/N-ratio zoals stro en compost,

terwijl bacteriën juist profiteren van gemakkelijk afbreekbare materialen met een laag C/N-ratio zoals drijfmest.

Nematoden

Drijfmest bevordert de populatie bacterie-etende nematoden. Door gewas- en wortelproductie nemen herbivore nematoden toe. De Goede et al. (2003) rapporteerden bij zodenbemesting (in vergelijking met oppervlakkige bemesting) een toename van nematoden die wijzen op met nutriënten verrijkte omstandigheden (cp1), oftewel bacterie etende nematoden. Het effect van drijfmest op nematoden en microflora kunnen indirect de functies van ziektevermindering en structuurvorming in de bodem beïnvloeden. Effecten op de gewasopbrengst kunnen dan op de langere termijn volgen (van Eekeren et al., 2006).

Er is tot op heden – voor zover bekend – zeer beperkt onderzoek gedaan naar de relatie tussen nematoden en het effect van verschillende mesttoedieningstechnieken.

Regenwormen

Veel van de eerdergenoemde factoren zoals bodemverdichting, organisch stofgehalte en schade aan de zode zijn van invloed op het aantal regenwormen en (de verhouding tussen) functionele groepen regenwormen. Zo is een hoog organisch stofgehalte gunstig voor aan de oppervlakte levende wormen. Bemesting met drijfmest kan ervoor zorgen dat juist strooiselbewonende regenwormen verminderen terwijl het aantal bodembewonende regenwormen in diepere lagen toe kan nemen (De Goede et al. 2003; Onrust et al 2019). Hoekstra et al. (2023a) vonden op klei op veen een negatief korte termijn effect van zodenbemesting op het aantal regenwormen in de bodem. In dezelfde studie vonden zij geen duidelijk effect van het snijden in de bodem op het aantal regenwormen of de totale wormbiomassa.

Drijfmesttoediening kan ook andere nadelige gevolgen hebben voor regenwormen (van Eekeren et al. 2019):

- Mechanische schade / (door)snijden van wormen: Bij het gebruik van een zodenbemester kunnen regenwormen bijvoorbeeld doorgesneden worden, wat hun overlevingskansen vermindert. Men zou kunnen verwachten dat dieper snijden de kans op schade aan macro- en mesofauna in de bodem verhoogt maar hier is weinig onderzoek naar gedaan; het onderzoek van Hoekstra et al. (2023a) wees niet op een effect. Een kanttekening hierbij is dat de zodesnede beperkt was tot 1,6 cm diepte. De Goede et al. (2003) vonden tegengestelde effecten van zodenbemesting op strooiselbewoners en bodembewoners. De eerste groep werd negatief beïnvloed en de tweede gestimuleerd. De afname werd deels verklaard door (door)snijden van strooiselbewoners. De Goede et al. (2003) beargumenteerden juist dat naar schatting zo'n 15% van de strooiselbewonende regenwormen van 5 cm of langer zal worden ontleed met injectiesleuven die 20 cm uit elkaar liggen, terwijl van regenwormen van 10 cm of meer zelfs 30% beschadigd zullen raken.
- Trillingen: Machinebewegingen kunnen wormen naar boven drijven, waardoor ze worden blootgesteld aan licht, predatoren en mogelijk giftige stoffen uit drijfmest. Het is mogelijk dat zwaardere machines meer trillingen veroorzaken.
- Rijschade en bodemverstoring: Door rijschade en structuurbederf kunnen regenwormen sterven. Zwaardere machines (zie paragraaf bodemverdichting en schade aan de zode) verrichten over het algemeen meer schade aan de bodem en dus hebben ze een grotere negatieve impact op het bodemleven.

Diverse auteurs (Huijsmans et al., 2008; CDM, 2020; Hoekstra et al., 2023a) concludeerden dat de literatuur niet eenduidig is over het effect van bemestingsmethode op het aantal en/of biomassa regenwormen. Andere factoren zoals weersomstandigheden blijken een groot effect te hebben. Zo vonden Van Vliet en de Goede (2006) in de zomer van 2003 een positief effect van zodenbemesting (diepte 5 cm) op het totaal aantal regenwormen en met name op strooiselbewoners, terwijl in het voorjaar van 2022 een negatief effect op het totaal en met name op strooiselbewoners gevonden werd. Al met al concludeerde de Commissie Deskundigen Meststoffenwet (CDM) op 17 September 2020 in een brief aan het LNV:

"Er zijn geen empirische aanwijzingen dat het mestbeleid (gebruiksnormen, emissiearme mesttoediening, en periode van mesttoediening) een effect hebben op regenwormen, maar er is weinig systematisch onderzoek geweest."

3.1.6 Weidevogels

Het tellen van het aantal weidevogels heeft over het algemeen beperkte waarde op perceel- of bedrijfsniveau, omdat het gaat om relatief kleine aantallen. Als afgeleide wordt daarom vaak gekeken naar habitateigenschappen voor weidevogels. Een omgeving kan een geschiktere of minder geschikte habitat voor weidevogels vormen. De impact van verschillende mesttoedieningsmethoden op (broedende) (weide)vogels wordt bepaald door een combinatie van parameters die onderverdeeld kunnen worden in (1) verstoring, (2) voedselbeschikbaarheid tijdens verschillende levensfasen en (3) de opgroeihabitat voor kuikens.

Verstoring

Verstoring kan gekenmerkt door het moment, de frequentie en de mate van verstoring:

- Het moment en de frequentie: aantal keer dat het perceel gedurende het broed- en opgroeiseizoen verstoord wordt door mest applicatie, waarbij uiteraard geldt dat hoe vaker er bemest wordt hoe kleiner de kans op broedsucces en kuikenoverleving.
- Periode tussen twee verstoringen: Hoe langer deze periode hoe meer kans op broedsucces.
- Mate van verstoring: De hoeveelheid schade of onrust die deze werkgangen veroorzaken. Deze verstoring kan onder andere worden afgeleid uit de tussenafstanden tussen de bemesterelementen en rijsporen, waarbij met name de elementafstand van de bemester en de bereiden proportie van het perceel een verhoogd risico op nestbeschadiging met zich meebrengen.

De toedieningsmethode van mest kan zowel een effect hebben op de frequentie als de mate van verstoring tijdens zowel de broei- als kuikenperiode. Veehouders hebben de plicht om nesten te beschermen tijdens werkzaamheden. Dit kan enerzijds door nesten te vermijden tijdens bemesting. Hierbij kan de wendbaarheid en het gemak waarmee een machine om een nest heen kan werken een rol spelen. Het plaatsen van nestbeschermers kan ook (Figuur 6). Daarnaast maakt het mogelijk verschil of de werkzaamheden worden uitgevoerd door de veehouder zelf of door een loonwerker: de eerste zal beter op de hoogte zijn van de (mogelijke) locatie van nesten.



Figuur 6. Het plaatsen van nestbeschermers tijdens drijfmest toediening biedt ook goede bescherming tegen bemesting met gebruik van een sleepslang. Wel is het van belang om deze zo snel mogelijk na bemesting weer te verwijderen.

Voedselbeschikbaarheid en -bereikbaarheid

- Regenwormen zijn de belangrijkste bron van voedsel voor volwassen weidevogels. Voor weidevogels zijn met name de groepen die aan de oppervlakte leven (strooiselbewoners, ook wel rode wormen, en ook wel pendelaars) interessant. Er geldt een minimumnorm van 60 gram per vierkante meter, en een kritische grens voor de grutto van 25 tot 30 gram (Van de Weijden & Guldemon, 2006).
- Struwe-Juhl (1995) vond dat volwassen grutto's niet in staat zijn om in de grond te dringen wanneer de weerstand van de grond de grens van 125 N/cm² overschrijdt. Teunissen en Wymenga (2011) concludeerden dat de indringingsweerstand van de bodem een gevoelige indicator lijkt te zijn voor de broedbiotoop van weidevogels in diverse weidegebieden. De indringingsweerstand in de bovenlaag van de bodem kan gemeten worden met behulp van een penetrologger (zie ook paragraaf 3.1.2., Kleijn et al., 2008; Kleyheeg et al., 2023).
- Kuikens voeden zich met name met insecten. Naast het aantal is ook de grootte van de insecten belangrijk: het kost een kuiken meer energie om zich te voeden met heel veel kleine insecten, dan

met enkele grote insecten (> 4mm). Het aantal en de grootte van insecten beschikbaar gedurende het opgroeiseizoen kunnen op verschillende manieren in kaart worden gebracht:

- o Met behulp van potvallen kan inzicht worden verkregen in het aantal kruipende insecten zoals kevers maar ook spinnen (Kleyheeg et al., 2023).
- o Vliegende insecten kunnen o.a. worden gemeten met behulp van plakvallen, de slagnetmethode, visuele beoordeling (zichtmeting) of piramidevallen.

Voedselbeschikbaarheid volwassen vogels

Regenwormen zijn verreweg de belangrijkste bron van voedsel voor volwassen weidevogels. Zoals eerder genoemd (3.4) bestaat er geen eenduidig antwoord op de vraag hoe bemestingsmethoden precies van invloed zijn op het aantal en de biomassa van regenwormen. Door scheurvorming, mogelijk als gevolg van zodenbemesting, kan het aantal regenwormen verminderen en/of kunnen regenwormen zich dieper in de grond terugtrekken. Dit kan ten koste gaan van de beschikbaarheid van regenwormen als voedselbron voor weidevogels. De indringingsweerstand van de bodem kan toenemen, wat het moeilijker, of op den duur onmogelijk maakt voor weidevogels om in de grond te prikken. Kleigrond wordt over het algemeen harder als deze uitdroogt in vergelijking met zandgrond. Hoekstra et al. (2023a) vonden echter geen negatief effect van snijden in een klei op veenbodem door een zodenbemester op de beschikbaarheid van regenwormen voor weidevogels. Het snijden in de bodem had geen invloed op de indringingsweerstand (hardheid) van de bodem. Dit betekent dat het voor weidevogels niet moeilijker was om met hun snavel de bodem in te kunnen. Een kanttekening hierbij is wel dat de proef plaatsvond onder relatief natte omstandigheden. Zoals genoemd vonden De Goede et al. (2003) tegengestelde effecten van zodenbemesting op strooiselbewoners en bodembewoners. De eerste groep werd negatief beïnvloed en de tweede gestimuleerd. De afname werd deels verklaard door (door)snijden van strooiselbewoners. Zij beargumenteerden daarmee wel een effect van zodenbemesten op de beschikbaarheid van strooiselbewoners voor weidevogels.

Voedselbereikbaarheid

De Indringingsweerstand (hardheid) van de bodem is zoals genoemd van groot belang voor de voedselbereikbaarheid, wordt bepaald door een complexe mix van factoren, waaronder:

- Bodemvochtgehalte: Indringingsweerstand wordt sterk bepaald door de vochtigheid van de bodem (Kleijn et al. 2009; Hoekstra et al. 2023a). Binnen een vochtigheidsgraad van 30% tot 70% blijft de bodemtoestand relatief stabiel. Echter, zodra de vochtigheid onder de 30% daalt, neemt de indringingsweerstand sterk toe. Dit fenomeen gaat gepaard met een afname van het aantal regenwormen in de bovenste 10 cm van de bodem. Als nadeel bij de sleufkouter en zodenbemester noemt men het open blijven staan en het uitdrogen van de grond rondom de sleuven wat de indringingsweerstand kan vergroten (Keuning en Keuning 2019; Hoekstra et al. 2023a). Echter, Hoekstra et al. (2023a) vonden geen verschillen in bodemvochtgehalte op plots met scheurvorming (zodenbemesting) en zonder scheurvorming (bovengrondse mesttoediening). Daarnaast kan een hogere grasproductie als gevolg van minder ammoniakemissie (zie 4.1) voor meer verdamping en een drogere bodem zorgen.
- Bodemverdichting: Ook bodemverdichting kan leiden tot een hogere indringingsweerstand. Zoals besproken in paragraaf 3.2 kan bodemverdichting worden veroorzaakt door tractor- en machinebewegingen op percelen als de draagkracht van de bodem laag is (afhankelijk van verschillende factoren waaronder organische stofgehalte en vochtigheid). Zowel de uitgeoefende druk (per cm²), de wiellast (totale gewicht van tractor en bemester) en de trekkracht zijn van invloed op de mate van verdichting.

Voedselbeschikbaarheid kuikens

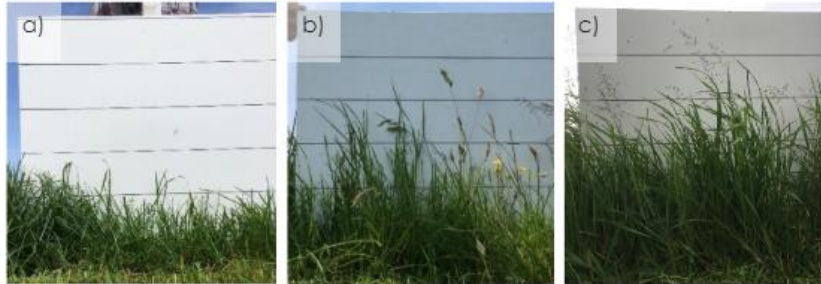
Het lijkt onwaarschijnlijk dat bemesting met een zodenbemester een directe invloed heeft op de aanwezigheid van grote insecten. Mogelijke indirecte effecten zouden kunnen zijn:

- Minder goede omstandigheden voor voortplanting en ontwikkeling insecten door een drogere bodem.
- Minder (bloeiende on-) kruiden door hogere N benutting en daarmee hogere effectieve N bemesting.
- Echter, bij schade aan de zode ontstaan mogelijk juist weer kansen voor andere soorten die aantrekkelijk zijn voor insecten.

Opgroeihabitat kuikens

Voor opgroeiende kuikens is het van belang dat er voldoende mogelijkheden zijn om te kunnen schuilen voor predatoren. Echter, als het gras te hoog en dicht wordt kunnen de kuikens zich moeizaam door het perceel bewegen. Dit heeft een negatief effect op hun capaciteit om voldoende voedsel (insecten) binnen te krijgen. De vegetatiehoogte en -structuur is daarom een belangrijke parameter voor de opgroei-habitat van kuikens. De vegetatiehoogte en -structuur kan op verschillende manieren in kaart worden gebracht:

- Gewashoogte: de gewashoogte kan op verschillende plekken middels een grashoogtemeter gemeten worden. Hiermee kon zowel de gemiddelde gewashoogte als de variatie daarin worden berekend (Kleyheeg et al., 2023).
- Door een witte plaat met hoogteaanduiding achter het gewas te plaatsen en een foto te maken, kan de gewasdiktheid en daarmee de hoeveelheid gewas op een perceel worden gemeten (Hoekstra et al., 2021) (Figuur 7).



Figuur 7a, 7b en 7c. Met behulp van de witte plaat methode kan de gewasdiktheid op verschillende hoogte-intervallen worden bepaald. (Hoekstra et al., 2021).

Verschiedende grashoogtes lijken gunstig te zijn voor de overleving van kuikens, omdat dit meer beschutting biedt tegen predatoren die in de afgelopen decennia zijn toegenomen. Weidevogels hebben open, doorwaadbare graslanden nodig om te foerageren en te broeden. Een verandering in botanische samenstelling als gevolg van mestapplicatie kan dit habitat negatief beïnvloeden.

Drijfmestbemesting (ongeacht de methode van toepassing) ten opzichte van bemesting met vaste mest leidt tot een dichtere vegetatie tijdens het kuikenseizoen, wat resulteert in een verminderde voedselbeschikbaarheid voor kuikens van de grutto en andere weidevogels (Kleijn et al., 2009; Kentie et al., 2011). Een betere N benutting uit drijfmest kan dit effect mogelijk licht versterken (indien er niet wordt gecompenseerd door een lagere (kunst)mestbemesting).

Hoewel verschillende methoden (zodenbemesting, sleufkouter of sleepvoet) mogelijk subtiele variaties in effecten vertonen in de context van weidevogelbehoud, lijken andere factoren zoals nestoverleving, kuikenoverleving, habitatverlies en predatie van weidevogels een grotere invloed te hebben. Nestoverleving en kuikenoverleving zijn kritische factoren die direct verband houden met broedsucces. Daarnaast speelt habitatverlies door intensivering van landbouwpraktijken een grote rol.

In de praktijk verwachten we geen noemenswaardige verschillen tussen de frequentie waarmee zodenbemesters, sleufkouters en sleepvoetmachines worden ingezet op grasland.

Voor de mate van verstoring in relatie tot de uitrijtechniek geldt hoe kleiner de afstand tussen de elementen en hoe groter de bereden proportie van het perceel hoe meer risico op nestbeschadiging. Over het algemeen is de variatie van elementafstanden van zodenbemesters, sleufkouters en sleepvoetmachine beperkt tot ca. 18 tot 25 cm. Over de proportie bereden oppervlak in relatie tot de uitrijtechniek valt beperkt iets te zeggen, omdat de werkbreedtes van de bemesters sterk uiteen kunnen lopen, zelfs binnen eenzelfde type bemester. Bij een grotere werkbreedte zal er minder op en neer gereden hoeven te worden, waardoor in theorie de kans op het overrijden van nesten en kuikens kleiner is. Wel mag worden verwacht dat technieken die meer trekkracht opleveren beter zullen passen bij wat kleinere werkbreedtes dan technieken die minder trekkracht vragen.

Als machines complexer en duurder zijn worden ze mogelijk meer door loonwerkers ingezet dan boerenmachines. Dit heeft mogelijk ook invloed op weidevogels. De bekendheid met het perceel en mogelijke nestplaatsen kan variëren tussen de boer en de loonwerker. Over het algemeen heeft de boer meer belang bij het kennen van het perceel en de aanwezige nesten. De boer is vaak vertrouwd met de specifieke kenmerken van zijn land, zoals broedgebieden en nestlocaties van weidevogels. De loonwerker, daarentegen, kan minder bekend zijn met de details van elk perceel en heeft mogelijk minder belang bij het opsporen van nesten.

3.1.7 Stikstofuitspoeling

Onder stikstofuitspoeling verstaan we uitspoeling van stikstof naar oppervlakte- en grondwater [Uitgedrukt als vracht in kg NO₃-N/ha per jaar]. Indicatoren voor het risico op nitraatuitspoeling zijn het N overschot op de bodembalans, het overschot van minerale N op de bodembalans en de hoeveelheid N (N residu, NR) die na oogst van gewassen in de bodem aanwezig is. In deze indicatoren komen tal van onderliggende factoren samen die invloed hebben op nitraatuitspoeling, zoals neerslaghoeveelheid en -verdeling over het jaar, gewasopbrengst en bemestingstijdstippen. In dit kader is het niet noodzakelijk om al deze onderliggende factoren te benoemen. In verband met toedieningstechnieken zijn de volgende mechanismen relevant:

- Effecten op graszode en de opbrengst van N
Toedieningstechnieken die de gewasopbrengst en daarmee de N opbrengst bevorderen, dragen bij aan een laag N bodemoverschot wat het risico van nitraatuitspoeling verlaagt (Hooijboer, Oenema, & Doornewaard, 2015). Omgekeerd geldt dat toedieningstechnieken die bij een gegeven hoeveelheid mest het gewas, in geval van gras de wortels van gras of de graszode beschadigen (Hoekstra, de Stigter, & van Eekeren, 2023), de N opbrengst van het gewas onder druk zetten, wat ongunstig is voor beperking van nitraatuitspoeling. Ook zonder dat verandering van de N opbrengst optreedt, kan beschadiging van de graszode nitraatuitspoeling verhogen. In open of beschadigde plekken in de graszode is de opname van N die vrijkomt uit mest of uit de bodem door mineralisatie geremd. Deze plekken vormen dan hot spots van uitspoeling.
- De diepte van mestplaatsing
Als de mest zodanig geplaatst wordt (in of nabij de wortels van gewassen) dat de aangeboden N goed kan worden opgenomen door het gewas, is dat gunstig voor beperking van nitraatuitspoeling. Mits er geen sprake is van zoutschade-effecten door hoge concentraties.
- Het tijdstip van mestplaatsing
N die geplaatst wordt op het moment (afgestemd op de gewasbehoefte en niet te laat in het groeiseizoen) draagt bij aan beperking van nitraatuitspoeling (Hoeks et al., 2012).

3.1.8 Fosfaatuitspoeling

Onder fosfaatuitspoeling verstaan we uitspoeling van fosfaat naar oppervlakte- en grondwater [Uitgedrukt als vracht, hoeveelheid P₂O₅ per ha per jaar].

Fosfaatuitspoeling wordt voornamelijk beïnvloed door de fosfaattoestand van de bodem, door de mobiliteit van P in de bodem (Van Rotterdam & Bussink, 2019) en door de hydrologische en topografische situatie van een perceel. Deze aspecten hebben beperkt raakvlakken met mesttoedieningstechnieken. Hieruit kan al opgemaakt worden dat de relatie van fosfaatuitspoeling met mesttoedieningstechnieken niet erg sterk en indirect zal zijn. Dit volgt ook uit onderstaande uitwerking voor de fosfaattoestand en de mobiliteit van P:

- Fosfaattoestand
De fosfaattoestand wordt op lange termijn beïnvloed door het P bodemoverschot, het verschil tussen aanvoer van P naar de bodem en de afvoer van P met gewas (Van Rotterdam & Bussink, 2019). De P toestand in de bodem kan toenemen als bij een gegeven hoeveelheid P de gewasopname van P lager wordt. De opname van P kan afnemen als de wortelontwikkeling geremd is of bij een lagere gewasopbrengst in termen van droge stofproductie (Neeteson et al., 2006). De aanvoer van P naar de bodem wordt volgens de benadering van deze verkenning per definitie niet beïnvloed door innovatieve toedieningstechnieken, omdat uitgegaan wordt van vaste referentiedoseringen van mest; deze blijven dus gelijk bij verschillende toedieningstechnieken. Indien de technieken de gewasopbrengst en daarmee de afvoer van P van de bodem met gewasoogst beïnvloeden, zou dat op termijn de fosfaattoestand en indirect ook het uitspoeling risico kunnen beïnvloeden.
- De mobiliteit van P
P heeft een sterke neiging zich te binden aan (bodem)oppervlakten. Daarom is P niet zo mobiel als bijvoorbeeld nitraat. De mobiliteit van P wordt beïnvloed door een aantal chemische en -fysische bodemeigenschappen (Verloop et al., 2018), te weten: de pH van de bodem, de diepte en de dynamiek van de aerobe zone in de bodem en de aanwezigheid van ijzer- en aluminiumoxiden. Bij pH 6 tot 7 is P beter wateroplosbaar en dus mobieler bij een lage pH van de bodem. Bij lage pH treedt binding met ijzer en aluminiumoxiden op (Van der Zee, 1988; Schouwman, 2015) en bij een hoge pH treedt binding met calcium op (Rietra et al., 2024). De invloed van bemestingstechnieken op de bodem pH door aanzuren van mest is daarom in principe relevant. Ook de diepte waarop de aerobe zone (normaliter de niet vochtverzadigde zone) overgaat in de anaerobe zone (de zone waarin de bodem vochtverzadigd is) heeft invloed op de mobiliteit. Bij natte, zuurstofarme

omstandigheden worden P-ijzeroxide complexen gereduceerd waardoor oplosbaar ijzer en fosfaat vrijkomen (Van Rotterdam en Postma, 2018). Door aanwezigheid van een grote hoeveelheid ijzer- en aluminiumoxiden in de bodem (ijzeroer) kan zeer veel fosfaat vastgelegd worden, wat vaak in verband is gebracht met P tekorten in gewassen (zie de zogenoemde fosfaatfixerende gronden). Organische stof en de CEC (Cation Exchange Capacity) kan ook invloed hebben op de P mobiliteit, maar deze invloed is minder sterk dan de overige, hier genoemde factoren. Bij hoge omzetting van organische stof in een natte bodem kan P die gebonden is aan de organische stof vrijkomen. Onder de meeste omstandigheden zal de vrijgekomen P weer snel biologisch of chemisch gebonden worden.

