



VIRKEMIDLER TIL REDUKTION AF KLIMAGASSER I LANDBRUGET - 2023

MATHIAS NEUMANN ANDERSEN OG ANDERS PETER ADAMSEN (RED.)

DCA RAPPORT NR. 220 • OKTOBER 2023 • RÅDGIVNING



AARHUS
UNIVERSITET

DCA - NATIONALT CENTER FOR FØDEVARER OG JORDBRUG



Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget - 2023

Rådgivningsrapport fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug

Mathias Neumann Andersen¹⁾ (red.), Anders Peter Adamsen⁴⁾ (red.), Elly Møller Hansen¹⁾, Ingrid Kaag Thomsen¹⁾, Nicholas John Hutchings¹⁾, Lars Elsgaard¹⁾, Uffe Jørgensen¹⁾, Lars Munkholm¹⁾, Christen Duus Børgesen¹⁾, Peter Sørensen¹⁾, Søren O. Petersen¹⁾, Poul Erik Lærke¹⁾, Jørgen E. Olesen¹⁾, Christian F. Børsting²⁾, Peter Lund²⁾, Maria Holst Kjeldsen²⁾, Morten Maigaard²⁾, Trine Michelle Villumsen³⁾, Frederik Rask Dalby⁴⁾, Peter Kai⁴⁾, Michael Nørremark⁵⁾, Gitte Blicher-Mathiesen⁶⁾, Joachim Audet⁶⁾, Marianne Bruus⁶⁾, Paul Henning Krogh⁶⁾, Brian Kronvang⁶⁾, Anne Winding⁷⁾, Hanne Lakkenborg Kristensen⁸⁾

¹⁾ Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet

²⁾ Institut for Veterinær og Husdyrvidenskab, Aarhus Universitet

³⁾ Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning, Aarhus Universitet

⁴⁾ Institut for Bio- og Kemiteknologi, Aarhus Universitet

⁵⁾ Institut for Elektro- og Computerteknologi, Aarhus Universitet

⁶⁾ Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet

⁷⁾ Institut for Miljøvidenskab, Aarhus Universitet

⁸⁾ Institut for Fødevarer, Aarhus Universitet

Datablad

Titel:	Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget - 2023
Serietitel og nummer:	DCA rapport nr. 220
Rapporttype:	Rådgivning
Udgivelsesår:	Oktober 2023. 1. udgave. 1. oplag
Forfattere:	Mathias Neumann Andersen (red.), Elly Møller Hansen, Ingrid Kaag Thomsen, Nicholas John Hutchings, Lars Elsgaard, Uffe Jørgensen, Lars Munkholm, Christen Duus Børgesen, Peter Sørensen, Søren O. Petersen, Poul Erik Lærke og Jørgen E. Olesen fra Institut for Agroøkologi, AU. Christian F. Børsting, Peter Lund, Maria Holst Kjeldsen og Morten Maigaard fra Institut for Veterinær og Husdyrvidenskab, AU. Trine Michelle Villumsen fra Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning, AU. Anders Peter Adamsen (red.), Frederik Rask Dalby og Peter Kai fra Institut for Bio- og Kemiteknologi, AU. Michael Nørremark fra Institut for Elektro- og Computerteknologi, AU. Gitte Blicher-Mathiesen, Joachim Audet, Marianne Bruus, Paul Henning Krogh og Brian Kronvang fra Institut for Ecoscience, AU. Anne Winding fra Institut for Miljøvidenskab, AU. Hanne Lakkenborg Kristensen, Institut for Fødevarer, AU. <i>Forfatter(ne) er angivet ved de enkelte kapitler.</i>
Fagfællebedømmelse:	Martin Weisbjerg og Peter Løvendal fra Institut for Veterinær og Husdyrvidenskab, AU. Frederik Rask Dalby, Lise Bonne Guldberg, Henrik B. Møller, Anders Peter Adamsen, Anders Feilberg og Peter Kai fra Institut for Bio- og Kemiteknologi, AU. Ingrid K. Thomsen, Elly Møller Hansen og Mathias Neumann Andersen fra Institut for Agroøkologi, AU. Brian Kronvang fra Institut for Ecoscience, AU. Steen Gyldenkerne og Ole-Kenneth Nielsen, Institut for Miljøvidenskab, AU. <i>Fagfællebedømmer(ne) er angivet ved de enkelte kapitler.</i>
Kvalitetssikring:	Specialkonsulent Anna Feldberg Marsbøll og chefkonsulent Lene Hegelund, DCA Centerenheden, AU (den samlede besvarelse). Chefkonsulent Hanne Bach, DCE Centerenheden, AU (kapitel 8.4).
Rekvirent:	Landbrugsstyrelsen (LBST), Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri (FVM)
Dato for bestilling/levering:	Bestilling årlig opdatering: 08.04.2022 (bestilling) / 10.10.2022 (til høring) / 03.03.2023 (foreløbig levering) / 21.04.2023 (samlet levering) Bestilling revideret kapitel 8.4: 04.07.2023 (bestilling) / 31.08.2023 (til ekstern kommentering) / 28.09.2023 (endelig levering)
Journalnummer:	2021-0205412 og 2023-0525478
Finansiering:	Besvarelsen er udarbejdet som led i "Rammeaftale om forskningsbaseret myndighedsbetjening" indgået mellem Miljøministeriet, Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri og Aarhus Universitet under ID nr. 2.29 i "Ydelsesaftale Planteproduktion 2022-2025" og "Ydelsesaftale Planteproduktion 2023-2026"
Ekstern kommentering:	Bestilling årlig opdatering: Et udkast til rapporten har været i ekstern høring. Kommenteringsark inkl. AUs håndtering af kommentarerne kan findes via dette LINK Bestilling revideret kapitel 8.4: Et udkast til det reviderede kapitel samt de relaterede reviderede rækker i Klimavirkemiddeltabellen har været til kommentering ved LBST. Kommenteringsark inkl. AUs håndtering af kommentarerne kan findes via dette LINK
Eksterne bidrag:	Bilag 2 (Boblerlisten) er sammensat af bidrag fra FVM og AU.

I forbindelse med udarbejdelse af rapporten har forfatter(ne) haft kontakt til fagpersoner hos Landbrugsstyrelsen for afklaring af spørgsmål omkring udbredelse af arealrelaterede virkemidler i 2020.

Kommentarer til bestilling:	Nærværende rapport er en opdatering af Tabel over klimaeffekter for virkemidler i landbruget (Hutchings et al., 2020 kan findes via dette LINK, opdateret i Petersen og Hutchings, 2020 kan findes via dette LINK og Petersen, 2020 (kan findes via dette LINK. I nærværende opdatering er der tilføjet en beskrivelse af alle virkemidler.
Kommentarer til besvarelse:	I nærværende rapport er kapitel 8.4 Vådområder på mineral jord (KVM8.4) revideret på baggrund af bestilling modtaget 04.07.2023. Herudover er der lavet følgende rettelser i Bilag 1: Rettet og indsat enkelte værdier for TRL-niveau samt reference til TRL-systemet; indsat enkelte vurderinger af "Sikker positiv klimaeffekt" og rettet enkelte vurderinger fra "Nej" til "Ja" på baggrund en mere ensartet vurdering samt inddragelse af den seneste viden; lavet enkelte korrektioner og indsat manglende værdier for netto klimaeffekt, som skyldes fejl ved overførsel af værdier fra regneark. Der er også foretaget enkelte redaktionelle ændringer. Denne rapport erstatter leveringen fra 21.04.2023. Rapporten blev første gang leveret februar 2023 men umiddelbart efter trukket tilbage pga. metodemæssige overvejelser vedr. kulstoflagring i jord. Efter aftale med LBST blev der udarbejdet en foreløbig levering, som inkluderede de dele af Klimavirkemiddeltabellen i Bilag 1, hvori der ikke forventedes yderligere revision. Den samlede rapport, som erstattede den delvise levering, blev leveret 21.04.2023. Rapporten præsenterer resultater, som ved udgivelsen ikke har været i eksternt peer review eller er publiceret andre steder. Ved en evt. senere publicering i tidsskrifter med eksternt peer review vil der derfor kunne forekomme ændringer.
Ophavsret:	Rapporten er omfattet af gældende regler om ophavsret.
Citeres som:	Andersen MN, Adamsen AP, Hansen EM, Thomsen IK, Hutchings NJ, Elsgaard L, Jørgensen U, Munkholm L, Børgesen CD, Sørensen P, Petersen SO, Lærke PE, Olesen JE, Børsting CF, Lund P, Kjeldsen MH, Maigaard M, Villumsen TM, Dalby FR, Kai P, Nørremark M, Blicher-Mathiesen G, Audet J, Bruus M, Krogh PH, Kronvang B, Winding A, Kristensen HL. 2023. Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget - 2023. 305 sider. Rådgivningsrapport fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 28.09.2023
Udgiver:	DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Niels Pedersens Allé 2, postboks 50, 8830 Tjele. Tlf. 22183077, e-mail: dca@au.dk , hjemmeside: dca.au.dk
Layout:	Rapportkoordinator Jette Illkjær, DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug
Fotos:	Bagside øverst: Colourbox, nederst: DCA fotoarkiv. Forside øverst: DCA fotoarkiv, nederst: Janne Hansen.
Sideantal:	305
Tryk:	DigiSource.dk
ISBN:	Trykt version: 978-87-94420-23-5. Elektronisk version: 978-87-94420-24-2
ISSN:	2245-1684
Internetversion:	https://dcapub.au.dk/djfpublikation/djfpdf/DCArapport220.pdf
Rådgivning fra DCA:	Læs mere på https://dca.au.dk/raadgivning/

Forord

Nærværende rapport er udarbejdet på bestilling af Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri (FVM) til erstatning af Klimavirkemiddeltabellen fra 2020 (Petersen, 2020). Kataloget skal opdateres årligt af Aarhus Universitet (AU), så ny viden og nye potentielle virkemidler kan inddrages for at styrke grundlaget for de klimaeffekter, som ministerierne, blandt andre Miljøministeriet, anvender som grundlag for politikudvikling mv. Med rapporten følger en tabeloversigt over virkemiddeleffekter (Bilag 1), der kan fungere som et opslagsværk.

Udarbejdelsen af Klimavirkemiddelkataloget er gennemført som led i "Rammeaftale om forskningsbaseret myndighedsbetjening mellem Miljøministeriet, Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri og Aarhus Universitet" under ID 2.29 i Ydelsesaftale Planteproduktion 2022-2025. Arbejdet med kataloget er udført af medarbejdere fra en række institutter på AU med Institut for Agroøkologi som projektleder. Et udkast til kataloget har været til interessenthøring formidlet af FVM. Høringskommentarerne og håndteringen af disse kan ses via et link i databladet.

Det er intentionen i rapporten at forudsætninger, antagelser og relevante referencesituationer er klart beskrevet, sådan at en bruger af kataloget/tabellen har mulighed for at forstå, under hvilke betingelser den angivne effekt vil kunne opnås, og hvilken effekt der kan opnås, når der afviges fra disse referencesituationer. Scenarierne flugter i vid udstrækning med den referencepraksis, som ligger i Kvælstofvirkemiddelkataloget (Eriksen m.fl.; 2020). I henhold til bestillingen fra FVM er virkemidlerne kategoriseret i grupper, der vedrører henholdsvis husdyrproduktion, husdyrgødning, afgrødeproduktion og arealanvendelse. Virkemidlerne under hver af disse områder er indgående beskrevet i hvert deres afsnit og nummereret i henhold hertil.

Der skal hvert år tages stilling til, om yderligere virkemidler bør tilføjes til kataloget og Boblerlisten i Bilag 2 angiver virkemidler til drøftelse. Det er muligt for både ministerierne og Aarhus Universitet at foreslå inklusion af nye virkemidler i kataloget, og den endelige beslutning tages i dialog forud for hver årlig bestilling. I forbindelse med bestilling af opgaven bliver der afholdt et kick-off-møde, hvor der kan tages stilling til tilføjelse af nye virkemidler, evt. behov for formataendringer m.m. Yderligere er der aftalt et spørgemøde efter levering af kataloget, hvor AU præsenterer resultaterne, og ministerierne har mulighed for at stille opklarende spørgsmål.

God læselyst!

Foulum, april 2023

Mathias Neumann Andersen & Anders Peter Adamsen

Indholdsfortegnelse

Forord	5
1 Sammen drag	13
2 Summary in English	18
3 Indledning	22
4 Referencesituationer og beregningsmetoder for effekter og potentialer af klimavirkemidler	24
4.1 Husdyrproduktion og husdyrgødning	25
4.1.1 Beskrivelse af den anvendte model	26
4.1.2 Usikkerheder på den anvendte model	26
4.1.3 Sammenligning med litteratordata	29
4.2 Afgrødeproduktion og arealanvendelse	33
4.2.1 Standardværdier for emissioner af klimagasser	33
4.2.2 Kvælstofrelaterede emissioner	34
4.2.3 Kulstoflagring i jord	35
4.2.4 Kalk og urea	38
4.2.5 Forbrug af fossil energi	38
4.2.6 Usikkerheder	39
4.3 Potentialer og muligheder for reduktion af drivhusgasser	41
4.3.1 Husdyrproduktion	41
4.3.2 Husdyrgødning	42
4.3.3 Afgrødeproduktion	42
4.3.4 Arealanvendelse	42
5 Husdyrproduktion	46
5.1 Generelle ændringer i foderrationen (KVM5.1)	47
5.1.1 Anvendelse	50
5.1.2 Relevans og potentiale	50
5.1.3 Effekt på drivhusgasudledning og sideeffekter	51
5.1.4 Samspil til andre virkemidler	51
5.1.5 Usikkerheder	51
5.2 Øget fodring med fedt til kvæg (KVM5.2)	53
5.2.1 Anvendelse	54
5.2.2 Relevans og potentiale	55
5.2.3 Effekt på drivhusgasudledning	55
5.2.4 Samspil til andre virkemidler	56
5.2.5 Usikkerheder	57

5.3	Anvendelse af metanreducerende tilsætningsstoffer i foder til kvæg (KVM5.3).....	60
5.3.1	Anvendelse.....	60
5.3.2	Relevans og potentiale	61
5.3.3	Effekt på drivhusgasudledning	61
5.3.4	Samspil til andre virkemidler	63
5.3.5	Usikkerheder	65
5.4	Genetisk selektion af malkekvæg (KVM5.4)	67
5.4.1	Anvendelse.....	70
5.4.2	Relevans og potentiale	70
5.4.3	Effekt på drivhusgasudledning	71
5.4.4	Samspil til andre virkemidler	72
5.4.5	Usikkerheder	73
6	Husdyrgødning.....	75
6.1	Hyppig udslusning af gylle fra stalde (KVM6.1)	77
6.1.1	Anvendelse.....	77
6.1.2	Relevans og potentiale	78
6.1.3	Effekt på drivhusgasudledning	79
6.1.4	Samspil til andre virkemidler	81
6.1.5	Usikkerheder	82
6.2	Forsuring af gylle i stalden (KVM6.2)	86
6.2.1	Anvendelse.....	86
6.2.2	Relevans og potentiale	88
6.2.3	Effekt på drivhusgasudledning	89
6.2.4	Samspil til andre virkemidler	91
6.2.5	Usikkerheder	91
6.3	Køling af gylle i grisestalde (KVM6.3).....	95
6.3.1	Anvendelse.....	95
6.3.2	Relevans og potentiale	96
6.3.3	Effekt på drivhusgasudledning	98
6.3.4	Samspil til andre virkemidler	102
6.3.5	Usikkerheder	103
6.4	Lav-dosis forsuring i gyllelagre (KVM6.4)	105
6.4.1	Anvendelse.....	106
6.4.2	Relevans og potentiale	106
6.4.3	Effekt på drivhusgasudledning	106
6.4.4	Samspil til andre virkemidler	108
6.4.5	Usikkerheder	108
6.5	Gylle og bioforgasning (reference for hyppig udslusning af gylle og bioforgasning) (KVM6.5).....	109
6.5.1	Anvendelse.....	109

6.5.2	Relevans og potentiale	109
6.5.3	Effekt på drivhusgasudledning	109
6.5.4	Samspil til andre virkemidler	112
6.5.5	Usikkerheder	112
6.6	Opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (KVM6.6)	113
6.6.1	Anvendelse.....	113
6.6.2	Relevans og potentiale	113
6.6.3	Effekt på drivhusgasudledning	114
6.6.4	Samspil til andre virkemidler	115
6.6.5	Usikkerheder	115
6.7	Overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (KVM6.7)	116
6.7.1	Anvendelse.....	117
6.7.2	Relevans og potentiale	117
6.7.3	Effekt på drivhusgasudledning	117
6.7.4	Samspil til andre virkemidler	119
6.7.5	Usikkerheder	119
6.8	Afbrænding og pyrolyse af husdyrgødning (fiberfraktion efter separering) (KVM6.8)	121
6.8.1	Anvendelse.....	121
6.8.2	Relevans og potentiale	121
6.8.3	Effekt på drivhusgasudledning	124
6.8.4	Samspil til andre virkemidler	128
6.8.5	Usikkerheder	128
6.9	Hyppig udslusning af gylle fra stalde og bioforgasning (KVM6.9)	131
6.9.1	Anvendelse.....	131
6.9.2	Relevans og potentiale	131
6.9.3	Effekt på drivhusgasudledning	131
6.9.4	Samspil til andre virkemidler	133
6.9.5	Usikkerheder	133
6.10	Hyppig udslusning af gylle fra stalde og overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (KVM6.10)	134
6.10.1	Anvendelse.....	134
6.10.2	Relevans og potentiale	134
6.10.3	Effekt på drivhusgasudledning	134
6.10.4	Samspil til andre virkemidler	135
6.10.5	Usikkerheder	135
6.11	Hyppig udslusning af gylle fra stalde og opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (KVM6.11)	137
6.11.1	Anvendelse.....	137
6.11.2	Relevans og potentiale	137
6.11.3	Effekt på drivhusgasudledning	137
6.11.4	Samspil til andre virkemidler	138

6.11.5	Usikkerheder	138
6.12	Hyppig udslusning af gylle og lavdosis forsuring i lageret (KVM6.12)	139
6.12.1	Anvendelse.....	139
6.12.2	Relevans og potentiale	139
6.12.3	Effekt på drivhusgasudledning.....	139
6.12.4	Samspil til andre virkemidler	140
6.12.5	Usikkerheder	140
6.13	Køling af svinegylle i stalde og bioforgasning (KVM6.13)	141
6.13.1	Anvendelse.....	141
6.13.2	Relevans og potentiale	141
6.13.3	Effekt på drivhusgasudledning.....	141
6.13.4	Samspil til andre virkemidler	142
6.13.5	Usikkerheder	143
7	Afgrødeproduktion.....	144
7.1	Efterafgrøder (KVM7.1)	144
7.1.1	Anvendelse.....	144
7.1.2	Relevans og potentiale	145
7.1.3	Effekt på drivhusgasudledning.....	146
7.1.4	Samspil til andre virkemidler	148
7.1.5	Usikkerheder	149
7.2	Mellemafgrøder (KVM7.2).....	152
7.2.1	Anvendelse.....	152
7.2.2	Relevans og potentiale	152
7.2.3	Effekt på drivhusgasudledning.....	152
7.2.4	Samspil til andre virkemidler	153
7.2.5	Usikkerheder	153
7.3	Tidlig såning af vintersæd (KVM7.3).....	155
7.3.1	Anvendelse.....	155
7.3.2	Relevans og potentiale	155
7.3.3	Effekt på drivhusgasudledning.....	155
7.3.4	Samspil til andre virkemidler	156
7.3.5	Usikkerheder	156
7.4	Nedmuldning af halm før vintersæd (KVM7.4)	158
7.4.1	Anvendelse.....	158
7.4.2	Relevans og potentiale	158
7.4.3	Effekt på drivhusgasudledning.....	158
7.4.4	Samspil til andre virkemidler	159
7.4.5	Usikkerheder	159
7.5	Halm til forgasning (pyrolyse) med biochar retur (KVM7.5).....	161
7.5.1	Anvendelse.....	161
7.5.2	Relevans og potentiale	162

7.5.3	Effekt på drivhusgasudledning	162
7.5.4	Samspil til andre virkemidler	164
7.5.5	Usikkerheder	164
7.6	Braklægning i sædskiftet (KVM7.6)	167
7.6.1	Anvendelse.....	167
7.6.2	Relevans og potentiale	167
7.6.3	Effekt på drivhusgasudledning	168
7.6.4	Samspil til andre virkemidler	169
7.6.5	Usikkerheder	169
7.7	Ompløjningstidspunkt for fodergræs og efterfølgende afgrødevalg (KVM7.7)	171
7.7.1	Anvendelse.....	171
7.7.2	Relevans og potentiale	172
7.7.3	Effekt på drivhusgasudledning	172
7.7.4	Samspil til andre virkemidler	173
7.7.5	Usikkerheder	173
7.8	Flerårige energiafgrøder i sædskiftet (KVM7.8)	174
7.8.1	Anvendelse.....	174
7.8.2	Relevans og potentiale	174
7.8.3	Effekt på drivhusgasudledning	175
7.8.4	Samspil til andre virkemidler	176
7.8.5	Usikkerheder	176
7.9	Pløjefri dyrkning og forbud mod jordbearbejdning i visse perioder (KVM7.9)	179
7.9.1	Anvendelse.....	179
7.9.2	Relevans og potentiale	180
7.9.3	Effekt på drivhusgasudledning	180
7.9.4	Samspil til andre virkemidler	181
7.9.5	Usikkerheder	181
7.10	Præcisionsjordbrug (KVM7.10).....	184
7.10.1	Anvendelse.....	184
7.10.2	Relevans og potentiale	185
7.10.3	Effekt på drivhusgasudledning	186
7.10.4	Samspil til andre virkemidler	190
7.10.5	Usikkerheder	191
7.11	Reduceret kvælstofnorm (KVM7.11)	195
7.11.1	Anvendelse.....	195
7.11.2	Relevans og potentiale	195
7.11.3	Effekt på drivhusgasudledning	199
7.11.4	Samspil til andre virkemidler	200
7.11.5	Usikkerheder	201
7.12	Større opbevaringskapacitet af husdyrgødning og ændringer i forbud mod udbringning af husdyrgødning om efteråret (KVM7.12)	203

7.12.1	Anvendelse.....	203
7.12.2	Relevans og potentiale	204
7.12.3	Effekt på drivhusgasudledning	205
7.12.4	Samspil til andre virkemidler	205
7.12.5	Usikkerheder	205
7.13	Afgrøder med stort kvælstofoptag (KVM7.13).....	207
7.13.1	Anvendelse.....	207
7.13.2	Relevans og potentiale	207
7.13.3	Effekt på drivhusgasudledning	207
7.13.4	Samspil til andre virkemidler	209
7.13.5	Usikkerheder	210
7.14	Skærpet udnyttelseskrav for N i udvalgte typer husdyrgødning (KVM7.14)	212
7.14.1	Anvendelse.....	212
7.14.2	Relevans og potentiale	214
7.14.3	Effekt på drivhusgasudledning	214
7.14.4	Samspil til andre virkemidler	215
7.14.5	Usikkerheder	215
7.15	Nitrifikationsinhibitorer (KVM7.15)	216
7.15.1	Anvendelse.....	216
7.15.2	Relevans og potentiale	216
7.15.3	Effekt på drivhusgasudledning	217
7.15.4	Samspil til andre virkemidler	218
7.15.5	Usikkerheder	218
7.15.6	Sideeffekter	219
7.15.7	Sammenfatning.....	223
8	Arealanvendelse	227
8.1.	Udtag af omdriftsareal til permanent ugødet brak (KVM8.1).....	227
8.12.1	Anvendelse.....	227
8.12.2	Relevans og potentiale	227
8.12.3	Effekt på drivhusgasudledning	228
8.12.4	Samspil til andre virkemidler	230
8.12.5	Usikkerheder	230
8.13	Udyrkede bræmmer langs vandløb og søer på mineraljord (KVM8.2)	231
8.2.1	Anvendelse.....	231
8.2.2	Relevans og potentiale	231
8.2.3	Effekt på drivhusgasudledning	232
8.2.4	Samspil til andre virkemidler	233
8.2.5	Usikkerheder	233
8.14	Paludikultur (KVM8.3).....	235
8.14.1	Anvendelse.....	235
8.14.2	Relevans og potentiale	236

8.14.3	Effekt på drivhusgasudledning	237
8.14.4	Samspil til andre virkemidler	238
8.14.5	Usikkerheder	238
8.15	Vådområder på mineral jord (KVM8.4)	241
8.15.1	Anvendelse.....	241
8.15.2	Relevans og potentiale	241
8.15.3	Effekt på drivhusgasemission	241
8.15.4	Samspil til andre virkemidler	243
8.15.5	Usikkerheder	244
9	Konklusioner, igangværende projekter og vidensbehov	246
9.1	Forskningsbehov samt oversigt over igangværende projekter, der bidrager til at beregne effekter af virkemidler på drivhusgasudledning.....	250
9.1.1	Forskningsbehov vedrørende husdyrproduktion	250
9.1.2	Forskningsbehov vedrørende husdyrgødning.....	250
9.1.3	Forskningsbehov vedrørende afgrødeproduktion	250
9.2	Igangværende projekter	253
9.2.1	Igangværende projekter vedrørende husdyrproduktion.....	253
9.2.2	Igangværende projekter vedrørende husdyrgødning	259
9.2.3	Igangværende projekter vedrørende afgrødeproduktion.....	271
10 Bilag 1	Klimavirkemiddeltabellen	276
11 Bilag 2	Boblerlisten	303

1 Sammendrag

Forfattere: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Anders Peter Adamsen, Institut for Bio- og Kemiteknologi

I forbindelse med EU's 2030 målsætning om reduktion af klimagasudslip og aftalen om grøn omstilling af dansk landbrug ønskes et opdateret vidensgrundlag over mulige virkemidler til reduktion af drivhusgasudledninger inden for landbruget. Rapporten giver en oversigt over effekter, potentiale, usikkerhed og barrierer af en række virkemidler, der kan bidrage til dette. Rapporten bygger på tidligere opgørelser (Olesen et al., 2018; Hutchings et al., 2020).