- Hydrologische en topografische situatie

Percelen met een ondiepe grondwaterstand hebben een groter risico op de uit- en afspoeling van fosfor naar oppervlaktewater dan percelen met een diepe grondwaterstand. Op percelen die voorzien zijn van buisdrains stroomt doorgaans het grootste deel van het neerslagoverschot op grotere diepte af naar het oppervlaktewater dan de onderkant van de met fosfaat verrijkte bodemlagen. Op natte percelen kan doorgaans later mest worden toegepast dan op matig droge of op droge percelen. Bij het uitrijden van dierlijke mest onder natte omstandigheden neemt het risico op bodemverdichting toe.

Het risico op P-afspoeling neemt toe bij een ongunstige maaiveldligging. Bij de vorming van plassen op het land die door een geul of greppel afwateren op een sloot is het risico op P-afspoeling relatief groot. Als de introductie van een nieuwe toedieningstechniek gepaard gaat met een aanpassing van het maaiveld (egaliserende werking) kan het risico op afspoeling afnemen.

Zolang toedieningstechnieken die mest dieper in de bodem plaatsen niet reiken tot onder de anaerobe zone, dus tot in de zone die nat en zuurstofarm is, is niet aannemelijk dat toepassing van deze technieken enig effect hebben op de mobiliteit van P. Ook effecten van toevoegen van water aan mest of toepassen van beregening, zullen verwaarloosbaar zijn, omdat de hoeveelheid extra aangevoerd water verwaarloosbaar is t.o.v. de neerslaghoeveelheid. Binding van P in de mest aan toevoegmiddelen, kan afhankelijk van de eigenschappen van het middel en de toegevoegde hoeveelheid, de mobiliteit van P verlagen. Op veengronden zou P gemobiliseerd kunnen worden door (extra) mineralisatie van de bodem organische stof. Dit zou kunnen optreden door toepassing van technieken die de veenbodem meer beroeren of insnijden.

3.1.9 Stikstofafspoeling

Onder stikstof afspoeling verstaan we oppervlakkige afspoeling van mest en of nutriënten naar oppervlakte wateren (Uitgedrukt als vracht in kg N per ha per jaar).

Stikstofafspoeling over de grond wordt bepaald door tal van factoren zoals het tijdstip van bemesting, de helling van het bemeste perceel, het bodemtype en de mate waarin water en mest snel in de bodem kan infiltreren (verslemping van het bodemoppervlak staat dit bijvoorbeeld in de weg), maaiveldligging, de afstand tussen de plaatsing van mest en de slootrand van een perceel en de lengte van de slootrand ten opzichte van het bemeste vlak (samengevat in het begrip connectiviteit) (Noij et al., 2008). In relatie met toedieningstechnieken zijn twee factoren relevant, te weten:

- Contact van mest met regeninslag

Bij zodenbemesten gaat het om de plaatsingsdiepte van mest in de sleuf en de breedte van de bovenkant van de mestsleuf. Bij gebruik van de sleepvoet gaat het om de breedte van de meststrook. Bij zware regenval is te verwachten dat de kans groter is dat mest die boven de mestsleuf uitkomt of in brede stroken op de bodem aanwezig is, deels afspoelt in tegenstelling tot mest die dieper in de bodem is geplaatst en niet of nauwelijks bereikbaar is voor regeninslag of afstroming door plassen op het maaiveld.

- Het gewicht en/of de benodigde trekkracht van de machine

Het gewicht is relevant omdat zware machines meer bodemverdichting kunnen veroorzaken en omdat er meer kans is op structuurbederf van de bodem, bijvoorbeeld door versmering van de toplaag als er veel trekkracht nodig is om machines voort te bewegen. Beide fenomenen kunnen ten koste gaan van snelle infiltratie van mest in de bodem wat ongunstig is om afspoeling te beperken (Ittersum et al., 2025).

Technieken die mest dieper plaatsen kunnen dus gepaard gaan met iets minder oppervlakkige afspoeling. Dit effect zal ten opzichte van *goed* uitgevoerde zodenbemesting heel beperkt zijn omdat de mest daarbij in de grond wordt gebracht en het risico van uitregenen van mest uit de sleuf al laag zal zijn. Dit effect zal groter zijn bij een *minder goede* uitvoering van zodenbemesting waarbij mest boven de sleuf uitkomt. Dit komt regelmatig voor in de praktijk maar is niet de referentie. Dit effect kan ten opzichte van de referentie bemesting met de sleepvoet iets groter zijn omdat de mest ook bij een goede uitvoering met de sleepvoet op de bodem ligt en niet erin.

Samenvattend:

- Van technieken waarbij het minder vaak voorkomt dat mest oppervlakkig op het land ligt, is te verwachten dat ze gepaard gaan met minder oppervlakkige afspoeling.
- Belemmering van de infiltratie van mest in de bodem door structuurbederf van de bodem kan het afspoelingsrisico vergroten. Dit kan zich voordoen bij gebruik van zware machines die veel trekkracht vragen op bodems met onvoldoende draagkracht, bijvoorbeeld bij bemesting van de eerste snede gras in het vroege voorjaar.
- Van technieken die een bepaalde mate van egalisering vergen is te verwachten dat de afstroming afneemt en daarmee ook de stikstofafspoeling.

3.1.10 Fosfaatafspoeling

Onder fosfaatafspoeling verstaan we oppervlakkige afspoeling van mest en of nutriënten naar oppervlakte wateren. [Uitgedrukt als vracht, dus de hoeveelheid P per ha per jaar].

De mechanismen achter bovengrondse P afspoeling zijn identiek aan die van bovengrondse afspoeling van stikstof (Verloop et al., 2018). Dat geldt ook voor de mogelijke effecten van mesttoedieningstechnieken (Paragraaf 3.1.9).

3.1.11 Stank en geur

De beleving van geur en stank is niet voor iedereen hetzelfde en is daarmee subjectief. Geur en stank van mest worden vaak gerelateerd aan de emissie van ammoniak en methaan. Ammoniak heeft echter vooral bij hogere concentraties een stekend effect op geurorganen en slijmvliezen en methaan is zelfs geurloos (<https://www.stigas.nl/agroarbo/bijlagen/gevaren-van-mestgassen/>)

De geur en stank van mest worden veroorzaakt door een combinatie zeer veel verschillende vluchtige verbindingen, waaronder vluchtige vetzuren, fenolen en zwavelverbindingen. De meeste van deze verbindingen worden verondersteld producten te zijn van anaërobe microbiële afbraak van de organische bestanddelen in urine en feces. In verschillende onderzoeken met varkensmest zijn totaal ongeveer 150 vluchtige verbindingen geïdentificeerd (Spoelstra, 1980).

Geuren kunnen alleen objectief worden gedefinieerd door het volledige spectrum van de aanwezige vluchtige chemicaliën te geven, inclusief hun concentraties in de lucht. Voor de geuren uit mest is dit praktisch onmogelijk vanwege het grote aantal componenten, die vaak in zeer lage concentraties aanwezig zijn (Spoelstra, 1980).

Er bestaan verschillende methodes om de hoeveelheid geur/stank vast te leggen. Een veel gebruikte methode is de Olfactometrie meetmethodiek (Williams, 1984, Ogink et al., 2001). Hierbij wordt met behulp van een geurpanel de beleving van geur of stank bepaald. Met behulp van een olfactometer (NVN 2820/A1) worden de luchtmonsters verdund volgens een gestandaardiseerde methode. Door het bepalen van de drempelwaarden waarbij het geurpanel nog net de geur kan onderscheiden van neutrale lucht wordt de minimale eenheid van 1 O.U.e/m³ (O.U.e = European Odour unit) vastgesteld. (Ogink et al 2001). De methodiek voor het meten van geurconcentraties in O.U.e is vastgelegd in EN 13725:2003 (Invernizzi et al., 2024). Een andere analysemethode die voor het meten van gasvormige bestanddelen, zoals non-methane volatile organic compounds (NMVOC), wordt toegepast is het analyseren van lucht met een massaspectrometer. Daarnaast is het ook mogelijk om geuren te meten met een E(lectronic)-nose. Dit is een apparaat met meerdere sensoren die verschillende geurstoffen kunnen detecteren (Hobbs et al., 1995). In Nederland wordt geuronderzoek onder andere uitgevoerd door adviesbureau Witteveen en Bos (<https://www.witteveenbos.com/nl/contact/office-odour-lab>).

Om luchtmonsters te verzamelen kan er gebruik gemaakt worden van verschillende methoden waarbij getracht wordt de samenstelling van de lucht niet te beïnvloeden voor de bemonsteringsmethode.

- Zak vullen middels vacuümtrekken: Door een te bemonsteren zak op te hangen in een kamer welke vervolgens vacuümgetrokken wordt kan lucht verzameld worden met zo min mogelijk beïnvloeding van de luchtsamenstelling. Hiermee wordt voorkomen dat lucht een pomp passeert en dat er door verwarming condens kan ontstaan (Ogink, 2001). Dit kan in het veld plaatsvinden door gebruik te maken van een frame met aanzuigstukken en monsterzakken die achter de bemester aanrijdt (Pain, 1991).
- Statische en dynamische kamers: Met statische kamers wordt een luchtmonster verzameld die vervolgens geanalyseerd wordt. Hiermee is het niet mogelijk om fluxen in geurconcentratie te monitoren. Met dynamische kamers kan er direct in het veld gemeten worden en werd 50 jaar geleden al toegepast. Een vat welke aan de onderkant open is wordt verse lucht ingelaten en eventueel gemixt met een interne ventilator (Agnew et al., 2010). Hiermee is het mogelijk gedurende een langere periode te meten.
- Windtunnel: Een windtunnel voor het meten van geuremissie bestaat uit een kamer waardoorheen een vaste hoeveelheid lucht geblazen wordt. Uitkomende lucht wordt bemonsterd en bekend is hoeveel lucht er door het systeem is gegaan (Pain et al., 1991).
- Micrometeorologische technieken bijvoorbeeld (ZINST), Pain et al., 1991: Dit model voorspelt de verspreiding van gasvormige massa van relatief gering grondoppervlak naar de atmosfeer. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de windsnelheid en de gasconcentratie op één enkele hoogte. In het onderzoek van Pain is gebruik gemaakt van een bemonsteringspunt in het midden van een cirkel.

Hoewel bekend is dat ammoniak geen belangrijke component is van de waargenomen geur van mest (Williams, 1984 en Spoelstra, 1980), zijn er in verschillende onderzoeken goede correlaties gevonden tussen geur en ammoniakemissie uit mestopslag en bij uitrijden van mest (Kowalewsky et al., 1980, Pain et al., 1988, Pain en Misselbrook, 1991). Dit komt omdat binnen eenzelfde mestsoort bij een hogere emissie van ammoniak de emissie van NMVOC veelal ook hoger is en omgekeerd. Een reductie van ammoniakuitstoot leidt echter niet altijd tot een verminderde geur en stank. Zo had het aanzuren met zwavelzuur van mest in de stal een lagere ammoniakemissie tot gevolg maar een hogere emissie van geur en stankstoffen (NMVOC). Bij aanzuren in het veld was de geur en stank emissie lager ten opzichte van de toepassing in de stal en de referentie (Pedersen et al., 2022). Dit aanzuren kan enerzijds oppervlakkig gebeuren op de plek waar mest in contact staat met de lucht waardoor er lokaal een pH verlaging van de mest in het veld plaatsvindt. Ook kan gekozen worden voor het aanzuren van de mest in zijn geheel waardoor er een lagere ammoniakemissie en geur en stank emissie plaatsvindt. Door het toevoegen van een zuur aan de mest daalt de pH van de mest doordat het evenwicht tussen de vluchtige ammoniak (NH_3) en ammonium (NH_4) verschuift naar ammonium.

Beperken van blootstelling van de mest aan de lucht helpt ook om de ammoniakemissie en geur en stank emissie te beperken. Dit kan enerzijds door het contactoppervlak met lucht te beperken en anderzijds door het verkorten van de blootstellingsduur aan de lucht. Het afdekken van toegediende mest met materiaal of injectie van de mest in de grond zonder open sleuven beperken het contactoppervlak met de lucht.

Verdunnen van mest zorgt voor een snelle opname van mest door de bodem en daarmee voor een korter blootstellingsduur aan de lucht. Daarnaast wordt door verdunnen de concentratie van ammoniak in de mest verlaagd. Omdat de ammoniak in de mest in evenwicht is met de ammoniak in de gasfase zal er minder ammoniak vervluchtigen. Volgens hetzelfde principe zal er dan ook minder emissie zijn andere gasvormige bestanddelen waardoor ook de geur en stank zal verminderen.

Binding van vluchtige stoffen in de mest zorgt voor minder vervluchtiging en daarmee lagere uitstoot van geur en stank. Door het opbrengen van stoffen op de opgebrachte mest of gemengd in de mest is het mogelijk om geur en stank te verminderen. In het laatste geval kan de samenstelling van de mest veranderen en kan dit zorgen voor een vermindering van geur en stank maar ook voor een verandering van de geur welke als zodanig ook als stank ervaren kan worden.

3.1.12 Lachgas

Lachgas (N_2O) is een krachtig broeikasgas dat vrijkomt uit landbouwbodems als gevolg van microbiële processen in de stikstofcyclus, met name nitrificatie en denitrificatie. Bij bemesting vooral met stikstofrijke meststoffen zoals drijfmest of kunstmest ontstaat een overschot aan beschikbare stikstof in de bodem. Onder bepaalde omstandigheden, zoals een hoge bodemvochtigheid en lage zuurstofbeschikbaarheid, wordt dit overschot door bodemorganismen omgezet waarbij lachgas vrijkomt. Lachgasemissies zijn sterk afhankelijk van het type meststof, de manier van toediening, het weer en de bodemgesteldheid.

Stikstof die met mest of via andere bronnen wordt aangevoerd naar de bodem en N die al in de bodemvoorraad aanwezig is, kan worden opgenomen door gewas, uitspoelen of afspoelen naar watersystemen, in organisch gebonden N in de bodem blijven (al dan niet opgenomen in levende organismen), of vervluchtigen als N_2 of N_2O . Dit gebeurt door denitrificatie. Dit is het proces waarbij nitraat in stappen wordt gereduceerd in gasvormig N_2O en N_2 .

In deze stappen ontstaat vanuit NO_3 eerst NO_2 (nitriet) en reductie van nitriet tot NO (stikstofoxide) en vervolgens reductie van NO in N_2O . Daarna kan uit N_2O nog N_2 ontstaan. Denitrificatie vindt plaats onder anaerobe omstandigheden in de bodem. In mest en in de bodem is het aandeel van stikstof die aanwezig is als nitraat in het algemeen niet hoog. De grootste hoeveelheid is aanwezig als ammoniak of N org. De hoeveelheid nitraat zal daarom vaak een beperkende factor zijn voor denitrificatie. Nitraat wordt gevormd door aerobe omzetting uit ammoniak. Dat gebeurt in de bodem door nitrificatie onder aerobe omstandigheden. Zo kan in aerobe delen van de bodem nitraat gevormd worden, wat in anaerobe delen in de bodem wordt gedenitrificeerd. Beide processen kunnen een soort biochemische trein vormen (gekoppelde nitrificatie en denitrificatie). Daardoor kan lachgasvorming versterkt worden door het afwisselend voorkomen van anaerobie en aerobie in de bodem. Ook zuurstof gradiënten in de bodem hebben dit effect (Thissen & Pijlman, 2022) (Velthof, 2002).

In verband met toedieningstechnieken zijn relevante factoren:

- De samenstelling van mest, met name het voorkomen van veel nitraat in mest
- het optreden van structuurbederf van de bodem wat tot lokaal anaerobe omstandigheden in de bodem kan leiden en
- de plaatsingsdiepte in de bodem, hoe dieper hoe hoger de lachgasemissie, zie bijvoorbeeld het verschil tussen de emissiefactor voor bovengrondse mesttoediening en bouwlandinjectie.

3.1.13 Energieverbruik

Het energieverbruik (MJ/t) bij het aanwenden van dierlijke mest wordt beïnvloed door meerdere factoren, waaronder de hoeveelheid energie die nodig is tijdens het aanwenden zelf en bij voorbereidende werkzaamheden. Een belangrijke indicator is het type toedieningstechniek, waarbij werkdiepte, gewicht en werkbreedte een cruciale rol spelen (Huijsmans, 2008) (Huijsmans, Hendriks, & Vermeulen, 1998).

Factoren die de weerstand beïnvloeden

De werkdiepte is een belangrijke factor: een grotere werkdiepte verhoogt de weerstand, terwijl ondieper werken juist voor minder weerstand zorgt. Het gewicht van de techniek speelt eveneens een rol, omdat een zwaardere machine meer weerstand genereert. Dit geldt ook voor werkbreedte, waarbij een grotere werkbreedte de weerstand per werkgang verhoogt. Echter, een grotere werkbreedte kan het totale energieverbruik per hectare verminderen doordat minder werkgangen nodig zijn. Daarnaast hebben bodemtype en omstandigheden invloed op de weerstand. Lichte, droge gronden bieden minder weerstand dan zware, natte kleigronden. Ook capaciteit en rijsnelheid spelen een rol: een hogere capaciteit (meer m^3 per uur) verkort de werktijd en verlaagt het brandstofverbruik per hectare. Bij hogere rijsnelheden kan de weerstand echter toenemen, wat het energieverbruik weer opdrijft.

Invloed van de hoeveelheid mest en toevoegingen

Naast de weerstand heeft de aan te wenden hoeveelheid mest een invloed op het energieverbruik, aangezien iedere extra liter verwerkt moet worden. Het toevoegen van water of hulpstoffen kan het volume en daarmee het energieverbruik beïnvloeden. Verdunning maakt mest vaak makkelijker te verpompen en verlaagt zo het energieverbruik per kuub. Maar een te grote hoeveelheid toegevoegd water kan juist averechts werken door het toenemende volume. Hulpstoffen kunnen daarnaast invloed hebben op de samenstelling van de mest, wat de pompbaarheid beïnvloedt. Dit kan zowel positief als negatief doorwerken op het energieverbruik.

Extra energieverbruik door voorbereidende behandelingen

Naast het energieverbruik tijdens het aanwenden, brengen voorbereidende behandelingen van de mest extra verbruik met zich mee. Bijvoorbeeld het opwekken van een plasmafase in de mest of het aanzuren ervan kost energie, wat het totale energieverbruik verhoogt. Deze behandelingen worden vaak ingezet om de samenstelling van de mest te verbeteren of de emissies te reduceren, maar het is belangrijk rekening te

houden met de bijkomende energiekosten van deze processen (Regelink, van Puffelen, Ehlert, & Schoumans, 2021).

Kortom, het energieverbruik wordt grotendeels bepaald door de weerstand, de hoeveelheid mest en eventuele voorbereidende behandelingen. Deze factoren worden beïnvloed door technische en natuurlijke omstandigheden, zoals de eigenschappen van de toedieningstechniek, het bodemtype en de gekozen mestbehandelingen. Door deze elementen goed op elkaar af te stemmen, kan het energieverbruik bij het aanwenden van dierlijke mest worden geoptimaliseerd.

3.1.14 Kostprijs

De kostprijs (€/m³) van het aanwenden van dierlijke mest omvat alle kosten die gepaard gaan met het functioneren van de toedieningstechniek. Dit gaat niet alleen over de aanschaf en onderhoud van de machine, maar ook over de kosten van energie, hulpstoffen en arbeid. Verschillende indicatoren bepalen de totale kostprijs, zoals investeringskosten, capaciteit, energiekosten en onderhoud (KWIN 2023).

Investeringskosten en afschrijving

Een belangrijk onderdeel van de kostprijs zijn de investeringskosten van de toedieningstechniek. Geavanceerde en precieze technieken hebben vaak hogere ontwikkelings- en aanschafkosten, wat leidt tot een hogere afschrijving en dus een hogere kostprijs per uitgereden hoeveelheid mest. Daartegenover staan eenvoudige technieken, die doorgaans lagere investeringskosten hebben en daardoor minder afschrijving vergen.

Capaciteit en arbeidskosten

Capaciteit is een andere bepalende factor: hoe meer mest een machine per uur kan uitrijden, hoe lager de arbeidskosten per m³. Een hogere capaciteit kan bijvoorbeeld worden bereikt door een bredere werkbreedte of hogere werksnelheid. Omgekeerd kunnen aanvullende handelingen, zoals het toevoegen van hulpstoffen tijdens het aanwenden, de capaciteit verlagen. Hoewel deze toevoegingen vaak in dezelfde werkgang plaatsvinden, kunnen de logistieke handelingen voor het aanleveren van de hulpstoffen extra tijd kosten en daarmee de algehele capaciteit negatief beïnvloeden.