Der er mange forskellige kilder til drivhusgasser fra landbruget. De største bidrag kommer fra metan og lattergas, bl.a. fordi disse drivhusgasser har hhv. 28 og 265 gange kraftigere drivhuseffekt end kuldioxid set over en 100-årig periode (GWP-100). For at lette sammenligningen af udledningen af alle typer drivhusgasser, omregner man mængden af andre drivhusgasser til den mængde af CO₂, som over 100 år ville give samme drivhuseffekt – den såkaldte CO₂-ækvivalent (CO₂-ækv). I tillæg til udledninger fra landbrugssektoren er der lavet en særskilt opgørelse for LULUCF området af ændringer i jordens indhold af kulstof, hvor øget kulstoflagring eller mindskede udslip vil reducere CO₂-belastningen. En øget kulstoflagring vil imidlertid ikke nødvendigvis bidrage til opfyldelse af Danmarks reduktionsforpligtigelse, da der er et loft over brugen af LULUCF-kreditter, hvorunder kulstoflagring i landbrugsjord indgår. Endvidere indregnes brændstofbesparelser i landbruget eller i transportsektoren (fra øget brug af biogas) som reduktion af CO₂-udledninger.

Virkemidlerne til reduktion af landbrugets drivhusgasudledning er i rapporten opdelt på tiltag omkring 1) Husdyrproduktion, 2) Husdyrgødning, 3) Afgrødeproduktion, og 4) Arealanvendelse. Effekten af et virkemiddel er i princippet beregnet for et enkelt års implementering af et tiltag set over den 100-årig periode, som anvendelse af GWP-100 værdier indebærer. Kulstoflagring i jord er imidlertid vanskelig at passe ind i et sådan fast skema, da netto-lagringen afhænger af udgangspunktet for kulstofindhold i jorden. I den danske afrapportering under UNFCCC, er det estimeret at 12 % af kulstof input i planterester lagres i jorden over en 20-årig periode (Mikkelsen et al., 2022). I denne rapport antages derfor, at kulstoflagringseffekten af ændringer i tilførsel af planterester kan indregnes som 12 % af den tilførte kulstofmængde, og at varigheden af denne effekt er 20 år, hvorefter der er opnået et nyt ligevægtsniveau. Herved opretholdes konsistens i forhold til den nationale emissionsopgørelse. Der er pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord skal beregnes med henblik på at indregne det i landbrugets udledninger og i hvilken udstrækning det vil blive muligt.

Da netto-effekten af mange af virkemidlerne vedrørende afgrødeproduktion og arealanvendelse fremkommer som en difference mellem kulstoflagring i jord og N₂O-udledning fra tilført gødning, som også er meget usikker, vil der ofte være tvivl om disse virkemidlers nettoeffekt er positiv eller negativ.

Potentialerne for fuld implementering tiltagene er endvidere som udgangspunkt beregnet for hvert enkelt tiltag alene, uden hensyntagen til eventuelle samspil med andre virkemidler og deres effekter. Dog er der beskrevet kædeeffekter ved samtidig eller sekventiel anvendelse af en række teknologier til håndtering af husdyrgødning. Generelt kan de angivne værdier for drivhusgasreduktion således ikke umiddelbart summeres. Effekten af det enkelte virkemiddel afhænger endvidere af de valgte referencesituationer. Disse er beskrevet nærmere i kapitel 4 for hhv. husdyrproduktion, husdyrgødning og for afgrødeproduktion.

De tiltag, der er beskrevet i rapporten i kapitel 5-8, varierer betydeligt i deres effekter og sideeffekter. Desuden vil der være stor variation i deres omkostningseffektivitet. For at et virkemiddel skal være relevant, skal det have en betydende effekt på de samlede udledninger, det skal kunne implementeres i praksis uden væsentlige negative sideeffekter og være økonomisk konkurrencedygtigt. Endelig skal effekten være veldokumenteret, så det kan inkluderes i den nationale emissionsopgørelse (Olesen et al, 2018).

I tabel 2.1 er reduktionen ved fuld implementering af nogle af de mest effektive virkemidler inden for de fire kategorier beregnet ud fra tilgængelige aktivitetsdata fra basisfremskrivningen 2020 (Energistyrelsen, 2020 og Line Maj Stranges, LBST, personlig kommunikation, 04.01.2023), samt den maksimalt mulige udbredelse beskrevet under de enkelte virkemidler. Disse kilder indeholder den forventede udvikling i arealanvendelse, husdyrhold og virkemidler. Effekterne afhænger af hvordan de enkelte tiltag sammensættes; således fås den største effekt af bioforgasning, hvis det kombineres med hyppig udslusning. Det skal understreges, at der ofte er betydelig usikkerhed om, hvor stor den potentielle udbredelse af et virkemiddel kan blive i fremtiden og den tidlige udvikling i implementeringen.

Tabel 2.1 Reduktionspotentialer for drivhusgasser ved brug af udvalgte virkemidler opgjort i kt CO₂-ækv./år ud fra tilgængelige aktivitetsdata 2020 set i relation til den maksimalt mulige implementering beskrevet under de enkelte virkemidler (antal husdyr, gødningsmængde eller hektar). Nogle af virkemidlerne er opgjort for forskellige grupper af dyr eller typer af husdyrgødning. Reduktion i udledningerne er beregnet som den samlede effekt af reduktion i lattergas og metan, øget kulstoflagring og reduktion af fossil energi i landbrug og transport (AR5-værdier anvendt). Der er pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord skal beregnes med henblik på at indregne det i landbrugets udledninger og i hvilken udstrækning det vil blive muligt. I effekten af virkemidlerne (Bilag 1), som danner grundlag for beregning af reduktionspotentialerne er LULUCF bidraget adderet til de øvrige poster. Desuden er det anført om virkemidlet umiddelbart kan indgå i den nationale emissionsopgørelse, samt om der er væsentlige tekniske, miljømæssige og sundhedsmæssige barrierer for implementeringen.

Virkemiddel	Udbredelse 2020	Potentiel udbredelse	Reduktion i alt	Emissions-opgørelse	Væsentlige barrierer
Husdyrproduktion					
Anvendelse af metanreducerende tilsætningsstoffer i foder til kvæg	0	425.000 køer	572	Ja	Nej
Generelle ændringer i foderrationen	?	567.000 køer	236 ¹	Ja	Nej
Øget fodring med fedt til kvæg	0	567.000 køer	202	Ja	Nej
Husdyrgødning					
Forsuring af gylle i stalden	5%	100%	1.679	Ja	Ja

Bioforgasning af gylle	23%	100%	1.804	Ja	Nej
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og bioforgasning	1%	100%	2.667	Nej	Nej
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og lavdosis forsuring i gyllelagre	0%	100%	1.602	Nej	Ja
Hyppig udslusning af gylle, opsamling og afbrænding af gylle	0%	100%	1.508	Nej	Ja
Afgrødeproduktion					
Halm til forgasning (pyrolyse) med biochar retur	0 ha.	1.000.000 ha	1.760	Ja	Ja
Præcisionsjordbrug	110.000 ha.	2.250.000 ha	370	Ja	Ja
Efterafgrøder	689.000 ha.	1.000.000 ha	278	Ja	Nej
Nitrifikationshæmmere til husdyrgødning+handelsgødning	0 kt N	385 kt N	416	Ja	Måske ²
Arealanvendelse					
Paludikultur – tidligere drænet omdrift + vedvarende græs	0 ha.	10.000 ha	330	Ja	Ja

¹Reduktionen er beregnet ud fra den potentielle reduktion i dyrenes emission af enterisk metan UDEN hensyn til, at ændret foderration kan give større drivhusgasemission. ²Der kan i forbindelse med anvendelse af nitrifikationshæmmere være effekter på økotoksikologi og udvaskning af tilsætnings- og nedbrydningsprodukter til grundvand, som bør afklares inden udbredt anvendelse. Kvælstofindhold i husdyrgødning estimeret fra Børsting et al. (2021).

Af tabel 2.1 fremgår, at der er et betydeligt potentiale for reduktion af udledningen af drivhusgasser fra landbruget ved implementering af en række af de mest effektive virkemidler. Mange af disse kræver dog investeringer i fx stalde med gyllekøling eller hyppig udslusning, udbygning af bioforgasningskapacitet, nye teknologier som pyrolyseanlæg og bioraffineringsanlæg, hvor økonomien stadig er usikker. En fuldstændig liste over de i rapporten inkluderede virkemidler og deres potentialer kan findes i afsnit 9.

Det fremgår af tabellen at selvom tiltagene ikke nødvendigvis kan kombineres, er der et potentiale for at reducerede udledningerne på henved 6.5 mill. ton CO₂-ækv. Hertil kommer de øvrige virkemidler, der er omtalt i rapporten. Altså en betydelig mulig reduktion af de totale udledninger fra landbrugssektoren, som omtrent lever op til de politiske målsætninger i Aftale om grøn omstilling. Mange af virkemidlerne er imidlertid lidt eller slet ikke udbredt for nærværende.

De fleste af virkemidlerne vil umiddelbart kunne indgå i den nationale emissionsopgørelse. Der er dog for en del af virkemidlerne behov for yderligere dokumentation af tiltagets effekt på emissionerne. Dette gælder bl.a. for brugen af nitrifikationshæmmere til gødning, nitrat i foderet og forsuring/køling af gyllen. Der vil desuden være behov for bedre indsamling af aktivitetsdata til opgørelse af effekterne i den nationale opgørelse og sidst men ikke mindst i forbindelse med bedriftsregnskaber. Dette gælder for en række tiltag fx brug af hyppig udslusning gylle, forsuring af gylle og overdækning af gyllebeholder, hvor der er brug for oplysninger om hvilke kombinationer af tiltag landbrugene anvender, fx hvorvidt flydelag

kombineres med overdækning. Såfremt mere præcise og differentierede emissionsfaktorer kan estimeres, vil kravene til og omfanget af indsamling af aktivitetsdata ofte øges. Dette kunne fx være staldtemperatur, gylletemperatur eller satellitdata og klimaforhold i forbindelse med afgrødevækst og markoperationer. Generelt er der således behov for bedre opgørelse af omfanget samt bedre specifikation af anvendelsen af de forskellige teknologier, hvis en række tiltag retvisende skal kunne indgå i den nationale opgørelse.

Det fremgår, at store emissionsreduktioner kan opnås gennem teknologiske løsninger til reduktion af landbrugets udledninger og kombinationer af disse. Disse teknologier skal dog tænkes sammen med de mange andre målsætninger for landbrugets produktion og miljøpåvirkninger. Der er gode eksempler på synergier. Generelt vil virkemidler til reduktion af N-udvaskningen have en positiv effekt via mindsket indirekte udledning af lattergas og ofte mindre behov for N-tilførsel i gødning, og dermed nedsat direkte udledning. Nitrifikationshæmmere kan være med til at reducere nitratudvaskning i forårsperioden og forsure af gyllen reducerer ammoniakfordampning. Også på disse områder er der dog brug for mere viden og bedre kortlægning.

Analysen understreger, at der også fremover vil være et stort behov for yderligere forskning i reduktion af landbrugets klimagasser. Dette gælder både med hensyn til nye driftsformer og teknologier med lavere udslip, men også i høj grad med hensyn til bedre kvantificering af de aktuelle udslip og dokumentation af effekter af allerede tilgængelige virkemidler. For en række af de virkemidler, der indgår i dette katalog, vil der være brug for yderligere forskning og dokumentation, før de kan indgå som en del af den danske nationale emissionsopgørelse. Det gælder fx for anvendelse af metanreducerende tilsætningsstoffer i foder til kvæg, forsuring af gylle i stalden til reduktion af metanudledning og anvendelse af nitrifikationshæmmere til reduktion af lattergasudledning. Teknologier som præcisionsjordbrug og anvendelse af biochar er langt fra færdigudviklede og forventes at kunne bidrage væsentlig mere til at nedbringe udledningerne end det er tilfældet i dag. I kapitel 9 i rapporten er igangværende projekter til at kvantificere effekten af såvel nye som kendte virkemidler kort beskrevet og en række nye forskningsbehov identificeret.

Referencer

Børsting, C.F. (Red.), Hellwing, A.L.F., Sørensen, M.T., Lund, P., van der Heide, M., Møller, S.H., Kai, P., Nyord, T., Aaes, O., Clausen E., Tybirk, P., Holm, M., Hansen, M.N., Jensen, H.B., Bækgaard, H. (2021) Normtal for husdyrgødning. DCA Rapport 191 • DECEMBER 2021 • RÅDGIVNING

Energistyrelsen, 2020. Basisfremskrivning 2020 – Danmarks Klima- og Energifremskrivning.

Hutchings, N., Lærke, P. E., Munkholm, L. J., Elsgaard, L., Kristensen, T., Rasmussen, J., Lund, P., Børsting, C. F., Løvendahl, P., Mikkelsen, M. H., Albrechtsen, R., Gyldenkerne, S., Møller, H. B., Hansen, M. J., Feilberg, A., & Adamsen, A. P. S., (2020). Opdatering af effekter og potentialer af klimavirkemidler til anvendelse i landbrug, Nr. 2019-0035910, 23 s., mar. 02, 2020.

Olesen, J.E., Petersen, S.O., Lund, P., Jørgensen, U., Kristensen, T., Elsgaard, L., Sørensen, P., Lassen, J. (2018).
Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget. DCA rapport, nr. 130, bind 130, DCA - Nationalt
Center for Fødevarer og Jordbrug,
<<http://web.agrsci.dk/djfpublikation/index.asp?action=show&id=1273>>

Summary in English

In connection with the EU's 2030 target for the reduction of greenhouse gas emissions and the agreement on the green transformation of Danish agriculture, an updated knowledge base is desired on possible means of reducing greenhouse gas emissions within agriculture. This report provides an overview of the effects, potentials, uncertainties, and barriers of a number of measures that can contribute to this. The report is based on previous assessments (Olesen et al., 2018; Hutchings et al., 2020).

There are many different sources of greenhouse gases from agriculture. The largest contributions come from methane and nitrous oxide, i.e. because these greenhouse gases have respectively 28 and 265 times stronger greenhouse gas effects than carbon dioxide when seen over a 100-year period (GWP-100). To facilitate the comparison of the emissions of all types of greenhouse gases, the amount of other greenhouse gases is converted to the amount of CO₂ that would produce the same greenhouse effect over 100 years - the so-called CO₂ equivalent (CO₂-eq). In addition to the emissions from the agricultural sector, a separate calculation for the LULUCF of changes in soil carbon content has been made, where increased carbon storage or reduced emissions will reduce the CO₂ load. Increased carbon storage may however not fully contribute to fulfill Denmark's reduction obligations, as there is a ceiling on the use of LULUCF credits, under which carbon storage in agricultural land is included. Furthermore, fuel savings in agriculture or in the transport sector (from increased use of biogas) are recognized as a reduction in CO₂ emissions.

The measures to reduce agriculture's greenhouse gas emissions are divided in the report into initiatives around 1) Livestock production, 2) Livestock manure, 3) Crop production, and 4) Land use. The effect of a measure is in principle calculated for a single year of implementation, seen over the 100-year period, which the use of GWP-100 values implies. Carbon storage in the soil is, however, difficult to fit into such a fixed scheme since net storage depends on the starting point for carbon content in the soil. In the Danish reporting under the UNFCCC, it is estimated that 12% of carbon input in plant residues is stored in the soil over a 20-year period (Mikkelsen et al, 2022). In this report, it is therefore assumed that the carbon storage effect of changes in the supply of plant residues can be factored in as 12% of the added carbon quantity, and that the duration of this effect is 20 years, after which a new equilibrium level has been reached. Thus, consistency with the national inventory report is maintained. At the moment, it is not clear how the contribution from carbon sequestration in soils should be calculated in order to include it in the agricultural emissions and to which extent this will be allowed in regulations.

Since the net effect of many of the instruments relating to crop production and land use are calculated as a difference between carbon storage in the soil and N₂O emission from applied fertiliser, which is also very uncertain, there will often be doubts as to whether the net effects of these instruments are positive or negative. The effects of the measures are also basically calculated for each individual measure alone, without taking into account possible interactions with other effects. However, chain effects have been described with the simultaneous or sequential use of several technologies for handling livestock manure. In

general, the stated values for greenhouse gas reduction cannot therefore be immediately summed up. The effect of the reduction measures depends on the chosen reference scenarios. These are detailed in chapter 4 concerning animal production, animal manure and crop husbandry.

The measures described in the report in chapter 5-8 vary considerably in their effects and side effects. Furthermore, there will be great variation in their cost-effectiveness. For a measure to be relevant, it must have a significant effect on total emissions, it must be able to be implemented in practice without significant negative side effects and be economically competitive. Finally, the effect must be well documented so that it can be included in the national emissions inventory (Olesen et al, 2018).

In table 3.1, the reduction by full implementation of some of the most effective measures within the four categories is calculated based on available activity data from 2020 (Energistyrelsen, 2020 and Line Maj Stranges, pers. comm., 04.01.2023). The effects depend on how the individual measures are combined; thus, the greatest effect of biogasification is obtained if it is combined with frequent venting. It must be emphasized that there is often considerable uncertainty about how large the potential implementation or prevalence of a measure may become in the future and not least the timeframe for implementation.

Table 3.1 *The reduction potential for greenhouse gases using selected measures calculated in kt CO₂-eq/year based on available activity data from 2020 seen in relation to the maximum possible implementation described under the individual measures (number of livestock, amount of fertilizer or hectare). Some of the measures are calculated for different groups of animals or types of livestock manure. Reduction in emissions is calculated as the total effect of reduction in nitrous oxide and methane, increased carbon storage and reduction of fossil energy in agriculture and transport (AR5 values used). However, it is not pt. clear how the contribution from carbon sequestration in soil (LULUCF) should be calculated in relation to include it in the emissions from agriculture and too which extent it will be possible in the future. It is thus only with reservation that this contribution has been added directly to the other contributions (in annex 1) to calculate the net climate effect of the measures. Finally, it is stated whether the measures can immediately be included in the national emissions inventory, as well as whether there are significant technical, environmental and health barriers to their implementation.*

Greenhousegas Reduction measure	Implemented by 2020	Potentiell implementation	Reduction in total	Emissions- inventory	Significant barriers
Animal husbandry					
Use of metan-reducing additives in feed to cattle	0	425.000 cows	572	Yes	No
General changes in the feed ration	?	567.000 cows	236	Yes	No
Increased feeding of fat to cattle	0	567.000 cows	202	Yes	No
Animal manure					
Acidification of slurry in the stable	5%	100%	1,679	Yes	Yes
Biogasification of slurry	23%	100%	1,804 ³	Yes	No
Frequent flushing of slurry from stables and Biogasification	1%	100%	2,667 ³	No	No
Frequent flushing of slurry from stables and low dosis	0%	100%	1,602	No	Yes

acidification in slurry tanks					
Frequent flushing of slurry from stables and flaring of methane from slurry tanks	0%	100%	1,508	No	Yes
Crop husbandry					
Straw used for pyrolysis with biochar returned to field	0 ha.	1,000,000 ha	1,760	Yes	Yes
Precision agriculture	110,000 ha.	2,250,000 ha	370		
Catch crops	689.000 ha.	1.000.000 ha	278	Yes	No
Nitrifications inhibitors to slurry and fertilizer	0 kt N	385 kt N	416	Yes	No ²
Land use					
Paludi culture	0 ha.	10.000 ha	330	Yes	No

¹The reduction is calculated based on the potential reduction in the animals' emission of enteric methane WITHOUT taking into account that a changed feed ration may result in greater greenhouse gas emissions. ²In connection with the use of nitrification inhibitors, there may be effects on ecotoxicology and leaching of addition and decomposition products into groundwater, which should be clarified before widespread use. Nitrogen content in livestock manure estimated from Børsting et al. (2021).

Table 3.1 shows that there is considerable potential for reducing the emission of greenhouse gases from agriculture by implementing several of the most effective measures. However, many of these require investments in e.g., stables with slurry cooling or frequent discharge, expansion of biogasification capacity, new technologies such as pyrolysis plants and biorefining plants, where the economy is still uncertain. A complete list of the measures included in the report and their potential can be found in chapter 9.

It appears from the table that although the measures cannot necessarily be combined, there is a potential for reducing emissions of around 6.5 million tonnes of CO₂-eq to which the other measures mentioned in the report may be added. A significant possible reduction of the total emissions from the agricultural sector, which does approximately meet the political objectives. The current prevalence of many of the measures is, however, small.

Most of the measures will immediately be able to be included in the national emissions inventory. However, for some of the measures there is a need for further documentation of the measure's effect on emissions. This applies, among other, to for the use of nitrification inhibitors for fertilizer, nitrate in the feed and acidification/cooling of the slurry. There will also be a need for better collection of activity data for calculating the effects in the national inventory and last but not least in connection with farm-level accounting. This applies to a number of measures, e.g., use of frequent manure removal, acidification of manure and covering of manure containers, where information is needed on which combinations of measures the farms use, e.g. whether floating layers are combined with covering. If more precise and differentiated emission factors can be estimated, the requirements for and scope of activity data collection will often increase. This could, for example, be temperature in stables, slurry temperature or satellite data and climate conditions in connection with crop growth and field operations. In general, there is thus a need

for a better calculation of the scope and better specification of the use of the various technologies, if a number of measures are to be fairly included in the national inventory.

It appears that large emission reductions can be achieved through technological solutions for reducing agricultural emissions and combinations of these. However, these technologies must be considered together with the many other objectives for agricultural production and environmental impacts. There are good examples of synergies. In general, measures to reduce N leaching will have a positive effect via reduced indirect emission of nitrous oxide and less need for N fertilisation and thus reduced direct emission. Nitrification inhibitors can help reduce nitrate leaching in the spring period and acidifying manure reduces ammonia volatilization. In these areas too, however, more knowledge and better mapping is needed.

The analysis emphasizes that in the future there will also be a great need for further research into the reduction of agricultural greenhouse gases. This applies both regarding new modes of operation and technologies with lower emissions, but also to a large extent with regard to better quantification of the current emissions and documentation of the effects of already available measures. For several of the measures included in this catalogue, further research and documentation will be needed before they can be included as part of the Danish national emissions inventory. This applies, for example, to the use of methane-reducing additives in feed for cattle, acidification of manure in the barn to reduce methane emissions and the use of nitrification inhibitors to reduce nitrous oxide emissions. Technologies such as precision farming and the use of biochar are far from fully developed and are expected to be able to contribute significantly more to reducing emissions than is the case today. In chapter 9 of the report, ongoing projects to quantify the effect of both new and known greenhouse gas reduction measures are briefly described and a number of new research needs are identified.

References

- Børsting, C.F. (Red.), Hellwing, A.L.F., Sørensen, M.T., Lund, P., van der Heide, M., Møller, S.H., Kai, P., Nyord, T., Aaes, O., Clausen E., Tybirk, P., Holm, M., Hansen, M.N., Jensen, H.B., Bækgaard, H. (2021) Normtal for husdyrgødning. DCA Rapport 191 • DECEMBER 2021 • RÅDGIVNING
- Energistyrelsen, 2020. Basisfremskrivning 2020 – Danmarks Klima- og Energifremskrivning.
- Hutchings, N., Lærke, P. E., Munkholm, L. J., Elsgaard, L., Kristensen, T., Rasmussen, J., Lund, P., Børsting, C. F., Løvendahl, P., Mikkelsen, M. H., Albrechtsen, R., Gyldenkerne, S., Møller, H. B., Hansen, M. J., Feilberg, A., & Adamsen, A. P. S., (2020). Opdatering af effekter og potentialer af klimavirkemidler til anvendelse i landbrug, Nr. 2019-0035910, 23 s., mar. 02, 2020.
- Olesen, J.E., Petersen, S.O., Lund, P., Jørgensen, U., Kristensen, T., Elsgaard, L., Sørensen, P., Lassen, J. (2018). Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget. DCA rapport, nr. 130, bind 130, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug,
<<http://web.agrsci.dk/djfpublikation/index.asp?action=show&id=1273>>

3 Indledning

Forfattere: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi og Anders Peter Adamsen, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Frederik Rask Dalby, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Med de nuværende tiltag mod udledningerne af drivhusgasser fra landbruget inklusive arealanvendelse og energiforbrug forventes disse at falde fra 15,9 mio. i 2020 til 15,1 mio. ton CO₂-ækv i 2030, men vil ikke desto mindre udgøre henved 45 % og en stigende andel af Danmarks samlede udledninger på grund af større reduktioner i andre sektorer (Energistyrelsen, 2022). Som en del af energiaftalen fra 2018, har det danske folketing besluttet, at Danmark skal arbejde frem mod en netto-nul udledning af drivhusgasser i EU og Danmark i senest i 2050, dvs. et klimaneutralt samfund. På den kortere bane ønskes udledningen af drivhusgasser reduceret med 70 % i 2030 set i forhold til niveauet i 1990 i henhold til Klimaloven af 2020 (Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, 2020), som blev vedtaget af et bredt flertal i folketinget. Som en del af EU's klima- og energipolitik har EU-kommissionen endvidere tildelt Danmark et reduktionsmål på 39 % i forhold til niveauet i 2006 for de ikke-kvotebelagte sektorer, som landbruget udgør en del af. Endeligt har et bredt flertal af folketingets partier i 2021 indgået en Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug (Ministeriet for fødevarer, landbrug og fiskeri, 2021), der fastsætter et bindende reduktionsmål for land- og skovbrugssektorens drivhusgasudledninger på 55-65 % ift. 1990-udledningen svarende til, at land- og skovbrugssektorens drivhusgasudledninger skal nedbringes med ca. 6,1-8,0 mio. t. CO₂-ækv i 2030. I aftalen vurderes, at der pt. er for få virkemidler til rådighed og at paletten derfor skal udvides med inddragelse af nye teknologier og løsninger. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri har derfor bedt DCA om en oversigt over og en vurdering af mulige virkemidler til reduktion af drivhusgasudledningerne inden for landbruget.

I nærværende rapport opdateres Tabel over klimaeffekter for virkemidler i landbruget, den såkaldte Klimavirkemiddeltabel (se bilag 1). I forbindelse med opdateringen er der tilføjet en detaljeret beskrivelse af alle virkemidler, således indgår klimavirkemiddeltabellen nu i Klimavirkemiddelkataloget. Her gives en oversigt over en række potentielle tiltag til reduktion af landbrugets udledninger, og effekter, potentialer og barrierer beskrives og vurderes. Der er en lang række mulige virkemidler inden for landbruget. Disse er alle kendetegnet ved at indeholde et større eller mindre element af biologiske processer, som typisk er vanskeligere at kvantificere og styre og har større usikkerhed forbundet med udfaldet end rent tekniske løsninger. Denne usikkerhed forsøges beskrevet sammen med teknologernes udviklingsstade og fremtidige muligheder for forbedringer. Det er intentionen, at kataloget skal være dynamisk og opdateres årligt, idet nærværende udgave fortrinsvis beskriver de virkemidler som indgik i klimavirkemiddeltabellen fra 2020 (Petersen, 2020). Der er derfor inkluderet en oversigt over mulige nye virkemidler i bilag 2 til rapporten (Boblerlisten).

Formålet med denne rapport er at beskrive en række virkemidler til reduktion af landbrugets udledning af drivhusgasser og kvantificere effekten. Virkemidlerne er opdelt på tiltag omkring 1) Husdyrproduktion, 2) Husdyrgødning, 3) Afgrødeproduktion, og 4) Arealanvendelse.

I rapporten vurderes effekterne og potentialet for implementering af en række virkemidler til reduktion af landbrugets drivhusgasudledning. Potentialerne med hensyn til tiltagene er beregnet for hvert enkelt tiltag alene, uden hensyntagen til eventuelle samspil med andre effekter, og de angivne værdier for drivhusgasreduktion kan derfor ikke umiddelbart summeres. For opgørelse af tiltag til behandling af husdyrgødning (gylle) er der dog beskrevet en række kombinationer og kædebetragtninger. Nogle af tiltagene vil kunne summeres, mens andre vil interagere med hinanden eller udelukke samtidig implementering. Et eksempel på dette er de forskellige arealtiltag, hvor der naturligvis ikke kan dyrkes fx energiafgrøder samtidig med efterafgrøder. For nogle tiltagene er energiforbrug og substitution af fossil energi (fra biogas) også indregnet.

De nævnte virkemidler, og deres effekt på drivhusgasemissionen, afspejler et teknisk muligt, maksimalt bud på udbredelsen af de valgte virkemidler, ligesom vurderingerne er baseret på de nuværende rammevilkår omkring landbrugsproduktionen. I det følgende kapitel beskrives beregningsmetoderne til at estimere effekterne af de omtalte klimavirkemidler.

Referencer

Energistyrelsen, 2022. Klimastatus og -fremskrivning, 2022

https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Basisfremskrivning/kf22_-_samlet_rapport.pdf

Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet, 2020. Lov om Klima.

<https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2020/965>

Ministeriet for fødevarer, landbrug og fiskeri, 2021. Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug.

fvm.dk/landbrug/aftale-om-groen-omstilling-af-dansk-landbrug

Petersen, S.O. (2020). Opdatering af klimaeffekter for virkemidler i landbruget bl.a. som følge af nyt

kvælstofvirkemiddelkata-log - med tilføjelse, 11 s.

https://pure.au.dk/portal/files/194923543/Tilføjelse_til_Opdatering_af_klimatabel_18082020_rev_ver.pdf

4 Referencesituationer og beregningsmetoder for effekter og potentialer af klimavirkemidler

Forfattere: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Anders Peter Adamsen, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Med mindre andet er angivet, er samtlige beregnede klimagasudledninger anført som årlige værdier. Der er her benyttet IPCC (2014) AR5 guidelines for emissionsberegninger samt opvarmningseffekter af metan og lattergas svarende til 28 og 265 gange CO₂ over en 100-årig horisont. Disse opvarmningseffekter er under konstant revision i forbindelse med IPCC's vurderingsrapporter fx AR6 (IPCC, 2021), men er i denne rapport fastsat til de samme værdier som anvendes i den nationale emissionsopgørelse for 2021 dvs. AR5. Beregninger i henhold til både AR4 (IPCC, 2006), AR5 og AR6 kan findes i bilag 1. I tabel 4.1 er angivet værdierne af de såkaldte Global Warming Potentials (GWP-100) i 100-årigt perspektiv for de vigtigste landbrugsrelaterede klimagasser i henhold til de seneste tre IPCC assessment reports.

Tabel 4.1 Global warming potentials i 100 årigt perspektiv i henhold til AR4 (IPCC2006), AR5 (IPCC, 2014) og AR6 (IPCC, 2021).

Drivhusgas	AR4	AR5	AR6
CO ₂	1	1	1
CH ₄	25	28	27
N ₂ O	298	265	273

De anvendte emissionsfaktorer og beregnede kulstoflagringer dækker over en stor variation i praksis afhængig af bl.a. jordbunds- og vejrforhold. For nogle situationer, hvor fx en lille nettoeffekt fremkommer som en differens mellem to eller flere store bidrag, er der særligt store usikkerheder forbundet med de beregnede udledninger, og hermed også til effekter af tiltag til emissionsreduktioner. Usikkerhederne er kort beskrevet under de enkelte tiltag, hvor dette har betydning for opgørelsen af tiltagets virkning.

Kvantificeringen af klimavirkemidlernes effekt bygger på retningslinjer udarbejdet af IPCC, men er derudover også afhængige af hvilken situation, der tages udgangspunkt i, den såkaldte referencesituation. I det følgende gøres kort rede for hvilken referencesituation, der er anvendt for de forskellige kategorier af virkemidler og hvordan effekterne er beregnet i forhold hertil.

4.1 Husdyrproduktion og husdyrgødning

Forfatter: Anders Peter Adamsen og Frederik Rask Dalby, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Anders Feilberg, Institut for Bio- og Kemiteknologi

For hver teknologi (klimavirkemiddel) er der valgt et referencesystem, som klimaeffekten relateres til. For deciderede teknologier, fx gyllekøling eller hyppig udslusning af gylle, er referencesystemerne tilsvarende stalde uden gyllekøling eller med udslusning ved en gyllehøjde på ca. 35 cm. Der er i enkelte tilfælde også sammenlignet staldsystemer f.eks. ved malkekøer, selvom et staldsystem som sådan ikke er en teknologi, der uden videre kan implementeres. Dette er for at vise potentialerne og kan bruges til fremtidige valg af staldsystemer, der både har lave emissioner af ammoniak og klimagasser.

Potentialet af en teknologi er vurderet ud fra udbredelsen af teknologien i et givent staldsystem eller lager i 2020 samt en potentiel udbredelse af det pågældende staldsystem. Kriteriet for om teknologien kan udbredes beror på en vurdering af om det er teoretisk muligt. Der er ikke taget højde for omkostninger eller om det teknisk set ville være muligt at implementere inden 2030.

Den grundlæggende enhed for modelberegninger er mængden af udskilt organisk stof (kaldet VS efter flygtigt stof, på dansk glødetab, på engelsk Volatile Solids) fra dyrene. Dette benyttes til at estimere metanproduktionen. For at estimere ammoniakemissionen, som er kilde til den såkaldte indirekte lattergasproduktion, regnes der også i gyllemængder. I den seneste klimavirkemiddeltabel anvendes der en gennemsnitlig svine- og kvæggylle, hvilket var tilstrækkeligt tidligere. I de sidste par år har der været stort fokus på hyppig (ugentlig eller oftere) udslusning af gylle, som er blevet modelleret på staldtypeniveau.

I forbindelse med de mere detaljerede beregninger har det været nødvendigt at definere reference-situationerne mere præcist. For teknologier som hyppig udslusning er det let, idet referencen er udslusning ved maksimal acceptabel gyllehøjde eller efter afslutning af et hold. Det samme med gyllekøling, hvor referencen er tilsvarende stald uden gyllekøling. For teknologier som omfatter staldtyper, er det mere kompliceret. Et staldsystem til kvæg med spalter og med gylle opbevaret i en ringkanal har en væsentlig højere emission af metan end stalde med fast gulv og hyppig skrabning hen til en tværkanal. Det er muligt at ombygge stalde med spaltegulve til stalde med faste gulve, som har hyppig udslusning. Dette er dog en større ombygning.

Det er forsøgt at opgive klimaeffekterne i CO₂-ækv. per ton gylle. I de fleste beregninger er der anvendt ton gylle ab dyr, hvor vandspild, vaskevand og strøelse ikke indgår. Mængden af gylle varierer mellem ab dyr, ab stald, hvor strøelse, vandspild og vaskevand medregnes, og endelig ab lager, hvor der ved lagre uden vandtæt overdækning også opsamles regnvand og der sker en fordampning.

Ved emissioner af klimagasser fra stalde og lagre er den direkte emission af metan langt den vigtigste klimagas. I nogle af de efterfølgende teknologier er eksempelvis emissioner af indirekte lattergas (dannet fra ammoniak) eller klimagasser til produktion af mineralisk gødning medtaget.

Klimaeffekten er beregnet ud fra IPCC AR5-værdier over en 100-årig periode. Da metan er en gas med en relativ kort levetid i atmosfære (ca. 12 år), så er effekten af at reducere metan på kort sigt langt højere end effekten for lattergas eller CO₂. Det understreger vigtigheden af at fokusere på hurtigt at reducere emission af metan fra stalde og lagre og dermed bidrage til faldende atmosfæriske koncentrationer af metan inden for en kort årrække.

Teknologier er i de følgende afsnit placeret således, at først kommer virkemidler til stalde, derefter virkemidler til lagre, og til sidst kombinationer af virkemidler i både stald og lagre.

4.1.1 Beskrivelse af den anvendte model

Emissionerne af metan samt reduktionseffekter af teknologier (virkemidler) er simuleret i en model. Modellen er baseret på input værdier fra Normtal-systemet (Børsting et al., 2021) og en model, der beskriver metanproduktion ud fra omsætning af organisk materiale, kaldet Arrhenius-modellen (Petersen et al., 2016). Denne model er tilsvarende den, der anvendes til den nationale opgørelse af metan.

Ud fra beskrivelse af staldtyper, højder og arealer af gyllekummer, dage mellem udslusninger af gylle og højde af restgylle beregnes gyllens gennemsnitlige opholdstid (Hydraulisk RetentionsTid, HRT) (Adamsen et al., 2021). Der anvendes parameterværdier fra Petersen & Gyldenkerne (2020) og Møller et al. (2022).

4.1.2 Usikkerheder på den anvendte model

Der er usikkerheder forbundet med parameterværdierne:

- LnA-værdier
- Gylletemperaturer i stalde og lagre
- Udskilt organisk stof (VS)
- Forhold mellem let-omsætteligt organisk stof (VSd) og tungt-omsætteligt organisk stof (VSnd) i stalde
- Forholdet mellem metan og CO₂ i den dannede gas
- Effekt af restgylle
- Omsætning i biogasanlæg
- Udbringningsmønstre for gylle

4.1.2.1 LnA-værdier

LnA er en præ-eksponentiel faktor, som ikke er direkte relateret til et specifikt fysisk fænomen eller en kemisk reaktion. Dette skyldes, at Arrhenius ligningen beskriver summen af processer, der fører til

metanproduktion. Man kan derfor sige at LnA afspejler potentialet for en metanproduktion, som påvirkes af gyllens sammensætning og nedbrydelighed samt mikroorganismernes aktivitet (særligt metanogener, som producerer metan) og tilpasning til miljøet i gyllelageret. Der differentieres mellem LnA og LnA' (LnA mærke). LnA knytter sig til nedbrydning af VS_d og LnA' knytter sig til VS_{tot}. I nærværende model benyttes LnA til simulering af metan-emission fra stalde, da der findes bedre og flere målinger af mængden af letnedbrydeligt organisk materiale (VS_d) fra stalde (Petersen et al., 2016). I lageret benyttes LnA'-værdier, da dokumentation for nedbrydeligt organisk materiale i lagre ikke er veldokumenteret og VS_{tot} og det kun er muligt at estimere VS_{tot}. Desuden skelnes der mellem LnA og LnA' mellem svin og kvæg. I tabel 4.2 er angivet benyttede værdier til i nærværende model.

Tabel 4.2 LnA værdier fra Petersen et al. (2016) og LnA' værdier fra Møller et al. (2022). Disse værdier benyttes i nærværende model til estimering af metanreduktionspotentialer for klimavirkemidler.

	LnA	LnA'
Svinegylle	31,3	30,3
Kvæggylle	31,2	29,2
Afgasset gylle		27,9

4.1.2.2 Gylletemperaturer i stalde og lagre

Der er regnet med en gennemsnitlig temperatur af gylle i svinestalde på 18,6°C. Nogle stalde har højere rumtemperatur, fx smågrisestalde, men indtil der foreligger bedre data for temperaturer for stalde fastholdes 18,6°C. For kvæggylle regnes med en gennemsnitlig temperatur på 12,8°C, der ligger nogle grader over den årsgennemsnitlige udetemperatur.

For gylletanke er der regnet med en gennemsnitlig månedstemperatur, og der er korrigeret for temperatur i gylle som beskrevet i Mikkelsen et al. (2016).

Da metanproduktion inden for relevante temperaturer i stalde og lagre er en tilnærmelsesvis eksponentiel kurve i forhold til temperatur, så vil varme perioder kunne medføre højere emissioner end beregnet ud fra gennemsnitlige værdier.

4.1.2.3 Udskilt organisk stof (VS)

Organisk stof beregnes ud fra foderindtag, producerede produkter, fx mælk, og tilvækst. Der udregnes en fordøjelighedsfaktor, som i normtallene er baseret på tørstof. Det vil være en fordel, hvis fordøjelighedsfaktor bliver baseret på organisk stof, så vil indholdet af salte være lettere at håndtere.

4.1.2.4 Forholdet mellem let-omsætteligt organisk stof (VS_d) og tungt-omsætteligt organisk stof (VS_{nd}) i stalde

Det er en af de mere komplicerede faktorer. I den såkaldte Arrhenius-model (Petersen et al., 2016) er andelen af VS_d estimeret i de udtagne prøver. Dels er den benyttede metode upraktisk at anvende, og dels er de estimerede forhold baseret på prøver udtaget fra stalde, og dermed er en del af det let-omsættelige organisk stof allerede omsat. Den oprindelige VS_d er estimeret ved at "fitte" værdier i modellen. Dette er sammenlignet med værdier fra B_0 og B_u som er henholdsvis den potentielle metanproduktion og den teoretiske mulige (Møller et al., 2004), og der er en god overensstemmelse. For svin regnes der med en VS_d på $0,7 \cdot VS_{tot}$ og for kvæg regnes med $0,42 \cdot VS_{tot}$.

Det er foreslået at undersøge, om man kan estimere VS_d ud fra udrådnings-test, der anvendes til at vurdere biogaspotential. Fordelen er, at der laves rigtig mange udrådnings-test på gylle til biogasanlæg, så der vil forelægge et større datasæt.

4.1.2.5 Forholdet mellem metan og CO_2 i den dannede gas

Især forholdet mellem metan og CO_2 i den dannede gas er kritisk, da det bruges til at beregne hvor meget organisk stof (VS) der er tilgængelig ved næste beregningstrin (følgende døgn). Det er især kritisk for metanproduktionen i lagre. Mikkelsen et al. (2016) har anvendt et CO_2/CH_4 -forhold på 3 (på mol eller volumenbasis). Det stemmer overens med Dinuccio et al. (2008) der fandt et CO_2/CH_4 forhold på 3 for frisk svinegylle inkuberet ved 25 °C og med et flow af atmosfærisk luft.

For kvæggylle fandt Dinuccio et al. (2008) et CO_2/CH_4 forhold på 13,6 under tilsvarende forhold.

For gylle opsamlet fra en svinestald og inkuberet under anaerobe (iltfrie) forhold er der fundet $CH_4/(CH_4 + CO_2)$ -forhold fra 21 og op til 40% (Feng et al., 2022). Dalby et al. (upubliceret) har fundet store forskelle mellem svinegylle fra en fortank, der blev inkuberet hhv. med et flow med atmosfærisk luft og et flow med kvælstof, hvilket indikerer en oxidation af metan i overfladen, hvor ilt kan diffundere ned (upubliceret data). Det vil ændre på CO_2/CH_4 forholdet. Grundet de forskellige biologiske processer, som bidrager til henholdsvis CO_2 og CH_4 produktion i gylle, vil CO_2/CH_4 forholdet i realiteten ændre sig over tid, hvilket forklarer hvorfor kraftigt varierende CO_2/CH_4 forhold er blevet rapporteret. I nærværende rapport benyttes en molar CO_2/CH_4 ratio på 3 for rå svine- og kvæggylle, mens der benyttes en molar CO_2/CH_4 ratio på 9 for afgasset gylle.

4.1.2.6 Effekt af restgylle

Mængden af gylle efter udslusning (tømning af gylle) i stalden er i modellen brugt som et udtryk (proxy) for hvor meget podningsmateriale, der er til stede. Restgylle indgår i beregningen af gyllens gennemsnitlige alder kaldet HRT (Hydraulic Retention Time). I tidligere opgørelse er restgylle ikke medtaget, hvilket kan give en underestimering af metanproduktionen.

4.1.2.7 Omsætning i biogasanlæg

Dette er beregnet ud fra DCA-rapporten Bæredygtig Biogas (Olesen et al., 2020). Beregninger omfatter kun organisk stof fra husdyrgødningen og ikke hvad der ellers tilføres et biogasanlæg.

4.1.2.8 Udbringningsmønstre for gylle

Det er i Mikkelsen et al. (2016) antaget at gylle udbringes i marts og april og derefter akkumuleres i gylletanke hen over året, samt at der ikke er forskel i udbringningsmønstre for kvæg- og svinegylle. Opgørelser viser imidlertid, at der er betydelig forskel på hvornår svinegylle og kvæggylle udbringes. Kvæggylle udbringes i højere grad på græsarealer hen over sommeren, ca. 28 % af den totale gyllemængde, hvorimod svinegylle udbringes primært i forårmånederne (Birkmose, 2020). Dette er medregnet i modellen i den nuværende opdatering.

4.1.3 Sammenligning med litteraturløst

I en review-artikel af Kupper et al. (2020) fandtes en median-emission fra svinegylle i gylletanke på gårdsskala på $0,55 \text{ g CH}_4 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ($n = 10$), hvilket giver $2,0 \text{ kg pr. m}^3$ for en gennemsnitlig opbevaring på 5 måneder. Kupper et al. (2020) angiver desuden en baseline udledning, hvor der vægtes i forhold hvornår på året der er målt og over hvor lang tid. Baseline udledningen er angivet til $0,68 \text{ g CH}_4 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ($n = 19$) svarende til $2,5 \text{ kg pr. m}^3$ for en gennemsnitlig opbevaring på 5 måneder.

I samme review-artikel fandtes en median-værdi på $0,75 \text{ g CH}_4 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$ ($n = 7$). Da kvæggylle ofte udbringes hen over sommeren på græsarealer er den gennemsnitlige opbevaring sat til 3 måneder. Det giver $1,6 \text{ kg pr. m}^3$. Den tilsvarende baseline udledning er $1,3 \text{ kg pr. m}^3$. Det skal understreges at disse emissionsværdier stammer fra forskellige lande og under forskellige klimatiske forhold.

4.1.3.1 Sammenligning med tidligere opgørelser

I beregninger af emissionerne og reduktioner af de forskellige virkemidler i nærværende katalog er metanproduktion og dermed reduktionspotentialt opjusteret for flere af teknologierne for gyllesystemer. I rapporten opjusteres reduktionspotentialt (i $\text{kg CO}_2\text{-ækv/ton gødning ab dyr}$) for flere af gylle- og gødningsbehandlingsteknologierne. Opjusteringerne skyldes ikke nye undersøgelser af de enkelte teknologiers reduktionseffekt, men en ny beregningsmetode, hvori Aarhus Universitet anvender nye reference-scenarier. Teknologierne reduktionseffekter blev tidligere beregnet ud fra reference-scenarier, der repræsenterede et gennemsnit af alle svinestalde og kvægstalde i Danmark, inklusiv dem med diverse miljøteknologier installeret. Endvidere blev metanproduktion relateret til gyllemængder ab lager, som er noget lavere end ab dyr, da der er mere gylle ab lager end ab dyr. Både før og nu beregnes metanproduktion på grundlag af udskilt organisk stof i kg per dyr , som så efterfølgende relateres til gyllemængder. I den tidligere beregning, som også ligger til grund for de nationale opgørelser, har man anvendt en model med længere tidsstep og større omsætning af organisk stof per $\text{kg produceret metan}$,

hvilket har medført en lavere metan-emission fra lagring af gylle. Dette er ændret i modellen anvendt til de nye beregninger i klimavirkemiddel-kataloget.

I de nye beregninger opdeles reference-scenarier på de enkelte dyre- og staldtyper. Det er mere kompliceret, men nødvendigt, da teknologier ikke kan eller vil blive anvendt i alle typer stalde af tekniske eller økonomiske grunde. Det er også en mere transparent metode.

Ved den sidste opdatering af klimavirkemiddeltabellen i 2020 (Hutchings et al., 2020, opdateret i Petersen, 2020) anvendtes DCE's estimer af de gennemsnitlige emissioner for kvæg- og svinegylle, som var på henholdsvis 1,48 kg og 2,39 kg CH₄ pr. ton gylle. Fordelingen i emission mellem stald og lager blev ligeledes baseret på DCE's opgørelser (Petersen et al. 2020). For svinegylle blev det estimeret at ca. 30 % af emissionen kom fra lageret, hvorimod det for kvæg var næsten 50 %.

I den nye rapport anvender Aarhus Universitet et "rent" reference-scenarie, altså en staldtype uden teknologi eller tiltag. En sådan "ren" reference har en højere basisemission af metan, end den gennemsnitlige reference. Derfor vil reduktionseffekten ved at tilføre teknologi til en "ren" referencestald være højere end ved tilførsel af teknologi til en gennemsnitlig referencestald (baseret på gennemsnitlig emission fra alle stalde), selvom reduktionseffekten af selve teknologien er uforandret i praksis. Det understreges igen at alle beregninger af reduktionseffekter er teoretiske, eller baseres alene på foreløbige undersøgelser.

Den nationale emissionsopgørelse ændrede metoden til beregning af CH₄ fra gødningshåndtering fra kvæg og svin i 2020/2021. Dette skete på baggrund af det på det tidspunkt mest opdaterede vidensgrundlag. Der udføres løbende forskning i CH₄-emissioner fra husdyrgødning, hvilket fører til ændringer i beregningsværdier og metoder. Disse bliver forsøgt indarbejdet i emissionsopgørelsen, når resultaterne er modne, dvs. publicerede og betragtet som repræsentative i en dansk sammenhæng. Dette vil i sagens natur altid komme senere end forskningsresultaterne og det forsøges også at undgå væsentlige ændringer på årlig basis.

Metoden, der anvendes i den nationale emissionsopgørelse, vil blive vurderet igen i 2023 med udgangspunkt i nye forskningsresultater siden den nuværende metode blev implementeret.

Referencer

- Adamsen, A.P.S., Hansen, M.J., Møller, H.B., (2021). Effekt af hyppig udslusning af gylle på metanproduktion, Nr. 2020-0166155, 9 s., jan. 12, 2021.
- Birkmose, T. (2020). Aktivitetsdata for udbragt husdyrgødning, 2016-2020. Notat fra SEGES.
- Børsting, C.F. (red.), Hellwing, A.L.F., Sørensen, M.T., Lund, P., van der Heide, M.E., Møller, S.H., Kai, P., Nyord, T., Aaes, O., Clausen, E., Tybirk, P., Holm, M., Hansen, M.N., Jensen, H.B., Bækgaard, H. (2021). Normtal for

husdyrgødning. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport Nr. 191
<https://dcapub.au.dk/djfpublikation/index.asp?action=show&id=1474>

Feng, L., Guldberg, L.B., Hansen, M.J., Ma, C., Ohrt, R.V. (2022). Impact of slurry removal frequency on CH_4 emission and subsequent biogas production; a one-year case study. *Waste Management*, 149, 199-206.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.06.024>

IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp.
doi:10.1017/9781009157896. Kupper, T., Hani, C., Neftel, A., Kincaid, C., Buhler, M., Amon, B., VanderZaag, A. (2020). Ammonia and greenhouse gas emissions from slurry storage - A review. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 300. <https://doi.org/ARTN 106963 10.1016/j.agee.2020.106963>

Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Gyldenkerne, S. (2016). Biogasproduktions konsekvenser for drivhusgasudledning i landbruget. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy.

Møller, H. B., Sommer, S.G., Ahring, B. (2004). Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass & Bioenergy*, 26(5), 485-495. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.008>

Møller, H.B., Sørensen, P., Olesen, J.E., Petersen, S.O., Nyord, T., Sommer, S.G. (2022). Agricultural Biogas Production—Climate and Environmental Impacts. *Sustainability* (Switzerland), 14(3), [1849]. <https://doi.org/10.3390/su14031849>

Petersen, S.O., Gyldenkerne, S. (2020). Redegørelse omkring forventede justeringer i beregning af metanemission fra husdyrgødning (Number Journal 2020-0066332).

Petersen, S.O., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., & Gyldenkerne, S., (2020). Justering af den beregnede emission af metan fra afgasset gylle, Nr. 2020-0096582, 9 s., jun. 08, 2020.

Petersen, S.O., Olsen, A.B., Elsgaard, L., Triolo, J.M., Sommer, S.G. (2016). Estimation of methane emissions from slurry pits below pig and cattle confinements. PLoS ONE, 11(8), 1-16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160968>

4.2 Afgrødeproduktion og arealanvendelse

Forfatter: Nicholas J. Hutchings, Jørgen E. Olesen, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmere: Steen Gyldenkærne og Ole-Kenneth Nielsen, Institut for Miljøvidenskab og Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

Vurderingerne af klimaeffekterne af virkemidler deles i to grupper, afhængig af om implementering betyder eller ikke betyder en ændring i arealanvendelsen og dermed i effekter på jordens kulstofpulje.

Følgende elementer indgår i beregningerne af drivhusgasemissioner:

- Den direkte lattergasemission, herunder emissionen fra handels- og husdyrgødning tilført arealet, planterester og nettomineralisering af organisk stof i jorden.
- Den indirekte lattergasemission fra ammoniakemission og nitratudvaskning.
- Kuldioxid emission fra kalk og urea tilført markerne.
- Fossil energi brugt til markoperationer og tørring af afgrøder.
- Ændring i netto-kulstoflagring i jorden.

Det antages, at virkemidlerne ikke påvirker antal husdyr eller husdyrproduktionens sammensætning, og dermed er der heller ikke effekter på emissioner fra husdyr eller husdyrgødningshåndtering. Den udbragte mængde husdyrgødning antages derfor at være uændret, og såfremt et virkemiddel reducerer N-gødskning, sker reduktionen alene i handelsgødning.

I beregningen af klimasideeffekten af N-virkemidler, som påvirker arealanvendelse, var referencesituationen (dvs. den nuværende arealanvendelse og driftsledelse) nogle gange et kornsædskifte og nogle gange en gennemsnitlig landbrugsjord. Med hensyn til dette, argumenterede Mikkelsen et al. (2022) at arealanvendelse i praksis også vil være et kornsædskifte. I tilfældet af at et virkemiddel kun påvirker en eller flere tabsposter under den samme arealanvendelse, er det kun nødvendigt at beregne effekten på de relevante tabsposter. Bemærk at beregningerne er gældende for frit drænende mineralske jord.