Kosten van hulpstoffen en energie

Hulpstoffen, zoals zuur of krijtoplossingen, vormen een extra kostenpost in situaties waarin deze worden toegepast. Naast de aanschaf kunnen ook de opslag en logistiek van deze middelen extra kosten met zich meebrengen. Daarnaast is het energieverbruik een belangrijke factor in de kostprijs, aangezien machines energie nodig hebben in de vorm van diesel of elektriciteit. Een hoger energieverbruik door intensievere werkingsmechanismen vertaalt zich direct naar hogere energiekosten.

Onderhoudskosten

Ook onderhoudskosten zijn een wezenlijk onderdeel van de totale kostprijs. Machines met meer slijtagegevoelige onderdelen, zoals pompsystemen of elementen die door de grond slepen, brengen hogere onderhoudskosten met zich mee. Bovendien vereisen geavanceerdere technieken vaak complex onderhoud, wat extra kosten kan genereren in vergelijking met eenvoudigere machines. Het minimaliseren van slijtagegevoelige onderdelen kan helpen om de onderhoudskosten te beperken.

Totale kostprijs in samenhang

Samenvattend wordt de kostprijs bepaald door een combinatie van investeringskosten, capaciteit, hulpstoffen, energiekosten en onderhoud. Hoewel elke indicator afzonderlijk van invloed is, zijn ze sterk met elkaar verweven. Bijvoorbeeld, een machine met een hogere capaciteit kan lagere arbeidskosten opleveren, maar hogere investerings- en onderhoudskosten. Door deze factoren in balans te brengen, kan de kostprijs per m³ mest worden geoptimaliseerd.

3.1.15 Waterverbruik

Waterverbruik (L/ha) is een belangrijk nevenaspect van toedieningstechnieken en omvat het water dat nodig is om de techniek te laten functioneren of te voldoen aan wettelijke eisen. Bij referentiemachines zoals de sleufkouter en sleepvoet is het noodzakelijk om water bij te mengen om de techniek wettelijk toe te staan

(Regelink et al., 2021). Daarnaast wordt water vaak gebruikt voor het verdunnen van hulpstoffen, zodat deze beter oplossen, toepasbaar worden of geen schade veroorzaken aan gewassen (Boxmeer, Middelkoop, & Dooren, 2023).

De belangrijkste factor die het waterverbruik bepaalt, is het verdunningspercentage. Dit geldt zowel voor het bijmengen van water in de mest zelf als voor het verdunnen van hulpstoffen tot de vereiste concentratie. In beide gevallen is de verdunning de kernindicator die direct invloed heeft op de hoeveelheid water die wordt gebruikt per hectare.

Samenvattend is het waterverbruik bij toedieningstechnieken primair afhankelijk van de noodzaak tot verdunning, zowel voor naleving van wettelijke vereisten als voor een goede toepassing van hulpstoffen.

3.1.16 Aanvoer van (extra) hulpstoffen

Aanvoer van hulpstoffen (kg/ha) is het nevenaspect waarmee het gebruik van (extra) hulpstoffen door toedieningstechnieken wordt beschreven. De hoeveelheden die worden toegevoegd in kilogrammen per hectare is hiervoor de eenheid. De hoeveelheden die toegevoegd moeten worden om gewenste reducties te behalen verschilt per hulpstof en wordt op verschillende manieren bepaald. Er zijn dus ook verschillende indicatoren te vinden, een eerste indicator is de pH van de mest. Een andere indicator is het fosfaatgehalte van de toegediende mest, als er meer of minder fosfaat in de mest zit is er ook meer of minder nodig van de hulpstof. Er kan ook gekozen worden om te kijken naar gewasbehoefte i.p.v. een beoogde reductie in ammoniak, waardoor gewasbehoefte als indicator kan functioneren. Daarnaast kan ook gekeken worden naar de potentiële schade die een hulpstof kan doen wanneer het in het milieu terechtkomt, het kan voorkomen dat een hulpstof géén potentiële milieuschade geeft waardoor de hoeveelheid minder van belang is.

3.2 Potentiële effecten van innovaties op nevenaspecten

3.2.1 Stikstofwerking

Op basis van de N-werkingscoëfficiënten in Tabel 5, gehalten aan N-fracties in Tabel 6 en de geschatte emissiereducties in Tabel 7 van hoofdstuk 3.1.1 zijn de verwachte NWC's van de verschillende innovaties berekend. Daarbij is een gewogen gemiddelde berekend van toediening in de eerste en tweede snede van respectievelijk 25 en 15 m³ per ha. Vervolgens zijn de geschatte NWC's gerelateerd aan de NWC's van de referenties. Zoals eerder is aangegeven is de emissiereductie met onzekerheid omgeven en daarmee ook de berekende NWC's. Daarom zijn de effecten op de NWC van de verschillende innovaties kwalitatief gescoord. Daarbij is een effect van <5% gescoord met 0, een effect van 5-10% met + en een effect van > 10% met ++. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 8.

M.u.v. de plasmatechniek zijn de effecten van de verschillen technieken op de verhoging van de NWC relatief beperkt uiteenlopend van 0 tot 8%. Dit komt, omdat de NWC ook wordt bepaald door de werking van de Norg en de werking daarvan blijft gelijk bij toepassing van de innovatie. Daarnaast is de werking van de NH₄-N in de referentie al relatief hoog (83%). Door afdekken van de meststoeven met verschillende middelen (krijtoplossing, magnesiumchloride en zwavelzuur wordt de ingeschatte NWC verhoogd met 1 tot 4%. Diepe injectie geeft een verhoging van de ingeschatte NWC van 10%.

Door de toevoeging van nitraat leidt de plasmatechniek tot een relatief sterke stijging van de NWC van ruim 20%. Dit wordt mede veroorzaakt door de toevoeging van extra nitraat aan de mest. Wanneer dit buiten beschouwing wordt gelaten, dan stijgt de NWC met 3-6% (t.o.v. onbewerkte dunne fractie). Bij deze techniek is geen rekening gehouden met eventuele extra denitrificatie die kan plaatsvinden door de aanwezigheid van nitraat in de dunne fractie.

Tabel 8. Verwachte NWC van innovatieve mesttoedieningstechnieken (kolom 1 en 2) en de verwachte effecten t.o.v. referentietechnieken, uitgedrukt als de procentuele verandering van de NWC (kolom 3 en 4) en als score (kolom 5) waarbij -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor een hoge NWC van toegediende mest.

	NWC (%)		absoluut effect op NWC (%)		Score NWC
	Min	Max			
Kolom	1	2	3	4	5
Referenties					
<i>Drijfmest</i>		49			
<i>Dunne fractie</i>		53			
1 Afdekken meststoeven					
<i>Krijtoplossing</i>	50	53	2	8	0 tot +
<i>Magnesiumchloride</i>	50	53	2	8	0 tot +
<i>Zwavelzuur</i>	50	53	2	8	0 tot +
<i>Polyhaliet</i>	50	53	2	8	0 tot +
2 Plasmabehandeling	70/56 ¹	71/59 ¹	32/6 ¹	34/11 ¹	++/++tot++ ¹
3 Betere uitvoering zodenbemesten	49	49	0	0	0
4 Afdekken met gronddeeltjes	52	55	5	11	+ tot ++
5 Schuin insnijden	51	53	4	8	0 tot +
5 Diepe injectie	56	60	14	22	++

¹ inclusief/exclusief nitraateffect

3.2.2 Organische stof

In paragraaf 3.2.1 zijn de aanvoer van EOS en versnelde afbraak van organische stof door bodemberoering genoemd als voornaamste mechanismen genoemd die invloed kunnen hebben op de opbouw of afbraak van organische stof in de bodem als gevolg van bemestingstechnieken. Tabel 9 geeft per innovatie de effecten van de werkingsmechanismen (Element) weer en het netto effect (Integratiescore) op organische stof in de bodem. Onder de Tabel volgt een onderbouwing van de effectschattingen.

Ten opzichte van bovengronds toedienen van mest, geeft gebruik van een zodenbemester een positief effect op het organisch stofgehalte in de bodem, de aanvoer van EOS in de bodem en een negatief effect door bodemberoering. De aan elkaar tegengestelde mechanismen kunnen elkaar opheffen zodat er geen netto effect is op het organisch stofgehalte in de bodem. Een aanwijzing daarvoor is dat het organische stofgehalte in Nederlands grasland sinds de verplichting van emissiearme mesttoedieningstechnieken niet sterk veranderd is (Koopmans & Van Opheusden, 2019). In onderzoek van Hoekstra et al. (2023) werd geen significant verschil gevonden in grasgroei en scheurvorming tussen zodenbemesten en sleepvoetbemesten op klei-op-veen. Dit is een indicatie dat er weinig verschil kan worden verwacht tussen de invloed van verschillende toedieningstechnieken op organische stof.

Voor de meeste innovaties verwachten we geen meetbaar effect op de organische stof in de bodem. De verwachting is dat er wel degelijk een klein effect kan zijn van extra beroering van grond of minder toevoer van organische stof door het gebruik van dunne fractie. Het precieze netto effect op de organische stof balans is moeilijk te voorspellen, omdat er tegengestelde effecten kunnen plaatsvinden via verschillende mechanismen, en omdat de effecten naar verwachting beperkt zijn. De verwachting is daarom dat de effecten van verschillende technieken voor mest uitrijden te verwaarlozen zijn in vergelijking met de algehele aanvoer van organisch stof naar de bodem vanuit het grasland zelf.

Wanneer de technieken daadwerkelijk leiden tot een besparing van ammoniakemissie, neemt bij een gelijke bemesting de hoeveelheid minerale stikstof voor gewasopname toe. Bij een jaarlijkse stikstofgift van 170 kg N per hectare en drijfmest met 1.9 kg minerale N en 2.1 kg organische gebonden N per kuub, is de ammoniakemissie bij zodenbemesten ca. 15 kg N (op basis van een emissiefactor van 17%). Bij een halvering tot volledige reductie van ammoniakemissie zou dit mogelijk tot een positief en meetbaar effect op de grasproductie kunnen leiden, wat vervolgens ook van invloed kan zijn op de organische stofproductie vanuit het grasland naar de bodem. Echter, wanneer de kunstmestgift wordt verlaagd als gevolg van een betere N benutting uit drijfmest, zoals aangenomen bij de uitgangspunten van dit onderzoek, wordt er geen effect een lagere ammoniakemissie op de EOS aanvoer verwacht.

Tabel 9. Verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken t.o.v. referentietechnieken op organische stof in de bodem; -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor het behoud van organische stof in de bodem.

		Element		Integratiescore organische stof
		Bodem-beroering	EOS aanvoer	
1	Afdekken mest sleuven			
	<i>Krijtoplossing</i>	0	0	0
	<i>Polyhaliet</i>	0	0	0
	<i>Magnesiumchloride</i>	0	0	0
	<i>Zwavelzuur</i>	0	0	0
2	Aanzuren door opwekken plasmafase	0	-	- tot 0*
3	Betere uitvoering zodenbemesten	0	0	0
4	Afdekken sleuf met gronddeeltjes	-	0	- tot 0
5	Mest in schuin ingesneden sleuven	-/0	0	-/0
6	Diepe injectie	-	0	- tot 0

* voor veengronden een score van 0.

Hieronder is kort per innovatie beschreven waarop de verwachtingen van de effecten gebaseerd zijn:

1. *Afdekken mestleuven*: De afdekmiddelen veranderen de opbouw of afbraak van organische stof op korte termijn naar verwachting niet, gezien de relatief kleine hoeveelheden afdekmiddel die worden toegevoegd (Tabel 22). Ook zorgen ze er niet voor dat er meer of minder organische stof wordt aan- of afgevoerd via de bemesting. Wel zorgen de toevoegmiddelen op lange termijn voor een overschot van mineralen ten opzichte van de gewasopname (Tabel 22). Het gaat om calcium bij het gebruik van krijt, kalium, zwavel en magnesium bij het gebruik van polyhaliet, magnesium bij het gebruik van magnesiumchloride en zwavel bij het gebruik van zwavelzuur. Afhankelijk van mineralengehalten in de bodem en andere chemische en fysische bodemeigenschappen, en de termijn waarop deze mineralen worden toegediend, zouden deze een effect kunnen hebben op de organische stofbalans van de bodem. Dit kan bijvoorbeeld door het veranderen van gewasgroei, pH, bodemstructuur, activiteit en samenstelling van bodemleven, binden van klei- of humusdeeltjes, en mogelijk nog andere factoren (bijv. Quideau et al. 2021).
2. *Aanzuren mest door opwekken plasmafase*: Deze innovatie wordt tot nu toe alleen toegepast op gescheiden mest waarbij de meeste organische stof achterblijft na het scheiden, en niet meer op het grasland wordt toegediend. Door het gebruik van deze innovatie verwachten we daarom een negatief effect op bodem organische stof op met name zand- en kleigronden. In de dikke fractie blijft de meeste organische stof achter. Als die niet op het grasland uitgereden wordt heeft dit een negatief effect op de organische stof balans.
3. *Betere uitvoering zodenbemesten*: Deze maatregel gaat alleen over borging van het goed afstellen van een zodenbemester, en heeft daarmee (in theorie) geen effect op de manier van bemesting. We verwachten dus ook geen beter effect dan de referentiesituatie met een zodenbemester.
4. *Afdekken sleuf met gronddeeltjes*: Deze techniek krabt de zode open wat in principe de afbraak van organische stof van de zode en de bodem kan versnellen. Er zou dus een (klein) negatief effect op organische stof kunnen optreden, echter wanneer het krabben vrij beperkt en oppervlakkig is dit effect mogelijk verwaarloosbaar ten opzichte van de organische stof aanvoer van grasland aan de bodem.
5. *Schuin insnijden*: Mogelijk kan er bij deze techniek extra snijschade aan wortels en bodem optreden doordat de schijven niet verticaal maar iets horizontaler door de grond snijden en daarmee mogelijk meer wortels raken en bodem verplaatsen. Echter is de snijhoek vrij beperkt waardoor er beperkte extra schade verwacht wordt ten opzichte van huidige zodenbemesters. De extra schade zou een (klein) effect op de organische stofafbraak van bodem en gras kunnen hebben, maar waarschijnlijk verwaarloosbaar ten opzichte van de organische stof aanvoer van grasland aan de bodem.
6. *Diepinjectie*: Het effect van deze innovatie op organische stof in de bodem hangt sterk samen met de schade aan de zode. Meer schade aan de zode betekent meer zichtbare bodem en meer afstervende plantenwortels en afbraak van organische stof. Tegelijk wordt de aangevoerde organische stof uit mest dieper in de grond geplaatst waardoor deze minder snel afgebroken zal worden. Hoe de uiteindelijke balans bij diepinjectie versus zodenbemesten van organische stofafbraak uitpakt is daardoor nog onduidelijk. Ook hier zijn effecten waarschijnlijk verwaarloosbaar ten opzichte van de organische stof aanvoer van grasland aan de bodem.

3.2.3 Bodemverdichting

Tabel 10 geeft per innovatie de effecten van de werkingsmechanismen (Element) weer en het netto effect (Integratiescore) op bodemverdichting. De score van de referentiesituatie (zodenbemester, sleufkouter of sleepvoet) op bodemverdichting wordt voor alle grondsoorten licht negatief ingeschat. Wiellasten van 5 ton zorgen al voor verdichting van de bodem die zich moeilijk herstelt (Herbert et al., 2023). Ook vergt zodenbemesten op o.a. zware kleigrond veel trekkracht om de machine daadwerkelijk in de grond te krijgen, en het bijmengen van water bij sleufkouter en sleepvoet zorgt voor meer rijbewegingen over het land. Bij de huidige wijze van bemesten met een mesttank worden wiellasten van 5 ton en meer al snel behaald. Voor het bemesten met een sleepslangbemester ligt dit anders. In dat geval is er geen zware tank die het land berijdt en kunnen wiellasten lager blijven tijdens het bemesten. Als bij het draaien de slang en de bemester worden opgetild kan die wiellast wel oplopen tot 5 ton (Vermeulen et al., 2013). Omdat bodemverdichting altijd afhankelijk is van de omstandigheden kan alleen gezegd worden of het risico groter of kleiner wordt bij gebruik van een innovatie.

Tabel 10. Verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken t.o.v. referentietechnieken op bodemverdichting; -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor het vermijden van bodemverdichting.

	Element	Integratiescore bodemverdichting		
		Gewicht machine	Trekkracht	Aantal keer berijden
1	Afdekken mestsleuven			
	<i>Krijtoplossing</i>	-/0	0	0
	<i>Polyhaliet</i>	-/0	0	0
	<i>Magnesiumchloride</i>	-/0	0	0
	<i>Zwavelzuur</i>	-/0	0	0
2	Aanzuren door opwekken plasmafase	0	0	0
3	Betere uitvoering zodenbemesten	0	0	0
4	Afdekken sleuf met gronddeeltjes	0	-	0
5	Mest in schuin ingesneden sleuven	0	--/-	0
6	Diepe injectie	0	--/-	++

Zelfde score voor alle grondsoorten

*risico op bodemverdichting 1 niveau minder wanneer uitgevoerd met sleepslangbemester i.p.v. mesttank

Voor de meeste innovaties wordt geen afwijkend effect op bodemverdichting verwacht ten opzichte van de referentiemethoden:

1. *Afdekken mestsleuven*: Bij het gebruik van af- en toedekmiddelen verwachten we geen verandering in mesttoedieningsmomenten en -hoeveelheden. Mogelijk leidt een groter gewicht van de mesttank door extra volume (extra tank) en installatie van afdek-mechanisme wel tot extra belasting van de bodem. Hoe groot dit extra gewicht in praktijk is, valt nog moeilijk te zeggen omdat deze innovatie nog niet op de markt gebracht is. Bij afdekken gaat het om een gewicht van ca. 25 tot 250 kg extra per ha welke wordt uitgereden. Mogelijk levert dit ook van enkele honderden tot ruim 1000 kilo extra machine- en voorraadgewicht op.
2. *Aanzuren mest door opwekken plasmafase*: Door de hogere stikstofdichtheid in de aangezuurde dunne mest zijn er kleinere hoeveelheden per hectare nodig, en kan mogelijk ook een rondgang met een kunstmeststrooier worden uitgespaard. Dit zou in theorie kunnen betekenen dat er minder gewicht over het land gaat. Echter wordt deze dunne fractie naar verwachting nog steeds met de referentiemethoden met hetzelfde gewicht op het land gebracht. Hierdoor zijn er netto alleen minder vervoersbewegingen over het land nodig waarmee het positieve effect op bodemverdichting naar verwachting beperkt zal zijn. Daartegenover staat dat er via de dunne fractie minder organische stof

naar de bodem wordt gebracht. Organische stof heeft een positief effect op o.a. de bodemstructuur (van den Akker, 2019).

3. *Betere uitvoering zodenbemesten*: Deze maatregel gaat alleen over borging van het goed afstellen van een zodenbemester, en heeft daarmee (in theorie) geen effect op de manier van bemesting en dus ook geen verwacht ander effect dan de referentiesituatie met een zodenbemester. Indien betere borging resulteert in diepere zodenbemesting omdat een machine zonder de borgingsmaatregel niet goed was afgesteld, dan neemt de verwachte verdichting mogelijk iets toe door toegenomen trekkracht. In deze studie is er echter aangenomen dat de referentiebemesting ook een goed uitgevoerde bemesting is, waardoor er geen effect op werkdiepte is.
4. *Afdekken sleuf met gronddeeltjes*: Deze innovatie resulteert mogelijk in een toename van de trekkracht door een krabber de mest moet bedekken met grond. Dit kan mogelijk zorgen voor meer verdichting van de bodem.
5. *Schuin insnijden*: Deze techniek zorgt mogelijk voor een toename van benodigde trekkracht en daarmee voor meer verdichting en mogelijk iets meer rijschade aan de zode. Dit vooral omdat de schijven schuin op de rijrichting van de trekker geplaatst zijn.
6. *Diepinjectie*: Bij diepinjectie van mest zou meer verdichting kunnen ontstaan door de grotere trekkracht die nodig is om diep te snijden. Daar tegenover staat dat mest toedienen hiermee slechts één keer per jaar hoeft te gebeuren in plaats van 3 keer. Hiermee daalt het aantal werkgangen en dus het aantal keer dat het land bereiden wordt. Daarnaast heeft een diepinjecteur een elementafstand van 50 cm tegenover ca. 20 cm voor reguliere bemesters, wat betekent dat er ca. 2,5 x minder sleuven worden getrokken tijdens het bemesten. Ook heeft het huidige model van de diepinjecteur een werkbreedte van 3 m en een relatief kleine tankinhoud, wat enerzijds de trekkracht beperkt maar anderzijds betekent dat er meer tractorbewegingen over het land zijn dan met een bredere machine. Wellicht wordt bij een eventuele doorontwikkeling de werkbreedte van een injecteur groter, net als de tankinhoud. Wel is de werkgang in het voorjaar (wanneer de grond meestal natter is) doorgaans het meest gevoelig voor verdichting. Deze werkgang zou bij deze innovatie ook blijven bestaan. Tegelijk heeft de diepinjecteur een woelend effect wat oppervlakkige bodemverdichting kan opheffen. Op ca. 12 cm diepte gaan er ganzenvoeten door de bodem heen die de zode een stukje optillen, in de ruimte die hierdoor ontstaat word de mest gedeponereerd. Bodemverdichting word echter niet opgeheven door deze innovatie.

3.2.4 Schade aan zode

Tabel 11 geeft per innovatie de effecten van de werkingsmechanismen (Onderdeel) weer van individuele onderdelen van zodebeschadiging (rij- snijschade, scheurvorming, bedekking/besmeuring en verbranding/zoutschade) en het netto effect (Integratiescore) op schade aan de zode. De referentietechnieken scoren per definitie 0, maar dat wil niet zeggen dat ze helemaal geen effect hebben op de zode. De verwachting is dat de zodenbemester op zand geen tot een lichte schade toebrengt aan de zode. Op klei wordt deze schade hoger ingeschat vanwege het risico op scheurvorming onder droge omstandigheden. We verwachten weinig schade aan de zode bij bemesting met een sleufkouter en sleepvoet op klei en veengrond, behalve als er niet netjes wordt gewerkt en er sprake is van besmeuring.

Tabel 11. Verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken t.o.v. referentietechnieken op zodeschade; -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor het vermijden van zodeschade.

	Onderdeel				Integratiescore schade aan zode
	Rij- en snijschade	Scheurvorming	Bedekking/besmeuren	Verbranding/zoutschade	
1 Afdekken mestsleuven					
<i>Krijtoplossing</i>	0	0	-/0	-/0	-/0*
<i>Polyhaliet</i>	0	0	-/0	-/0	-/0*
<i>Magnesiumchloride</i>	0	0	-/0	-/0	-/0*
<i>Zwavelzuur</i>	0	0	-/0	-/0	-/0*
2 Aanzuren door opwekken plasmafase	0	0	0	-/0	-/0*
3 Betere uitvoering zodenbemesten	0	0	0	0	0
4 Afdekken sleuf met gronddeeltjes	nvt**	nvt**	nvt**	nvt**	nvt**
5 Mest in schuin ingesneden sleuven	--/-/0	--/-/0	0	0	-- tot 0
6 Diepe injectie	--/-/0	--/-/0	0	0	-- tot 0

*mits netjes uitgevoerd, zonder besmeuring van gras

** deze innovatie wordt niet toegepast op grasland, maar enkel op bouwland.

1. *Afdekken mestsleuven*: Bij het afdekken van de mestsleuven komt de gesprayde oplossing mogelijk in contact met het omliggende gras. Dit zou kunnen resulteren in bedekking van het gras wat leidt tot minder fotosynthese. Dit risico schatten we relatief laag in, al hangt dit wel af van de lengte van het gras en de nauwkeurigheid waarmee gewerkt wordt (Huiden, 2024). Bijvoorbeeld bij een minder goede machineafstelling of harde wind zou er meer afdekmiddel op het gras terecht kunnen komen. Bij het afdekken van de mestsleuven met een oplossing zou ook verbranding en of zoutschade aan het gras kunnen ontstaan. Bij toepassing van zwavelzuur wordt dit risico benoemd in de literatuur (Park et al., 2018). Overmatige toepassing van magnesiumchloride kan schadelijk zijn voor gras. Magnesium is een essentieel element voor planten, maar een overmaat kan andere kationen zoals kalium en calcium verdringen, wat de gezondheid van het gras kan beïnvloeden (van Boxmeer et al., 2023; CBGV 2023). Polyhaliet is een mineraal dat de elementen K, S, Mg en Ca bevat. Gras heeft al deze mineralen nodig en neemt ze op uit de bodem (Herrera & Ferney, 2019; Lillywhite et al., 2020). Als toevoeging aan drijfmest is de dosering ten opzichte van de gewasopname een belangrijke factor. In tabel 22 is te zien dat zowel kalium, zwavel en magnesium overmatig toegediend zullen worden. De effecten van een overmaat aan magnesium zijn eerder beschreven. Een overmaat van kalium en zwavel in de bodem heeft mogelijk een beperkt effect op gras.

-
2. *Aanzuren mest door opwekken plasmafase:* Door het scheiden van de mest bevat de dunne fractie hogere concentraties nutriënten. Dit zou mogelijk kunnen leiden tot zoutschade en verbranding als deze mest op het gras terecht komt. Ook kan de lage pH van de mest mogelijk tot extra verbranding leiden. Risico op verbranding en zoutschade speelt echter ook bij de referentiemethoden en kan voorkomen worden door een correcte uitvoering (correcte afstelling van de bemester).
 3. *Betere uitvoering zodenbemesten:* Deze maatregel gaat alleen over borging van het goed afstellen van een zodenbemester, en heeft daarmee (in theorie) geen effect op de manier van bemesting en dus ook geen verwacht ander effect dan de referentiesituatie met een zodenbemester.
 4. *Afdekken sleuf met gronddeeltjes:* Deze innovatie wordt niet toegepast op grasland, maar enkel op bouwland. Hierdoor is de score voor schade aan zoden niet van toepassing op deze innovatie.
 5. *Schuin insnijden:* Mogelijk kan er extra snijschade aan wortels optreden bij deze innovatie doordat de schijven niet verticaal maar iets horizontaler door de grond snijden en daarmee mogelijk meer wortels raken. Echter is de snijhoek vrij beperkt waardoor er beperkte extra schade verwacht wordt. Bij een relatief open zode kan deze innovatie mogelijk wel grotere schade toebrengen bij het snijden door het lostrekken van de zode.
 6. *Diepinjectie:* Bij deze innovatie kan grotere schade aan de zode optreden door de toegenomen trekkracht en het ontstaan van bredere snijvlakken (zie figuur 4). Dit wordt mogelijk gecompenseerd doordat de snijafstand groter is (50 cm) en er slechts één keer per jaar wordt bemest. Dit is ook afhankelijk van hoe de schade aan de zode herstelt. Dit wordt momenteel onderzocht in een praktijkproef.

3.2.5 Bodemleven

Tabel 12 gaat in op de mogelijke effecten op het bodemleven. Onder de tabel volgt een onderbouwing per innovatie. Zoals benoemd is in de paragraaf over organische stof zou, wanneer de technieken daadwerkelijk leiden tot een besparing van ammoniakemissie, bij een gelijke bemesting de hoeveelheid minerale stikstof voor gewasopname wat toe kunnen nemen. Dit zou mogelijk tot een positief en meetbaar effect op de grasproductie kunnen leiden, wat vervolgens ook van invloed kan zijn op de organische stofproductie vanuit het grasland naar de bodem, en daarmee ook positief kunnen zijn voor het bodemleven. Echter bij de aanname dat de kunstmest naar beneden wordt bijgesteld bij een hogere N benutting uit drijfmest, wordt er geen netto effect verwacht op de organische stofproductie van de innovaties. Innovaties die de bodem bewerken zoals innovatie 4, 5 en 6 kunnen ook een licht positief effect hebben op het bodemleven door een betere toegankelijkheid tot zuurstof.

Tabel 12. Verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken t.o.v. referentietechnieken op bodemleven; -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor het bodemleven.

	Element				Integratiescore bodemleven
	Extra stoffen	Organische stof	Mechanische schade	Bodemverdichting	
1 Afdekken mestsleuven					
<i>Krijtoplossing</i>	-/0	-/0	-/0*	-**	- tot 0
<i>Polyhaliet</i>	-/0	-/0	-/0*	-**	- tot 0
<i>Magnesiumchloride</i>	-/0	-/0	-/0*	-**	- tot 0
<i>Zwavelzuur</i>	-/0	-/0	-/0*	-**	- tot 0
2 Aanzuren door opwekken plasmafase	-/0	-	-/0*	-**	- tot 0***
3 Betere uitvoering zodenbemesten	0	0	0	0	0****
4 Afdekken sleuf met gronddeeltjes	0	-/0	--/-	--/-**	-- tot 0
5 Mest in schuin ingesneden sleuven	0	0	--/-/0	--/-**	-- tot 0
6 Diepe injectie	0	-/0	--/-/0	--/-**	-- tot 0

* indien toegepast bij een sleepvoet of sleufkouter een score van 0.

** risico op bodemverdichting 1 niveau minder wanneer uitgevoerd met sleepslangbemester i.p.v. mesttank.

*** bij een sleepvoet of sleufkouter een score van -/0.

**** Voor kleigrond een score van -/0.

Hieronder is kort per innovatie beschreven waarop de verwachtingen van de effecten gebaseerd zijn:

1. *Afdekken mestsleuven*: Het risico op negatieve effecten neemt vooral toe wanneer bepaalde stoffen aanzienlijk boven de norm worden toegediend, zoals beschreven in Tabel 22. Of er daadwerkelijk een effect optreedt, hangt af van verschillende factoren, zoals het bodemtype, de bodem-pH, het klimaat en het seizoen, evenals de verhouding van voedingsstoffen in de bodem. Over het algemeen zijn zandgronden gevoeliger voor overschrijding dan kleigronden, terwijl veengronden daartussenin zitten.

2. *Aanzuren mest door opwekken plasmafase*: Het aanzuren door het opwekken van een plasmafase waarbij alleen de dunne fractie van mest wordt gebruikt, kan tot een lagere netto aanvoer van organische stof naar de bodem leiden. Dit kan negatieve gevolgen voor zowel de bodemstructuur als de bodembiologie, maar waarschijnlijk blijven de effecten zeer beperkt door de relatief grote aanvoer van organische stof door het gras aan de bodem (zie ook de toelichting op organische stof). Naar verwachting zal dit met name spelen bij zand- en kleigronden die voor akkerbouwgewassen worden ingezet. Minder organische stof in de bodem kan leiden tot een verminderde aggregaatstabiliteit en een afname van het bodemleven, zoals bacteriën, schimmels, nematoden en regenwormen, die essentieel zijn voor een gezonde bodem (Quideau et al. 2021). Bovendien kan het proces van plasmafase-opwekking leiden tot de vorming van zure bijproducten, die de pH

van de bodem op de lange termijn kunnen verlagen (Zireeni et al. 2023). Een lagere pH kan de beschikbaarheid van essentiële voedingsstoffen verminderen en toxische elementen zoals aluminium mobiliseren, wat schadelijk is voor planten.

3. Betere uitvoering zodenbemesten: Deze maatregel gaat alleen over borging van het goed afstellen van een zodenbemester, en heeft daarmee (in theorie) geen effect op de manier van bemesting. We verwachten dus ook geen ander effect dan de referentiesituatie met een zodenbemester.

4. Afdekken sleuf met gronddeeltjes: Het afdekken van sleuven met gronddeeltjes heeft geen directe invloed op de chemische samenstelling van de grond, maar het kan mogelijk wel effect hebben op het bodemleven en bodemverdichting. Bij deze innovatie is het mogelijk dat zwaardere machines en/of extra trekkracht vereist zijn, wat het risico op bodemverdichting vergroot. Bodemverdichting beschadigt langgerekte en kwetsbare organismen, zoals draadachtige schimmels, waardoor de bodem meer gedomineerd wordt door kleine eencellige bacteriën. Verdichting kan leiden tot een significante reductie van arthropoden (geleedpotigen) en regenwormen. Ook nematoden (aaltjes) worden negatief beïnvloed door bodemverdichting, waarbij hun diversiteit en aantallen kunnen afnemen. Daarnaast belemmert bodemverdichting het graafgedrag en de voedselopname van regenwormen. Het vermindert de poriën in de bodem, waardoor de zuurstofvoorziening wordt belemmerd. Dit heeft negatieve gevolgen voor aerobe (zuurstofminnende) organismen. Tegelijkertijd gedijen anaërobe bacteriën in verdichte bodems, terwijl aerobe organismen benadeeld worden (Boxmeer et al., 2023).

5. Beperken luchtcontact bij zodenbemesten door schuin insnijden: Ook deze innovatie heeft naar verwachting grotere trekkracht nodig wat het risico op bodemverdichting verhoogt. De mogelijke effecten van bodemverdichting zijn hierboven beschreven.

6. Diepinjectie van mest: Diepte-injectie met een ganzenvoet die 12 cm diep gaat kan verschillende effecten hebben op de bodemstructuur en bodembioologie. Deze methode kan de bodemstructuur in de bovenlaag verbeteren door de bodem beter te beluchten, wat de wortelgroei en de opname van voedingsstoffen bevordert (Goed bodembeheer, 2024). Bovendien kan het de waterinfiltratie verbeteren door de bodem losser te maken, wat gunstig is voor de gewasgroei. Echter, als diepte-injectie te vaak of met te zware machines wordt uitgevoerd, kan het leiden tot bodemverdichting op diepere lagen, wat de waterdoorlatendheid en beluchting vermindert (Herbert et al., 2023). Bij nat weer kan diepte-injectie ook tot zode schade leiden, wat de grasmat kan verzwakken en de bodemstructuur kan aantasten. Wat betreft de bodembioologie, kan de verbeterde bodemstructuur en beluchting sommige micro-organismen ten goede komen, terwijl de verstoring door de injectie schadelijk kan zijn voor andere organismen. Regenwormen, die cruciaal zijn voor een gezonde bodem, kunnen ook worden verstoord door diepte-injectie. Als diepte-injectie beperkt blijft tot één per seizoen, is de inschatting dat ze zich kunnen herstellen.

3.2.6 Weidevogels

De impact van de voorgestelde innovaties op het aantal weidevogels is sterk afhankelijk van een mix van factoren, zoals weersomstandigheden en waterstanden. Mest uitrijden tijdens het broedseizoen kan verstoringen werken voor weidevogels, wat kan leiden tot schade aan nesten, eieren en kuikens. Ondanks dat elke bemestingsmethode zijn eigen (beperkte) impact heeft, is het moeilijk om een significante verbetering in broedsucces en kuikenoverleving te bereiken zonder een bredere aanpak die rekening houdt met alle verstoringen factoren tijdens het broedseizoen.

Tabel 13. Verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken t.o.v. referentietechnieken op weidevogels; -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor weidevogels.

	Element				Integratiescore weidevogels
	Mechanische schade	Bodemverdichting	Organische stof	Toegankelijkheid voedsel	
1 Afdekken mest Sleuven					
<i>Krijtoplossing</i>	-/0*	-*	0	-/0	- tot 0
<i>Polyhaliet</i>	-/0*	-*	0	-/0	- tot 0
<i>Magnesiumchloride</i>	-/0*	-*	0	-/0	- tot 0
<i>Zwavelzuur</i>	-/0*	-*	0	-/0	- tot 0
2 Aanzuren door opwekken plasmafase	-/0*	-*	-	0	- tot 0**
3 Betere uitvoering zodenbemesten	0	0	0	0	0
4 Afdekken sleuf met gronddeeltjes	--/-	--/-*	0	-/0	-- tot 0
5 Mest in schuin ingesneden sleuven	--/-/0	--/-*	0	-/0	-- tot 0
6 Diepe injectie	--/-/0	--/-*	-/0	-/0	-- tot 0

* risico op bodemverdichting 1 niveau minder wanneer uitgevoerd met sleepslangbemester i.p.v. mesttank.

** bij een sleepvoet of sleufkouter een score van -/0.

Hieronder is kort per innovatie beschreven waarop de verwachtingen van de effecten gebaseerd zijn:

1. Afdekken mest Sleuven:

Risico rondom afdekkmiddelen kan zijn dat er een overmaat aan mineralen door opgebouwd kan worden in de bodem. Een overmatig magnesium toevoeging kan voor kleigronden de structuur van de bodem negatief beïnvloeden, en daarmee mogelijk de doordringbaarheid van de bodem voor weidevogels.

2. Aanzuren mest door opwekken plasmafase:

Doordat bij deze techniek enkel de dunne fractie nog wordt toegediend welke minder organische stof bevat, zou hier een negatief effect op bodemleven kunnen ontstaan en daarmee ook op de beschikbaarheid van regenwormen voor weidevogels. De techniek kan wel leiden tot minder frequent verstoringen omdat er bij het bemesten een 'kunstmestgift' wordt meegegeven.

3. Betere uitvoering zodenbemesten:

Deze maatregel gaat alleen over borging van het goed afstellen van een zodenbemester, en heeft daarmee (in theorie) geen effect op de manier van bemesting. We verwachten dus ook geen ander effect dan de referentiesituatie met een zodenbemester.

4. Afdekken sleuf met gronddeeltjes:

Afdekken van sleuven met gronddeeltjes is mogelijk ook nadeliger voor weidevogels, doordat het theoretisch wat extra verdichting van de bodem kan opleveren. Toegankelijkheid van voedsel wordt hierdoor negatief beïnvloed. Zie ook de toelichting rondom bodemleven voor deze techniek.

5. Beperken luchtcontact bij zodenbemesten door schuin insnijden:

Schuin insnijden lijkt mogelijk tot wat meer scheurvorming in kleigrond dan zodenbemesten, wat nadeliger is

voor weidevogels. Toegankelijkheid van voedsel wordt hierdoor negatief beïnvloed. Ook kan extra trekkracht zorgen voor meer bodemverdichting, wat theoretisch nadelig kan zijn voor bodemleven.

6. Diepinjectie van mest:

Hoewel diepe injectie de schade kan verminderen doordat de mestgift slechts een keer per seizoen plaatsvindt en de bemestingselementen verder uit elkaar liggen, blijft er een risico bestaan door verstoring en andere landbouwactiviteiten zoals maaien. Ook kan de techniek door extra trekkracht mogelijk voor een grotere bodemverdichting zorgen.

3.2.7 Afspoeling van stikstof en fosfaat

De effecten van toedieningstechnieken op afspoeling van fosfaat en stikstof kunnen niet goed gekwantificeerd worden in termen van veranderingen van de flux naar watersystemen. Dit komt doordat de fluxen in het algemeen laag zijn en de effecten van toedieningstechnieken zijn dat ook. Bovendien zijn er veel andere factoren zoals de bodemgesteldheid en weeromstandigheden die invloed hebben op afspoeling van fosfaat en stikstof.

Tabel 14. Verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken t.o.v. referentietechnieken op afspoeling van stikstof en fosfaat over de grond; -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor het beperken van afspoeling.

	Element		Integratiescore afspoeling
	Voorkomen mest op het land	Bodemverdichting en structuurbederf	
1 Afdekken mestsleuven			
- <i>Krijtoplossing</i>	0	-*	0
- <i>Polyhaliet</i>	0	-*	0
- <i>Magnesiumchloride</i>	0	-*	0
- <i>Zwavelzuur</i>	0	-*	0
2 Aanzuren door opwekken plasmafase	0	-*	0
3 Betere uitvoering zodenbemesten	0	0	0
4 Afdekken sleuf met gronddeeltjes	+	- tot 0*	- tot +
5 Mest in schuin ingesneden sleuven	+	-- tot*	-- tot +
6 Diepe injectie	+	-- tot 0*	-- tot +

*Risico in verband met bodemverdichting 1 niveau minder wanneer uitgevoerd met sleepslangbemester i.p.v. mesttank.

Hieronder is kort per innovatie beschreven waarop de verwachtingen van de effecten gebaseerd zijn:

1. *Afdekken met mest met additieven*

De laag waarmee de mest wordt afgedekt is bij deze innovatie voldoende om ammoniakemissie te beperken, maar zal onvoldoende zijn om mest in de sleuf wezenlijk te beschermen tegen uitregenen bij situaties met hevige neerslag. De machine is niet veel zwaarder dan de gangbare technieken zodat weinig of geen structuurbederf te verwachten is.

2. *Aanzuren door opwekken plasmafase*

Bemesting vindt plaats met behulp van de voorgeschreven technieken, zodat het optreden van afspoeling niet anders zal verlopen dan bij de referentie. Het N gehalte in de mest zal wel hoger zijn door invangen van lucht vrije stikstof als nitraat in mest. Daardoor is – als afspoeling zich voordoet- de belasting van het watersysteem iets groter (er is geen/minder risicospreiding door splitsing toedieningsmomenten van drijfmest en kunstmest N).

3. *Betere uitvoering bemesting met zodenbemester*

Er wordt gewerkt met een zodenbemester en er zijn geen extra veranderingen daarom is de score gelijkwaardig aan de referentie.

4. *Afdekken met grond*

De aangebracht grond vormt een laag tussen het mestvolume in de sleufjes en de atmosfeer. De afdekking van grond, kan de mest in de sleufjes beschermen zodat deze, ook bij hevige regenval, niet uit de sleufjes wordt gespoeld. In theorie kan de afspoeling dus iets afnemen. Het verwachte effect op afspoeling is klein omdat de afspoeling bij zorgvuldig omgaan met de referentietechnieken ook al laag is.

5. *Schuin insnijden*

De afdekking van grond, kan de mest in de sleufjes beschermen zodat deze, ook bij hevige regenval, niet uit de sleufjes spoelt. In theorie kan de afspoeling dus iets afnemen. Het verwachte effect op extra afspoeling is klein. Maar of dit zo gaat werken, hangt af van effecten op de graszode. In theorie zou ook de oriëntatie van de sleuf ten opzichte van de sloot (bovenkant richting de sloot af ervan af?) en ten

opzichte van de helling van het perceel (open kant is opwaarts of neerwaarts t.o.v. de helling gericht). Hier zou bij technische uitwerking van de techniek rekening mee gehouden kunnen worden (door de richting van de insnijding flexibel te maken).

6. *Diepe injectie*

- Door de mest dieper in de bodem te brengen is de kans dat de mest uit de sleufjes spoelt bij hevige regenval in theorie kleiner dan bij zodenbemesten.
- Echter, het verschil met goed en zorgvuldig uitgevoerde zodenbemesten op minerale gronden zal nihil zijn. Want de kans dat bij goed uitgevoerde zodenbemesten (waarbij de mest ook keurig in de sleufjes zit), mest N afspoelt is ook al beperkt. Op veengrond is hierover meer onzekerheid, maar het is de vraag of diepere injectie op veengrond praktijk kan gaan worden.
- De machine zal vermoedelijk wat zwaarder zijn dan de zodenbemester en sleepvoetbemester en meer trekkracht nodig hebben waardoor iets meer kans is op structuurbederf van de bodem waardoor mest die op het land komt meer tijd nodig kan hebben om in de bodem te trekken. Omdat de mest bij deze aanpak in de grond wordt gebracht, speelt dit mechanisme hier geen rol.

3.2.8 Uitspoeling van fosfaat

Tabel 15 gaat in op mogelijke effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken op uitspoeling van fosfaat. De effecten van toedieningstechnieken op uitspoeling van fosfaat kunnen niet betrouwbaar worden gekwantificeerd in termen van veranderingen van de flux naar watersystemen. Dit komt doordat de effecten van toedieningstechnieken zwak zijn en de onzekerheden groot door de invloed van variatie in bodemtypes, bodemgesteldheid en weeromstandigheden.

Tabel 15 geeft voor alle innovaties 'geen effect' aan ten aanzien van de fosfaattoestand. We verwachten dan ook geen noemenswaardig verandering van op de fosfaatopbrengst ten gevolge van de innovaties. De opbrengst van droge stof kan weliswaar N gelimiteerd zijn en bij lagere NH₃ emissie is het N aanbod aan de plant iets hoger, maar dit wordt in de scenario's telkens gecompenseerd door een reactie van minder kunstmest N. Daardoor blijven het N bemestingsniveau en alle opbrengsten gelijk en is ook geen extra fosfaat nodig.

Tabel 15. Verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken t.o.v. referentietechnieken op uitspoeling van fosfaat; -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor het beperken van uitspoeling.