4.2.1 Standardværdier for emissioner af klimagasser

Referencesituationen for virkemidler, som indebærer en ændring i arealanvendelse, antages at være korndyrkning (Mikkelsen et al., 2022). Da det antages at husdyrgødningsproduktionen ikke ændres som følge af en implementering af virkemidler på marker, er det antaget, at der kun benyttes handelsgødning i referencesituationen. På baggrund af Mikkelsen et al. (2022), er N input i handelsgødning i referencesituationen 171 kg/ha/år (kontra 200 kg/ha/år i Eriksen et al., 2020).

Ammoniakemission indgår i klimaberegningen som en indirekte lattergaskilde. Bemærk at ammoniakemissionsfaktor for handelsgødning fra det seneste nationale beregninger er 0,04 kg NH₃-N/kg N, kontra 0,02 i Eriksen et al. (2020). N-udvaskning for standard-kornsædskiftet er 60 kg N/ha/år (Mikkelsen et al., 2022), hvilket ikke er væsentligt anderledes end de 64 kg N/ha/år benyttet i Eriksen et al. (2020). CO₂ emission fra kalk og urea antages at være 94 kg ækv/ha/år, som i Eriksen et al. (2020).

Et overblik over klimagasemissioner fra det anvendte standard-kornsædskifte er vist i tabel 4.3.

Tabel 4.3 Drivhusgasemissioner fra standard korndyrkning.

		kg N/ha/år	kg N ₂ O-N emission/ha/år	kg CO ₂ ækv/ha/år
N input		171		
Direkte N ₂ O emission	Gødning		1,71	712
	Planterester	70	0,70	292
Indirekte N ₂ O emission	Ammoniak	6,8	0,07	28
	N-udvaskning	60	0,28	115
Fossil energi				361
Kalk m.m.				94
Kulstoflagring				0
			Sum	1602

4.2.2 Kvælstofrelaterede emissioner

Direkte N₂O fra udbragt gødning = N i udbragt gødning * EF Direkte N₂O

Direkte N₂O fra planterester = N i planterester * EF Direkte N₂O

Indirekte N₂O fra ammoniakfordampning = N i handelsgødning * EF NH₃ fordampning (handelsgødning) * EF Direkte N₂O

Indirekte N₂O fra ammoniakfordampning = N i husdyrgødning * EF NH₃ fordampning (husdyrgødning) * EF Direkte N₂O

Indirekte N₂O fra N-udvaskning = N-udvaskning * EF Indirekte N₂O fra nitrat-udvaskning

Følgende standardværdier er brugt:

Fra IPCC (2013):

$\text{GWP-100 N}_2\text{O} = 265 \text{ kg CO}_2 \text{ ækv.}/\text{kg N}_2\text{O}$

Konvertering $\text{N}_2\text{O-N}$ til $\text{N}_2\text{O} = 44/(2 \times 14) = 1,571$

Emissionsfaktorer fra DCE (Mette Hjorth Mikkelsen, pers komm.):

- Direkte N_2O : $0,01 \text{ kg N}_2\text{O-N (kg N)}^{-1}$
- Indirekte N_2O fra nitrat-udvaskning = $0,0046 \text{ kg N}_2\text{O-N (kg N)}^{-1}$
- NH_3 fordampning (handelsgødning) = $0,04 \text{ kg NH}_3\text{-N (kg N)}^{-1}$
- NH_3 fordampning (husdyrgødning) = $0,091 \text{ kg NH}_3\text{-N (kg N)}^{-1}$

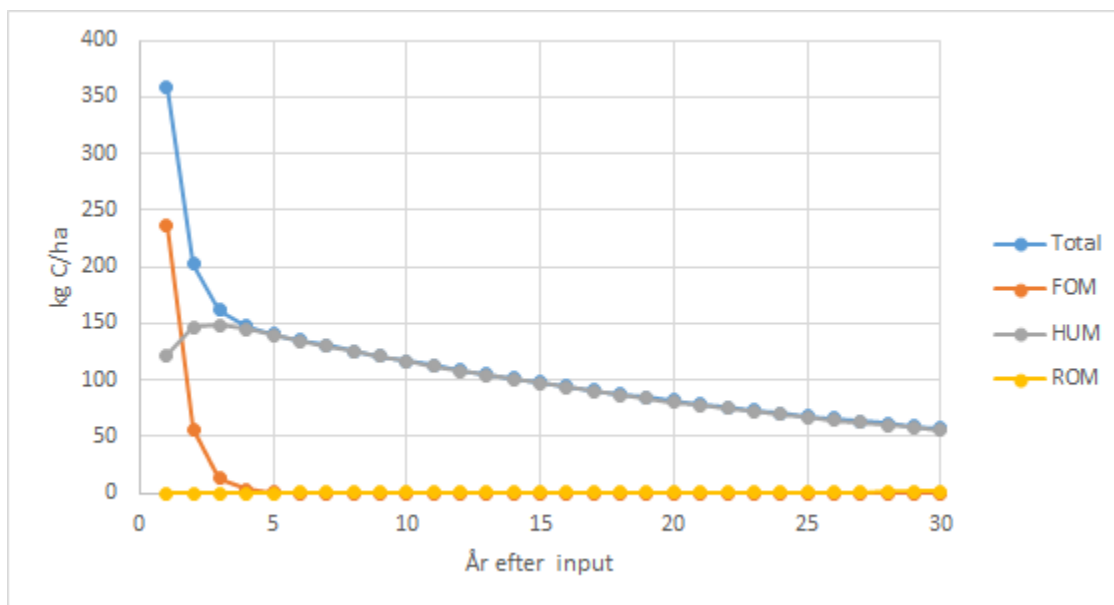
Beregning af N input i planterester er især vanskelig og usikker, fordi mængden er afhængig af afgrøde og udbytte. I Eriksen et al. (2020) er N input i planterester beregnet på baggrund af en relation mellem N i planterester og N input med data fra de den gang seneste nationale beregninger fra DCE (Nielsen et al. 2019). Tankegangen var og er, at der er en sammenhæng mellem gødningsnormen for en afgrøde og N-optagelsen i samme afgrøde. Metoden har den fordel, at den er gennemskuelig og kun har brug for N-gødsning som inputdata, men har en ulempe i at det er ikke muligt at skelne mellem afgrødetypen og især mellem etårige afgrøder og græs eller kløvergræs. Takket være forskellene i vækstform og driftsledelser, vil metoden formodentlig underestimere N input i planterester fra græs/kløvergræs og overestimere inputtet fra andre afgrødetyper. DCE beregner N input i planterester efter IPCC (2006), som bruger udbyttedata og afgrødetype. Disse inputdata henter DCE fra statistisk kilde på regionsniveauet og er afhængig af afgrødeblanding og udbyttelniveauer i det pågældende år. Til at udjævne årsvariationer, har vi her benyttet en relation mellem N i planterester og N input som er et gennemsnit over 10 år og ikke kun det seneste år. Endvidere har DCE for nylig opdateret deres beregningsmetode for N input i planterester. Tilsammen, er effekten at kg N input i planterester pr kg N input som handels- eller husdyrgødning øges fra 0,21 i Eriksen et al (2020) til 0,41 her.

4.2.3 Kulstoflagring i jord

Nogle virkemidler vil påvirke jordens kulstoflager, fordi de medfører en ændring i kulstofinputtet enten i planterester eller i husdyrgødning. Det tilførte kulstof i organisk stof nedbrydes af mikroorganismer i jorden. Kulstof i plantemateriale omsættes hurtigere end kulstof i husdyrgødning, hvor en stor del af det let omsættelige kulstof allerede er omsat i dyrene eller i gødningslageret (Thomsen et al., 2013). Tilsvarende vil kulstof tilført i biokul omsættes endnu langsommere og dermed sikre en mere vedvarende lagring af kulstof i jorden (Elsgaard et al., 2022). For kulstof tilført i plantemateriale vil størstedelen under danske forhold være nedbrudt i løbet af det første år efter tilførsel (figur 4.1). Det vil sige, at størstedelen af kulstof vender tilbage til atmosfæren som CO_2 medens en mindre del bliver tilbage i jorden i en mere resistent, humusagtig form, som kun langsomt bliver nedbrudt. I C-TOOL modellen (Taghizadeh-Toosi et al., 2014),

som bruges ved den danske afrapportering under UNFCCC, er halveringstiden for det friske organisk stof nogle måneder, medens den for det humusagtige organiske stof, er flere årtier. For en given mængde kulstofinput, er nedbrydning af organisk stof fra husdyrgødning lidt langsommere end for planterester, da cirka 10% af organisk stof i husdyrgødning regnes som humusagtigt.

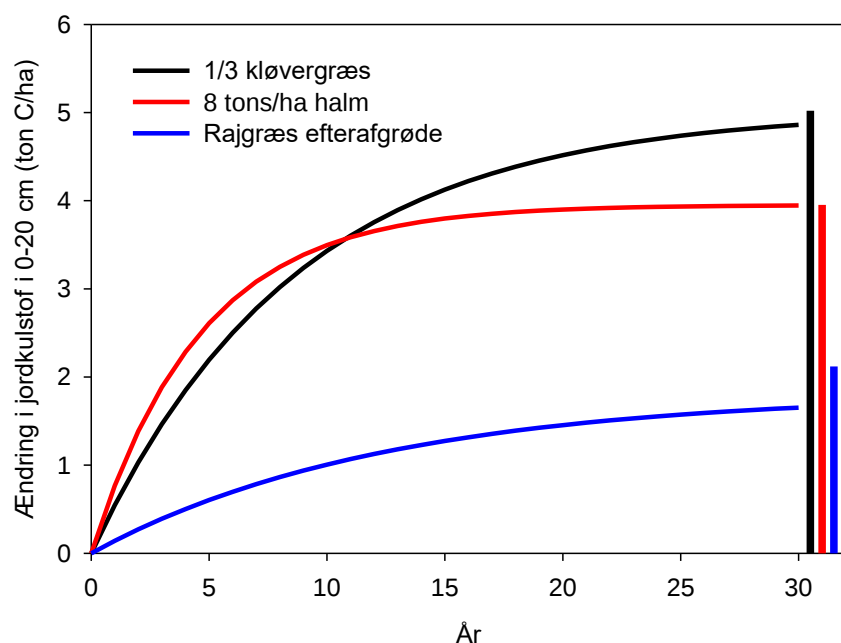
Nedbrydning over tid er vist i figur 4.1 beregnet med C-Tool modellen. Langt den størstedel af FOM nedbrydes i løbet af det første to år. En mindre del (16%) omdannes til HUM, som selv bliver nedbrudt over flere årtier. Kun en meget lille del aflejres mere permanent i ROM og dermed har HUM den største betydning for kulstoflagring over de første årtier efter tilførsel.



Figur 4.1 Ændringer i kulstoflagring i frisk organisk stof (FOM), humus organisk stof (HUM), resistent organisk stof (ROM) og total-kulstof over tid, efter 1 t ha^{-1} kulstofinput som FOM. Nedbrydningsrater; frisk organisk stof (FOM) = $1,44 \text{ år}^{-1}$, humus organisk stof (HUM) = $0,0366 \text{ år}^{-1}$, resistent organisk stof (ROM) = $4,63 \times 10^{-4} \text{ år}^{-1}$, humification = 0,16, romification = 0,012.

I den nationale opgørelse af klimabidrag opgøres ændringer i jordens kulstofindhold for dyrkede landbrugsarealer under LULUCF ved anvendelse af en simuleringsmodel for kulstof i jorden. Her anvendes C-TOOL modellen til at beregne årlige ændringer i jordens kulstofmængde baseret på nationale og regionale statistikker over input af kulstof i planterester og husdyrgødning. Kulstofinputtet fra afgrødernes planterester afhænger af hvilke afgrøder, der dyrkes og deres udbytter. Desuden spiller især halmfjernelse og dyrkning af efterafgrøder en rolle for kulstofinputtet. Ved opgørelse af ændringer i jordens kulstofindhold medregnes kun de stabile puljer (HUM og ROM) i modellen. Et centralt element i beregningerne er niveauet af kulstof i udgangssituationen, hvor de nationale opgørelser anvender en klassificering ud fra 8 regioner og tre jordtyper (Nielsen et al., 2020).

Ved konstant tilførsel af kulstof til jorden i organisk stof vil jordens kulstoflager over tid komme i ligevægt. Hvis niveauet for kulstoftilførsel ændres, vil der over et tidsrum ske en ændring i jordens kulstoflager indtil der opstår en ny ligevægt. Dette er illustreret i figur 4.2 baseret på langvarige forsøg med græs i sædskiftet, efterafgrøder og halmtilførsel. I disse forsøg er der kun målt i de øverste 20 cm af jordprofilen, og den samlede kulstoflagring vil derfor være større, da der også vil ske en lagring dybere end 20 cm. Det fremgår at væksten i kulstoflagringen aftager over tid, og at 90 % af effekten typisk er nået inden for 20 år. I den danske afrapportering under UNFCCC, er det estimeret at 12 % af kulstof input i planterester lagres i jorden over en 20-årig periode (Mikkelsen et al, 2022). Dette kan ses som den gennemsnitlige værdi af tilbageholdelsen af HUM over 20 år i figur 4.1. I denne rapport antages derfor, at kulstoflagringseffekten af ændringer i tilførsel af planterester kan indregnes som 12 % af den tilførte kulstofmængde, og at varigheden af denne effekt er 20 år, hvorefter der er opnået et nyt ligevægtsniveau. Dette nye ligevægtsniveau vil kun kunne opretholdes, hvis det nye niveau for tilførsel af organisk materiale bibeholdes.



Figur 4.2 Ændring i jordens kulstofindhold i de øverste 20 cm fra forsøg med dyrkning af en tredjedel af sædskiftet med kløvergræs (Jensen et al., 2022a), tilførsel af 8 tons halm per ha årligt (Jensen et al., 2022b) og dyrkning af rajgræsefterafgrøde hvert år (Jensen et al., 2022b). Kurverne viser tilpassede forløb for den målte udvikling i jordens kulstofindhold og søjlerne viser den beregnede ændring i kulstoflager ved ligevægt.

I livscyklusanalyser beregnes effekten af kulstoflagring ofte på en anden måde, hvor klimaeffekten af kulstofbinding i jord beregnes som klimaeffekten over en 100-årig periode ved sammenligning med klimaeffekten af en tilsvarende udledning af CO₂ (Petersen et al., 2013). Effekten på atmosfærens strålingsbalance afhænger således af, hvor stor andel af årets input af kulstof der frigives og hvor stor andel

heraf som optages i de globale CO₂-dræn (oceaner og økosystemer). Ved denne metode kan der på en 100-årig tidshorisont indregnes en klimaeffekt af øget lagring af kulstof fra tilførsel af planterester. Denne metode harmonerer dog ikke med LULUCF-metoden i den nationale opgørelse. Vi har derfor valgt at modregne kulstoflagring beregnet med LULUCF-metoden i de globale opvarmnings-effekter af de direkte/indirekte emissioner beregnet over 100 år, velviden at beregningsperioderne er forskellige. Forskellen i modregningseffekten er dog begrænset, i forhold til usikkerhederne omkring størrelsen af kulstofinputtet.

4.2.4 Kalk og urea

Emissioner af CO₂ fra tilførsel af kalk og urea-baserede handelsgødninger er i gennemsnit 94 kg CO₂ ækv/ha/år og er beregnet som de afrapporterede 244 kt CO₂ emission på landsplan (DCE, 2020), fordelt over det samlede dyrkningsareal. Da ingen virkemidler inkluderer øget forsuring af gylle, er det her antaget at der ingen ændring er i emissioner, når et virkemiddel ikke udtager landbrugsjord og der er ingen eller meget mindre emission fra jorden som er udtaget. Det antages heller ikke at der vil være væsentlige ændringer i anvendelsen af urea-baserede gødninger eller i kalkanvendelse som følge af forsuring forårsaget af ændret gødningsanvendelse.

4.2.5 Forbrug af fossil energi

Tabel 4.4 viser estimater for fossilenergiforbrug i forbindelse med korn, græs og roer produktion, fra Mogensen et al. (2018), med de konverteringsfaktorer der er angivet i tabel 4.5.

Tabel 4.4 Forbrug af fossil energi i forbindelse markoperationer, vanding og tørring til produktion af korn, græs og roer produktion (Mogensen et al., 2018).

		Byg	Hvede	Kløvergræs	Græs	Roer	Sukkerroer
El, vanding	kWh/ha	34	47	161	161	64	0
El, tørring	kWh/ha	98	138	0	0	0	0
Diesel, tørring	liter/ha	8	11	0	0	0	0
Diesel, mark	liter/ha	78	96	89	101	91	91
Nettoudbytte	Mg TS*/ha	4,4	6,2	8,1	9,1	12,1	13,2

*TS: tørstof

Tabel 4.5 Konverteringsfaktorer (Mogensen et al, 2018)

		kg CO ₂ ækv/enhed
Diesel	liter	2,82
El	kWh	0,56

På baggrund af tabel 4.4 og 4.5 estimeres forbruget af fossil energi til at variere mellem 340 CO₂ ækv/ha/år for et kornsædskifte til 445 CO₂ ækv/ha/år for græs med et højt udbytte. Det bemærkes at disse tal er betydelig lavere end de 1100 kg CO₂/ha/år antaget af Eriksen et al. (2014).

På længere sigt, skal fossilenergiforbrug til landbrugsoperationer udfases og erstattes af vedvarende energikilder. I takt med at det sker, skal modregningen for erstatning af fossilenergi i drivhusgasbalancer for virkemidler som producere energi også udfases.

4.2.6 Usikkerheder

I praksis, vil N-inputtet i planterester, N-tabet via denitrifikation, udvaskning og ammoniakfordampning, samt effekten på kulstoflagring i jorden være afhængig af hvordan og hvor i landet et virkemiddel implementeres. Klimaeffekten af virkemidlerne kan dermed kun beregnes i grove træk.

Referencer

EMEP/EEA (2022). EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook; European Environment Agency: Copenhagen, Denmark, 2019. Available online: <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019> (linket sidst kontrolleret den.10-01-2022).

Elsgaard, L., Adamsen, A.P.S., Møller, H.B., Winding, A., Jørgensen, U., Mortensen, E.Ø., Arthur, E., Abalos D., Andersen M.N., Thers H., Sørensen P., Dilnessa A.A., Elofsson K., 2022. Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture. DCA advisory report No. 208.

Eriksen J. et al (2014). Virkemidler til realisering af 2. generations vandplaner og målrettet arealregulering. DCA Rapport nr 52.

Eriksen, J., Thomsen, I. K., Hoffmann, C. C., Hasler, B., Jacobsen, B. H. 2020. Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. 452 s. – DCA rapport nr. 174, <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp Table 8.7 | GWP and GTP with and without inclusion of climate–carbon feedbacks.

Jensen, J.L., Beucher, A.M., Eriksen, J., 2022a. Soil organic C and N stock changes in grass-clover leys: Effect of grassland proportion and organic fertilizer. *Geoderma* 424, 116022.

Jensen, J.L., Eriksen, J., Thomsen, I.K., Munkholm, L.J., Christensen, B.T., 2022b. Cereal straw incorporation and ryegrass cover crops: The path to equilibrium in soil carbon storage is short. *European Journal of Soil Science* 73, e13173.

Landbrugsstyrelsen. 2022. Vejledning om gødsknings- og harmoniregler. Planperioden 1. august 2022 til 31. juli 2023.

Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Gyldenkærne, S. 2022. Sammenligning af klimaeffekter - Emissionsopgørelse, emissionsfremskrivning og Klimaeffekttabel. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 166 s. - Videnskabelig rapport nr. 501 <http://dce2.au.dk/pub/SR501.pdf>

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkærne, S., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Thomsen, M., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H.G., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Callesen, I., Caspersen, O.H., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Olsen, T.M., Hansen, M.G. 2019. Denmark's National Inventory Report 2019. Emission Inventories 1990-2017 - Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 886 pp. Scientific Report No. 318.

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkærne, S., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Thomsen, M., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H.G., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Callesen, I., Caspersen, O.H., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Olsen, T. M. & Hansen, M.G. 2020. Denmark's National Inventory Report 2020. Emission Inventories 1990-2018 - Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 900 pp. Scientific Report No. 372 <https://dce2.au.dk/pub/SR372.pdf>

Petersen, B.M., Knudsen, M.T., Hermansen, J.E., Halberg, N., 2013. An approach to include soil carbon changes in life cycle assessments. Journal of Cleaner Production 52, 217-224.

Taghizadeh-Toosi, A., Christensen, B.T., Hutchings, N.J., Vejlin, J., Katterer, T., Glendining, M., Olesen, J.E., 2014. C-TOOL: A simple model for simulating whole-profile carbon storage in temperate agricultural soils. Ecological Modelling 292, 11-25.

Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Møller, H.B., Sørensen, P., Christensen, B.T., 2013. Carbon dynamics and stabilization in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces. Soil Biology and Biochemistry 58, 82-87.

4.3 Potentialer og muligheder for reduktion af drivhusgasser

Forfattere: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi; Frederik Rask Dalby, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Anders Peter Adamsen, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Det fremtidige potentiale for at reducere drivhusgasemissionerne er beregnet ud fra skøn over teknologiernes maksimalt mulige udbredelse. Hvordan dette er skønnet, er nærmere beskrevet under de enkelte virkemidler. Da det er det fremtidige potentiale der beskrives, er det, hvor det har været muligt, opgjort med basis i udbredelsen i 2020, som den fremgår af tilgængelig statistik og indberetninger. Maksimal udbredelse fra 2020 og frem, som kan være opgjort som antal dyr, mængde gødning eller antal hektar, ganges derefter med den beregnede/forventede effekt af klimavirkemidlet (angivet i reduktion i udledning i CO₂-ækv pr. dyr, pr. mængde gødning eller pr ha), som beskrevet ovenfor. For økologisk produktion er der en række af virkemidlerne, der ikke er relevante. Dette gælder bl.a. for nitrifikationshæmmere, visse fodringstiltag for malkekvæg og forsuring af husdyrgødning, da nogle af de anvendte stoffer (fx urea og svovlsyre) ikke er tilladt i økologisk jordbrugsproduktion. Der er lagt til grund, at økologiske malkekvæg og ammekvæg vil udgøre omkring 25 % af malkekobestanden i fremtiden. Tilsvarende forudsættes at 25 % af kvæggyllen at ville være økologisk. Ud fra dette nås et nationalt estimat for den mulige reduktion af udledningerne ved fuld implementering af et virkemiddel med basis i 2020 udbredelsen og den valgte referencesituation. Disse estimater fremgår af tabel 9.1 og i uddrag i tabel 2.1/3.1.

4.3.1 Husdyrproduktion

Ved beregning af potentiale for virkemidlerne er der taget udgangspunkt i Klimafremskrivningen, se tabel 4.6 (Energistyrelsen, 2022).

Tabel 4.6 Husdyrbestanden (antal dyr) i 2015 og 2020 (Energistyrelsen, 2022).

Kategori	2015	2020
Malkekvæg	561.000	566.000
Øvrigt kvæg	1.197.000	1.121.000
Søer	1.030.000	1.054.000
Smågrise	31.500.000	33.246.000
Slagtesvin	19.860.000	19.066.000
Fjerkræ	122.400.000	131.030.000

4.3.2 Husdyrgødning

I foråret 2022 afholdtes et seminar med Miljøministeriet med forslag til AU's prioritering af de mest lovende teknologier til at reducere drivhusgasudledning (Feilberg et al., 2022). Udbredelsen af teknologierne vil afhænge meget af økonomi og kommende regulering af drivhusgas. Endvidere vil udbredelsen også afhænge af, hvor hurtigt de enkelte teknologier rent praktisk kan implementeres. Eksempelvis vil teknologier i stalden kombineret med biogas afhænge af udbygning af biogassektoren. Dette er ikke forsøgt udredt i denne rapport.

4.3.3 Afgrødeproduktion

SEGES har vurderet handelsgødningsforbruget i 2017 til at være 260 kt N (Olesen et al., 2018). Dette skyldes især en vurdering af, at mange landmænd af en række årsager ikke fuldt ud vil udnytte den N-mængde, der er til rådighed op til den optimale N-tilførsel, og at de øvrige landmænd ikke kan overstige bedriftens N-kvota. Med indførsel af målrettet regulering vil der yderligere blive et incitament til ikke at gå op til den fulde økonomisk optimale N-mængde i de oplande, som vil blive påvirket af denne regulering. Her forekommer et niveau på 7 % under norm at svare til et omkostningseffektivt niveau for reduktion af gødningsniveauet på landsplan. I praksis vil dette kunne variere mellem vandoplande afhængig af krav til reduktion i kvælstofudledning. Forbruget er rapporteret i Klimafremskrivningen 2022 for en årrække (tabel 4.7) og er projiceret til at falde til et niveau omkring 200 kt N pr. år i de kommende år. Det antages således, at den økonomisk optimale norm ikke udnyttes fuldt ud.

Tabel 4.7 Antaget kvælstofanvendelse i handelsgødning (kt N/år) i henhold til Klimafremskrivningen 2022.

2015	2016	2017	2018	2019	2020	2025	2030
211	243	249	224	235	252	203	197

Nitrifikationshæmmere anvendes til reduktion af lattergasudledninger, og forudsættes at kunne tilsættes hele mængden af handelsgødning samt den konventionelle flydende husdyrgødning. Brugen af nitrifikationshæmmere vil i visse situationer også kunne reducere kvælstofudvaskningen. Der er for en række af de øvrige virkemidler indhentet information om deres udbredelse i 2020 fra Landbrugsstyrelsen (Line Maj Stranges, personlig kommunikation, 04.01.2023) som fremgår af tabel 9.1.

4.3.4 Arealanvendelse

Aralet med dyrkede humusrige og organiske jorder er i 2021 opgjort til i alt 170.000 ha, heraf 74.000 ha med mere en 12% organisk kulstof (Greve et al., 2021). Kortlægningen af arealet med kulstofrig organisk jord (OC > 12%) viser, at ca. halvdelen ligger i sammenhængende områder, typisk i tidligere højmossearealer, mens den øvrige halvdel ligger spredt, typisk i ådalene. Udtagning af disse jorde fra omdrift og efterfølgende vådlægning har et meget stort potentiale for at reducere drivhusgasudledningerne fra

arealanvendelse (Olesen et al., 2018). Dette er mere detaljeret beskrevet i et særskilt kapitel i vidensyntesean af Greve et al. (2021) og indgår bl.a. derfor ikke i nærværende rapport bortset fra en beregning på paludikultur, der reflekterer dette potentiale.

For de øvrige arealrelaterede virkemidler, som især finder anvendelse på mineraljord, er det sværere at angive et specifikt potentiale, da disse i høj grad afhænger af udviklingen i afgrødevalg og sædskifte. Der er således for virkemidler som braklægning, energiafgrøder, bræmmer og paludikultur i højere grad tale om et eksemplificeret potentiale, som vil være betinget af udbredelse dvs fremtidige sædskifte- og afgrødevalg.