	Element		Integratiescore P uitspoeling
	Fosfaattoestand	Fosfaat mobiliteit	
1 Afdekken mestsleuven			
- Krijtoplossing	0	0	0
- Polyhaliet	0	0	0
- Magnesiumchloride	0	0	0
- Zwavelzuur	0	0	0
2 Aanzuren door opwekken plasmafase	0	-	- tot 0
3 Betere uitvoering zodenbemesten	0	0	0
4 Afdekken sleuf met gronddeeltjes	0	0	0
5 Mest in schuin ingesneden sleuven	0	0	0
6 Diepe injectie	0	0	0

Hieronder is kort per innovatie beschreven waarop de verwachtingen van de effecten gebaseerd zijn:

7. Afdekken met mest met additieven

- Magnesium en calcium binden fosfaat. De hoeveelheid materiaal waarmee de mest wordt afgedekt is bij deze innovatie voldoende om ammoniakemissie te beperken, maar is klein ten opzichte van het hele bodemcomplex en het mestvolume. Daardoor is het effect op de mobiliteit van P verwaarloosbaar. Het is eveneens niet te verwachten dat de P opname door gewas significant beïnvloed wordt door vorming van niet voor de plant beschikbare neerslagen van fosfaat met calcium en magnesium. Ook de bodemvoorraad van P zal dan ook niet wezenlijk veranderen.
- Zuur verhoogt de mobiliteit van fosfaat. Dit kan het risico van fosfaat uitspoeling doen toenemen, afhankelijk van de grootte van het bindingscomplex in de bodem. Door de bescheiden hoeveelheid die wordt toegediend als afdekmiddel is dit effect verwaarloosbaar.

8. Aanzuren door opwekken plasmafase

Zuur verhoogt de mobiliteit van fosfaat. Om de ammoniakemissie wezenlijk te verlagen, is aanzuring van de mest tot pH 5 nodig. Mogelijk heeft dit een verhogend effect op de mobiliteit van fosfaat en daarmee op fosfaatuitspoeling. Dat de aanzuring via een ander proces verloopt dan bij toevoegen van zwavelzuur maakt voor dit effect niet uit. Om dit risico beter te kunnen schatten, moet nagegaan worden hoeveel zuurequivalenten aan de bodem worden toegevoegd door deze techniek, dan wel hoeveel van de bufferende werking van mest wordt opgeheven in het proces van aanzuring.

9. Betere uitvoering bemesting met zodenbemester

Er wordt gewerkt met een zodenbemester. Deze techniek benadert de referenties per definitie meer dan elke andere variant.

10. Afdekken met grond

De aangebracht grond vormt een laag tussen het mestvolume in de sleufjes en de atmosfeer. Dit heeft geen invloed op de uitspoeling van fosfaat door de bodem.

11. Schuin insnijden

Het is niet te verwachten dat de uitspoeling van fosfaat hierdoor zal toenemen.

12. Diepe injectie

Het is niet te verwachten dat de uitspoeling van fosfaat door dieper in de grond brengen van mest zal toenemen. Dit zou wel het geval kunnen zijn als deze techniek op veengrond zou worden toegepast. Maar dat wordt in de scenario's uitgesloten.

3.2.9 Uitspoeling van stikstof

Tabel 16 geeft de geschatte effecten weer van de innovatieve toedieningstechnieken op uitspoeling van nitraat. De geschatte effecten van verlaging van de NH₃ emissie van technieken en de daarmee gepaard gaande hogere N aanvoer naar de bodem op nitraatuitspoeling worden steeds als niet bestaand of verwaarloosbaar gekwalificeerd. Dit komt doordat de extra aanvoer van N naar de bodem door verlaging van de NH₃ emissie beperkt is. Bovendien is voor de technieken waarbij deze extra aanvoer van N naar de bodem wat groter is, uitgegaan van compensatie door een lagere kunstmest N gift.

Tabel 16. Verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken t.o.v. referentietechnieken op uitspoeling van nitraat; -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor het beperken van uitspoeling.

	Element				Integratiescore nitraatuitspoeling
	N aanvoer bodem	Schade aan zode	Diepte bemesting	Tijdstip bemesting	
1 Afdekken mestsleuven					
- <i>Krijtoplossing</i>	0	-/0	0	0	0
- <i>Polyhaliet</i>	0	-/0	0	0	0
- <i>Magnesiumchloride</i>	0	-/0	0	0	0
- <i>Zwavelzuur</i>	0	-/0	0	0	0
2 Aanzuren door opwekken plasmafase	0	-/0	0	-/0	-/0
3 Betere uitvoering zodenbemesten	0	0	0	0	0
4 Afdekken sleuf met gronddeeltjes	0	-	0	0	0
5 Mest in schuin ingesneden sleuven	0	--/-/0	0	0	0
6 Diepe injectie	0	--/-/0	-/0 tot 0/+	-/0 tot 0/+	-- tot 0

Hieronder is kort per innovatie beschreven waarop de verwachtingen van de effecten gebaseerd zijn:

1. *Afdekken met mest met additieven*
Het is niet te verwachten dat neerwaarts transport van mest N wordt beïnvloed door deze afdekking en het is niet plausibel dat de uitspoeling zal toenemen. Het verwachte effect op uitspoeling is nihil.
2. *Aanzuren door opwekken plasmafase*
Hier is van belang dat deze techniek luchtvrige stikstof vastlegt in de mest als Nitraat. De op deze wijze ingevangen nitraat wordt dan in een keer gegeven, terwijl deze in de uitgangssituatie -op maat- toegediend kan worden in een aparte bemestingsronde voor kunstmest. Er is dus minder mogelijkheid voor risicospreiding. De effecten van timing van (deel)giften is zeer lastig kwantitatief in te schatten.
3. *Betere uitvoering bemesting met zodenbemester*
Er wordt gewerkt met een zodenbemester. Deze techniek benadert de referenties per definitie meer dan elke andere variant. Effecten van deze variant op nitraatuitspoeling zijn niet plausibel en niet waarschijnlijk.
4. *Afdekken met grond*
Het is niet te verwachten dat neerwaarts transport van mest N wordt beïnvloed door deze afdekking. Het is ook niet plausibel dat de uitspoeling zal toenemen. Het verwachte effect op uitspoeling is nihil.
5. *Schuin insnijden*
Het is niet te verwachten dat neerwaarts transport van mest N wordt beïnvloed door deze afdekking. Het is ook niet plausibel dat de uitspoeling zal toenemen. Het verwachte effect op uitspoeling is nihil.
6. *Diepe injectie*
Diverse factoren spelen een rol
 - Het te verwachten effect van dieper inbrengen van mest kan bepaald worden door de mate waarin schade aan de graszode optreedt, de diepte van mestplaatsing en het tijdstip van plaatsing. De mechanismen kunnen een tegengesteld effect hebben.

-
- **Graszode**
Als dieper in de grond brengen van mest beschadiging van de graszode veroorzaakt zal het risico van nitraatuitspoeling toenemen. In open of beschadigde plekken in de graszode is de opname van N die vrijkomt uit mest geremd; de insnijding kan de mineralisatie iets toeneemen. Deze plekken vormen dan hot spots van uitspoeling. De techniek zal dus zo vormgegeven moeten worden dat zodebeschadiging minimaal blijft. Een implicatie van deze techniek is dat bemestingsronde achterwege kan blijven en dat na oogst van de eerste snede niet nogmaals bemest wordt, terwijl dit in de referentie wel gebeurt. Dit spaart de graszode juist. Waardoor het netto effect op de zode zelfs gunstig kan zijn t.o.v. de referentie. Per saldo kan het effect in verband met effecten op de graszode dus zowel licht risico verlagend als risico verhogend zijn, waarbij de mate van het risico verhogende effect afhankelijk is van het technisch functioneren van de techniek.
 - **De diepte van mestplaatsing**
Tot 15 cm is geen risico-verhogend effect te verwachten door plaatsing buiten bereik van graswortels. Maar naarmate de mest dieper ingebracht wordt (richting 20 cm min maaiveld), wordt een aanjagend effect op uitspoeling wel meer denkbaar, afhankelijk van het bodemprofiel en de ontwateringsdiepte. Of wortels bij mestplaatsing dieper dan 15 cm de N nog kunnen bereiken, hangt samen met de bewortelingsdiepte van de zode (dieper in tijdelijk grasland dan blijvend grasland). Risico's kunnen zich bij plaatsing tot 20 cm met name voordoen door inspoeling mest N bij veel regen naar 30 cm min maaiveld. Anderzijds wordt de mest wordt gelijkmatiger verdeeld over een grotere bodemlaag, waardoor in de bemeste bodemlaag minder hoge zoutconcentraties voorkomen. Dit kan juist weer gunstiger zijn voor wortels en bodemleven. Dit potentiële voordeel valt weg als hogere giften in eens gegeven worden. Per saldo kan het effect in verband met het tijdstip van mestplaatsing dus zowel licht risico verlagend als licht risico verhogend zijn.
 - **Het tijdstip van mestplaatsing**
N die geplaatst wordt op het moment (afgestemd op de gewasbehoefte en niet te laat in het groeiseizoen) draagt bij aan beperking van nitraatuitspoeling. Qua timing zijn er twee mogelijke effecten die elkaar tegenwerken. Vroeger bemesten van grasland kan leiden tot een betere synchroniciteit tussen vrijkomen van mest N en de opnamecapaciteit van gras en kan het risico op uitspoeling in het najaar verlagen. Als veel mest in een snede wordt gegeven is er geen sprake meer van risicospreiding in de bemesting. Per saldo kan het effect in verband met het tijdstip van mestplaatsing dus zowel licht risico verlagend als licht risico verhogend zijn.

3.2.10 Stank en geur

Aangezien er in verschillende onderzoeken goede correlaties zijn gevonden tussen de emissies van ammoniak en geurstoffen (ref?) hebben we de schattingen van het effect van de innovaties op geur en stank gebaseerd op het effect van de innovaties op de ammoniakemissie. Hierbij hebben we gebruik gemaakt van de aan ons verstrekte informatie over de ammoniakreductie van innovaties (zie hoofdstuk 3.2.1). De ammoniakemissiereducties van verschillende innovaties zijn nog onzeker en daarmee ook schattingen van het effect van de innovaties op geur en stank. We hebben de effecten van innovaties t.o.v. referentietechnieken voor geur gescoord op basis van 5 niveaus, variërend van ongunstig (--), via neutraal (0), tot gunstig (++). In sommige situaties wordt een niveau gekozen dat het midden houdt tussen de genoemde kwalificaties, bijvoorbeeld: 0/+ en -/0. Hiermee wordt bedoeld respectievelijk een marginaal gunstig effect en een marginaal ongunstig effect. Voor de relatie met de ammoniakemissie is aangehouden dat bij een gemeten of ingeschatte NH₃-emissiereductie tot 50% de geuremissiereductie beoordeeld is met een + en bij een gemeten of ingeschatte NH₃-emissiereductie van meer dan 50% met ++. Naast vermindering van emissie van geurstoffen kan door toevoeging van hulpstoffen ook de samenstelling van de geurstoffen veranderen. Op basis van *expert judgement* is geconcludeerd dat alleen de innovatie aanzuren door opwekken plasmafase leidde tot een waarneembaar verandering van de geursamenstelling (richting koperachtige, ozonachtige geur). Bij de andere innovaties met verschillende toevoegmiddelen konden geen noemenswaardige veranderingen van de geur worden vastgesteld. In tabel 17 is naast de verwachte reductie op de geuremissie (zie kolom integrale score) ook het effect op het niveau van onderliggende werkingsmechanismen per innovatie weergegeven. Laatstgenoemde is gebaseerd op de beschrijving van de innovaties in Hoofdstuk 2.4. Voor het afdekken van de mest sleuven met verschillende middelen is geschat dat die een (licht) gunstig effect (+) hebben op de reductie van de geuremissie omdat de ingeschatte reductie van de NH₃-emissie voor deze middelen tussen de 12,5 en 50% ligt. Het geschatte effect van aanzuren door opwekken plasmafase op de reductie van de geuremissie is gunstig (+) tot zeer gunstig (++). Deze inschatting is gemaakt op basis van de gemeten reductie van de NH₃-emissie van 12,5% tot 90% en op basis van positieve geurwaarnemingen in de praktijk, ondanks de hiervoor genoemde veranderde geursamenstelling. Genoemde effecten gelden alleen voor de toepassing van dunne fractie na mestscheiding. Ook het geschatte effect van afdekken van de mest sleuf met gronddeeltjes is positief tot zeer positief. Het effect kan, net als effect op NH₃-emissie, sterk variëren omdat het afhankelijk is van de beschikbaarheid van losse grond. Het toevoegen van de middelen polyhaliet en zwavelzuur geeft een verwachte reductie van de NH₃-emissie van resp. 10-25% en 10-50%. Op basis daarvan is de reductie van de geuremissie positief beoordeeld met een +. Van de toevoegmiddelen zeoliet, bioliet en magnesiumchloride is geen reductie van de NH₃-emissie gevonden en daarom is ingeschat dat er ook geen reductie van de geuremissie zal zijn. Bij diepe injectie worden de meststrookjes praktisch volledig afgesloten door de zode waardoor de emissie van zowel ammoniak als geurstoffen sterk zal worden gereduceerd.

Tabel 17. Werkingsmechanismen met betrekking tot neveneffecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken (kolom 1 t/m 5); blauw = werkingsmechanisme is actief, en verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken t.o.v. referentietechnieken op geuremissie (kolom 6); -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor het beperken van geuremissie.

	Werkingsmechanisme					Integratie- score geur
	Verlaging pH	Vermindering contact met de lucht	Verlaging concentratie	Binding geurstoffen	Verandering samenstelling van geur	
	Kolom 1	Kolom 2	Kolom 3	Kolom 4	Kolom 5	Kolom 6
1 Afdekken mestsleuven <i>Krijtoplossing</i> <i>Polyhaliet</i> <i>Magnesiumchloride</i> <i>Zwavelzuur</i>						0/+ 0/+ 0/+ 0/+
2 Aanzuren door opwekken plasmafase						+ / ++
3 Betere uitvoering zodenbemesten						0
4 Afdekken sleuf met gronddeeltjes						0/+
5 Mest in schuin ingesneden sleuven						0/+
6 Diepe injectie						++

3.2.11 Lachgas

Tabel 18 betreft de verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken op lachgas. Zowel de geschatte emissiefactoren van lachgas als de score van het effect ten opzichte van de referentietechnieken is weergegeven. Onder de tabel is per innovatieve techniek een toelichting opgenomen van de schattingen in Tabel 18. De verwachting is dat de lachgasemissie kan toenemen bij aanzuren door opwekking van een plasmafase in mest, bij schuin insnijden en bij diepe injectie van mest.

Tabel 18. Verwachte emissiefactor van lachgas bij toepassing van innovatieve mesttoedieningstechnieken en referentietechnieken (kolom 3 en 4) en verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken t.o.v. referentietechnieken op de emissie van lachgas (kolom 5); -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor het beperken van lachgasemissie.

Kolom 1	Kolom 2	Emissiefactor		Score
		Minerale bodem	Organische bodem	
		Kolom 3	Kolom 4	Kolom 5
Ref	Zodenbemester	0,3	1	
Ref	Sleufkouter, 2:1 mest en water	0,3	1	
Ref	Sleepvoet, 2:1 mest en water	0,3	1	
1	Afdekken mestsleuven			
	<i>Krijtoplossing</i>	0,3	1	0
	<i>Polyhaliet</i>	0,3	1	0
	<i>Magnesiumchloride</i>	0,3	1	0
	<i>Zwavelzuur</i>	0,3	1	0
2	Aanzuren door opwekken plasmafase	0,9	3	--
3	Beter uitvoering zodenbemesten	0,3	1	0
4	Afdekken sleuf met gronddeeltjes	0,3	1	0
5	Mest in schuin ingesneden sleuven	0,325	1,025	-/0
6	Diepe injectie	0,6 ^{1/2}		-

¹ Zand en klei

² Veen

Hieronder is kort per innovatie beschreven waarop de verwachtingen van de effecten gebaseerd zijn:

1. Afdekken mestsleuven met additieven

Uitvoering met een zodenbemester en geen verder effect verwacht door toevoegmiddelen. Dus lachgasemissie vergelijkbaar met standaard zodenbemesting.

2. Aanzuren door opwekken plasmafase

Door het opwekken van de plasmafase wordt de pH verlaagd, dit gebeurt door het toevoegen van nitraat aan de mest. Dit kan zorgen voor een significante stijging van lachgasemissie, tot wel 3x hoger dan de referentie. Door een hoger aandeel nitraat is er meer mogelijkheid tot denitrificatie en dus een hoger risico op lachgasemissie. Eerste onderzoeken buiten deze studie ondersteunen deze aannames, (Puente-Rodríguez, Vonk, & Verdoes, 2025) neemt hoge waarden waar tijdens eerste metingen en (Lloyd, Grayson, Galdos, Morrison, & Chapman, 2024) heeft een factor gemeten die 4 keer zo hoog is bij een veldproef met varkensmest.

3. betere uitvoering zodenbemesten

Geen effect op lachgasemissie, emissie komt dus overeen met zodenbemesten.

4. afdekken sleuf met gronddeeltjes

Diepte verschilt niet wezenlijk met zodenbemesting en het laagje waarmee de sleuf wordt afgedekt is dermate poreus dat het zuurstofgehalte ook niet significant verschilt. Daarom wordt er geen additioneel effect verwacht.

5. Schuin insnijden

Het contactoppervlak met de buitenlucht wordt verkleind, dit kan ook een effect hebben op de hoeveelheid zuurstof in de bodem. Dit kan het risico op lachgas verhogen, maar dit effect is onzeker en waarschijnlijk klein. Een stijging t.o.v. zodenbemesten met een relatief percentage van 0,25%.

6. Diepe injectie

Diepere injectie leidt tot meer lachgas, onderzoek wijst uit dat bouwlandinjectie t.o.v. zodenbemesting op maisland een hogere emissie veroorzaakt. Dit effect wordt ook verwacht op grasland.

Drie factoren spelen hierbij een rol:

-
- Minder ammoniakemissie, daardoor meer minerale N in de bodem. En dit geeft een hoger risico op lachgasemissie
 - Hoe dieper in de bodem, hoe lager het zuurstofgehalte en hoe hoger het risico op lachgasemissie
 - Diepinjectie verhoogt de concentratie van mest door vaak grotere giften en minder elementen, hierdoor ontstaat hotspots van hoge zuurstofconsumptie in de bodem, en dit verhoogt het risico op lachgasemissie

3.2.12 Energieverbruik

Tabel 19. Verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken t.o.v. referentietechnieken op energiegebruik; -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor het beperken van energieverbruik.

		Element			Integratiescore energiegebruik
		Trekkracht	Aangebrachte hoeveelheid	Vorbereiding	
1	Afdekken mestsleuven				
	<i>Krijtoplossing</i>	-/0*	-	0	- tot 0
	<i>Polyhaliet</i>	-/0*	-	0	- tot 0
	<i>Magnesiumchloride</i>	-/0*	-	0	- tot 0
	<i>Zwavelzuur</i>	-/0*	-	0	- tot 0
2	Aanzuren door opwekken plasmafase	-/0*	0	--	--
3	Betere uitvoering zodenbemesten	0	0	0	0
4	Afdekken sleuf met gronddeeltjes	-*	0	0	- tot 0
5	Mest in schuin ingesneden sleuven	-/--*	0	0	-- tot 0
6	Diepe injectie	-/--*	0	0	-- tot 0

*Op kleigrond is de weerstand hoger dan op zand & veen, echter is dit zeer afhankelijk van omstandigheden, waardoor er geen eenduidige score aan kan worden gegeven (Huijsmans et al., 1998).

Hieronder is kort per innovatie beschreven waarop de verwachtingen van de effecten gebaseerd zijn:

1. Afdekken mestsleuven met additieven

Het toevoegen van additieven zorgt ervoor dat er een grote hoeveelheid aangebracht wordt per hectare. Het transport hiervan zorgt voor een hoger energiegebruik. Daarnaast moeten deze extra stoffen ook meegenomen worden, dit leidt tot een zwaardere machine hierdoor wordt het energiegebruik ook verhoogd. Kortom het energiegebruik zal hoger zijn dan een standaard zodenbemester.

2. Aanzuren door opwekken plasmafase

Voor het opwekken van de plasmafase is veel energie nodig, namelijk 30 – 40 kWh per kg stikstof in het eindproduct. Dit is noodzakelijk voordat er bemest wordt, dit is dus voorbereiding voor het bemesten. Het energiegebruik tijdens het bemesten zal niet significant verschillen t.o.v. de referentie.

3. betere uitvoering zodenbemesten

Deze innovatie is gericht op het beter uitvoeren van zodenbemesten, m.b.v. cameratechniek wordt het werk beoordeeld en de machine wanneer nodig beter afgesteld. Dit kan betekenen dat als bijvoorbeeld de machine te diep staat afgesteld, en dit wordt verhinderd het energiegebruik afneemt. Echter zal in de praktijk een machines vaker te ondiep afgesteld worden dan te diep, omdat gebruikers geneigd zijn op brandstofkosten te besparen.

4. afdekken sleuf met gronddeeltjes

Bij deze innovatie wordt er een soort krabbertje achter de zodenbemester toegevoegd, waardoor er grond over de sleuf wordt gelegd. Het krabbertje zorgt voor een hogere trekbehoefte en zal het brandstofverbruik iets verhogen, maar dit effect zal bij een juiste afstelling niet groot zijn.

5. Schuin insnijden

Bij deze innovatie worden de elementen van de zodenbemester onder een hoek afgesteld waardoor er schuin wordt gesneden i.p.v. recht. Dit zorgt voor een iets hogere trekkrachtbehoefte en daardoor een iets hoger brandstofverbruik. Het effect zal niet erg groot zijn.

6. Diepe injectie

Bij deze innovatie wordt de mest dieper weggestopt dan bij zodenbemesten. Hierdoor is de weerstand significant hoger dan bij zodenbemesten. Vanuit studies in de jaren 90 en 2000 was duidelijk dat het brandstofverbruik per hectare 20-40% hoger is dan bij zodenbemesten. Daarnaast is de werkbreedte over het algemeen lager dan bij een zodenbemester, waardoor er meer werkgangen nodig zijn. Dit verhoogd het energiegebruik ook.

3.2.13 Kostprijs

Tabel 20 gaat in op de kosten van innovatie mesttoedieningstechnieken. Hierbij is onderscheid in de verschillende oorzaken van eventuele kostenverhoging ten opzichte van de referentietechnieken (Elementen) en is het integrale effect weergegeven (Integatiescore). Onder de Tabel is een onderbouwing van de verwachte effecten opgenomen.

Tabel 20. Verwachte effecten van innovatieve mesttoedieningstechnieken t.o.v. referentietechnieken op de kostprijs; -- = ongunstig, - = licht ongunstig, 0 = neutraal, + = licht gunstig, ++ = gunstig voor het een lage kostprijs.

	Element				Integratie- score kostprijs
	Investerings kosten	Capaciteit	Onderhoud	Gebr. stoffen & energie	
1 Afdekken mestsleuven					
<i>Krijtoplossing</i>	-	-	-/0	-	-
<i>Polyhaliet</i>	-	-	-/0	-	-
<i>Magnesiumchloride</i>	-	-	-/0	-	-
<i>Zwavelzuur</i>	-	-	-/0	-	-
2 Aanzuren door opwekken plasmafase	--	-/0	-	--	--
3 Betere uitvoering zodenbemesten	-	0	0	0	-/0
4 Afdekken sleuf met gronddeeltjes	-/0	0	-/0	-/0	-/0
5 Mest in schuin ingesneden sleuven	-/0	0	0	-/0	-/0
6 Diepe injectie	-	-	-/0	-	-

Hieronder is kort per innovatie beschreven waarop de verwachtingen van de effecten gebaseerd zijn:

1. afdekken mestsleuven met additieven

De kostprijs zal stijgen bij deze innovatie waarbij mestsleuven met additieven worden afgedekt.

- Er is additionele techniek nodig om additieven te kunnen toedienen, waardoor de aanschafprijs zal worden verhoogd
- De additieven worden in een hulptank opgeslagen en zullen ook getankt moeten worden, dit extra tanken zal extra tijd kosten t.o.v. de referentie, hierdoor zal de capaciteit dalen.
- De additionele techniek zal zorgen voor extra onderhoud t.o.v. de referentie, al zal dit relatief beperkt zijn.
- De extra stoffen moeten aangeschaft worden en dit zorgt voor een structureel hogere kosten ten opzichte van de referentie. Hoe groot dit effect is, is sterk afhankelijk van de prijs van de toevoegmiddelen. Daarnaast zal het energieverbruik iets toenemen.

2. Aanzuren door opwekken plasmafase

- De machine kost ongeveer 200.000, dit is een forse investering in vergelijking met een bijvoorbeeld een normale mesttank plus bemester (~55.000) (KWIN 2022). Daarnaast is er na de behandeling van deze machine nog steeds een bemestingstechniek nodig. Dit zorgt ervoor dat de investeringskosten dus fors hoger zijn t.o.v. de referentie.
- Tijdens het aanwenden zorgt deze innovatie niet voor capaciteitsverlies als de mest van tevoren behandeld is. Maar als deze tijd mee wordt geteld dan zorgt deze innovatie er zeker voor dat in algemene zin het bemesten langer duurt dan de referentie.
- Er is naast een zodenbemester een additionele machine nodig die de mest behandelt, deze machine zorgt voor extra onderhoud.
- Het energieverbruik neemt toe t.o.v. de referentie en dit zorgt voor extra kosten tijdens het gebruik van deze innovatie.

3. betere uitvoering zodenbemesten

-
- De extra cameratechniek zal een extra investering met zich meebrengen. Waardoor de investeringskosten zullen stijgen.

4. afdekken sleuf met gronddeeltjes

- Er worden krabbertjes achter de zodenbemester toegevoegd die de mestsleuven afdekken met gronddeeltjes. Deze krabbertjes zullen waarschijnlijk zorgen voor een kleine stijging van de aanschafprijs.
- Het toevoegen van krabbertjes zal het aantal slijtdelen verhogen en daarmee kan het onderhoud iets hoger uitpakken.
- Het energieverbruik kan iets hoger uitpakken waardoor de kosten ook iets kunnen toenemen.

5. Schuin insnijden

- De machine zal waarschijnlijk een iets hogere aanschafwaarde hebben dan een 'normale' zodenbemester.
- Het energieverbruik kan iets hoger uitpakken waardoor de kosten iets kunnen toenemen.

6. Diepe injectie

- Door de diepere werkdiepte zal de constructie robuuster moeten zijn. Hierdoor zal de aanschafprijs waarschijnlijk hoger zijn dan een zodenbemester.
- De innovatie zal meer kuubs toedienen per keer bemesten, waardoor de rijnsnelheid lager zal zijn dan zodenbemesten. Daarnaast is de werkbreedte lager, dit zorgt ervoor dat er meer werkgangen nodig zijn. De capaciteit zal dus lager zijn dan de referentie, waardoor de kostprijs per hectare omhoog gaat.
- Deze innovatie zal een diepere werkdiepte hebben dan een zodenbemester, dit verhoogd de weerstand en ook de slijtage aan slijtonderdelen. Dit kan zorgen voor een verhoogd onderhoud.
- Het energieverbruik zal toenemen, door de verhoogde weerstand van het dieper injecteren van de mest. Daarnaast is de werkbreedte lager dan de referentie, waardoor meer werkgangen nodig zijn. Ook dit verhoogd het energieverbruik

3.2.14 Waterverbruik

Tabel 21 geeft het verwacht waterverbruik weer bij bemesting met innovatieve toedieningstechnieken en de referentietechnieken. Met n.v.t. wordt bedoeld dat bij bemesting geen water wordt toegevoegd aan mest.

Tabel 21. *Verwacht waterverbruik bij bemesting met referentietechnieken en innovatieve toedieningstechnieken.*

	Innovaties	Hoeveelheid
Ref	Zodenbemester	n.v.t.
Ref	Sleufkouter, 2:1 mest en water	2 delen mest : 1 deel water
Ref	Sleepvoet, 2:1 mest en water	2 delen mest : 1 deel water
1	Afdekken mestsleuven	
1A	<i>Krijtoplossing</i>	500 ¹
1B	<i>Polyhaliet</i>	320, 640 ¹
1C	<i>Magnesiumchloride</i>	500 ¹
1D	<i>Zwavelzuur</i>	n.v.t. ¹
2	Aanzuren door opwekken plasmafase	n.v.t. ¹
3	Betere uitvoering zodenbemesten	n.v.t. ¹
4	Afdekken sleuf met gronddeeltjes	n.v.t. ¹
5	Mest in schuin ingesneden sleuven	n.v.t. ¹
6	Diepe injectie	n.v.t. ¹

1 Bij het gebruik van een sleufkouter of sleepvoet is het wettelijk verplicht om mest toe te dienen volgens de verhouding 2 delen mest : 1 deel water. Bij een gift van 25m³ mest wordt er 12,5 m³ water toegevoegd.

Hieronder is kort per innovatie beschreven waarop de verwachtingen van de effecten gebaseerd zijn:

1. *Afdekken mestsleuven met additieven*

Voor het afdekken van mestsleuven met additieven wordt extra water toegevoegd om de verschillende afdekmiddelen toepasbaar te maken tijdens het aanwenden. De hoeveelheid water verschilt per additief. Voor de krijtoplossing wordt 500L per hectare per bemesting, voor polyhaliet is het afhankelijk van de concentratie. Bij de volle concentratie wordt er 320 L toegevoegd, en bij een halve concentratie 640 L per hectare per bemesting. Bij magnesiumchloride en calciumchloride wordt er 300 L per hectare per bemesting toegevoegd.

2. *Aanzuren door opwekken plasmafase*

Is een innovatie dat de mest aanzuurt door het opwekken van een plasmafase, hiervoor wordt energie gebruikt. Er worden geen water toegevoegd, er is dus géén nevenaspect in deze categorie.

3. *betere uitvoering zodenbemesten*

Is een innovatie dat zich richt op een betere uitvoering van zodenbemesten m.b.v. cameratechniek, er worden geen water gebruikt. Er is dus ook geen nevenaspect in deze categorie.

4. *afdekken sleuf met gronddeeltjes*

Innovatie die grond aanbrengt over de mestsleuf, de grond vormt een laag tussen het mestvolume in de sleufjes en de atmosfeer. Er worden géén water toegevoegd. En er is dus voor dit nevenaspect géén effect.

5. *Schuin insnijden*

Is een innovatie die een schuine sleuf maakt en zo de mest aanbrengt met een beperkter contactoppervlakte met de lucht. Er wordt geen water gebruikt en er is dus ook geen nevenaspect in deze categorie.

6. *Diepe injectie*

Is een innovatie die mest dieper injecteert waardoor het contactoppervlak bijna helemaal wordt gereduceerd. De machine maakt geen gebruik van water, en heeft dus geen nevenaspect in deze categorie.

3.2.15 Aanvoer van hulpstoffen

Tabel 22 geeft een overzicht van de stoffen die worden gebruikt bij het afdekken van meststoeven. Kolom 1 geeft het gewichtspercentage weer van het middel ten opzichte van de mest waarmee het vermengd is om als afdekmiddel te fungeren. Kolom 2 geeft de hiermee corresponderende totale aanvoer weer bij toepassing van 42,5 m³ mest per ha. Kolom 3 geeft weer de aanvoer die afkomstig is van de mest en kolom 4 geeft de aanvoer die afkomstig is van het toegevoegde middel. Kolom 5 geeft het bemestingsadvies voor de betreffende stof weer en kolom 6 geeft de normoverschrijding weer, dat is het verschil tussen de totale aanvoer en het advies.

Tabel 22. Verwachte aanvoer van hulpstoffen bij bemesting met innovatieve mesttoedieningstechnieken; kolommen 2 t/m 6: kg per ha per jaar.

	Afdekmiddel	% in mest	Aanvoer toevoegmiddel ¹⁾	Aanvoer uit mest	Totaal	Adviesnorm	Overschrijding
		Kolom 1	Kolom 2	Kolom 3	Kolom 4	Kolom 5	Kolom 6
1a	Krijtoplossing Ca	1.3	552,5 221	64	285	Opname gras 60-90 kg/jr	
	Krijtoplossing Ca	0.7	277,1 111	64	175	Opname gras 60-90 kg/jr	
1b	Polyhaliet	0.5	213 30 41 13 36	230 30 51 89	259 71 64 125	Ca. 150-450 ≤40 50	≤59 ≥31 14
	Polyhaliet	1	425 60 82 26 72	230 30 51 89	289 111 77 162	Ca. 150-450 ≤40 50	89 ≥71 27
1c	MgCl ₂	0.3	25	51	76	0.0 50	26
	MgO		25	43		43	
1d	H ₂ SO ₄ 0,4M	2.5	1.7			1.7	
	S		0.5	30	30	≤40	≤-10
	H ₂ SO ₄ 0,8M	2.5	3.3			1.7	
	S		1.1	30	31	≤40	≤-10

¹⁾ Bij bemesting van 42,5 m³ RDM/ha.

Hieronder is kort per innovatie beschreven waarop de verwachtingen in Tabel 22 gebaseerd zijn:

1. Afdekken meststoeven met additieven

- Krijtoplossing is in twee verschillende concentraties getest en bevat calcium. Er wordt bij het toedienen van de 1.3 concentratie in totaal 221 kg calcium extra toegediend, terwijl de behoefte van gras slechts 60-90 kilogram is. Bij een concentratie van 0,7 wordt er 111 kilogram extra toegediend. Ook dit is hoger dan de opname van gras.
- Polyhaliet wordt ook in twee verschillende concentraties getest en bevat kali, zwavel, magnesiumoxide en calciumoxide. Waarbij met name zwavel, magnesiumoxide en calciumoxide fors toenemen en in sommige gevallen ook forse overschrijdingen met zich meebrengen.
- Magnesiumchloride wordt er gewerkt met één concentratie, deze leidt tot een overschrijding van magnesiumoxide van 26 kg per hectare.
- Zwavelzuur wordt ook in twee concentraties getest, echter wordt er zeer weinig extra zwavel gebruikt, waardoor er geen risico's ontstaan op overschrijdingen bij de hoeveelheid zwavel.

2. Aanzuren door opwekken plasmafase

Is een innovatie dat de mest aanzuurt door het opwekken van een plasmafase, hiervoor wordt energie gebruikt. Er wordt stikstof uit de buitenlucht toegevoegd, dit wordt niet gezien als hulpstof en is daarom niet opgenomen in de tabel.

3. betere uitvoering zodenbemesten

Is een innovatie dat zich richt op een betere uitvoering van zodenbemesten m.b.v. cameratechniek, er worden geen extra stoffen gebruikt. Er is dus ook geen nevenaspect in deze categorie.

4. Afdekken sleuf met gronddeeltjes

Innovatie die grond aanbrengt over de mestsleuf, de grond vormt een laag tussen het mestvolume in de sleufjes en de atmosfeer. Er worden géén extra stoffen toegevoegd. En er is dus voor dit nevenaspect géén effect.

5. Schuin insnijden

Is een innovatie die een schuine sleuf maakt en zo de mest aanbrengt met een beperkter contactoppervlakte met de lucht. Er worden géén extra stoffen gebruikt en er is dus ook geen nevenaspect in deze categorie.

6. Diepe injectie

Is een innovatie die mest dieper injecteert waardoor het contactoppervlak bijna helemaal wordt gereduceerd. De machine maakt geen gebruik van extra stoffen, en heeft dus geen nevenaspect in deze categorie.

3.3 Synthese; potentiële nevenaspecten per innovatie

Deze paragraaf vat de analyse uit dit hoofdstuk samen (Tabel 23). Vervolgens lichten we in het bijzonder de meest in het oog lopende resultaten van de analyse per innovatieve mesttoedieningstechniek.

Tabel 23. Eindscores op de nevenaspecten van innovaties die opgenomen zijn in het onderzoek van Bemest op z'n Best, gericht op reductie van de ammoniakemissie bij mesttoediening.

	Stikstofwerking	Organische stof	Bodemverdichting	Schade aan graszone	Bodemleven	Weidevogels	N en P afspoeling	P uitspoeling	NO ₃ uitspoeling	Stank en geur	Afwentelingen op luchtweg	Energieverbruik	Kostprijs
Afdekken meststoeven													
Krijtoplossing	0 tot +	0	0	-/0 ⁴⁾	- tot 0	- tot 0	0	0	0	0/+	0	- tot 0	-
Magnesiumchloride	0 tot +	0	0	-/0 ⁴⁾	- tot 0	- tot 0	0	0	0	0/+	0	- tot 0	-
Zwavelzuur	0 tot +	0	0	-/0 ⁴⁾	- tot 0	- tot 0	0	0	0	0/+	0	- tot 0	-
Polyhaliet	0 tot +	0	0	-/0 ⁴⁾	- tot 0	- tot 0	0	0	0	0/+	0	- tot 0	-
Plasmabehandeling	++/+ tot ++ ¹⁾	- tot 0 ²⁾	0	-/0 ⁴⁾	- tot 0 ⁵⁾	- tot 0 ⁷⁾	0	- tot 0	-/0	+/++	--	--	--
Betere uitvoering zodenbemesten	0	0	0	0	0 ⁶⁾	0	0	0	0	0	0	0	-/0
Afdekken met gronddeeltjes	+ tot ++	- tot 0	- tot 0 ³⁾	nvt	-- tot 0	-- tot 0	- tot +	0	0	0/+	0	- tot 0	-/0
Schuin insnijden	0 tot +	-/0	-- tot 0 ³⁾	-- tot 0	-- tot 0	-- tot 0	-- tot +	0	0	0/+	-/0	-- tot 0	-/0
Diep injectie	++	- tot 0	-- tot ++ ³⁾	-- tot 0	-- tot 0	-- tot 0	-- tot +	0	-- tot 0	++	-	-- tot 0	-

1) inclusief/exclusief nitraat; 2) voor veengronden een score van 0; 3) risico op bodemverdichting 1 niveau minder wanneer uitgevoerd met sleepslangbemester i.p.v. mesttank; 4) mits netjes uitgevoerd, zonder besmeuring van gras; 5) bij een sleepvoet of sleufkouter een score van -/0; 6) Voor kleigrond een score van -/0; 7) bij een sleepvoet of sleufkouter een score van -/0

1. Afdekken meststreuven met Krijt, Magnesiumchloride, Zwavelzuur en Polyhaliet

Gunstige nevenaspecten:

Het gebruik van afdekmiddelen kent geen zwaarwegende gunstige nevenaspecten, dat wil zeggen dat er geen scores zijn vergelijkbaar met + of ++. Echter is het goed om op te merken dat afhankelijk van de gewasbehoefte het soms gunstig kan zijn om afdekmiddelen te gebruiken. Omdat het toevoegen van Ca, Mg, K₂O of zwavel door afdekmiddelen soms gunstige effecten hebben op de gewasgroei.

Ongunstige nevenaspecten:

De nadelen van deze afdektechnieken liggen voornamelijk bij de kostprijs en het verhoogde energieverbruik. Het toepassen van deze producten en technieken kan extra kosten met zich meebrengen, zowel qua materiaal, opslag als arbeidsintensiteit. Daarnaast kan het gebruik van deze middelen de energiebehoefte vergroten omdat er meer product verwerkt moet worden t.o.v. de bestaande technieken.

Daarnaast zijn licht ongunstige nevenaspecten mogelijk: schade aan zode indien gras wordt besmeurd met toevoegmiddel, mogelijk een negatief effect op bodemleven en weidevogels indien lange termijn aanvoer van hulpstoffen in bodem ophopen en/of bij besmeuring van gras met toevoegmiddel.

2. Plasmabehandeling

Gunstige nevenaspecten:

Deze innovatie behandelt mest m.b.v. plasmatechniek, hierdoor wordt er extra stikstof uit de buitenlucht aan de mest toegevoegd. Dit zorgt voor een pH daling in de mest waardoor er minder ammoniakemissie optreedt. Door de toevoeging van extra stikstof aan de te behandelen mest is de N-werking van het eindproduct een stuk hoger dan normale meststoffen. Daarnaast zal de emissie van stank en geur ook afnemen, als gevolg van de afname van de ammoniakemissie.

Ongunstige nevenaspecten:

Echter zijn er ook nadelige effecten bij het gebruik van de plasmabehandeling. Allereerst kost het veel energie om stikstof uit de buitenlucht te vangen en toe te voegen aan de mest; Bij de technieken die nu worden ingezet is het energiegebruik zo'n 100 kWh per kuub mest (Puente-Rodríguez et al., 2025). Om dit goed op waarde te kunnen schatten zou het energieverbruik ook uitgedrukt kunnen worden per kg stikstof die door de techniek wordt toegevoegd aan de mest en dit zou vervolgens vergeleken kunnen worden met het energieverbruik met de productie van kunstmest stikstof. Dit zou een nuttige aanvulling kunnen zijn op onze analyse. Deze hoge energievraag brengt ook een hoge kostprijs met zich mee. Ook zorgt de plasmabehandeling op dit moment voor een verhoogde lachgasemissie, eerste onderzoeken wijzen uit dat dit kan oplopen tot een factor 4 hoger dan bij gebruik van reguliere varkensmest (Lloyd et al., 2024). Daarnaast zijn mogelijk licht ongunstig nevenaspecten: organische stof (m.u.v. veengronden), bodemleven, weidevogels vanwege de lagere organische stofaanvoer via bemesting bij deze techniek.

Plasmabehandeling vindt plaats nadat drijfmest gescheiden is in een dunne en dikke fractie. De dikke mestfractie kan op diverse manieren en in verschillende teelten toegediend worden. Als de dikke mestfractie op gras wordt toegediend, zal dit gepaard gaan met hoge emissie van ammoniak.

3. Beter uitvoering zodenbemesten

Deze innovatie borgt de huidige conventionele manier van bemesten en waarborgt daarmee dat het zodenbemesten altijd presteert zoals het bedoeld is. Echter daarmee scoort het niet beter of slechter dan een zodenbemester. Dit komt doordat er in dit onderzoek een vergelijking wordt gemaakt tussen een goed functionerende zodenbemester en innovaties. Voor de innovatie 'beter uitvoering zodenbemesten' geldt dat deze innovatie voordelen oplevert in vergelijking met suboptimale bemesting die men vaak in de praktijk ziet.

4. Afdekken met Gronddeeltjes

Gunstige nevenaspecten:

Het afdekken van mest met gronddeeltjes kan de afspoeling van stikstof en fosfor (N&P) verminderen. Dit komt doordat de mest niet meer 'bovenop' de grond ligt waardoor het minder snel kan afspoeling richting de sloot. Tevens is de N-werking bij het gebruik van deze innovatie gunstig gescoord door de relatief grote ammoniakemissiereductie die deze innovatie behaalt.

Ongunstige nevenaspecten:

Er zijn geen nevenaspecten gevonden die een score van – of - - hebben voor deze innovatie. Mogelijke licht ongunstige nevenaspect zijn er wel, namelijk bodemverdichting, bodemleven en weidevogels door de lichte extra bewerking/beroering van de bodem die deze techniek veroorzaakt ten opzichte van de huidige technieken.

Naast de nevenaspecten is het ook van belang om te benoemen dat het afdekken met gronddeeltjes enkel mogelijk is op bouwland, deze machine is dus niet toepasbaar op grasland.

5. Schuin Insnijden

Gunstige nevenaspecten:

Het schuin insnijden van de zode tijdens het bemesten kan zorgen voor het partieel of volledig afdekken van de sleuf, doordat deze 'dichtvalt'. Dit zorgt voor een vermindering in de ammoniakemissie, en een vermindering van de contactoppervlakte met de buitenlucht. Beide factoren dragen ook bij aan het verminderen van de stank en geuremissie.

Ongunstige nevenaspecten:

Een potentieel nadelig effect van het schuin insnijden van de bodem is de(extra) schade aan de graszode ten opzichte van een normale zodenbemester. Het afstellen van een de machine die onder een hoek werkt, vereist constante aandacht en de optimale afstelling kan verschillen per grondsoort of omstandigheid. Bij onjuiste afstelling van de machine is er een risico van extra schade aan de zoden, door bijvoorbeeld beschadiging van wortels, uitdrogen van de zoden, of zelfs vervorming van de bodem door bijvoorbeeld geultjes te trekken. Mogelijk ook licht ongunstig zijn de nevenaspecten bodemverdichting, bodemleven, weidevogels.