Referencer

- Bastami, M.S.B., Jones, D.L., Chadwick, D.R. (2016). Reduction of methane emission during slurry storage by the addition of effective microorganisms and excessive carbon source from brewing sugar. J. Environ. Qual. 45, 2016-2022.
- Dubgaard, A., Ståhl, L. (2018). Omkostninger ved virkemidler til reduktion af landbrugets drivhusgasemissioner: Opgjort i relation til EU's 2030-målsætning for det ikke-kvotebelagte område. Institut for Fødevare- og Ressourceøkonomi, Københavns Universitet. IFRO Rapport Nr. 271,
- Energistyrelsen (2022). Klimastatus og -fremskrivning 2022
https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Basisfremskrivning/kf22_-_samlet_rapport.pdf
- Eriksen, J., Thomsen, I. K., Hoffmann, C. C., Hasler, B., Jacobsen, B. H. (2020). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. 452 s. – DCA rapport nr. 174 <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>
- Feilberg, A., Adamsen, A. P. S., & Petersen, S. O., (2022). Afrapportering fra opstart seminar vedr. udviklingstiltag til gylle- og gødningshåndtering, Nr. 2022-0334060, 28 s., feb. 08, 2022.
Rådgivningsnotat fra DCA – National Center for Fødevarer og Jordbrug
- Greve, M.H., Greve, M.B., Peng, Y., Pedersen, B.F., Møller, A.B., Lærke, P.E., Elsgaard, L., Børgesen, C.D., Bak, J.L., Axelsen, J.A., Gyldenkerne, S., Heckrath, G.J., Zak, D.H., Strandberg, M.T., Krogh, P.H., Iversen, B.V., Sørensen, E.M., Hoffmann, C.C. (2021). Vidensyntese om kulstofrig lavbundsjord. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. 137 sider.
- IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>

IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Jensen, P.N., Blicher-Mathiesen, G., Rolighed, J., Børgesen, C.D., Olesen, J.E., Thomsen, I.K., Kristensen, T., Sørensen, P., Vinther, F.P., 2015. Revurdering af baseline. Teknisk rapport fra DCE nr. 67. <https://dce2.au.dk/pub/TR67.pdf>

Landbrugsstyrelsen (2022). Vejledning om gødsknings- og harmoniregler. Planperioden 1. august 2022 til 31. juli 2023.

Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Gyldenkerne, S. (2022). Sammenligning af klimaeffekter - Emissionsopgørelse, emissionsfremskrivning og Klimaeffekttabel. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 166 s. - Videnskabelig rapport nr. 50.1 <http://dce2.au.dk/pub/SR501.pdf>

Mogensen, L., Knudsen, M.T., Dorca-Preda, T., Nielsen, N.I., Kristensen, I.S., Kristensen, T. (2018). Bæredygtighedsparametre for konventionelle fodermidler til kvæg - metode og tabelværdier. DCA rapport nr. 116. Aarhus Universitet

Nielsen, O.K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Hjelgaard, K., Nielsen, M., Fauser, P., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Gyldenkerne, S., Thomsen, M. (2017). Projection of greenhouse gases 2016-2035. Scientific Report from DCE – Danish Centre for Environment and Energy No. 244

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Thomsen, M., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H.G., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Callesen, I., Caspersen, O.H., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Olsen, T. M., Hansen, M.G. (2020). Denmark's National Inventory Report 2020. Emission Inventories 1990-2018 - Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 900 pp. Scientific Report No. 372 <http://dce2.au.dk/pub/SR372.pdf>

Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Thomsen, M., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H.G., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Callesen, I., Caspersen, O.H., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Olsen, T. M., Hansen, M.G.

2019. Denmark's National Inventory Report 2019. Emission Inventories 1990-2017 - Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 886 pp. Scientific Report No. 318.
<http://dce2.au.dk/pub/SR318.pdf>

Olesen, JE, Petersen, SO, Lund, P, Jørgensen, U, Kristensen, T, Elsgaard, L, Sørensen, P & Lassen, J 2018, Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget. DCA rapport, nr. 130, bind 130, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug,
<http://web.agrsci.dk/djfpublikation/index.asp?action=show&id=1273>

Taghizadeh-Toosi, A., Christensen, B.T., Hutchings, N.J., Vejlin, J., Katterer, T., Glendining, M., Olesen, J.E., 2014. C-TOOL: A simple model for simulating whole-profile carbon storage in temperate agricultural soils. Ecological Modelling 292, 11-25.

5 Husdyrproduktion

Drøvtyggere (kvæg) er i langt højere grad end enmavede dyr (grise), afhængige af mikroorganismer i mavetarmkanalen for at omsætte og udnytte deres foder. Hos voksende grise udskilles der af denne årsag kun små mængder af metan, mens udskillelsen er større hos søer, fordi de får et mere fiberrigt foder, men dog langt mindre end hos drøvtyggere. Vommen fungerer således som en bioreaktor, hvor mikroorganismene nedbryder svært tilgængelige, strukturelle kulhydrater (fibre) og mere let nedbrydelig stivelse til mindre sukkerenheder, der efterfølgende forgæres til organiske syrer – især eddikesyre, propionsyre og smørsyre. Disse kortkædede fedtsyrer optages over vomvæggen og indgår i koens stofskifte. Ved forgæringsprocesserne dannes der også kuldioxid (CO_2) og brint (H_2). Ved dannelsen af propionsyre forbruges brint, mens der ved dannelsen af eddikesyre og smørsyre dannes både kuldioxid og brint. Hvis den dannede brint ophobes i vommen kan den, pga. termodynamiske forhold, hæmme visse forgæringsprocesser og dermed koens foderudnyttelse. En særlig gruppe bakterielignende mikroorganismer, såkaldte metan-dannende arkæer eller blot metanogener, kan imidlertid omdanne kuldioxid og brint til metan (CH_4).

5.1 Generelle ændringer i foderrationen (KVM5.1)

Forfatter: Christian F. Børsting, Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab

Fagfællebedømmer: Martin Riis Weisbjerg, Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab

Metan fra drøvtyggernes fordøjelsesprocesser (enterisk metan) kan reduceres via sammensætningen af foderrationen. Metan er ikke relateret til fodermidlerne som sådan, men til deres indhold af næringsstoffer, og næringsstofferne omsætning i vommen. Nogle næringsstoffer kan reducere udledningen af metan pr. kg tørstof (TS), men der er grænser for, hvor meget rationen kan ændres, før det kan påvirke dyrenes sundhed, produktivitet og i nogle tilfælde også produktkvaliteten. Der skal typisk ændres på indholdet af flere fodermidler, hvis der fx anvendes mere kraftfoder, for at alle relevante krav til foderrationen er opfyldt, hvilket delvis udjævner de forskelle i næringsstofsammensætning, som er årsag til reduktionen i metan emissionen. Kvægbrugere sammensætter foderrationen ud fra et økonomisk optimum under hensyn til dyrenes forsyning med næringsstoffer, mælkeydelse og sundhed. Det er derfor også sandsynligt, at tilpasning af foderrationen for at opnå en reduktion af den enteriske metan produktion vil begrænse kvægbrugerens muligheder i forhold til en økonomisk optimering af rationen.

Malkekøer

Øget andel af kraftfoder til malkekøer

Der er i de senere år gennemført en række forsøg ved AU for bl.a. at undersøge effekten på metan emissionen af stigende andel af kraftfoder i rationen. Børsting et al. (2020a) fandt på tværs af disse forsøg, at der var et lineært fald i liter metan pr. kg tørstofoptagelse med stigende andel af kraftfoder. Der var en tydelig race effekt. For Jersey faldt metan pr. kg tørstof med ca. 0,17 liter for hver procent ekstra kraftfoder i tørstof. For Holstein var tallet helt oppe på 0,33 eller næsten det dobbelte. Hvis en Jersey besætning anvender 35 % kraftfoder og 65 % grovfoder og øger kraftfoderandelen til 70 %, så vil der være et fald i metan pr. kg tørstof på 6 liter, hvorimod der for Holstein vil være et fald på 12 liter. Ved 35 % kraftfoder var metan emissionen i disse forsøg 32 liter pr. kg tørstof for begge racer, og dermed var der et fald på ca. 19 % for Jersey, og hele 36 % for Holstein ved at øge andelen af kraftfoder fra 35 til 70 %. Hvis andelen af kraftfoder i udgangspunktet er 40 % (som er det maksimalt tilladte til økologiske køer), som blev anvendt i gennemsnit for alle besætninger i praksis i 2018 (Børsting et al., 2020) bliver øget til 50 %, ville det give en reduktion i metan på ca. 5 % for Jersey og ca. 10 % for Holstein.

Stor øgning af kraftfoderandelen er således et potentielt virkemiddel til reduktion af enterisk metan. Forsøg rapporteret af Oliejhoek et al. (2022) og Børsting et al. (2019) viste, at ydelsen af energikorrigeret mælk blev øget lidt ved et niveau på 70 % kraftfoder i forhold til 50 % kraftfoder. Men vomprøver viste, at der var risiko for vomacidose især hos Holstein, så dette niveau er ikke realistisk at anvende i praksis, i hvert fald ikke til Holstein. Øget andel af kraftfoder følges af et højere niveau af stivelse, typisk fra modne kornarter, men ud fra resultater fra Oliejhoek et al. (2022) vil det dog være realistisk i forhold til ydelse og sundhed at

fodre med op til 60 % kraftfoder, hvorved ovennævnte reduktioner i metan på 11 % og 21 % for henholdsvis Jersey og Holstein burde kunne opnås i forhold til fodring med 40 % kraftfoder. Til gengæld vil det som regel være væsentligt dyrere at fodre med en så høj andel af kraftfoder i forhold til fodring med mere grovfoder.

Børsting et al. (2019) øgede andelen af kraftfoder fra 50 til 90 %, hvilket førte til en reduktion i metan emissionen på 48 % for Holsten og 23 % for Jersey. Til gengæld var klimabelastningen ved dyrkningen af de to rationer større ved rationen med 90 % kraftfoder, når belastningen blev beregnet ved en livscyklusanalyse, der inddrager alle forhold ved dyrkning af foderet baseret på gennemsnitsudbytter i Danmark. De anvendte udbytter var henholdsvis 8,1 og 9,9 tons tørstof pr. ha for kløvergræs og majs. Når den samlede klimaeffekt blev beregnet pr. kg energikorrigeret mælk var effekten 0 % hos Holstein og en øgning af klimabelastningen på 11 % for Jersey til trods for den store reduktion i metanemissionen. Det skal bemærkes, at der ved sammensætningen af kraftfoderet, der erstattede grovfoderet, ikke var taget hensyn til at vælge fodermidler med en lav belastning ved dyrkning og forarbejdning, fx indgik der ved 90 % kraftfoder større mængder af roepiller og tørret bærmæ, der begge kræver klimabelastende energi til tørring.

Til trods for at kraftfoder til erstatning af grovfoder kan sammensættes på mange måder viser eksemplet, at det er vigtigt at se på den samlede klimaeffekt og ikke bare på den reducerende effekt på metan, når metan ønskes reduceret ved brug af mere kraftfoder.

Anvendelse af større andel af majsensilage på bekostning af græsensilage.

Børsting et al. (2022a) og Brask-Pedersen et al. (upubliceret manuskript) har undersøgt effekten af at ændre på forholdet mellem kløvergræs- og majsensilage, når de to grovfodertyper udgjorde 70 % af TS i rationen. Andelen af grovfoder fra kløvergræsensilage udgjorde 100 %, 67 %, 33 % og 0 % i 4 rationer, mens majsensilage udgjorde resten af grovfoderet. Øgning af andelen af majsensilage gav et lineært fald fra 30,7 liter metan pr. kg TS ved 100 % kløvergræsensilage til 26,2 liter ved 100 % majsensilage, hvilket var et fald på 15 %. Til gengæld var klimabelastningen ved dyrkningen af de to rationer 10 % større ved majsrationen end ved kløvergræsrationen pga. en stor kulstofaflejring i jorden ved dyrkning af kløvergræsset. Disse tal blev beregnet ved en livscyklusanalyse baseret på gennemsnitsudbytter i Danmark. I denne analyse blev desuden inddraget klimaeffekten af emission fra husdyrgødning, samt energiforbrug til kvægproduktionen (excl. energi til foderdyrkning). Det betød, at den samlede drivhusgasudledning kun var 4 % lavere ved brug af 100 % af grovfoderet fra majsensilage. Det blev desuden vist, at nettoudbyttet i marken har stor betydning for den samlede klimaeffekt. Hvis udbyttet af majs på en bedrift er større end det gennemsnitlige udbytte i Danmark, så giver det en større fordel til brug af majsensilage, mens kløvergræsensilage kan blive mest fordelagtig på bedrifter med højere udbytte af kløvergræs end gennemsnittet.

Brask et al. (2013) fodrede med 65 % af TS fra kløvergræsensilage med tidlig udviklingstrin, kløvergræsensilage med sen udviklingstrin eller majsensilage. Fordøjeligheden af organisk stof for de 3 rationer med disse grovfodertyper var 76, 72 og 71 %. Metanproduktionen var 29,0 liter pr. kg TS ved fodring med kløvergræsensilage med høj fordøjelighed, 31,8 liter ved kløvergræsensilage med lav fordøjelighed og 26,5 liter med majsensilage. Dermed var metanproduktionen ved majs fodring 17 % lavere sammenlignet med græsensilage fra sen slæt, og 9 % lavere end ved kløvergræsensilage fra tidlig slæt.

Hellwing et al. (2014) sammenlignede to rationer med 61 % af TS fra henholdsvis kløvergræs- og majsensilage. Metanproduktionen var henholdsvis 35,8 og 30,6 liter pr.kg TS, dvs. 15 % lavere ved fodring med majsensilage.

I disse to studier blev der ikke lavet en LCA analyse af den samlede klimabelastning incl. effekt af dyrkning af de forskellige grovfodertyper.

Højere fordøjelighed af græsmarksprodukter

Brask et al. (2013) fandt en metanproduktion på 29,0 liter pr. kg tørstof ved fodring med 65 % af TS fra kløvergræsensilage med høj fordøjelighed (76 % af organisk stof for hele rationen) i forhold til 31,8 liter ved anvendelse af samme andel kløvergræsensilage med lav fordøjelighed (72 % af organisk stof for hele rationen), dvs. 9 % lavere metanproduktion med ensilage med høj fordøjelighed. Øget fordøjelighed af kløvergræsensilage kan altså reducere metanproduktionen.

Slagtekalve og opdræt af malkeracer samt kødkvæg

Under danske forhold bliver en stor del af slagtekalvene fodret med en stor andel af kraftfoder samt en lille mængde halm. I nogle tilfælde erstattes en del af dette med ensilage af hele majs, majscolber eller majskeer. I sjældne tilfælde anvendes græsensilage. Selvom både kraftfoder og de forskellige majsensilager giver rationer med meget højt indhold af stivelse og lavt indhold af fibre, så har danske forsøg vist store forskelle i metan emissionen mellem disse typer af foder (Hellwing et al., 2018). De fandt, at udskiftning af 10 % halm og ca. 44 % kraftfoder på TS-basis fra en typisk kraftfoderbaseret ration med 40 % kolbemajs og 14 % roepiller førte til, at enterisk metan blev øget med ca. 25 %. Når 10 % halm og 50 % kraftfoder blev udskiftet med 60 % græsensilage steg enterisk metan med hele 75 %.

I et andet forsøg fandt Hellwing et al. (2011), at ombytning af 40 % kraftfoder med 35 % kernemajs og 5 % halm øgede enterisk metan med hele 70 %. Ombytning af 68 % kraftfoder med 61 % kernemajsensilage og 7 % halm øgede også enterisk metan med ca. 70 %.

Der findes ikke tilstrækkelig viden om effekt på enterisk metan ved fodring af kvier af malkeracer samt kødkvæg med øget mængde stivelse eller større andel af kraftfoder.

Tyrekalvene fra kødkvæg fodres efter fravænning ved 5-6 måneders alderen typisk på samme måde som slagtekalve af malkeracer.

5.1.1 Anvendelse

Den maksimale anvendelse af fodersammensætninger, der kan reducere enterisk metan, defineres for alle dyrekategorier som et niveau, hvor der ikke forventes direkte afledte negative effekter på dyrenes sundhed eller produkternes ernæringsværdi i kombination med de praktiske muligheder.

Øget andel af kraftfoder kan som udgangspunkt anvendes til alt kvæg, som fodres på stald, mens det ikke kan anvendes til kvæg, der går ude hele døgnet, dvs. kødkvæg og en del af kvierne af malkerace. Hos slagtekalve, der i forvejen fodres med størstedelen af foderet i form af kraftfoder, kan der ikke opnås yderligere reduktion, mens effekten er ukendt hos kvier og kødkvæg.

Ombytning af kløvergræsensilage med majsensilage kan anvendes til malkekøer og kvier (dog med risiko for at kvierne bliver for fede) og kødkvæg, der i de fleste besætninger får en relativ stor andel af grovfoder i form af græsprodukter.

Øget fordøjelighed af græsensilage vil især være brugbar hos malkekøer, da der også er mulighed for positiv effekt på ydelse (fx Johansen et al., 2017). Mindre relevant til kvier og kødkvæg, der ikke har ekstra tilvækst, der kan kompensere for ekstra udgifter til at opnå højere fordøjelighed. Ikke relevant til slagtekalve, fordi de i de fleste besætninger ikke får ret meget græsensilage.

5.1.2 Relevans og potentiale

Økologiske bedrifter kan ikke generelt øge græssets fordøjelighed under afgræsning uden konsekvens for køernes sundhed, da der typisk allerede er en høj fordøjelighed i græsset, der afgræsses

For slagtekalve forventes det ikke muligt at opnå en effekt af ændret fodermiddelsammensætning pga. risikoen for forringet sundhed hos kalvene, da fodringen her allerede er baseret på letfordøjeligt, stivelsesrigt foder. Til trods for at kraftfoder kan føre til mindre metanudskillelse end brugen af forskellige typer af majsensilage, kan det ikke anbefales kun at anvende kraftfoder og halm, da det øger risikoen for sygdom, og desuden vil det ofte være dyrere udelukkende at anvende kraftfoder. Tyrekalvene og en del af kvierne fra kødkvæg fodres efter fravænning ved 5-6 måneders alderen typisk på samme måde - som slagtekalve af malkekvægsracer.

Kødkvæg og malkeracekvier, der går på græs, får normalt ikke tilskudsfoder, så med mindre der afholdes ekstra udgifter til kraftfoder og arbejde vil det ikke være muligt at reducere deres metan emission med ændret fodring i sommerhalvåret. I staldperioden, vil det være muligt at give køer og kvier rationer med mindre fibre og mere stivelse, men som beskrevet ovenfor kendes effekten ikke.

Det er ikke muligt at beregne det samlede potentiale af alle de forskellige metanreducerende fodermiddelsammensætninger, der kan anvendes til alle kategorier af kvæg.

5.1.3 Effekt på drivhusgasudledning og sideeffekter

Effekten af ændret fodring mht. ændringer i typen og fordøjeligheden af grovfoder er svær at estimere. Men generelt vil en ændret fodring med mere stivelse i rationen på bekostning af NDF reducere emission af enterisk metan fra malkekøer, uanset om dette opnås ved ændringer i grovfoderet eller ved ændret forhold mellem grovfoder og kraftfoder. Som beskrevet ovenfor vil en øgning fra 40 % til 50 % kraftfoder give en reduktion i enterisk metan på ca. 5 % for Jersey og ca. 10 % for Holstein. Dette virkemiddel kan ikke anvendes af økologer, da de har krav om at anvende maks. 40% kraftfoder.

Antages det, at emissionen af enterisk metan er 165 kg pr. årsko (Albrektsen et al., 2021) så svarer det til 4.620 kg CO₂-ækv. pr. årsko ved brug af en omregningfaktor på 28 kg CO₂-ækv. pr. kg metan. Ved at øge kraftfoderandelen 10 %-enheder vil det give en reduktion på henholdsvis ca. 460 og ca. 230 kg CO₂-ækv. pr årsko for henholdsvis Holstein og Jersey.

Som beskrevet ovenfor kan der være samspil mellem virkemidler og afledte effekter. For de fodringsmæssige tiltag skal det således ved vurderingen af effekten indregnes, at der kan være en større emission af drivhusgasser knyttet til produktionen af foderet. Ved øget anvendelse af kraftfoder er der stor risiko for, at den gunstige effekt på enterisk metan delvis opvejes af ekstra klimapåvirkning ved dyrkning af foderet. Derfor skal disse sammenhænge belyses nærmere. Skift i sædskifter mellem græs og kornafgrøder, herunder majs giver også andre miljøpåvirkninger med en generelt større kvælstofudledning via nitratudvaskning fra korndominerede sædskifter.

5.1.4 Samspil til andre virkemidler

I afsnit 5.2.4 er samspillet med fedt beskrevet.

Effekten af Bovaer på enterisk metanproduktion ser ud til at være afhængig af rationens sammensætning og særligt rationens fiberniveau og -type og stivelsesniveau og -type, hvilket er beskrevet i afsnit 5.3.4. Generelt ses en større metanreducerende effekt af Bovaer i majsbaserede rationer end i græs-baserede.

Reduceret enterisk metan kan som beskrevet ovenfor bl.a. ske ved at reducere andelen af kløvergræs i foderrationen, og den maksimale reduktion af græsmarksprodukter vil desuden kræve, at dyrene fodres på stald året rundt i et konventionelt system. En mindre anvendelse af græs vil føre til lavere kulstoflagring i jorden som følge af opbygning af mindre kulstoflager i andre foderafgrøder sammenlignet med græsmarker.

5.1.5 Usikkerheder

De angivne effekter på drivhusgasudledningen ved ændret fodermiddelsammensætning er baseret på et beskedent antal forsøg. Disse forsøg kan derfor ikke repræsentere alle de forskelle, der kan være i praksis mht. kombinationer af fodermidler og deres kvaliteter. Det forventes dog, at de beskrevne effekter giver en indikation af, hvilke effekter, der som gennemsnit kan opnås. Det er ikke muligt at skønne den potentielle

udbredelse af disse virkemidler. Til trods for de nævnte muligheder for reduceret klimapåvirkning ved ændret fodermiddelsammensætning, kan disse ikke på nuværende tidspunkt inddrages i den nationale emissionsopgørelse, da samspillet mellem effekten på enterisk metan og klimaeffekten af en ændret afgrødesammensætning og klimaeffekten ved indkøb af kraftfodermidler kræver yderligere undersøgelser.

5.2 Øget fodring med fedt til kvæg (KVM5.2)

Forfatter: Christian F. Børsting, Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab

Fagfællebedømmer: Martin Riis Weisbjerg, Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab

Fodring med en øget andel af fedt i rationen kan reducere dannelsen af metan i vommen og dermed udledningen af metan pr. kg fodertørstof fra dyrenes fordøjelse af foderet (Niu et al., 2018). Fedtsyrer forgæres ikke i vommen, og ombytning af fermenterbart organisk stof (fx stivelse eller fiber) med fedt, vil derfor reducere produktionen af enterisk metan. Under danske forhold kommer en væsentlig del af tilskudsfedt fra rapsolie, der binder brint ved biohydrogenering i vommen, og dermed sænkes metanproduktionen. Desuden har fedt en inhiberende effekt på særligt de fibernedbrydende og metanogene mikroorganismer i vommen (Niu et al., 2018), hvilket forårsager en stor del af resten af effekten af fedt. Da fermentering af fiber hovedsageligt er koblet til produktionen af eddikesyre vil denne inhibering, som beskrevet ovenfor, medføre et fald i produktionen af brint og kuldioxid og dermed mindre substrat for metanproduktion. Palmefedt udgør også en betydelig del af fedttilskuddet i danske foderrationer til malkende køer. Da denne fedttype er forholdsvis mættet kan den forventes at give en lidt mindre metanreduktion pga. mindre biohydrogenering og mindre effekt på de fibernedbrydende mikroorganismer.

På tværs af en række danske rationer er det beregnet, at 10 g/kg TS ekstra fedtsyrer i rationen kan reducere produktionen af enterisk metan med ca. 4 % baseret på beregninger i NorFor (Børsting et al., 2020b). Dette svarer godt til de 3,4 – 4,1 % som Niu et al. (2018) fandt i en metaanalyse med forsøg fra mange steder i verden.

Børsting et al. (2021) arbejdede med SEGES data for rationernes fedtindhold i ca. 1.600 besætninger med stor race og ca. 250 jerseybesætninger fra hvert af årene 2017- 2019. I opgørelserne var besætningerne desuden opdelt i økologiske og konventionelle. De malkende Jerseykøer fik i konventionelle besætninger 37 g fedtsyrer/kg TS og i økologiske 30 g fedtsyrer/kg TS. De malkende køer af stor race fik i konventionelle besætninger 33 g fedtsyrer/kg TS og i økologiske 26 g fedtsyrer/kg TS. Det vil sige, at Jersey får et højere indhold af fedtsyrer i foderet end Stor race, og for begge racer anvendes 6-7 g mindre fedtsyrer/ kg TS ved økologisk produktion. Jersey får typisk et højere fedtniveau for at understøtte deres evne til at producere mælk med en højere fedtprocent. Det lavere indhold af fedtsyrer i de økologiske rationer skyldes typisk, at den økologiske produktion er mere begrænset i udvalget af tilladte råvarer og fedtkilder. Goldkøer af Jerseyracen fik 23 g fedtsyrer/kg TS, mens de hos stor race fik 20 g. Det forventes, at ekstra fedtsyrer til goldkøer vil have ca. samme reducerende effekt pr. kg. TS som fundet for malkekøer. Dette er dog ikke undersøgt, ligesom det er uvist, om der vil være negative effekter for sundhed og produktion efter kælvning.

Laskari et al. (2022) og Børsting et al. (2022b) har i en metaanalyse vist, at tilskudsfedt i tidlig laktation ikke øger risikoen for stofskifteproblemer, selvom køerne i denne periode også mobiliserer meget fedt fra

kroppen. Derfor vurderes det, at være muligt at fodre med samme mængde tilskudsfedt i tidlig laktation som i resten af laktationen.

Om dette fedtniveau er økonomisk optimalt, afhænger af forholdet mellem prisen for ekstra fedt og prisen for mælk. I Danmark anvendes bl.a. palmefedt og danskavlede rapsfrø og -kager. Klimaaftrykket af palmefedt er ca. det tredobbelte af rapskager, hvis den direkte effekt af regnskovsrydningen regnes ind. Ved brug af importeret palmefedt i stedet for dansk producerede rapsprodukter vil den nationale emission reduceres væsentligt, mens den globale emission kun vil blive reduceret lidt eller evt. være uforandret, da reduktionen i enterisk metan helt eller delvist modsvares af en øget emission ved dyrkning af palmefedt.

Der findes ikke studier af effekt af tilskudsfedt til slagtekalve fodret med en meget stor andel af kraftfoder. Fordi fodring med en høj andel af kraftfoder, og dermed et højt indhold af stivelse, giver meget mindre metanemission, end når en stor del af kraftfoderet udskiftes med ensilage af græs, helsædsmajs, kolbemajs eller kernemajs (som beskrevet i afsnit 5.1), må det formodes, at emissionen ikke kan reduceres væsentligt, hvis der også tilsættes fedt. Hvis de fleste slagtekalve, derimod fodres med større andele af en af de majsensilagetyper, som er beskrevet i afsnit 5.1, er det uvist om fedt vil have en effekt. Alt i alt, regnes der ikke med at fedt kan reducere emissionen af metan fra slagtekalve (tabel 5.2)

Der mangler studier af effekt af tilskudsfedt til kvier af malkeracer samt kødkvæg. Det er derfor uklart, hvordan effekten vil være hos disse kategorier af kvæg.

5.2.1 Anvendelse

Tiltaget kan som udgangspunkt anvendes til alt kvæg, som fodres på stald, mens kvæg der går på græs hele døgnet, dvs. kvier af malkerace samt kødkvæg på græs i sommerhalvåret normalt ikke får tilskudsfoder, så med mindre der afholdes ekstra udgifter til kraftfoder og arbejde, vil det ikke være muligt at reducere deres metanemission med ændret fodring i sommerhalvåret

Baseret på mange forsøg konkluderede Weisbjerg & Lund (2020), at der er positiv effekt på EKM-ydelsen op til 45 – 50 g fedtsyrer pr. kg TS. Ved mættet fedt og Ca-forsæbet fedt er der positiv effekt ved højere fedtniveau, mens maksimal ydelse nås ved et lavere niveau ved tilskud af stærk umættet fedt. I det seneste danske forsøg med tilsætning af rapsfrø op til et niveau på 54 g fedtsyrer/kg TS fandt Giagnoni et al. (2022) maksimal EKM-ydelse (svarende til en stigning på 3,0%) ved 42 g fedtsyrer/kg TS, EKM i forhold til ingen fedttilskud, mens EKM-ydelsen ved 54 g/kg TS var marginalt mindre (-0,6%) i forhold til ingen fedttilskud. Til konventionelle lakterende malkekøer kan der derfor uden væsentlig risiko for reduceret ydelse anvendes op til ca. 53 g/kg TS og ca. 57 g/kg TS for henholdsvis stor race og Jersey, hvilket svarer til 20 g/kg TS ekstra fedtsyrer i forhold til niveauet i praksis i 2017-2019, idet niveauet i praksis var henholdsvis 33 og 37 g pr. kg TS for de to racer (Børsting et al., 2021). I de nyeste amerikanske anbefalinger (NRC, 2021) anbefales det generelt, at indholdet af fedtsyrer skal være under 70 g/kg TS til malkekøer, mens det i nogle tilfælde i tidlig laktation er uhensigtsmæssigt at gå over 50 g/kg TS. Ud fra metaanalysen af Lashkari et al. (2022b) er det

muligt at anvende samme niveau som i resten af laktationen, hvis kvægbrugeren ikke ønsker at anvende en særskilt foderblanding med lidt lavere fedtniveau i tidlig laktation.

Da økologiske rationer indeholder en større mængde græsprodukter, som har en større andel af umættede fedtsyrer i fedtet og fordi færre fedtkilder er til rådighed fodres økologiske køer med mindre fedt, nemlig henholdsvis 27 og 30 g fedtsyrer pr. kg TS til henholdsvis Holstein og Jersey (Børsting et al., 2021). Da udgangspunktet er lavere for økologiske køer forventes det, at de også kan fodres med 20 g/kg TS ekstra fedtsyrer i forhold til praksis 2017-2019.

Hellwing et al. (2012) fandt et fald på 6 % i andelen af bruttoenergien, der blev til metan, når der blev givet et tilskud af 27 g fedtsyrer pr. kg TS, men effekten pr. kg TS-optagelse var ikke signifikant. Da der ikke er fundet studier af effekt på metan af tilskudsfedt til slagtekalve og kødkvæg er de angivne effekter i tabel 5.1.1, derfor anslåede effekter.

5.2.2 Relevans og potentiale

Da både fedtprodukter og fodermidler med et relativt højt fedtindhold kan anvendes til at øge rationens fedtindhold kan tiltaget straks tages i brug. Det forventes, at reduktion af metanemissionen i første omgang kan tages i anvendelse til malkekøer, og at ekstra fedt kan bruges til både konventielle og økologiske malkekøer, dog kan de økologiske besætninger have sværere ved at skaffe brugbare fedtkilder.

5.2.3 Effekt på drivhusgasudledning

Generelt formodes det, at alle malkekøer kan tildeles yderligere 20 g/kg TS i forhold til niveauet i 2017-2019 (Børsting et al. 2021), dog med forbehold for at hverken effekten eller sideeffekter er undersøgt til bunds hos goldkøer. De økologiske besætninger har i praksis sværere ved at tilsætte yderligere 20 g fedtsyrer pr. kg TS pga., at der er færre økologiske fodermidler med et højt fedtindhold.

Den maksimale udbredelse, defineret som et niveau, hvor der ikke forventes direkte afledte negative effekter på dyrenes produktion og sundhed, eller produkternes ernæringsværdi i kombination med de praktiske muligheder, er estimeret som angivet i tabel 16 pr. årssdyr.

Tabel 5.1 Estimeret maksimal udbredelse brug af tilskudsfedt i 2030, % pr. årssdyr.

Produktionssystem	Malkekøer	Opdræt, malkerace	Slagtekalve, malkerace	Ammekvæg
Konventionel	100	100	0	40
Økologisk	100	100	0	40

Tabel 5.2 Estimeret effekt af fodringstiltag (% reduktion i metan pr. årskøbe) i 2030 for de dyr, hvor tiltaget implementeres med ekstra 20 g fedtsyrer pr. kg TS.

Produktionssystem*	Malkekøer	Opdræt, malkerace	Slagtekulve, malkerace	Ammekvæg
Konventionel	8	4	0	4
Økologisk	6	3	0	3

*For konventionelle malkekøer er effekten baseret på forsøg, mens det for de øvrige kategorier er skønnede effekter. Der er regnet med lavere effekt for økologiske malkekøer, fordi de i sommerhalvåret er på græs en del af døgnet. For opdræt og ammekvæg er der regnet med mindre effekt end for malkekøer, fordi en del af disse er på græs hele døgnet i en del af året, idet der i denne periode ikke anvendes tilskudsfoder, og dermed heller ikke fedt.

Antages det, at emission af enterisk metan er 165 kg pr årskøbe (Albrechtsen et al., 2021), så svarer det til 4.620 kg CO₂-ækv. pr årskøbe ved brug af en omregningsfaktor på 28 kg CO₂-ækv. pr. kg metan. Med et reduktionspotentiale for 20 g ekstra fedtsyrer pr. kg TS på henholdsvis 8 og 6 % for konventionelle og økokøer vil det svare til en reduktion på henholdsvis 370 og 280 CO₂-ækv. pr årskøbe, der tildeles denne ekstra fedtmængde.

5.2.4 Samspil til andre virkemidler

Samspil med Bovaer

I afsnit 5.3 er der en omfattende gennemgang af forsøg til at belyse samspillet mellem foderets fedtindhold og tilskud af additivet Bovaer, så her gives kun et resume af disse forsøg. Kjeldsen et al. (2022) undersøgte effekten af at kombinere Bovaer (80 mg/kg tørstof) med tildeling af fedt til malkekøer. En foreløbig opgørelse viser, at der ikke var en vekselvirkning mellem de to tiltag. Et forsøg af Maigaard et al. (2022a) har vist, at effekten af de to strategier ikke var additiv, dvs. der var ingen ekstra effekt af at øge fedtniveauet, når man også tildelte Bovaer.

Samspil med gyllehåndtering

Fodring med fedtholdige produkter kan i teorien give større udledninger af metan fra gylle i stalden og fra gyllelageret som følge af højere indhold af fedt i gyllen. Et forsøg af Hellwing et al. (2014) tydede dog ikke på, at dette er tilfældet.

Samspil med grovfodertype

Brask et al. (2013) har undersøgt effekten på enterisk metan af fedttilsætning til rationer med 65 % af TS fra henholdsvis tidlig slæt og sen slæt kløvergræsensilage samt majsensilage. Dette gav en reduktion i liter metan pr. kg TS på 3-6 %, uden vekselvirkning til grovfodertypen.

Andet

Tilskudsfedtets fedtsyresammensætning kan i nogen grad påvirke mælkens fedtsyresammensætning, hvilket kan påvirke mælkens effekt på human sundhed i både positiv og negativ retning.

5.2.5 Usikkerheder

De angivne effekter for konventionelle malkekøer er baseret på mange forsøg, så som gennemsnit forventes den anførte reduktion i tabel 5.1.2 at være af den rette størrelsesorden for køer fodret på stald med rationer, der er typiske på nuværende tidspunkt. Til gengæld har der været en del variation imellem effekten på tværs af forsøgene. Effektens størrelse er mere usikker under afgræsning og derfor er de økologiske køer sat til en mindre reduktion. For opdræt, slagtekalve og ammekvæg er værdier anslået ud fra en vurdering i forhold til reduktionen hos malkekøer.

Det er usikkert om den skønnede maksimale udbredelse kan nås i praksis.

Referencer

- Albrechtsen, R., Mikkelsen, M.H., Gyldenkerne, S. (2021). Danish emission inventories for agriculture. Inventories 1985 – 2018. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 202 pp. Scientific Report No. 443. <http://dce2.au.dk/pub/SR443.pdf>
- Brask, M., Lund, P., Hellwing, A.L.H., Poulsen, M., Weisbjerg, M.R. (2013). Enteric methane production, digestibility and rumen fermentation in dairy cows fed different forages with and without rapeseed fat supplementation. Anim. Feed Sci. a. Technol.. 184, 67-79.
- Børsting, C.F, Brask-Pedersen, D.N., Mogensen, L., Lamminen, M., Johansen, M., Lund, P. (2020a). Græs versus majs – er det grovfoderet eller rationens sammensætning, der påvirker metan emissionen og mælkens klimaaftryk. Indlæg ved Fodringsdagen 9 september 2020. [Internship \(landbrugsinfo.dk\)](https://landbrugsinfo.dk/Internship)
- Børsting, C.F, Brask-Pedersen, D.N., Mogensen, L., Lund, P. (2022a). Majs reducerer metan fra kørne – og kan reducere den samlede klimaeffekt ved høje majsudbytter. Plantekongressen. Februar 2022. [Internship \(landbrugsinfo.dk\)](https://landbrugsinfo.dk/Internship).
- Børsting, C.F., Hellwing, A.L., Weisbjerg, M.R., Lund, P., Nielsen, N.I. (2019). Race og grovfoderandel har stor betydning for malkekøernes klimapåvirkning. 2019. Indlæg ved Fodringsdagen september 2019. [Internship \(landbrugsinfo.dk\)](https://landbrugsinfo.dk/Internship).
- Børsting, C.F., Johansen, M., Lund, P., Møller, H.B. (2020b). Notat vedr. optimeret fodring med øget fedt til kvæg og reduktionseffekt på enterisk metan. Notat til Miljø- og Fødevarerministeriet. 11 pp.

- Børsting, C.F., Weisbjerg, M.R., Lund, P., Kjeldsen, M.H., Johansen, M., Adamsen, A.P. S., Møller, H.B. (2021). Notat vedr. anvendelse af fedt til malkekøer som virkemiddel til reduktion af drivhusgasser. 14 pp. No. 2020-0166156.
- Børsting, C.F., Lashkari, S., Weisbjerg, M.R., Foldager, L. (2022b). Notat vedr. tildeling af fedt til malkekøer i tidlig laktation belyst ved en meta-analyse af resultater fra litteraturen samt gennemgang af andre forhold vedr. fodring af malkekøer med tilskudsfedt. Notat til Miljø- og Fødevareministeriet. 9 pp.
- Giagnoni, G. Lund, P., Johansen, M., Weisbjerg, M. 2022. Effect of rapeseed and palm kernel oil dietary inclusion levels on milk production, feed efficiency, methane and economy. Fodringsdag august 2022. <https://www.landbrugsinfo.dk/-/media/landbrugsinfo/public/d/1/e/fd22effectrapeseedpalmkerneloildietaryinclusionlevelsmilkproductionfeedeffmethane-economygiulioigiagnoni.pdf>
- Hellwing, A.L.F., Jørgensen, K.F., Vestergaard, M., Weisbjerg, M.R. (2011). Methane production in bull calves fed rations based on grain or different levels of high-moisture corn kernel silage. Proceedings of the 2nd Nordic Feed Science Conference. Report no. 277 from Swedish University of Agric. Sci.48-52.
- Hellwing, A.L.F., Lund, P., Mogensen, L., Vestergaard, M. (2018). Growth, feed intake, methane emissions and carbon foot print from Holstein bull calves fed four different rations. Livestock Science. 214, 51-61.
- Hellwing, A.L.F., Sørensen, M.T., Weisbjerg, M.R., Vestergaard, M., Lund, P. (2012). Can crushed rapeseed lower methane emission from heifers? DOI:10.1080/09064702.2013.788203. Acta Agric. Scand., Sect. A., Anim. Sci. 62, 259-262.
- Hellwing, A.L.F., Weisbjerg, M.R., Møller, H.B. (2014). Enteric and manure-derived methane emissions and biogas yield of slurry from dairy cows fed grass silage or maize silage with and without supplementation of rapeseed. Livestock Science. 165, 189-199.
- Johansen, M., Søgaard, K., Lund, P., Weisbjerg, M. R. (2017). Digestibility and clover proportion determine milk production when silages of different grass and clover species are fed to dairy cows. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13401>. J. Dairy Sci. 100, 8861-8880.
- Kjeldsen, M., Weisbjerg, M.R., Walker, N., Hellwing, A.L.F., Lund, P. (2022). Gas exchanges and dry matter intake when lactating cows are fed 3-NOP and fat. Proceedings of the 8th International Greenhouse Gas & Animal Agriculture Conference (GGAA), 146.
- Lashkari, S., Weisbjerg, M. ., Foldager, L., Børsting, C.F. (2022b). Fat supplement for dairy cows during early lactation – potentials, challenges, and risks – a meta-analysis. 2022. Submitted to J. Dairy Sci.

- Maigaard, M. Weisbjerg, M.R., Johansen, M., Lund, P. (2022a). Combined effects of dietary fat, nitrate and 3-NOP in dairy cow enteric methane emission. Proceedings of the 8th International Greenhouse Gas & Animal Agriculture Conference (GGAA), 187.
- Niu, M., E. Kebreab, A.N. Hristov, J. C. Arndt, A. Bannink, A.R. Bayat, A.F. Brito, T. Boland, D. Casper, L. A. Crompton, J. Dijkstra, M.A. Eugène, P.C. Garnsworthy, M.N. Haque, A.L.F. Hellwing, P. Huhtanen, M. Kreuzer, B. Kuhla, P. Lund, J. Madsen, C. Martin, S.C. McClelland, M. McGee, P. J. Moate, S. Muetzel, C. Muñoz, P. O'Kiely, N. Peiren, C. K. Reynolds, A. Schwarm, K.J. Shingfield, T. M. Storlien, M.R. Weisbjerg, D. R. Yáñez-Ruiz, & Z. Yu. (2018). Prediction of enteric methane production, yield, and intensity in dairy cattle using an intercontinental database. *Glob. Change Biol.*, 1-22
- NRC. Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Eighth Revised Edition. (2021). Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25806>
- Olijhoek, D.W., Hellwing, A.L.F., Noel, S.J., Lund, P., Larsen, M., Weisbjerg, M.R., Børsting, C.F. (2022). Feeding up to 91% concentrate to Holstein and Jersey dairy cows: effects on enteric methane emission, rumen volatile fatty acids, nutrient digestibility, production, feeding behavior, and rumen bacterial community structure. *Dairy Sci. TBC*:1–19 <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21676>
- Weisbjerg, M.R., Lund, P. 2020. Fedt i foderet – potentielt virkemiddel til reduktion af metan fra kvæg, Indlæg ved Kvæggkongressen februar 2020.

5.3 Anvendelse af metanreducerende tilsætningsstoffer i foder til kvæg (KVM5.3)

Forfattere: Peter Lund, Maria Holst Kjeldsen & Morten Maigaard, Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab

Fagfællebedømmer: Martin Riis Weisbjerg, Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab

Der findes en række tilsætningsstoffer (foderadditiver) til drøvtyggere som fx nitrat, sulfat, 3-nitrooxypropanol (3-NOP), forskellige tangarter og essentielle olier, tanniner og saponiner som alle har haft en reducerende effekt på enteriske metan i in vitro forsøg og/eller dyreforsøg (Almeida et al., 2021; Arndt et al., 2022). For at et tiltag til reduktion af metan kan vurderes som validt, forventes det imidlertid at effekten er konsistent og dokumenteret i en række forsøg udført på forskellige forsøgsinstitutioner og ved brug af den aktuelle dyreart og dyregruppe. I dette tilfælde er dyrearten kvæg, og dyregrupperne er primært malkekøer, men også opdræt og kødkvæg. Endvidere er det ønskeligt, at effekten er målt med de mest præcise og anderkendte målemetoder, hvor GreenFeed målesystemet til måling af individuel emission af metan fra en gruppe af fritgående dyr og respirationskamre (Golden Standard metoden) til måling på få og opbundne dyr, er de foretrukne metoder. Endeligt er det afgørende, at effekten er publiceret i en række peer-reviewede tidsskrifter, som er anderkendte inden for forskningsområdet og gerne i form af meta-analyser, hvor data er samlet fra en række forsøg inden statistisk databehandling på tværs af forsøgene. 3-nitrooxypropanol er det eneste foderadditiv, hvor effekten er verificeret af EFSA (EFSA, 2021) og godkendt i EU under tilsætningsstofkategorien "zootekniske tilsætningsstoffer" og den funktionelle gruppe "stoffer, der har en gavnlig indvirkning på miljøet" og "som tilsætningsstof til foder til malkekøer og avlskøer" (EU, 2022). Det er dog ikke umiddelbart klart, hvad "avlskøer" her dækker over. Dette kapitel vil derfor alene omhandle 3-nitrooxypropanol. Handelsnavnet for 3-nitrooxypropanol er Bovaer, og dette vil blive brugt i den resterende del af kapitlet, med mindre der direkte henvises til det aktive stof som sådan.

5.3.1 Anvendelse

Formålet med brug af Bovaer er at opnå en reduktion i produktionen af enterisk metan fra den mikrobielle fermentering i vommen hos kvæg. DSM, som producerer tilsætningsstoffet, fortolker ovenstående EU godkendelse som, at Bovaer må bruges til kvier efter første inseminering og til køer uanset om det er malkende køer, goldkøer eller kødkvæg (Christer Ohlsson, pers. med. 2022). Godkendelsen omfatter en dosering på 53-80 mg/kg fuldfoder med 12% vand (EU, 2022) svarende til 60 til 91 mg 3-nitrooxypropanol/kg fodertørstof. Virkningsmekanismen er, at det aktive stof, 3-nitrooxypropanol, hæmmer et særligt enzymesystem, methyl-coenzym M reductase (MCR), som er unikt for metanogenerne. Både 3-nitrooxypropanol og nedbrydningsproduktet nitrit binder til dette enzymesystem, hvorved nikkel oxideres fra Ni^+ til Ni^{2+} og enzymesystemet inaktiveres. Under inaktiveringen af MCR enzymet nedbrydes 3-nitrooxypropanol til nitrat og nitrit (Duin et al., 2016). Nitrat kan være tilstede i den normale foderration og særligt ved fodring med meget græsrigte rationer, mens nitrit kan dannes ved den naturlige omsætning af

nitrat i vommen, og derfor ikke forventes at have en negativ effekt ved den foreslåede dosering (Olijhoek et al., 2016), en dosering som er meget lav i forhold til hvad der naturligt kan forekomme af nitrat i foderet.

5.3.2 Relevans og potentiale

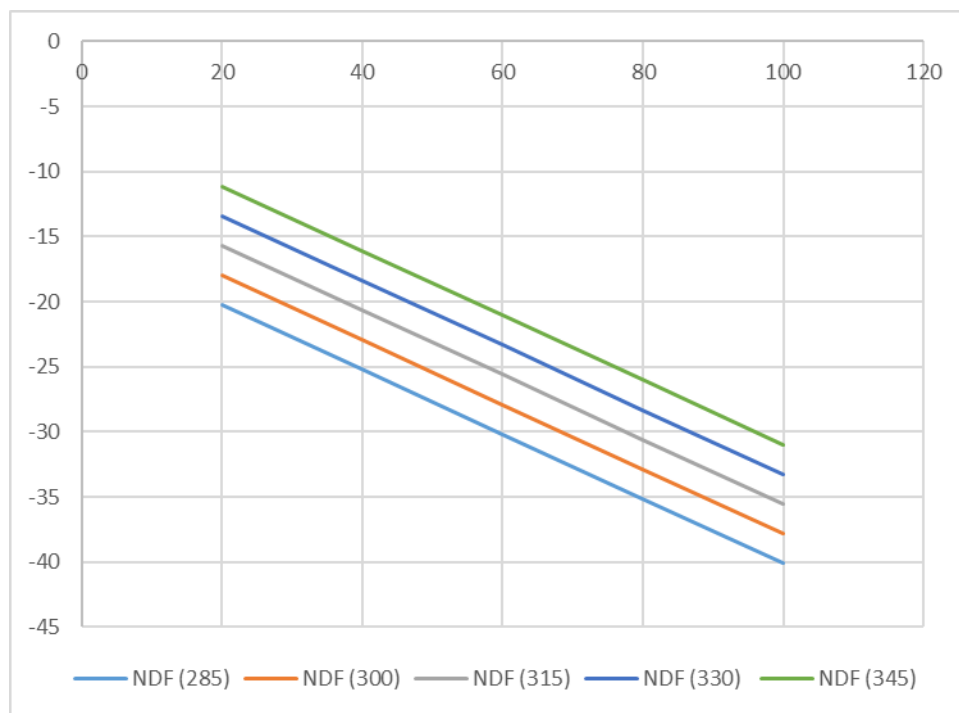
Da produktet er godkendt i EU kan det allerede tages i brug som tilsætningsstof. Det forventes, at Bovaer i første omgang vil blive taget i anvendelse til malkekøer og at Bovaer kan bruges til alle konventielle malkekøer, men ikke til økologiske køer for nærværende.

5.3.3 Effekt på drivhusgasudledning

Dijkstra et al. (2018) har samlet den daværende litteratur baseret på data fra malkekøer og kødkvæg, og hvor metan er kvantificeret ved hjælp af en af ovennævnte metoder. Der indgår data fra 9 artikler, 11 forsøg og i alt 38 forskellige behandlinger. Analysen viste at produktionen af metan (g/d) faldt med gennemsnitligt 39 % for malkekøer og med 22 % for kødkvæg, mens metan udtrykt som g/kg fodertørstof faldt med gennemsnitligt 39 % for malkekøer og med 17 % for kødkvæg, hvilket indikerer at niveauet af 3-nitrooxypropanol skal være højere i foder til kødkvæg sammenlignet med malkekøer for at opnå en tilsvarende reduktion i metan. Den højere effekt af 3-nitrooxypropanol i malkekøer i forhold til kødkvæg kan eventuelt skyldes forskelle i rationens sammensætning samt forskelle i foderniveau. På tværs af dyregrupper og ved den gennemsnitlige dosis af 3-nitrooxypropanol (123 mg/kg fodertørstof) var reduktionen i metan produktion (g/d) 33 % og var 29 % når den blev sat i relation til foderoptagelse, og udtrykt i g/kg fodertørstof. Endvidere viste analysen, at en øgning af indhold af 3-nitrooxypropanol i rationen med yderligere 10 mg/kg fodertørstof i forhold til gennemsnittet på 123 mg/kg fodertørstof reducerede produktionen af metan med yderligere 2,6 % og metan udtrykt som g/kg fodertørstof faldt med 2,5 % for hver ekstra 10 mg/kg fodertørstof. En tilsvarende mindre reduktion i enterisk metan ses hvis dosis sænkes tilsvarende. Et øget indhold af NDF i rationen vil som udgangspunkt medføre en højere produktion af metan, da fiber fremmer produktionen af eddikesyre i vommen, og dermed produktionen af brint som indgår i metanogenesen. Meta-analysen viste i overensstemmelse med dette, at en øgning af indholdet af NDF (fiber) i rationen på 10 g per kg fodertørstof i forhold til gennemsnittet på 331 g NDF/kg fodertørstof, reducerede effekten af 3-nitrooxypropanol på produktionen af metan med 1,6 % og metan udtrykt som g/kg fodertørstof med 1,5 % for hver ekstra 10 g NDF/kg fodertørstof. Et tilsvarende øget respons i enterisk metan ses hvis indholdet af NDF sænkes tilsvarende. van Gastelen et al. (2019) har også samlet den relevante litteratur og konkluderer, at tilsætning af 3-nitrooxypropanol reducerede metan med 25-41 % hos malkekøer. Nedenstående figur 5.1 viser effekt på enterisk metan (% reduktion, y-akse) ved forskellige koncentrationer af Bovaer i rationen (mg/kg tørstof, x-akse) og ved forskellige indhold af NDF i rationen, baseret på modellen af Dijkstra et al. (2018).

På baggrund af en række danske og hollandske forsøg (se nedenfor) forventes dosis af Bovaer under danske forhold at være 60 mg/kg tørstof baseret på en afvejning af reduktionspotentiale og risiko for

reduktion i foderoptagelse. Samtidig er indholdet af NDF i danske rationer i gennemsnit 315 g/kg tørstof (Martinussen & Kjeldsen, 2021). Dette svarer ifølge figur 5.1 til et reduktionspotentiale på ca. 25 % under danske forhold.