6. Diep Injectie

Gunstige nevenaspecten:

Het diep injecteren van mest kent enkele gunstige nevenaspecten. Allereerst neemt de bemestende waarde van N in de toegediende mest toe doordat het verlies van ammoniakemissie fors afneemt door deze innovatie. Dit komt ten goede aan de gewassen voor opname, oftewel de N-werking is verhoogd t.o.v. een zodenbemester. Daarnaast zorgt deze vermindering in ammoniakemissie en contactoppervlak met de buitenlucht ook voor een verlaging van de stank en geur emissie. Een ander bijkomend voordeel van het dieper wegstoppen van mest is dat oppervlakkige afspoeling van stikstof en fosfor verminderd wordt, immers ligt de mest onder een laag grond waardoor oppervlakkige afspoeling vermeden kan worden. Als laatste kent de toepassing van de techniek een voordeel voor broedende vogels. Als diepinjectie zo wordt uitgevoerd dat de in totaal op jaarbasis benodigde mestgift uitgevoerd kan worden in één gift in het voorjaar van bijvoorbeeld 40 kuub, zijn latere bemestingen niet meer noodzakelijk. Hierdoor kan verstoring van broedende vogels door bemesten (in de periode rond mei) vermeden worden.

Ongunstige nevenaspecten:

Nadelige effecten bij het diep injecteren van mest zijn o.a. een grotere schade aan de zode dan bij zodenbemesten. Een diepinjectie machine heeft minder elementen dan een zodenbemester, die verder uit elkaar staan. Echter wordt de grond los gescheurd en weer aangedrukt om de scheur te dichten. Dit is – afhankelijk van de technische vormgeving van de machine – een ingrijpende actie die meer schade veroorzaakt dan de snedes van een zodenbemester. Een tweede nadelig effect is een grotere lachgasemissie dan bij zodenbemesten. Dit komt doordat de mest dieper en geconcentreerd wordt aangewend, hierdoor is de stikstof langer in een vochtige en zuurstofarme zone dan bij zodenbemesten. Ook vergt een diepinjectie machine meer trekkracht dan een zodenbemester omdat er dieper gewerkt wordt, dit vergroot de energiebehoefte. Daarnaast is de werkbreedte vaak beperkt, waardoor er meer werkgangen nodig zijn, ook dit zorgt voor een hogere energiebehoefte. Tenslotte heeft diepinjectie mogelijk een negatief effect op bodemverdichting, bodemleven, weidevogels.

Naast nevenaspecten is het van belang om te benoemen dat diep injectie enkel mogelijk is op zandgrond, op veen- en kleigronden werkt de machine niet naar behoren, omdat de machine teveel schade veroorzaakt of, omdat de sleuven niet goed afgesloten worden.

4 Discussie

In deze discussie geven we een aantal kanttekeningen aan die gelden voor de analyse van nevenaspecten en voor interpretatie van resultaten (Paragraaf 4.1). Vervolgens wordt er ingegaan op de mogelijkheid om aspecten door doorontwikkeling te verbeteren (paragraaf 4.2) en op het belang van zorgvuldige praktische implementatie voor de gewenste impact (paragraaf 4.3).

Deze analyse

- Veel van de emissiecijfers die gebruikt zijn voor het scoren op nevenaspecten, zoals stikstofwerking en lachgasemissie, zijn gebaseerd op schattingen of op de eerste verkennende onderzoeken van innovatieve technieken die nog op beperkte schaal bemeten zijn. Dit betekent dat er onzekerheid zit in de onderliggende data waarop de scores gebaseerd zijn. Ook zijn de scores van effecten gebaseerd op prototypes die nog aangepast kunnen worden. De uiteindelijke impact in de praktijk kan daardoor afwijken van de schattingen die voortkomen uit deze verkenning. Verdere monitoring, metingen in de praktijk en validatie van aannames zijn nodig om de daadwerkelijke prestaties van deze innovaties op het gebied van emissies en andere nevenaspecten nauwkeuriger te kunnen aangeven.
- In deze rapportage is voor de beoordeling van de verschillende nevenaspecten van innovatieve mesttoedieningsmachines gebruikgemaakt van een eenvoudig scoresysteem met negatieve en positieve waarden ($-$ / $+$). Hoewel dit systeem een snelle en overzichtelijke indruk geeft van de verwachte effecten, kleeft er een beperking aan deze aanpak. Het toepassen van een uniforme score kan onbedoeld de indruk wekken dat de nevenaspecten direct met elkaar te vergelijken zijn in zwaarte of belang. In werkelijkheid zijn de nevenaspecten zoals stikstofwerking, energiegebruik, bodemverdichting en schade aan zode ongelijksoortig. Ze raken verschillende milieu- en praktijkdoelstellingen en hebben ieder hun eigen schaal, impact en contextuele afhankelijkheid. Het is daarom belangrijk om te benadrukken dat het score-systeem slechts een indicatief hulpmiddel is en niet bedoeld is om een rangorde van belang, een absoluut effect, of ernst aan te brengen tussen de afzonderlijke aspecten.
- Hoewel de interacties tussen verschillende nevenaspecten zijn meegenomen in de analyse, komt deze samenhang in de uiteindelijke scoreweergave, met symbolen zoals '+' of '-', niet goed tot uiting. Hierdoor kan de indruk ontstaan dat de nevenaspecten volledig los van elkaar staan, terwijl ze in werkelijkheid juist sterk met elkaar samenhangen. Een reductie in ammoniakemissie kan bijvoorbeeld leiden tot een hogere stikstofwerking, wat weer effect heeft op gewasopbrengst én op risico's voor nitraatuitspoeling. Deze systeemeffecten zijn, voor zover mogelijk, verwerkt in de analyse, maar worden niet automatisch herkend bij het bekijken van de individuele scores.

Verbetering door doorontwikkeling

- De onderzochte innovaties zijn primair ontwikkeld met het doel om ammoniakemissies (NH_3) tijdens de mesttoediening te reduceren. De focus ligt dus op het behalen van milieudoelstellingen ten aanzien van ammoniak. Nevenaspecten zoals energiegebruik, schade aan zode, lachgas en nitraatuitspoeling zijn in dit ontwikkelproces vaak van secundair belang geweest. Dit betekent echter niet dat hierop geen verbetering mogelijk is, dan wel dat sommige innovaties mogelijk beter scoren op bepaalde nevenaspecten dan de huidige gebruikte technieken. In tegendeel, naarmate de technologieën verder doorontwikkeld worden en meer praktijkervaring wordt opgedaan, is het goed voorstelbaar dat ontwerp-aanpassingen of verbeterde instellingen leiden ook tot betere scores op deze aspecten. Het monitoren en actief meenemen van deze nevenaspecten in de evaluatie en doorontwikkeling van mesttoedieningstechnieken blijft daarom belangrijk om tot een brede optimalisatie te komen.
- Een belangrijk gevolg van innovatieve mesttoedieningstechnieken is de vermindering van ammoniakemissie (NH_3) bij het aanwenden van dierlijke mest. Deze emissiereductie betekent dat er meer stikstof (N) in de bodem beschikbaar blijft voor het gewas, wat leidt tot een verhoging van de werkingscoëfficiënt van dierlijke mest. Bij sommige technieken, zoals aanzuren door het opwekken van een plasmafase, wordt bovendien extra nitraat toegevoegd aan de mest, wat het stikstofaanbod verder verhoogt. In een enkel geval behelst de innovatie ook het vrijkomen van een dikke

mestfractie. Dit mestproduct zal in het algemeen ook op het land gebracht worden, naast de dunne fractie die in het innovatieve systeem verder verwerkt wordt. Voor deze technieken is het noodzakelijk om kritisch te kijken naar het totaalplaatje van stikstofbemesting.

Praktische toepassing

- De nevenaspecten die in deze analyse in beschouwing zijn genomen, hebben betrekking op ecologische, milieukundige aspecten, grondstoffengebruik en kosten. In de praktijk zijn ook aspecten van belang die nog nauwelijks meegewogen zijn, zoals storingsgevoeligheid, complexiteit van de techniek en beschikbaarheid van machines (duurdere complexere machines zijn vaker 'loonwerkmachines', waardoor de planning van de loonwerker een grotere invloed krijgt op het moment van bemesten dan bij eenvoudiger, goedkopere machines). Het is nuttig om deze zaken ook in beschouwing te nemen. Dit zal dan moeten gebeuren in een vervolgactie. Het lijkt het meest efficiënt om dit initiatief te nemen voor technieken die uiteindelijk het meest kansrijk blijken te zijn.
- Hoewel innovatieve mesttoedieningsmethoden veelbelovend zijn in het verminderen van ammoniakemissies, is het cruciaal dat de behaalde reducties ook formeel worden erkend via aangepaste emissiefactoren. Daardoor kunnen deze technieken worden meegenomen in rekentools zoals de KringloopWijzer (KLW) en kunnen de effecten van het toepassen van betere technieken gewaardeerd worden, wat van belang is voor agrarisch ondernemers.
- Tegelijkertijd is de effectiviteit van deze innovatieve technieken sterk afhankelijk van de toepassing in de praktijk. Factoren zoals weersomstandigheden, bodemgesteldheid, afstelling en onderhoud van de machines spelen een grote rol in de uiteindelijke emissiereductie. Onjuiste afstelling kan niet alleen de verwachte milieuwinst verminderen, maar ook neveneffecten veroorzaken zoals graszodebeschadiging of zelfs extra emissies. Daarom is bijvoorbeeld goede scholing, begeleiding en ervaring essentieel bij de inzet van deze technieken, en eventueel ook borging. Ook binnen het programma Bemest op z'n Best is hier aandacht voor, omdat nauwkeurig werken van groot belang is, niet alleen bij nieuwe innovaties, maar ook bij bestaande technieken zoals zodenbemesters.

5 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de meest relevante inzichten samengevat gevolgd door enkele aanbevelingen. De doelstelling van de innovatieve technieken is om ammoniakemissie significant te verminderen tijdens het aanwenden van dierlijke mest. Het doel van deze studie is om potentiële nevenaspecten te identificeren voor de innovaties. De verkenning levert het volgende beeld op:

In totaal zijn er 90 scores gegeven (15 nevenaspecten x 6 innovaties), hiervan zijn er 5 gunstig (+/++ of ++) en 3 ongunstig (-/-- of - -). De volgende scores zijn toegekend aan de verschillende innovaties, waarbij enkel licht gunstig (+), gunstig(++), licht ongunstig(-) en ongunstig(- -) zijn meegenomen:

1. Afdekken meststoeven met Krijt, Magnesiumchloride, Zwavelzuur en Polyhaliet

Gunstige nevenaspecten: het gebruik van afdekmiddelen kent geen zwaarwegende (licht) gunstige nevenaspecten, dat wil zeggen dat er geen scores zijn vergelijkbaar met + of ++.

Licht ongunstige nevenaspecten: kostprijs en energieverbruik, mogelijk schade aan zode indien gras wordt besmeurd met toevoegmiddel, mogelijk negatief effect op bodemleven en weidevogels indien lange termijn aanvoer van hulpstoffen in bodem ophopen en/of bij besmeuring van gras met toevoegmiddel

2. Plasmabehandeling

Gunstige nevenaspecten: stikstofwerking en stank en geur.

Licht ongunstig nevenaspect: organische stof (m.u.v. veengronden), bodemleven, weidevogels

Ongunstige nevenaspecten: energie, kostprijs en lachgas

3. Betere uitvoering zodenbemesten

Deze innovatie borgt de huidige conventionele manier van bemesten en waarborgt daarmee dat het zodenbemesten altijd presteert zoals het bedoeld is. Echter daarmee scoort het niet beter of slechter dan een zodenbemester. Dit komt doordat er in dit onderzoek een vergelijking wordt gemaakt tussen een goed functionerende zodenbemester en innovaties. Voor de innovatie 'betere uitvoering zodenbemesten' geldt dat deze innovatie voordelen oplevert in vergelijking met suboptimale bemesting die men vaak in de praktijk ziet.

4. Afdekken met Gronddeeltjes

Gunstige nevenaspecten: stikstofwerking

Licht gunstige nevenaspecten: afspoeling van stikstof en fosfor

Licht ongunstig nevenaspect: mogelijk bodemverdichting, bodemleven, weidevogels

5. Schuin insnijden

Licht gunstige nevenaspecten: stank & geur

Licht ongunstige nevenaspecten: schade aan zode, mogelijk bodemverdichting, bodemleven, weidevogels

6. Diepinjectie

Gunstige nevenaspecten: stikstofwerking en stank & geur

Licht gunstige nevenaspecten: weidevogels en afspoeling van stikstof en fosfor

Licht ongunstige nevenaspecten: lachgas, energie en kostprijs, mogelijk bodemverdichting, bodemleven, weidevogels

Ongunstige nevenaspecten: schade aan zode en bodemleven.

Naast de algehele conclusies over de scores van individuele nevenaspecten en innovaties zijn er nog enkele andere conclusies naar voren gekomen uit dit onderzoek:

- Voor alle in deze verkenning beschouwde innovaties geldt dat ze zich in een prototype fase bevinden. Daardoor zijn resultaten nog onderhevig aan veranderingen.
- Voor alle innovaties in deze verkenning is een kostprijs verhoging t.o.v. een zodenbemester te verwachten, al verschilt dit per innovatie.
- De nevenaspecten methaanemissie en P uitspoeling kennen voor alle innovaties een score '0'. Er worden dus geen significante verschillen verwacht voor deze aspecten t.o.v. een zodenbemester, of sleepvoet/sleufkouter.
- De innovatie 'Betere uitvoering zodenbemesten' die in deze rapportage ongeveer op alle aspecten gelijk scoort als een zodenbemester, behelst het technisch ondersteunen van het realiseren van een goed werkresultaat van bemesting. Op papier lijkt de innovatie weinig te verbeteren aan de huidige praktijk. Echter, deze techniek zal naar verwachting in het veld juist wel een grote verbetering gaan opleveren, met name met betrekking tot het verlagen van de ammoniakemissie.

Aanbevelingen:

- Op basis van dit rapport lijkt het voor de aspecten organische stof, bodemverdichting, schade aan zode, bodemleven en weidevogels van belang om nieuwe of doorontwikkelde bemestingstechnieken zo te ontwerpen dat de impact op bodem, de bodemchemie (pH, mineralen, organische stof) en de zode zo beperkt mogelijk is.
- Voor sommige innovaties is het nuttig om werkingsmechanismen beter te doorgronden omdat dit richting geeft aan de analyse van potentiële nevenaspecten en doorontwikkeling van technieken.
- Om een beter beeld te krijgen van kwantitatieve scores van de nevenaspecten is vervolgonderzoek noodzakelijk. In dit vervolgonderzoek wordt aanbevolen om aanvullende metingen uit te voeren voor nevenaspecten zoals lachgas, stank & geur, stikstofwerking, afspoeling en uitspoeling, alsook naar aspecten van de bodem en grasland (organische stof, verdichting, schade aan zode, bodemleven en weidevogels). Daarnaast is het goed om te monitoren wat de effecten van innovaties zijn in praktijkomstandigheden op weidevogels, bodemleven, organische stof, schade aan zode en energieverbruik. Daarbij is het evident dat innovaties nog volop in ontwikkeling zijn en dat deze doorontwikkelingen mee moeten worden genomen in het vervolgonderzoek. Daarnaast komen er geleidelijk extra innovaties op de markt die soortgelijke oplossingen bieden als de innovaties in dit onderzoek, het meenemen van deze nieuwe innovaties in het vervolg onderzoek is ook sterk aan te bevelen.
- Eerder in deze rapportage is al opgemerkt dat de focus op het de uitvoering van het werk niet alleen belangrijk is voor de referentiemachines en de huidige situatie maar ook voor innovaties. Factoren als weersomstandigheden, bodemgesteldheid, afstelling en onderhoud spelen hierbij een rol. Binnen het programma Bemest op z'n Best is hier aandacht voor, omdat nauwkeuriger werken van groot belang is. Het is aan te bevelen om hier structureel aandacht aan te besteden, aansluitend op de aandacht die hieraan besteed wordt binnen het programma Bemest op z'n Best.
- In dit rapport zijn een 15 tal nevenaspecten opgenomen, echter missen hier nog een aantal aspecten die betrekking hebben op de praktische toepassing in de praktijk. Voorbeelden hiervan zijn de storingsgevoeligheid, onderhoudsgevoeligheid, bedieningsgemak etc. om de innovaties tot een uiteindelijk succes te maken dienen deze aspecten ook te kloppen. Het is daarom zaak om een beeld te hebben van deze praktische aspecten, en waar nodig ze aan te passen zodat ze voldoen aan de eisen van de praktijk.

Literatuurlijst

- Agnew, C., Lague, J., Schoenau, J., Feddes, H., & Guo, C. (2010). Effect of manure type, application rate, and application method on odours from manure spreading. *Canadian Biosystems Engineering*, 52(6.19-6.29).
- Akker, J.J.H. van den, G.D. Vermeulen, P.H.M. Dekker en A.P. Phillipsen, 2006. Bodemverdichting. Leidraad Bodembescherming, onderdeel 5720. Sdu, Den Haag, 51 p
- Akker, J.J.H. van den, F. de Vries, G.D. Vermeulen, M.J.D. Hack-ten Broeke en T. Schouten, 2013a. Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied in kaart. Wageningen, Alterra, Alterra-Rapport 2409, 81 blz.
- Akker, J.J.H. van den; Vries, F. de; Hack-ten Broeke, M.J.D., 2013b. Risico op ondergrondverdichting in kaart : resultaten PRISMA-project 'gevoeligheid voor verdichting'. *Bodem* 23/1, p. 14 – 15.
- Akker, J.J.H. van den, R.F.A. Hendriks, 2015. Hoe erg is ondergrondverdichting in de landbouw? Een samenvatting en conclusies uit onderzoek naar ondergrondverdichting. *Bodem* 3-2015, blz 42- 44.
- Akker, J.J.H. van den , 2023. Bodemverdichting: ondergrond en bovengrond. Fact finding paper voor de Raad voor Leefomgeving en Infrastructuur (RLI) voor het advies Vitale Bodem
<https://edepot.wur.nl/637673>
- Anoniem. (1991). Wet van 27 maart 1991, houdende regels terzake van het op of in de bodem brengen van meststoffen (Meststoffenwet); Staatsblad 1991, nr. 132.
- Arts, W.B.M., B.R. Verwijs en J. van Maanen, 1994. De invloed van berijding op de fysische bodemconditie van zandgrond en de gevolgen daarvan voor de grasproductie. IMAG-DLO, rapport 94-5
- Atlas Natuurlijk Kapitaal. (2018). Regenwormen van Nederland in kaart gebracht. Atlas Natuurlijk Kapitaal.
<https://www.atlasnatuurlijkkapitaal.nl/>
- Bemestingsadvies. (z.d.). www.bemestingsadvies.nl. Commissie Bemesting en Voedergewassen.
- Bezooijen, J. van. (2006). Methods and techniques for Nematology. Revised version 2006. Landbouwuniversiteit Wageningen.
- Blokhuis, C., Schepens, J. A. B., & van der Wal, A. (2020). Een eerste verkennende literatuurstudie over het effect van bodembeheer op het behalen van bodem-, water- en luchtdoelstellingen.
- Bongers, T. (1990). The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition. *Oecologia*.
- Bongers, T., Ferris, H., & de Goede, R. G. M. (1995). Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. *Trends in Ecology & Evolution*, 10(4), 129-134.
- Boxmeer, E. v., Middelkoop, J. v., & Dooren, H. J. v. (2023). Toevoegen van magnesiumchloride (MgCl₂) aan runderdrijfmest : huidige stand van zaken van onderzoek naar het effect van MgCl₂ in mest op emissies, bodem en gewas. (Rapport / Wageningen Livestock Research; No. 1428). Wageningen Livestock Research. <https://doi.org/10.18174/631674>
- CBGV. (2023). Bemestingsadvies. <https://www.verantwoordeveehouderij.nl/nl/bemestingsadvies.htm>
- CDM. (2020). Effect van mesttoediening op regenwormen als voedsel voor weidevogels.
- Coleman, D. C., Callaham, M. A., & Crossley, D. A. (2018). *Fundamentals of Soil Ecology*. (Third Edition). Academic Press, London.
- Coosemans, J. (2002). Nematoden als indicators voor bodemclassificatie. *Bulletin Van Het Koninklijk Belgisch Instituut Voor Natuurwetenschappen Biologie*, 72-Suppl., 51-62.
- De Boer, H. (2020). Afbreeksnelheid van organische stof uit runderdrijfmest: Effecten van dosering, zoutgehalte en herkomst mest en grond. Wageningen Livestock Research, rapport 1346.
- De Boer, H., Deru, J., & van Eekeren, N. (2016). Woelen van blijvend grasland op een zandgrond: Effecten op bodemstructuur, beworteling en grasopbrengst (1570-8616). Wageningen UR Livestock Research.
- De Boer, H., Deru, J., & van Eekeren, N. (2018). Woelen van verdicht grasland op een zavelgrond en een zware kleigrond: Effecten op bodemstructuur, beworteling en productiviteit. Wageningen Livestock Research.
- De Boer, H., & van Eekeren, N. (2007). Bodemverdichting door berijden bij zodebemesten: Effecten op opbrengst en voederwaarde van gras-klaver, bodemstructuur en biologische bodemkwaliteit= Soil