Figur 5.1 Effekt på enterisk metan (g/kg fodertørstof) udtrykt i % (y-akse) ved forskellige koncentrationer af Bovaer i rationen (mg/kg tørstof, x-akse) og ved forskellige indhold af NDF i rationen (285-345 g/kg tørstof), baseret på modellen af Dijkstra et al. (2018): $\text{Effekt (\%)} = -38,8 - 0,248 \times ([3\text{-NOP}] - [3\text{-NOP}]_{\text{middel}}) + 0,152 \times ([\text{NDF}] - [\text{NDF}]_{\text{middel}})$, hvor $[3\text{-NOP}]_{\text{middel}}$ er 123 mg/kg tørstof og $[\text{NDF}]_{\text{middel}}$ er 331 g/kg tørstof.

Efter meta-analysen af Dijkstra et al. (2018) er der gennemført en række forsøg under nordeuropæiske forhold, dvs. primært i Danmark og i Holland.

I et dansk intensivt forsøg med 4 vom- og tarmfistulerede malkekøer fodret med kombinationer af Bovaer (0 eller 80 mg/kg tørstof) og forskellige fedtniveauer fandt Kjeldsen et al. (2022), at tildeling af Bovaer i en dosis på 80 mg/kg tørstof reducerede enterisk (L/kg tørstof) med 21-28 % (gennemsnit 25 %).

I et dansk produktionsforsøg med 48 malkekøer, som blev fodret kombinationer af Bovaer, nitrat og fedt fandt Maigaard et al. (2022a), at tildeling af Bovaer i en dosis på 80 mg/kg tørstof reducerede enterisk metan (g/kg tørstof) med 27 % når tildeling alene af Bovaer blev sammenlignet med kontrol. Tildeling af en kombination af Bovaer, nitrat og mere fedt reducerede enterisk metan (g/kg tørstof) med 23 %.

I et dansk produktionsforsøg med 72 malkekøer, som blev fodret kombinationer af Bovaer (0, 60 og 80 mg/kg tørstof) og forskellige forhold mellem græsensilage og majsensilage i rationen fandt Maigaard et al. (2022b) at tildeling af Bovaer i en dosis på 60 mg/kg tørstof reducerede enterisk metan (g/kg tørstof) med 30 % i en græs-baseret ration og 38 % i en majs-baseret ration. Derudover viste forsøget, at tildeling af Bovaer

i en dosis på 80 mg/kg tørstof reducerede enterisk metan (g/kg tørstof) med 27 % og 35 % i henholdsvis en græs- og en majsbaseret ration. De opnåede reduktioner i dette forsøg var henholdsvis 4 og 12 procent-point højere, end hvad modellen af Dijkstra et al. (2018) prædikterede ved en dosis på 60 mg/kg tørstof, og henholdsvis 5 procent-point lavere og 5 procent-point højere end hvad modellen prædikterede ved en dosis på 80 mg/kg tørstof. Dette indikerer, at modellen af Dijkstra et al. (2018) måske underestimerer effekten af Bovaer i typiske danske rationer, når det tildeles i en dosis på 60 mg/kg tørstof, mens effekten er mindre entydig ved en dosis på 80 mg/kg tørstof.

I et tilsvarende hollandsk produktionsforsøg fandt van Gastelen et al. (2022) en reduktion i enterisk metan (g/kg tørstof) på ca. 27 % i en græs-baseret ration og ca. 35 % i en majs-baseret ration ved en dosis på 60 mg/kg tørstof. Ved 80 mg var de tilsvarende reduktioner henholdsvis ca. 29 % og 42 %. Her var den opnåede effekt 4-11 procent-point højere end prædikeret ved en dosis på 60 mg/kg tørstof og 0-13 procent-point højere ved en dosis på 80 mg/kg tørstof. Tilsvarende det danske forsøg synes den i praksis opnåede effekt især at være højere end den prædikterede effekt i majsrige foderrationer, hvilket indikerer at andre faktorer end dosis og NDF niveau, som fx stivelsesindhold, påvirker effekten af Bovaer i praksis.

I et hollandsk studie med malkekøer i tidlig laktation fandt van Gastelen et al. (2020) at en dosis på 51 mg/kg tørstof reducerede enterisk metan (g/kg tørstof) med 16 %.

Antages det, at emission af enterisk metan er 165 kg pr årsko (Albrektsen et al., 2021) så svarer det til 4620 kg CO₂-ækv. pr årsko ved brug af en omregningfaktor på 28 for at gå fra kg metan til kg CO₂-ækv. Baseret på ovenstående vurderes det, at Bovaer ikke kan anvendes i en højere dosis end 60 mg/kg tørstof under nord-europæiske forhold, og at dette svarer til et reduktionspotentiale på 25-30 %. Det skal hertil bemærkes, at reduktionspotentialet er meget afhængigt af rationens sammensætning – særligt i forhold til valg af grovfodertype og sandsynligvis også grovfoderkvalitet. Et reduktionspotentiale for Bovaer på 25-30 % vil derfor svare til en reduktion på 1155-1386 kg CO₂-ækv. pr årsko.

5.3.4 Samspil til andre virkemidler

Kjeldsen et al. (2022) undersøgte effekten af at kombinere Bovaer (80 mg/kg tørstof) med tildeling af fedt i et intensivt forsøg med vom- og tarmfistulerede malkekøer. En foreløbig opgørelse viser, at der ikke var en vekselvirkning mellem tildeling af Bovaer og øget fedtniveau i rationen.

Maigaard et al. (2022a) undersøgte i et dansk produktionsforsøg med 48 malkekøer effekten af Bovaer (80 mg/kg tørstof) når det blev brugt alene eller sammen med tildeling af fedt og/eller nitrat, som værende de 3 mest lovende strategier til reduktion af enterisk metan hos malkekøer. Forsøget viste, at effekten af de 3 strategier på enterisk metan ikke var additiv, dvs. der var ingen ekstra effekt af at tildele nitrat eller øge fedtniveauet i rationen, når man tildelte Bovaer.

Valg af grovfoder kan påvirke det samlede klimaaftryk i både positiv og negativ retning både pga. forskelle i aftryk fra dyrkning af foderet og som følge af forskelle i enterisk metan, når fx græsensilage udskiftes med majsensilage. Effekten af Bovaer på enterisk metan-produktion synes at være afhængig af rationens sammensætning og særligt rationens fiberniveau og -type og stivelsesniveau og -type. Der er således set forskelle i repons afhængig af type af grovfoder (Van Gastelen et al., 2022; Maigaard et al., 2022b). Van Gastelen et al. (2022) fandt, at udskiftning af græsensilage med majsensilage medførte en øget reduktion i enterisk metan udtrykt i g/dag, g/kg fodertørstof og g/kg EKM, når Bovaer blev tildelt i doser på enten 60 og 80 mg/kg tørstof. Helt tilsvarende fandt Maigaard et al. (2022b) i et dansk forsøg, at reduktionen i enterisk metan (g/kg fodertørstof) var 30 % i en græsbaseeret ration og 38 % i en majsbaseeret ration, når Bovaer blev tildelt i en dosis på 60 mg/kg tørstof. Når reduktionen i enterisk metan istedet blev udtrykt som g/kg EKM var reduktionen 31 % i den græsbaseerede ration og 38 % i den majsbaseerede ration. Responset i metan-reduktion ved en dosis på 80 mg for de forskellige foderrationer var helt tilsvarende responset med en dosis på 60 mg.

Brug af Bovaer har især i danske forsøg resulteret i reduktion i foderoptagelse ved høj dosis. Dette er sandsynligvis en følge af et højere brinttryk i vommen, og vil medføre en reduktion i mælkeydelse, som kan undgås ved en lavere dosis.

I et intensivt forsøg med 4 vom- og tarmfistulerede malkekøer fodret med kombinationer af Bovaer (0 eller 80 mg/kg tørstof) og forskelligt fedtniveau fandt Kjeldsen et al. (2022), at tildeling af Bovaer i en dosis på 80 mg/kg tørstof reducerede foderoptagelsen (kg tørstof/dag) med 13-21 % (gennemsnit 17 %).

I et produktionsforsøg med 48 malkekøer, hvor der blev fodret med kombinationer af Bovaer, nitrat og fedt fandt Maigaard et al. (2022a), at tildeling af Bovaer (80 mg/kg tørstof) reducerede foderoptagelsen (kg tørstof/dag) med 12 % i en direkte sammenligning med køer på kontrolbehandlingen, og køer som alene fik tildelt Bovaer og ikke nitrat eller højt fedtniveau.

Maigaard et al. (2022b) fandt, at foderoptagelsen (kg tørstof pr dag) ved tildeling af Bovaer i en dosis på 80 mg/kg tørstof blev signifikant reduceret med 12 % i en majsbaseeret ration, men reduktionen kun var numerisk i græsbaseerede rationer (6 %). I rationer med en dosis på 60 mg/kg tørstof var reduktionerne i foderoptagelse kun numeriske og på henholdsvis 3 % og 2 % i græs- og majsbaseerede rationer.

Van Gastelen et al. (2022) fandt, at foderoptagelsen (kg tørstof/dag) blev signifikant reduceret både ved en dosis på 60 mg/kg tørstof (3 %) og ved en dosis på 80 mg/tørstof (6 %), og at denne reduktion var uafhængig af rationens indhold af majs- og græsensilage. Det var imidlertid kun ved en dosis på 80 mg/tørstof at også mælkeydelsen var signifikant reduceret.

I et hollandsk studie med malkekøer i tidlig laktation fandt van Gastelen et al. (2020), at en dosis på 51 mg/kg tørstof ikke påvirkede foderoptagelsen (kg tørstof pr dag).

5.3.5 Usikkerheder

Som tidligere nævnt synes den metan-reducerende effekt af Bovaer at være afhængig af dosis og rationens sammensætning, og dette synes at være særligt gældende under nord-europæiske forhold. Der er derfor et akut forskningsbehov for forsøg, som undersøger sammenhængen mellem brugen af Bovaer ved en dosis på de anbefalede 60 mg/kg tørstof og forskellige andre virkemidler/foderadditiver. Endvidere er der behov for kvantificering af, om den anbefalede dosis på 60 mg/kg tørstof har en potentiel negativ effekt på foderoptagelse og produktion, samt om den metanreducerende effekt er ens på tværs af fx foderrationens sammensætning, race, produktionsniveau, produktionssystem mm. Dette vil sikre, at der er grundlag for en bedriftsspecifik vurdering af effekten på enterisk metanproduktion ved brug af Bovaer, som afhænger af produktionsmæssige forhold på den enkelte bedrift.

Referencer

- Albrechtsen, R., Mikkelsen, M.H., Gyldenkerne, S. (2021). Danish emission inventories for agriculture. Inventories 1985 – 2018. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 202 pp. Scientific Report No. 443. <http://dce2.au.dk/pub/SR443.pdf>
- Almeida, A.K., Hegarty, R.S., Cowie, A. (2021). Meta-analysis quantifying the potential of dietary additives and rumen modifiers for methane mitigation in ruminant production systems. *Animal Nutrition*, 7, 1219-1230. /doi.org/10.1016/j.aninu.2021.09.005.
- Arndt, C., Hristov, A.N., Price, W.J., McClelland, S.C., Pelaez, A.M., Cueva, S.F., Oh, J., Dijkstra, J., Bannink, A., Bayat, A.R., Crompton, L.A., Eugene, M.A., Enahoro, D., Kebreab, E., Kreuzer, M., McGee, M., Martin, C., Newbold, C.J., Reynolds, C.K., Schwarm, A., Shingfield, K.J., Veneman, J.B. Yanez-Ruiz, D., Yu, Z. (2022). Full adaptation of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 °C target by 2030 but not 2050. *PNAS*, 119, 20, 10 sider. doi.org/10.1073/pnas.2111294119.
- Dijkstra, J., Bannink, A., France, J., Kebreab, E., van Gastelen, S. (2018) Short communication: Antimethanogenic effects of 3-nitrooxypropanol depend on supplementation dose, dietary fiber content, and cattle type. *Journal of Dairy Science*, 101, 9041-9047. doi.org/10.3168/jds.2018-14456.
- Duin, E.C., Wagner, T., Shima, S., Prakash, D., Cronin, B., Yáñez-Ruiz, D.R., Duval, S., Rumbeli, R., Stemmler, R.T., Thauer, R.K., Kindermann, M. (2016). Mode of action uncovered for the specific reduction of methane emissions from ruminants by the small molecule 3-nitrooxypropanol. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 113, 6172-6177.
- EFSA (2021). Safety and efficacy of a feed additive consisting of 3-nitrooxypropanol (Bovaer® 10) for ruminants for milk production and reproduction (DSM Nutritional Products Ltd). *EFSA Journal*, 19, 6905, 35 sider. doi: 10.2903/j.efsa.2021.6905.

- EU (2022). Kommissionens gennemførelsesforordning (EU) 2022/565 af 7. april 2022 om godkendelse af et præparat af 3-nitrooxypropanol som tilsætningsstof til foder til malkekøer og avlskøer (indehaver af godkendelsen: DSM Nutritional Products Ltd, repræsenteret i EU af DSM Nutritional Products Sp. z o.o.). 3 sider.
- Kjeldsen, M.H., Weisbjerg, M.R., Walker, N., Hellwing, A.L.F., Lund, P. (2022). Gas exchanges and dry matter intake when lactating cows are fed 3-NOP and fat. Proceedings of the 8th International Greenhouse Gas & Animal Agriculture Conference (GGAA), 146.
- Maigaard, M. Weisbjerg, M.R., Johansen, M., Lund, P. (2022a). Combined effects of dietary fat, nitrate and 3-NOP in dairy cow enteric methane emission. Proceedings of the 8th International Greenhouse Gas & Animal Agriculture Conference (GGAA), 187.
- Maigaard, M., Weisbjerg, M.R., Lund, P., Ohlsson, C., Walker, N. (2022b). Effekten af 3-NOP afhænger af dosis og grovfodertype. Indlæg Fodringsdag 2022. https://www.landbrugsinfo.dk/-/media/landbrugsinfo/public/8/e/9/fd22_effekten_3nop_afh_af_dosis_og_grovfodertype_morten_maigaard.pdf
- Martinussen, H., Kjeldsen, A.M. (2021). Indhold af næringsstoffer i foderrationer til malkekøer. Notat, SEGES. 2 s.
- Ohlsson, C. (2022). Pers. comm., DSM.
- Olijhoek, D.W., Hellwing, A.L.F., Brask, M., Weisbjerg, M.R., Højberg, O., Larsen, M.K., Dijkstra, J., Erlandsen, E.J., Lund, P. (2016). Effect of dietary nitrate level on enteric methane production, hydrogen emission, rumen fermentation, and nutrient digestibility in dairy cows. J. Dairy Sci. 99, 6191-6205.
- van Gastelen, S., Bannink, A., Dijkstra, J. (2019). Are dietary strategies to mitigate enteric methane emission equally effective across dairy cattle, beef cattle, and sheep? Journal of Dairy Science, 102, 6109-6130, doi: 10.3168/jds.2018-15785.
- van Gastelen, S., Dijkstra, J., Binnendijk, G., Duval, S.M., Heck, J.M.L., Kindermann, M., Zandstra, T., Bannink, A. (2020). 3-Nitrooxypropanol decreases methane emissions and increases hydrogen emissions of early lactation dairy cows, with associated changes in nutrient digestibility and energy metabolism. Journal of Dairy Science, 103, 8074-8093, doi.org/10.3168/jds.2019-17936.
- van Gastelen, S., Dijkstra, J., Heck, J.M.L., Kindermann, M., Klop, A., de Moi, R., Rijnders, D., Walker, N., Bannink, A. (2022). Methane mitigation potential of 3-nitrooxypropanol in lactating cows is influenced by basal diet composition. Journal of Dairy Science, 105, 4064-4082, doi.org/10.3168/jds.2021-20782

5.4 Genetisk selektion af malkekvæg (KVM5.4)

Forfatter: Trine Michelle Villumsen, Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning

Fagfællebedømmer: Peter Løvendahl, Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning

Genetisk selektion af malkekvæg med henblik på lavere klimabelastning har fokus reduktion af malkekøernes metanproduktion pr producerede kg mælk og kød. Der er overordnet set to måder hvor man via genetisk selektion kan påvirke klimabelastningen:

- Inddragelse af egenskaber i avlsmålet der påvirker metanproduktionen.
- Strukturelle ændringer af kvægavlen.

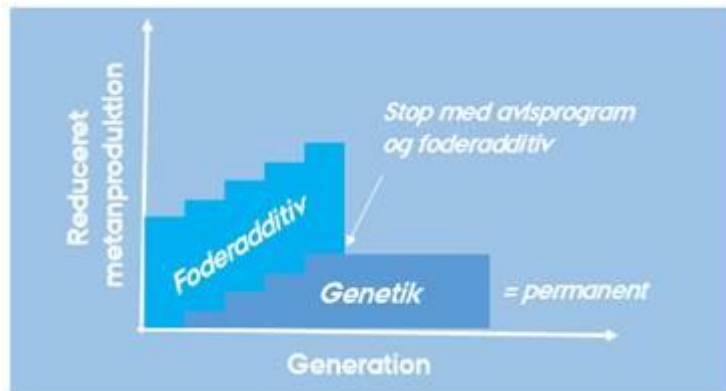
Relevante egenskaber i forbindelse med genetisk selektion af malkekvæg efter mindre klimabelastning omfatter både egenskaber hvor der selekteres direkte efter mindre metanproduktion på baggrund af individuelle metanmålinger på kørne, samt egenskaber hvor der sker en indirekte selektion på baggrund af egenskaber som er genetisk korrelerede med metanproduktionen, fx fodereffektivitet.

De strukturelle ændringer er af mere overordnet karakter. De kan bl.a. omfatte et større fokus på produktion af kød fra malkekvæg og deres afkom, frem for kødkvæg, idet produktionen af kød på kødkvæg har et klimaaftryk som er tre gange højere end kød fra malkekvæg og afkom af disse, hvor størstedelen af klimabelastningen allokeres til mælk som er hovedproduktet (Mogensen et al., 2016). Dette kan fx ske ved at avle i retning af toformålsrcer hvor kødproduktion har en relativt større vægt i avlsmålet. Et andet eksempel på en strukturel ændring er systematisk krydsning af racer for at opnå krydsningsfrodighed på egenskaber såsom sundhed og holdbarhed. Et tredje eksempel er mere systematisk anvendelse af kønssorteret sæd til at producere kvier, og kødkvægssæd på resterende køer til at producere slagtedyr af høj kvalitet. Der må forventes at være synergieffekter ved både at inddrage nye egenskaber og foretage strukturelle ændringer i kvægavlen

I forhold til selektion af malkekvæg for lavere klimabelastning har der rent forskningsmæssigt hidtil været størst fokus på inddragelse af nye egenskaber i avlsmålet, frem for det potentiale der er ved at ændre på strukturen i kvægavlen. I den efterfølgende tekst er der således størst fokus på inddragelse af nye egenskaber, som har relation til malkekøers metanproduktion.

Malkekøers metanproduktion har i mindre studier fra både Danmark og Internationalt vist sig at have en moderat arvbarhed i størrelsesordenen 0,1 til 0,3, men ofte omkring 0,2 afhængig af definitionen af metanfænotypen (fx Hayes et al., (2016), Lassen & Løvendahl (2016), Manzanilla-Pech et al. (2022a)). Arvbarheden er et udtryk for andelen af den variation man observerer mellem køers metanudskillelse, som skyldes deres gener. Der er dermed en begrundet forventning om, at genetisk selektion efter reduceret metanudledning pr kg mælk og kød kan blive en vigtig brik i reduktionen af klimagasser fra kvægproduktionen. Det er vigtigt at være opmærksom på, at avl efter køer der producerer mindre metan

pr kg mælk og kød er en langsommere proces end en et managementmæssigt tiltag som fx tilsætning af et foderadditiv, der har en øjeblikkelig effekt, men kun så længe additivet tilsættes. Genetiske ændringer er små for hver generation, men til forskel fra managementmæssige tiltag er ændringerne permanente og kumulative over hver efterfølgende generation. Dette er illustreret skematisk i nedenstående figur 5.2, med et foderadditiv som eksempel på et managementmæssigt tiltag.



Figur 5.2 Skematisk illustration af forskellen mellem et managementmæssigt tiltag og avlsprogram til reduktion af metanproduktion hos malkekøer.

I dag selekteres malkekøer på baggrund af mange egenskaber såsom mælkeydelse, kælvningsevne og sygdomsforekomst, som sammen indgår i et totaløkonomisk indeks (Nordic Total Merit, NTM). I NTM har hver egenskab en økonomisk vægt der sammen med egenskabernes arvbarheder og genetiske korrelationer, er bestemmende for den genetiske fremgang for hver egenskab. Jo større relativ vægt der lægges på en given egenskab, jo større fremgang for egenskaben kan forventes.

Fælles for egenskaberne i NTM er, at det er de omhyggelige registreringer fra danske kvægbesætninger, og indberetningen til en landsdækkende database, som giver grundlag for den genetiske fremgang.

Indirekte selektion for reduceret metanproduktion på baggrund af egenskaber korreleret til metanproduktionen er en brugbar strategi for at nedbringe metanproduktionen pr kg mælk og kød, men det vil altid være mere effektivt også at selekttere direkte for reduceret metanproduktion pr. kg mælk og kød.

De første forudsætninger for at selekttere køer direkte for reduceret metanudledning er, at der er gode registreringer af metanproduktionen fra et stort antal malkekøer, der repræsenterer et bredt udsnit af parametre som kan have betydning for metanproduktionen, såsom ydelsesniveau, race, produktionssystem, laktation og laktationsstadiet. Der er desuden behov for etablering af en central metandatabase som kan danne grundlag for udvikling af genetiske modeller for metanproduktion.

Over en årerække har Aarhus Universitet (Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning) været involveret i udviklingen af et relativt prisbilligt apparat til måling af metankoncentration som kan anvendes

i private malkerobotbesætninger, en såkaldt sniffer som måler metan- og kuldioxidkoncentration i køers udåndingsluft i malkerobottens fodertrug under hver malkning, typisk 2-5 daglige målinger á 4-10 minutters varighed for hver ko.

Sniffermetoden har vist sig at være tilstrækkelig nøjagtig til, at det er muligt at anvende koncentrationerne som grundlag for genetisk selektion. Udviklingen af snifferen har dannet grundlag for, at det er muligt at opskalere antallet af metanmålinger til at omfatte målinger i mange private besætninger med malkeroboter.

Der er i øjeblikket flere igangværende forskningsprojekter, som har fokus på storskala metanmålinger i private besætninger, og udvikling af en database som sammen med afstamnings- og DNA information skal danne grundlag for udviklingen af genomiske modeller til avlsværdivurdering, der kan rangere malkekøer efter deres metanproduktion. Det vil være muligt at avlsværdivurdere alle danske malkekøer, også dem uden egne metanmålinger, på baggrund af slægtskab og DNA information. Men sikkerheden på avlsværdierne vil blive højere jo mere information (egen/slægtnings) der ligger til grund for avlsværdien.

I NTM indekset selekteres der allerede for lavere klimabelastning, da der selekteres for egenskaber som er korreleret til metanproduktionen, fx mælkeydelse. Når køer selekteres for højere mælkeydelse sker der indirekte også en selektion for lavere metanproduktion pr kg mælk. Dette er bekræftet af et belgisk studie af Kandel et al. (2018) som fandt et korreleret respons mellem mælkeydelse og metan/kg mælk på -0,15 dvs. højere ydelse giver mindre metan/kg mælk, selv når metan ikke indgår i indekset.

Et simuleringstudie af Haas et al. (2021) baseret på det hollandske totaløkonomiske indeks og sammenhørende genetiske parametre fandt tilsvarende at der kan forventes 13 % mindre metan/kg produceret mælk i 2050 som et udtryk for, at der indgår egenskaber der er korreleret til metanproduktionen i indekset. Når metan/kg mælk blev inkluderet som en selvstændig egenskab i indekset med en økonomisk vægt svarende til CO₂ kvoteprisen i 2021, så kunne der forventes en reduktion i metanudledningen pr kg mælk på 24 % i 2050. I studiet understreges, at for at opnå tilstrækkelig sikkerhed på indekserne (>0,4) for at selektere for reduceret metan pr kg mælk, så kræves der tilstrækkelig med data fra køer i mange besætninger, samt DNA information fra disse køer. Studiet understreger desuden, at direkte selektion er mere effektiv end indirekte selektion.

Et review af Løvendahl et al. (2018) har beskrevet hvordan flere studier har vist en sammenhæng mellem fodereffektivitet og metanproduktion, hvor mere fodereffektive køer producerer mindre metan pr kg mælk.

Manzanilla-Pech et al., (2022a) har beregnet arvbarheder og genetiske korrelationer for forskellige metanfænotyper og forskellige definitioner af fodereffektivitet på baggrund af registreringer fra Danmarks Kvægforskningscenter. De fandt arvbarheder for henholdsvis metan- og fodereffektivitetsfænotyperne på hhv. omkring 0,2 og 0,15. De fandt også moderat gunstige genetiske korrelationer mellem metan/kg mælk og fodereffektivitet. Resultaterne viste at de genetiske parametre og sammenhænge er meget påvirket af

hvordan egenskaberne defineres, og det derfor er vigtigt at få fastlagt hvilken definition af hhv. metanfænotype og fodereffektivitet der er den bedste kandidat til fremtidige avlsværdivurderinger med henblik på at reducere klimabelastningen. Dette studie bekræftede også, at den genetiske korrelation mellem egenskaberne bevirker at en selektion for mere fodereffektive køer vil resultere i mindre metan/kg mælk, selv om metan ikke indgår i indekset, mens inddragelse af både metan og fodereffektivitet som selvstændige egenskaber i det totaløkonomiske indeks vil reducere klimabelastningen yderligere, ligesom det er tilfældet ved selektion for højere ydelse.

En af forudsætningerne for at beregne fodereffektivitet er kendskabet til individuel foderoptagelse. Individuel foderoptagelse er generelt omkostningstungt og tidskrævende at registrere, men gennem de seneste år har kvægavlsforeningen Viking Genetics har sammen med Teknologisk Institut udviklet en metode til at beregne individuel foderoptagelse for køer i private besætninger, på baggrund af 3D kameraovervågning, hvilket bl.a. har givet mulighed for storskala registrering af denne egenskab. Et igangværende forskningsprojekt, som foreløbigt er baseret på foderoptagelse fra omkring 4.000 køer viser en arvbarehed på omkring 0,15 til 0,19 for residual foderoptagelse som er en indikator for fodereffektivitet (Manzanilla-Pech et al., 2022b).