- compaction due to trafficking during slurry injection: Effects on yield and nutritional value of grass-clover, soil structure and biological soil quality. Animal Sciences Group.
- De Goede, R. G. M., Brussaard, L., & Akkermans, A. D. L. (2003). On-farm impact of cattle slurry manure management on biological soil quality. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 51, 103-133.
- De Wit, J., van der Goor, S., Pijlman, J., & van Eekeren, N. (2018). Opbouw organische stof met blijvend grasland. *V-focus* september 2018.
- Deru, J., van Eekeren, N., & de Boer, H. (2010). Beworteling van grasland - een literatuurstudie. Nutriëntenopname in relatie tot bewortelingsdiepte en - intensiteit. Factoren en potentiële maatregelen die de beworteling beïnvloeden. LBI 2010-018 LbV.
- Deru, J., van Eekeren, N., Bloem, J., de Goede, R., Brussaard, L., & Eekeren van, N. (2023). Effects of organic and inorganic fertilizers on soil properties related to the regeneration of ecosystem services in peat grassland. *Applied Soil Ecology*, 187, 104838.
- Edesi, L., Talve, T., Akk, E., Vösa, T., Saue, T., Loide, V., Vettik, R., Plakk, T., & Tamm, K. (2020). Effects of acidified pig slurry application on soil chemical and microbiological properties under field trial conditions. *Soil and Tillage Research*, 202, 104650.
- Ehlert, P. A. I., van Middelkoop, J. C., van der Salm, C., & Dekker, P. H. M. (2008). Effecten van fosfaatoverschotten op gras- en bouwland op lange termijn; Stand van zaken 2007. Alterra-rapport 1665, Wageningen.
- Eijkelkamp, R. (z.d.). Penetrologger met GPS-standaard set. Geraadpleegd 21 juni 2024, van <https://www.royaleijkelkamp.com/nl/producten/veldmeetapparatuur/indringingsweerstand/elektronisch-met-datalogger/penetrologger-met-gps-standaard-set/>
- EPPO. (2013). PM 7/119 (1) Nematode extraction. *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin*, 43(3), 471-495.
- Goed Bodembeheer. (2024b). Bodemleven. Geraadpleegd op 12 augustus 2024, van <https://www.goedbodembeheer.nl/bodemleven>
- Herbert, Z., van der Kolk, J.-P., & Koopmans, C. (2023). Incentives voor het voorkomen van bodemverdichting.
- Hobbs, P. J., Misselbrooks, T. H., & Pain, B. F. (1995). Assessment of odours from livestock wastes by a photoionization detector, an electronic nose, olfactometry and gas chromatography-mass spectrometry. *J. agric. Engng Res.*, 60, 137-144.
- Hoeks, P., van Middelkoop, J. C., Philipsen, A. P., Talens, B., Bussink, D. W., Bos, A. J., . . . van Dijk, W. (2012). Bemestingsadvies Commissie Bemesting Grasland en Voedergewassen. Retrieved from <https://edepot.wur.nl/202929>
- Hoekstra, A., & Jansma, A. (2021). Beweiding en weidevogelbeheer Bevindingen en aanbevelingen vanuit project Vogels en Voerspoed Fryslân. Louis Bolk Instituut. 2021-032 LbD.
- Hoekstra, N., de Stigter, J., Bruinenberg, M., & van Eekeren, N. (2023b). Het effect van zodenbemesting en bovengrondse drijfmesttoediening op scheurvorming en uitdroging van de bodem op klei, veen en zand. Louis Bolk Instituut, 2023 - 011 LbP.
- Hoekstra, N., de Stigter, J., & van Eekeren, N. (2023a). Het effect van drijfmesttoediening met zodenbemester en sleepvoet op bodem-vocht, scheurvorming, regenwormen en grasopbrengst op klei-op-veen. Louis Bolk Instituut, 2023-005 LbP.
- Hooijboer, A., Oenema, J., & Doornewaard, G. (2015). Relatie tussen stikstofbodemoverschot en waterkwaliteit. *Nieuwsbrief Koeien & Kansen*, (43), 2-2.
- Huijsmans, J. F. M. (2008). Emissiearme mesttoediening : ammoniakemissie, mestbenutting en nevenaspecten. Wageningen: Plant Research International.
- Huijsmans, J. F. M., Hol, J. M. G., & van Schooten, H. A. (2015). Toediening van aangezuurde mest met een sleepvoetenmachine op grasland. Wageningen UR Plant Research International. Rapport 629.
- Huijsmans, J., Schröder, J., Vermeulen, G., De Goede, R., Kleijn, D., & Teunissen, W. (2008). Emissiearme mesttoediening: Ammoniakemissie, mestbenutting en nevenaspecten (1566-7790). Plant Research International.
- Ittersum, M. K. v., Dijkstra, J., Oude Lansink, A. G. J. M., Wiering, M. A., Meers, E., Kocks, C. G., . . . Schulte-Uebbing, L. (2025). Advies 'Vervroegen uitrijddatum drijfmest op bouwland 2025'. Retrieved from <https://edepot.wur.nl/687950>
- Janssen, P. W. L., Hoekstra, N. J., & van Eekeren, N. J. M. (2023). Higher density swards have a higher load bearing capacity. *Grass and Forage Science*. 1-10.
- Kentie, R., Hooijmeijer, J. C. E. W., Both, C., & Piersma, T. (2011). Grutto's in ruimte en tijd 2007-2010. Rijks Universiteit Groningen.

-
- Keuning en Keuning. (2019). Drijfmest of verdrijfmest? Effecten van drijfmestinjectie op de bodembioologie. *Bodem*, (6), december 2019.
- Kleijn, D., Berendse, F., Verhulst, J., Roodbergen, M., Klok, T. C., & van 't Veer, R. (2008). Ruimtelijke dynamiek van weidevogelpopulaties in relatie tot de kwaliteit van de broedhabitat. Welke factoren beïnvloeden de vestiging van weidevogels? (No. 1579). Directie Kennis, Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Den Haag.
- Kleijn, D., Lamers, L., van Kats, R., Roelofs, J., & van 't Veer, R. (2009). Ecologische randvoorwaarden voor weidevogelsoorten in het broedseizoen. Resultaten van een pilotstudie in het Wormer- en Jisperveld. Alterra-rapport 1613.
- Kleyheeg, E., Loonstra, J., Roodbergen, M., & Visser, T. (2023). Habitatselectie en overleving van kievitskuikens in Nederlandse graslanden (Rapport nummer OBN-2021-134-CU). Kennisnetwerk OBN, Driebergen.
- Koopmans, C., & Van Opheusden, M. (2019). Organische stof in de Nederlandse bodem - Feiten en discussie in perspectief (2019-023LbP; p. 32). Louis Bolk Instituut.
<https://www.louisbolk.nl/sites/default/files/publication/pdf/organische-stof-de-nederlandse-bodem.pdf>
- Korthals, G., & Rutgers, M. (2021). Bodemdiversiteit in beeld. Bioindicatoren in beeld voor boer, beleid en burger. *Bodem*, (3), juni 2021.
- Kowalewsky, W. H., Scheu, R., & Vetter, H. (1980). Measurement of odour emissions and immissions. In J. K. H. Gasser (Ed.), *Effluents from livestock*. Applied Science Publisher, London.
- Laine, P., Ourry, A., Boucaud, J., & Salette, J. (1998). Effects of a localized supply of nitrate on NO₃⁻ uptake rate and growth of roots in *Lolium multifolium* Lam. *Plant and Soil*, 202, 61-67.
- Lesschen, J. P., Vellinga, T., Dekker, S., van der Linden, A., & Schils, R. (2020). Mogelijkheden voor monitoring van CO₂-vastlegging en afbraak van organische stof in de bodem op melkveebedrijven (1566-7197). Wageningen Environmental Research.
- Lloyd, I., Grayson, R., Galdos, M., Morrison, R., & Chapman, P. (2024). Nitrous oxide and methane fluxes from plasma-treated pig slurry applied to winter wheat. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1-16.
- Marzio Invernizzi, G. D., Scolieri, F. T., Bettini, A., Cinci, M., Lenzi, A., & Sironi, S. (2024). Chemical and olfactometric inventory of gaseous spot vents in Mt. Amiata volcanic-geothermal area (Italy). *Science of The Total Environment*, 931, 172607.
- Murphy, J. A., & Zaurov, D. E. (1994). Shoot and root-growth response of perennial ryegrass to fertilizer placement depth. *Agronomy Journal*, 86, 828-832.
- Neeteson, J. J., Schröder, J. J., Smit, A. L., Bos, J. F. F. P., & Verloop, J. (z.d.). Plant Research International, Wageningen University and Research Centre, PO Box 16, 6700 AA Wageningen, Netherlands.
- Noij, G. J., Corré, W., Boekel, E. v., Oosterom, H., Middelkoop, J. v., Dijk, W. v., . . . Bakel, J. v. (2008). Kosteneffectiviteit van alternatieve maatregelen voor bufferstroken in Nederland. Retrieved from <http://edepot.wur.nl/22534>
- Ogink, N. W. M., & Lens, P. N. (2001). Geuremissies uit de veehouderij. Overzichtsrapportage 1996-1999; IMAG, rapport 2001-14.
- Onrust, J., Wymenga, E., Piersma, T., & Olff, H. (2019). Earthworm activity and availability for meadow birds is restricted in intensively managed grasslands. *Journal of Applied Ecology*, 2019, 1-10.
- Pain, B. F., & Misselbrook, T. H. (1991). Relationships between odour and ammonia emission during and following the application of slurries to land. Elsevier Applied Science, New York, NY.
- Pain, B. F., Clarkson, C. R., Phillips, V. R., Klarenbeek, J. V., Misselbrook, T. H., & Bruins, M. (1991). Odour emission arising from application of livestock slurries on land: Measurements following spreading using a micrometeorological technique and olfactometry. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 48, 101-110.
- Pain, B. F., Rees, Y. J., & Lockyer, D. R. (1988). Odour and ammonia emissions following the application of pig or cattle slurry to the land. In V. C. Nielsen, J. H. Voorburg, & P. L'Hermite (Eds.), *Volatile emissions from livestock farming and sewage operations*. Elsevier Applied Science Publishers, London.
- Park, S. H., Lee, B. R., Jung, K. H., & Kim, T. H. (2018). Acidification of pig slurry effects on ammonia and nitrous oxide emissions, nitrate leaching, and perennial ryegrass regrowth as estimated by 15N-urea flux. *Asian-Australas J Anim Sci.*, 457-466.
- Pedersen, J., Feilberg, A., & Nyord, T. (2022). Effect of storage and field acidification on emissions of NH₃, NMVOC, and odour from field applied slurry in winter conditions. *Journal of Environmental Management*, 310, 114756.

-
- Puente-Rodríguez, D., Vonk, J., & Verdoes, N. (2025). Perspectief van plasmatechnologie als methaan- en ammoniakemissie reducerende maatregel in de melkveehouderij. Retrieved from <https://doi.org/10.18174/687821>
- Quideau, S., Simpson, M., & Gillespie, A. (2021). Soil organic matter. Digging into Canadian Soils.
- Regelink, I. C., van Puffelen, J. L., Ehlert, P. A. I., & Schoumans, O. F. (2021). Evaluatie van verwerkingsinstallaties voor mest en co-vergiste mest. Retrieved from <https://edepot.wur.nl/554452>
- Rietra, R. P. J. J., Schipper, P. N. M., & Kroonen-Backbier, B. M. A. (2024). Effectgerichte maatregelen tegen fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden; Effecten van maatregelen ter vermindering van de fosfaatuitspoeling uit landbouwgronden met een slechte kwaliteit van oppervlaktewater vanwege fosfaat. Wageningen Environmental Research, Rapport 3325.
- Van Rotterdam, D. & Bussink, D. W. (2019). Samenstelling organische producten in relatie tot uitspoeling van fosfaat op zandgronden. Retrieved from <https://edepot.wur.nl/539479>
- Rougoor, C., Vermeulen, E., & van Well, E. (2023). Bovengronds mest aanwenden, SWOT-analyse van totaal bedrijfssysteem. Rapport Bodem Onderzoeken Biodiversiteit Water. www.clm.nl
- Schils, R. L. M. (1992). Invloed tijdstip van toediening op stikstofwerking van dunne rundermest op grassland (PR rapport 136). Lelystad, Proefstation Rundveehouderij, Paardenhouderij en Schapenhouderij.
- Schoumans, O. F. (2015). Phosphorus leaching from soils: process description, risk assessment and mitigation (pHD thesis). Wageningen University.
- Schouten, A. J., de Goede, R. G. M., Eekeren van, N., & Rutgers, M. (2014). De schoonheid van een duurzaam beheerde bodem. Leidt biologische landbouw tot een gezondere bodem? *Bodem*, (6), december 2014.
- Schröder, J. J., de Buisonjé, F. E., Kasper, G. J., Verdoes, N., & Verloop, K. (2009). Mestscheiding: relaties tussen techniek, kosten, milieu en landbouwkundige waarde. Retrieved from <https://edepot.wur.nl/50884>
- Spelstra, S. F. (1980). Origin of objectionable odorous components in piggery wastes and the possibility of applying indicator components for studying odour development. *Agriculture and Environment*, 5, 241-260.
- Stewart, T. A. (1980). Prevention of damage to grass swards from applications of silage effluent by neutralization or dilution of effluent acids. *Grass and Forage Science*, 35(1), 47-54.
- Stigas. (z.d.). <https://www.stigas.nl/agroarbo/bijlagen/gevaren-van-mestgassen/>
- Struwe-Juhl, B. (1995). Effects of conservation measures in the Hohner See area on numbers, breeding success and feeding ecology of the Black-tailed Godwit (*L. limosa*). *Corax*, 16, 153-172.
- Teunissen, W. A., & Wymenga, E. (Eds.). (2011). Factoren die van invloed zijn op de ontwikkeling van weidevogelpopulaties. Belangrijke factoren tijdens de trek, de invloed van waterpeil op voedselbeschikbaarheid en graslandstructuur op kuikenoverleving. SOVON onderzoeksrapport 2011/10. SOVON Vogelonderzoek Nederland, Nijmegen. A&W-rapport 1532. Bureau Altenburg & Wymenga, Veenwouden. Alterra rapport 2187, Alterra, Wageningen.
- Thissen, W., & Pijlman, J. (2022). Emissies van lachgas bij natte teelten - Een literatuurstudie. Retrieved from <https://edepot.wur.nl/651587>
- Van Balen, D., Topper, C., Van Geel, W., De Haan, J., de Haas, M., & NMI, D. B. (2015). Effecten bodem-en structuurverbeteraars.
- Van Boxmeer, E. G. G., van Middelkoop, J. C., & van Dooren, H. J. C. (2023). Toevoegen van magnesiumchloride (MgCl₂) aan runderdrijfmest; Huidige stand van zaken van onderzoek naar het effect van MgCl₂ in mest op emissies, bodem en gewas. Wageningen Livestock Research, Openbaar Rapport 1428.
- Van Bruggen, C., Bannink, A., Bleeker, A., Bussink, D. W., van Dooren, H. J. C., Groenestein, C. M., Huijsmans, J. F. M., Kros, J., Oltmer, K., Ros, M. B. H., van Schijndel, M. W., Schulte-Uebbing, L., Velthof, G. L., & van der Zee, T. (2024). Emissies naar lucht uit de landbouw berekend met NEMA voor 1990-2022. Wageningen, The Statutory Research Tasks Unit for Nature and the Environment (WOT Natuur & Milieu), WOT-technical report 264.
- Van den Akker, J. (2019). Bodemverdichting: ondergrond en bovengrond. Fact finding paper voor de Raad voor Leefomgeving en Infrastructuur (RLI) voor het advies Vitale Bodem.
- Van den Akker, J., De Vries, F., Vermeulen, G., Hack-ten Broeke, M., & Schouten, T. (2013). Risico op ondergrondverdichting in het landelijk gebied kaart (1566-7197). Alterra.

-
- Van Doorn, J., Lucassen, E. C. H. E. T., Douma, M., Roosmalen, M., Roelofs, J., & Smolders, A. (2021). Aanpak van stikstofproblematiek met zeoliet. *Landschap*, 38, 107-115.
https://www.researchgate.net/publication/369236916_Aanpak_van_stikstofproblematiek_met_zeoliet
- Van Eekeren, N., & Bokhorst, J. (2009). Beoordeling bodemkwaliteit zandgrond: Een inventarisatie van bodemindicatoren voor de veehouderij. Louis Bolk Instituut.
- Van Eekeren, N., & Rutgers, M. (2008). Een verkennende literatuurstudie over het effect van bodembeheer op ecosysteemdiensten. LER briefrapport 607604010.
- Van Eekeren, N., Heeres, E., & Smeding, F. (2003). Leven onder de graszode, Discussiestuk over het beoordelen en beïnvloeden van bodemleven in de biologische melkveehouderij. Louis Bolk Instituut.
- Van Eekeren, N., Philipsen, B., Bokhorst, J., & Ter berg, C. (2019). Bodesignalen grasland. Praktijkids voor bodemmanagement op melkveebedrijven. Roodbont Publishers B.V.
- Van Eekeren, N., Visser, M., de, Geert, A., Lantinga, E., Bloem, J., & Smeding, F. (2006). Effect van mestkwaliteit op gewasgroei en bodemleven. Een verkennende potproef. Rapport 16. Bioveem.
- Van Eekeren, N., Wit, J. de, Versteeg, C., Hoekstra, N., Pijlman, J., Janssen, P., Deru, J., Bruinenberg, M., Manhoudt, A. G. E., Jansma, A., Sleurink, D., Jong, P. de, Verhoeff, T., Meerkerk, B., Schepens, R., & Lenssinck, F. (2022). Winst & Weidevogels: Weidemaatregelen voor (functionele agro-)biodiversiteit. 2022-015LbD. Louis Bolk Instituut.
- Van Rotterdam, D., & Postma, R. (2019). Fosfaatonderzoek Wieden en Weerribben. Rapport 1692.N.17, Nutriënten Management Instituut B.V.
- Van der Zee, S. E. A. T. M. (1988). Transport of reactive contaminants in heterogeneous soil systems (Dissertatie). Landbouwniversiteit Wageningen.
- Velthof, G. L. (2002). Beperking van lachgasemissie uit bemeste landbouwgronden. Wageningen: Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte.
- Verloop, J., Hoving, I., de Haan, M., & Noij, G. J. (2018). BedrijfsWaterWijzer, Versie 2018.1, Koeien & Kansen rapport nr 80, WPR rapport nr. 791.
- Verloop, J., Oenema, J., Burgers, S. L. G., Aarts, H. F. M., & van Keulen, H. (2010). P-equilibrium in an intensive dairy farming system: effects on soil-P status, crop yield and P leaching.
- Vermeulen, G. D., Verwijs, B., & Van den Akker, J. (2013). Vergelijking van de bodembelasting bij agrarisch veldwerk in 1980 en 2010. Plant Research International.
- Vliet, P. C. J. van, & de Goede, R. G. M. (2006). Effects of slurry application on soil fauna communities in permanent grassland. *European Journal of Soil Biology*, 42(Supplement 1), 348-353.
- Williams, A. G. (1984). Indicators of piggery slurry odour offensiveness. *Agricultural Wastes*, 10, 15-36.
- Yeates, G. W., Bongers, T., de Goede, R. G. M., Freckman, D. W., & Georgieva, S. S. (1993). Feeding habits in soil nematode families and genera - an outline for soil ecologists. *Journal of Nematology*, 25, 315-331.
- Young, E. H., & Unc, H. (2023). A review of nematodes as biological indicators of sustainable functioning for northern soils undergoing land-use conversion. *Applied Soil Ecology*, 195, 105208.
- Zireeni, Y., Jones, D. L., & Chadwick, D. R. (2023). Influence of slurry acidification with H₂SO₄ on soil pH, N, P, S, and C dynamics: Incubation experiment. *Environmental Advances*, 14, 100447.
- Zwart, K., Wolfs, A., Kikkert, A., Termorshuizen, A., & van der Burgt, G. (2013). Tien vragen en antwoorden over organische stof. HLB.

Bijlage I: Totaalbeeld van de integratiescores van effecten van innovatieve mesttoediening ten opzichte van referentietechnieken.

Innovatie	N-werking (NWC %)	Afspoeling N & P	Lachgas & NOx	Uitspoeling Fosfaat	Uitspoeling Nitraat	Organisch stofgehalte bodem	Methaan	WATERVERBRUIK (L / ha)
1. Afdekken mest sleuven met:								
<i>Krijtoplossing</i>	0 tot+	0	0	0	0	0	0	500 ²
<i>Polyhaliet</i>	0 tot+	0	0	0	0	0	0	320, 640 ²
<i>Magnesiumchloride</i>	0 tot+	0	0	0	0	0	0	500 ²
<i>Zwavelzuur</i>	0 tot+	0	0	0	0	0	0	500 ²
2. Aanzuren door opwekken plasmafase	+tot++ ¹	0	--	-tot0	-/0	-tot0*	0	n.v.t. ²
3. Betere uitvoering zodenbemesten	0	0	0	0	0	0	0	n.v.t. ²
4. Afdekken sleuf met gronddeeltjes	+tot++	-tot+	0	0	0	-tot0	0	n.v.t. ²
5. Schuin insnijden	0 tot +	--tot+	-/0	0	0	-/0	0	n.v.t. ²
6. Diep injectie	++	--tot+	-	0	-tot+	-tot0	0	n.v.t. ²

1: Inclusief/exclusief nitraateffect.

2: bij het gebruik van een sleufkouter of sleepvoet is het wettelijk verplicht om mest toe te dienen volgens de verhouding 2 delen mest : 1 deel water. Bij een gift van 25m3 mest wordt er 12,5 m3 water toegevoegd.

* op veengrond score van 0

Vervolg Bijlage I

Innovatie	Bodemverdichting	Schade aan zoden	Bodemleven	Weidevogels	Stank & geur	Energie	Kostprijs
1. Afdekken mest sleuven met:							
<i>Krijtoplossing</i>	0	-/0*	-tot0	-tot0	0/+	-tot0	-
<i>Polyhaliet</i>	0	-/0*	-tot0	-tot0	0/+	-tot0	-
<i>Magnesiumchloride</i>	0	-/0*	-tot0	-tot0	0/+	-tot0	-
<i>Zwavelzuur</i>	0	-/0*	-tot0	-tot0	0/+	-tot0	-
2. Aanzuren door opwekken plasmafase	0	-/0*	-***	-tot0**	+/++	--	-/--
3. Betere uitvoering zodenbemesten	0	0	0****	0	0	0	-/0
4. Afdekken sleuf met gronddeeltjes	-tot0 ¹	Nvt	--tot0	-tot0	0/+	-tot0	-/0
5. Schuin insnijden	--tot0 ¹	--tot0	--tot0	--tot0	0/+	-tot0	-/0
6. Diep injectie	--tot0 ¹	--tot0	--tot0	--tot0	++	--tot0	-

* Mits netjes uitgevoerd zonder besmeuring van gras

** Bij sleepvoet of sleufkouter score van 0/-

*** Bij sleepvoet of sleufkouter score van -/0

**** Voor kleigrond score van -/0

¹ Risico op bodemverdichting 1 niveau minder wanneer uitgevoerd met sleepslangbemester i.p.v. mesttank

Het innovatieprogramma 'Bemest op z'n Best' wordt uitgevoerd door een consortium bestaande uit Wageningen Research (WR), Nutriënten Management Instituut (NMI), Stichting Louis Bolk Instituut (LBI), Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek (TNO), Instituut voor Landbouw-, Visserij- en Voedingsonderzoek (ILVO), Delphy B.V. en Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) in samenwerking met PPP Agro Advies en Monique Paes Marketing & Interieur.

Correspondentie adres voor dit rapport:

Postbus 16
6700 AA Wageningen
T 0317 48 07 0
wur.nl/plant-research



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.