I et andet forskningsprojekt foretages ligeledes registreringer af metankoncentration og foderoptag på slagtekalve som er krydsninger af kød- og malkekvæg, med henblik på at undersøge om disse krydsninger kan producere kød mere klimavenligt end renracede kalve af malkekvæg. Metanregistreringerne skal anvendes til at udvikle en model til genetisk selektion efter reduceret metanudledning pr kg kød (Johansen et al., 2022)

5.4.1 Anvendelse

Genetisk selektion kan som udgangspunkt anvendes på alle kalve, kvier og køer med kendt afstamning og/eller en DNA-genotypning såfremt der er udviklet en genetisk model til avlsværdivurdering, og der er et tilstrækkeligt datagrundlag. Der vil dog være forskel på, hvor sikkert et individs avlsværdi bestemmes, afhængig af, om der foreligger egne registreringer eller om avlsværditallet baserer sig på registreringer fra beslægtede individer. Strukturelle ændringer af kvægavlen har ligeledes potentiale til at omfatte alle danske malkekøer.

5.4.2 Relevans og potentiale

Genetisk selektion med henblik på lavere klimabelastning kan enten foregå direkte på baggrund af metanmålinger eller indirekte form af egenskaber korreleret til metanudledningen pr kg mælk og kød, fx mælkeydelse og fodereffektivitet eller som en kombination af begge typer, da begge typer af egenskaber er relevante i avlsværdivurderingen hos malkekvæg, med henblik på at opnå en lavere klimabelastning.

Da både danske og internationale studier har vist arvbårheder omkring 20 % for metan, er der et væsentligt potentiale ved at inddrage metan i det totaløkonomiske indeks. Jo højere værdi (vægt) metanudledningen pr kg mælk og kød tillægges, jo større avlsfremgang og dermed lavere klimabelastning kan opnås, men høj vægt på metan vil generelt medføre mindre fremgang for egenskaber i indekset. Dette gælder især for egenskaber som genetisk er meget negativt korreleret til reduceret metanproduktion, mens egenskaber som genetisk er meget positivt korreleret til reduceret metanproduktion kan få et løft. Eksempler på egenskaber som er negativt korreleret til reduceret metanproduktion er mælkeydelse, mens overlevelse og mastitiresistens er positivt korreleret (Richardson et al., 2021). Da der i dag kun er udviklet sniffere til brug i malkeroboter, er der pt kun muligt at måle metan hos de 25 % af malkekøerne som malkes i robotter. Der findes andet udstyr til at måle i fx foderautomater, men dette er væsentligt dyrere end sniffere.

Fodereffektivitet er i flere studier fundet at være genetisk korreleret til metanproduktion pr kg mælk og har samtidig en arvbårhed og genetisk variation af en størrelsesorden som muliggør genetisk fremgang. Det ovenfor nævnte setup med 3D kameraer synes at have potentiale til at registrerer fænotyper for fodereffektivitet som på sigt kan anvendes i en avlsværdivurdering. Systemet har den fordel, at der i den igangværende udvikling er fokus på at understøtte daglige managementbeslutninger. Dette kan være med til at sikre, at systemet er relevant for en stor del af de danske kvægbesætninger. Kameraerne har dog bl.a. den begrænsning, at beregning af fodereffektivitet kræver at al foder indtages på foderbordet, hvilket bevirker at systemet ikke kan anvendes til at beregne fodereffektivitet i perioder med afgræsning.

Mælkeydelse indgår allerede i NTM indekset, og der er igangværende forskningsprojekter som sigter mod at få skabt et tilstrækkeligt datagrundlag for metanproduktion og fodereffektivitet som kan sikre udviklingen af genetiske modeller til avlsværdivurdering af egenskaberne.

Der har hidtil ikke været stor forskningsmæssig fokus på hvorledes strukturelle ændringer af kvægavlen kan være med til at reducere klimabelastningen fra produktionen af mælk og oksekød, hvilket kort er beskrevet i indledningen til afsnittet. Da 20 % af oksekødsproduktionen i Danmark foregår på kødkvæg, som er tre gange så klimabelastende, som den del der foregår på baggrund af malkekvæg, er der et meget stort reduktionspotentiale ved at ændre det danske avlsmål så der kommer en højere vægtning på kødproduktion, for at få avlsfremgang for denne egenskab. Der er et behov for et større forskningsmæssigt fokus på, hvordan strukturelle ændringer i kvægavlen kan være med til at reducere klimapåvirkningen fra mælk og kød i samspil med nye egenskaber.

5.4.3 Effekt på drivhusgasudledning

Det ovenfor nævnte hollandske simuleringsstudie fandt, at der kan forventes en metanreduktion på omkring 24 % pr. kg mælk i 2050 ved at inddrage en avlsværdivurdering for metan i det totaløkonomiske indeks med en økonomisk vægt for metan, svarende til CO₂ kvoteprisen i 2021. Ved at bevare det nuværende totaløkonomiske indeks i Holland forventedes en metanreduktion på omkring 13 % pr. kg

mælk, som følge af den genetiske korrelation mellem metan og de nuværende egenskaberne i avlsmålet (de Haas et al., 2021). Det forventes, at disse tal stort set kan overføres til danske forhold.

Effekten ved at inddrage metan og korrelerede egenskaber såsom fodereffektivitet i avlsmålet vil blive påvirket af faktorer såsom økonomisk vægt, hvor en højere økonomisk vægt på egenskaberne vil accelerere avlsfremgangen. Kvaliteten af registreringerne og størrelsen af datagrundlaget har en afgørende betydning for, med hvor stor sikkerhed avlsværdierne kan bestemmes, og dermed muligheden for en sikker selektion af de bedste dyr. Overordnet set, synes det ikke urealistisk at forvente en avlsfremgang på 1 % pr. år, i et avlsprogram hvor der fortsat er fokus på egenskaber såsom længere levetid og øget ydelse, men hvor der også fremadrettet selekteres direkte på metanreduktion og forbedret fodereffektivitet.

En avlsmæssig ændring mod et større fokus på oksekødsproduktion fra malkekvæg men med uændret mælkeproduktion, vil betyde at der kan produceres mere kød fra malkekvæg og deres afkom end tilfældet er i dag. Hvis der reduceres tilsvarende i kød produceret på kødkvæg, vil det reducere klimaaftrykket fra det kød der flyttes fra kødkvægsproduktionen til malkekvægsproduktionen til en trediedel

5.4.4 Samspil til andre virkemidler

I de kommende år forventes at der bliver et større fokus på tilsætning af foderadditiver og udvikling af foderplanter, der resulterer i mindre enterisk metan. Der er væsentligt at få klarlagt om tilsætning af foderadditiver ændrer rangeringen af køer med hensyn til metanproduktion. Hvis dette er tilfældet, synes det også sandsynligt at dette kan blive tilfældet ved fodring med foderplanter som resulterer i mindre enterisk metan. Det er for nuværende ikke kendt, i hvor høj grad der vil forekomme vekselvirkninger mellem køernes gener og en ændring i foderrationen og tilsætning af additiver, som potentielt kan bevirke at der forekommer ændringer i avlsdyrenes indbyrdes rangering med hensyn til metanproduktion.

Der er ligeledes behov for en bedre forståelse for sammenhængen mellem koens genetik og vommens mikroorganismer. Selv om den mikrobielle sammensætning i vommen er ansvarlig for dannelse af metan, er man kun i den indledende fase med at forstå hvordan genetik påvirker denne. I et studie af vomvæske fra 750 køer i kommercielle danske malkekvægsbesætninger er det blevet vist, at mens koens genetik forklarer omkring 20 % af variationen i metanproduktionen, så forklarede den mikrobielle sammensætning i vommen 13 % af variationen (Difford et al., 2018). Studiet viste også, at de to komponenter tilsyneladende har en minimal vekselvirkning således at køer med en type af gener stadig vil have høj eller lav metanproduktion uanset hvilke mikrober der findes i vommen. Der er behov for yderligere studier, for endeligt at afklare, hvorvidt det er muligt at selektere for et specifikt vommikrobielt miljø som kan reducere metanproduktionen.

5.4.5 Usikkerheder

Hidtidige genetiske parametre for metan og fodereffektivitet i både danske og udenlandske studier er i de fleste tilfælde baseret på relativt små datasæt. Ved angivelse af effekt på drivhusgasudledning er det forudsat at storskalamålinger i private besætninger vil resultere i tilsvarende genetiske parametre.

Referencer

- Difford G.F., Plichta, D.R., Løvendahl, P., Lassen, J., Noel, S.J., Højberg, O., Wright, A.D.G., Zhu, Z., Kristensen, L., Nielsen, H.B., Guldbrandtsen, B., Sahana, G. (2018) Host genetics and the rumen microbiome jointly associate with methane emissions in dairy cows PLoS genetics 14:10: e1007580
- de Haas Y., Veerkamp R.F., de Jong, G., Aldridge, M.N. (2021) Selective breeding as a mitigation tool for methane emissions from dairy cattle. Animal. 15, Suppl 1:100294. doi: 10.1016/j.animal.2021.100294.
- Hayes, B.J., Donoghue K.A., Reich C.M., Mason, B.A., Bird-Gardiner, T., Herd RM, Arthur PF. (2016). Genomic heritabilities and genomic estimated breeding values for methane traits in Angus cattle. J Anim Sci. 2016, 94:902-8. doi: 10.2527/jas.2015-0078.
- Johansen, K., Kargo, M., Bjerring, M., Løvendahl, P., Buitenhuis, A.J. (2022). Phenotypic differences and genetic parameters for methane concentration in BeefxDairy crossbred slaughter calves.
- Lassen, L., Løvendahl, P. WCGALP 2022 proceedings, Wageningen Academic Publishers Heritability estimates for enteric methane emissions from Holstein cattle measured using noninvasive methods J. Dairy Sci., 2016, 99:1959-1967. doi: 10.3168/jds.2015-10012
- Kandel, P., Vanderick, S., Vanrobays, M.L., Soyeurt, H., Gengler, N. (2018). Consequences of genetic selection for environmental impact traits on economically important traits in dairy cows. Animal Production Science, 2018, 58, 1779-1787. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100294>
- Løvendahl, P., Difford, G.F., Li, B., Chagunda, M.G.G., Huhthnen, P., Lidauer, M.H., Lassen, J., Lund, P. (2018). Animal, 2018, 12:52, 336-349. doi:10.1017/S1751731118002276
- Manzanilla-Pech, C.I.V., Stephansen, R., Difford, G.F., Løvendahl, P., Lassen, J. (2022a). Selecting for Feed Efficient Cows will help to reduce methane gas emissions. Front. Genet., doi: 10.3389/fgene.2022.885932/full
- Manzanilla-Pech, C.I.V., Stephansen, R., Andersen, T., Lassen, J. (2022b). Genetic parameters for residual feed intake in three dairy cattle breeds in commercial farms using 3D cameras. WCGALP 2022 proceedings, Wageningen Academic Publishers.

- Mogensen, L., Nguyen, T.L.T, Madsen, N.T., Pontoppidan, O., Preda, T., Hermansen, J.E. (2016). Environmental impact of beef sourced from different production systems - focus on the slaughtering stage: input and output, *Journal of Cleaner Production*, 133, 284-293, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.05.105
- Richardson C.M., Sunduimijid B., Amer P., van den Berg I., Pryce J.E. (2021). A method for implementing methane breeding values in Australian dairy cattle. *Animal Production Science*. 61, 1781-1787. doi:10.1071/AN21055

6 Husdyrgødning

Forfattere: Anders Peter Adamsen, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Frederik Rask Dalby, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Der er i forbindelse med modellering benyttet referencestal til udregning af potentialet for reduktion af drivhusgasudledning. Referencestal skal forstås som alternativet, når man ikke udnytter den pågældende teknologi. De anvendte specifikationer på referencestaldene er vist i tabel 6.1.

Mængden af gylle kan opgøres på forskellige måder: ab dyr, ab stald og ab lager. Generelt vil gyllemængder stige ned af kæden, idet der til mængder ab dyr skal tillægges strøelse, vandspild, eventuelt foderspild, og for gyllemængder i lagre vil der komme ekstra bidrag fra eventuelle ensilage og gødningslagre og regn, hvis der ikke er en fast overdækning. For at man kan sammenligne med andre opgørelser, så er der i tabel 6.1 vist gyllemængder både ab dyr og ab lager.

Tabel 6.1 Referencestalde for svin og kvæg brugt i modellering af metanproduktioner og reduktions-potentialet.

Dyre-type	Staldnavn ^a	Prod.-areal, m ² dyr	Kummeareal, % af prod.-areal	Udslusnings-interval, dage	Udbredelse, gylle ab dyr pr. dyretype, % ^b	Gylle ab dyr, kilotons/år	Gylle ab lager, kilotons/år
Små-grise	Toklimastald m. delvis spaltegulv	0,3	50	24	80	2394	3408
	Drænet gulv + spalter (50/50)	0,3	100	48	18	536	761
Slagte-svin	Drænet gulv + spalter (33/67)	0,65	100	29	49	4795	5266
	Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	0,65	50	15	11	1049	1139
	Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	0,65	75	22	39	3824	4153
Søer	Drægtighedsstalde., løs + individuel, delvis spalte ^c	2,5	39	30	64	2689	4603
	Farestalde., kassesti, delvis spalte	4,9	50	41	25	1044	1519
	Farestalde., kassesti, fuldspalte	4,9	100	41	4,7	200	291
Kvæg	Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	8,0	66	28	38	7336	8686
	Sengebåse, fast gulv, skraberanlæg	8,0	6	1	14	2695	3191
	Sengebåse, spalter, skraberanlæg ^d	8,0	-	-	18	3525	4174
	Sengebåse, drænet-fast gulv, 2% hæld, skrab ^d	8,0	-	-	5,0	970	1148

^a Staldnavn som angivet i DCE aktivitetsdata (Albrektsen et al., 2021).

^b Udbredelse baseret på gylleudskillelse ab dyr inden for hver dyretype. Ikke alle staldd typer er medtaget, hvorfor udbredelsen ikke summerer op til 100% inden for hver dyretype.

^c Drægtighedsstalde inkl. løbeafsnit (også kaldet løbe- /drægtighedsstalde) med løse og individuelt søer i bokse er slået sammen, da der er usikkerhed omkring fordelingen. Således bruges produktions-og kummeareal for løse søer for alle søer i drægtighedsstalde, da søer i individuelle bokse udfases henimod 2032 og vurderes at udgøre en mindre andel af søer i løbe-/drægtighedsstalde pr. 2020.

^d Mangelfuld viden om kummeareal. I estimer antages derfor at disse stalde har samme CH₄ udledning som "Sengebåse, fast gulv, skraberanlæg".

6.1 Hyppig udslusning af gylle fra stalde (KVM6.1)

Forfattere: Frederik Rask Dalby og Anders Peter Adamsen, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Lise Bonne Guldberg, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Hyppig udslusning af gylle dækker i princippet over udslusning, når det sker oftere end nødvendigt som følge af fyldte gyllekummer eller gyllekanaler. Oftest henviser hyppig udslusning dog til gyllesystemer, hvor gylle udsledes ugentligt eller hyppigere. Hyppig udslusning kan anvendes i de fleste gyllebaserede systemer og reducerer metanudledning fra gylle i stalden. Strategien ved hyppig udslusning er, at gyllen ønskes opbevaret i udendørslagre, hvor temperaturen typisk er lavere end i stalden. Ved at opbevare gyllen ved lavere temperatur, reduceres mikroorganismernes omsætningshastighed af det organiske materiale og således reduceres metanproduktionen. Hyppig udslusning kan med fordel benyttes i svinestalde, hvor staldtemperaturen typisk er omkring 20 °C og med gylletemperaturer mellem 18-20 °C (Albrechtsen et al., 2021). I kvægstalde med naturlig ventilation følger staldtemperaturen (og gyllens temperatur) udetemperaturen (Albrechtsen et al., 2021), men er typisk ca. 3 °C højere, og derfor vil nettoeffekten af hyppig udslusning teoretisk set være lavere. I praksis er der en række andre forskelle, der påvirker metanproduktionen, fx daglig produktion af gylle, højden af restgylle efter udslusning, udslusningshyppighed, foderspild osv. For både svine- og kvægstalde er det af betydning, hvor stor en mængde restgylle, der efterlades i gyllekanalerne eller gyllekummerne efter udslusning, da tilbageværende gylle kan fungere som podningsmateriale for frisk udskilt gylle og dermed fremskynde metanproduktionen (Dalby et al., 2021). Derfor vil installationer, hvor gyllen skrubes væk, reducerer metanudledningen mere end ved standard rørudslusning, hvor der typisk står nogle centimeters restgylle tilbage efter udslusning. Det er helt centralt, at hyppig udslusning bruges i kombination med andre virkemidler i lageret, da en stor del af den opnåede klimagevinst i stalden ellers reduceres af øget metanudledning fra udendørslageret.

6.1.1 Anvendelse

I svinestalde med rørudslusningssystemer (også kaldet vakuumudslusning), kan der normalvis ikke udsledes oftere end ugentligt, da udslusningssystemet kræver en bestemt gyllehøjde i kummerne for at fungere korrekt. Adamsen & Kai (2022) lavede en vurdering af driftmæssige udfordringer ved hyppig udslusning i svinestalde og fandt, at ugentlig udslusning var muligt i slagtesvinesstalde, løbedrægtighedsstalde med delvis spaltegulv og gyllekumme, samt for smågrise i to-klimastalde. Alternative systemer, såsom linespilsanlæg, gylletragte eller gyllerender kan implementeres for at øge udslusningshyppigheden og dermed reducere gyllens opholdstid i stalden, men disse teknologier kan kræve større staldombygninger. I kvægstalde findes flere løsninger, hvor gyllen dagligt eller op til 12 gange i døgnet skrubes ud til en gyllebrønd eller tværkanal. Tværkanalen kan ligge både inde i stalden eller udenfor og har en relativt begrænset gyllekapacitet i forhold til den daglige gylleproduktion fra dyrene, hvorfor gyllen herfra udsledes

dagligt. Disse stalde praktiserer derfor allerede en hyppig udslusning og yderligere metanreduktioner vil derfor ikke kunne hentes i disse stalde, i forhold til at reducere gyllens opholdstid i stalden. I kvægstalde med ringkanal, som er mest udbredt i Danmark, opbevares gylle i en ringformet gyllekanal under spalteelementerne, hvor gyllen dagligt cirkuleres for at forhindre sedimentation og lagdeling. Her holdes gyllehøjden som minimum på 40 cm, for at anlægget kan fungere, og der udsluses til eksternt lager, når gyllehøjden når 80 cm. Ringkanalers dybde er omkring 1,2 m. I kvægstalde med ringkanal vil gylle også kunne udsluses oftere, fx ugentligt.

6.1.2 Relevans og potentiale

For svinestalde er hyppig udslusning nemt at implementere i praksis, hvorfor ugentlig udslusning forventes at blive lovpligtigt i nogle slagtesvinestalde. I nedenstående tabel 6.2 er potentialet beregnet ud fra en vurdering af, hvilke staldsystemer der kan implementere ugentlig udslusning i svinestalde. Således er staldtyper, hvor skrabning allerede er en implementeret teknologi ikke indregnet. I kvægstalde vurderes det, at stalde med ringkanalsystem kan ombygges relativt billigt, ved at udfylde ringkanalen og lægge nyt fast gulv oven på det eksisterende gulv. Dermed vil potentialet udelukkende være for stalde med ringkanalsystemer og dermed ikke inkludere stalde, hvor hyppig udslusning allerede praktiseres

Tabel 6.2 Estimeret metanreduktion i stald, lager og totalt ved ugentlig udslusning af svinegylle og daglig udslusning af kvæggylle. Endvidere udbredelsen i 2020 og potentiel udbredelse. De sidste to kolonner viser reduktion i CO₂-ækv. (CO₂e per ton gylle af dyr og i 1000. tons (kt) per stalddtype. Daglig udslusning af kvæggylle er beregnet som gødning fra stalde med ringkanal system, hvor det antages at staldene kan ombygges til stalde med fast gulv med skraber. Enheder i pr. ton henviser til pr. ton gylle af dyr og kter er 1000. tons per stalddtype.

Dyre-og stalddtype	Ref.	CH ₄ udledning, kg CH ₄ /ton			Udbredelse, %		Reduktion netto	
		Stald	Lager	Total	2020	Potenti ale	kg CO ₂ e/ ton	kt CO ₂ e/ staldd- type
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Ja	1,7	0,8	2,5	0	100	41	301
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg*	Nej	0,1	0,9	1,1				
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Ja	1,9	2,5	4,4	0	100	22	105
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Nej	0,8	2,9	3,6				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Ja	1,5	2,6	4,1	0	100	15	57
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Nej	0,7	2,9	3,6				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Ja	1,1	2,8	3,8	0	100	8	8
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Nej	0,6	2,9	3,5				
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Ja	1,9	2,4	4,2	40	100	21	34
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Nej	0,7	2,7	3,5				
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Ja	2,5	2,2	4,6	0	100	29	30
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Nej	0,9	2,7	3,6				
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Ja	1,5	2,4	3,8	0	100	16	38
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Nej	0,6	2,6	3,3				
Kvægstalde	Ja	1,7	0,8	2,5	0	100	41	301
Kvægstalde	Nej	0,1	0,9	1,1				
Svinestalde	Ja	1,7	2,5	4,2	4	100	19	288
Svinestalde	Nej	0,7	2,8	3,5				

*Kræver ombygning af stalden, således at gyllekummen fyldes op og der etableres fast gulv.

6.1.3 Effekt på drivhusgasudledning

Hyppig udslusning har en relativt stor effekt på metanudledning i svinestalde, men forventes ikke at have en effekt på ammoniakudledning, da emissionsoverfladen vil være uændret. Af samme grund påvirker strategien heller ikke det indirekte bidrag fra ammoniak til lattergas og det følgende afsnit vil udelukkende koncentrere sig om effekter på metanudledning. Metanudledning fra svinestalde med hyppig udslusning er blevet målt flere gange, men ofte med en målemetode, som benytter sig af foto-akustisk spektroskopi (PAS). Denne metode har vist sig at være sensitiv overfor flygtige stoffer og vanddamp, når det gælder betemmelse af metankoncentration (Adamsen et al., 2018; Liu et al., 2020). Derfor må mange tidligere

estimerer betragtes som usikre. Holm et al. (2016) rapporterede en metanreduktion på 55% fra en slagtesvinestald med ugentlig udslusning med PAS metoden. Der er senere blevet målt en metanreduktion på 45% fratrullet enterisk metanproduktion fra en slagtesvinsstald med ugentlig udslusning og en bedre målemetode (Jørgensen et al., 2022). Hansen et al. (2022) målte en metanreduktion på 36% fra stalden og 50% fra gyllen i en forsøgsstald med slagtesvin og ugentlig udslusning (Hansen et al., 2022). Ved hyppigere udslusning end ugentligt, fx ved at bruge gyllerender eller gylletragte blev der opnået en større metanreduktion på hhv. 78% og 87% fra gyllen (Hansen et al. 2022). Ligeledes er der i drægtighedsstalde med linespilsanlæg målt en metanreduktion fra gyllen på 90%, dog med PAS metoden (Holm et al., 2019). I to slagtesvinestalde med linespilsanlæg er der målt 86 og 98% metanreduktion fra gyllen (Holm et al., 2022). Osada et al. (1998) målte en metanreduktion i den lave ende på 11% fra stalden med ugentlig udslusning og PAS metoden (Osada et al., 1998). Der er rapporteret stor variation i metanudledning fra svinestalde (Vansbreck et al., 2013), og derfor forventes også variation i effekten af hyppig udslusning. For kvæg udgør gyllens bidrag i stald og lager omkring 24% af den samlede metanudledning fra kvæg (Albrechtsen et al., 2021). I stalden vil gyllens bidrag til metanudledning være endnu mindre, og nøjagtig kvantificering af dennes størrelse kræver gode estimater for den enteriske metanproduktion, som kan variere med fodersammensætning og dyrenes produktionscyklus. Derudover er metanproduktion fra kvæggylle lavere end for svinegylle grundet et lavere indhold af nedbrydeligt organisk materiale (VS_d) og en gennemsnitlig lavere gylletemperatur i kvægstalden. Der foreligger ikke god dokumentation for effekten af hyppig udslusning i kvægstalde.

Adamsen et al. (2021) udviklede en model baseret på Arrhenius sammenhængen mellem gylletemperatur og metanproduktionsrate (Petersen et al., 2016). I modellen blev der tilføjet en parameter, der delvist tager højde for inokulumeffekter i form af gyllens hydrauliske opholdstid. Med denne model estimeres omkring 60% metanreduktion fra svinegylle fra en slagtesvinsstald med 33% drænet gulv og 67% spaltegulv, hvilket er den mest udbredte slagtesvinestaldtype. I tabel 6.2 er denne model benyttet til estimering af metanreduktionen ved hyppig udslusning i svine- og kvægstalde. Modellen er benyttet på de staldtyper, som blev vurderet egnede til hyppig udslusning. Til beregning af reduktion benyttes referencestalde for forskellige svinestalde, inkl. smågrise, søer og svinestalde, og for kvægstalde med ringkanaler. Det antages, at der i svinestalde udsluses når gyllestanden når 35 cm, og efter udslusning er restgyllehøjden 3 cm. I tilfælde hvor gyllestanden ikke når 35 cm ved slutningen af produktionscyklus, udsluses der ved slutningen af produktionscykles. Dette vil være gældende i fx farestalde. I svinestalde med hyppig udslusning udsluses der ugentligt, hvilket resulterer i forskellige gyllehøjder ved udslusningstidspunktet afhængigt af dimensionerne på gyllekummerne samt dyrekategori. Mængden af let nedbrydeligt organisk materiale (VS_d) sættes til 70% af total organisk materiale (VS_{tot}) for svinegylle (Møller et al., 2004a, b). Den udslusede gylle tilføres et gyllelager, som gradvis fyldes op fra april og tømmes igen efter et år. Yderligere detaljer omkring referencestald for de forskellige typer af svin kan findes i Adamsen et al., (2021). I kvægstalde med ringkanal udsluses der når gyllehøjden er 80 cm, og restgyllehøjden efter udslusning er

40 cm, svarende til udslusning hver 28. dag. Ringkanal arealet sættes til 66% af produktionsarealet ud fra estimater baseret på sengebåsestalde (Kai & Adamsen, 2017). Ved hyppig udslusning i kvægstalde antages det at stalden er blevet ombygget således at gyllen kan skrubes 12 gange dagligt fra gangarealerne ned i en tværkanal. Denne ombygning kræver at ringkanalen fyldes op, så der ikke kan ligge gylle under gulvet. Tværkanalen udgør 6% af produktionsarealet. Restgyllehighøjden i tværkanalen efter udslusning antages at være 40 cm. Med 12 skrab per dag i gangarealerne, kan det antages at gyllen udelukkende opholder sig i tværkanalen. Mængden af VS_d i kvæggylle sættes til 42% af VS_{tot} . Dette estimat er baseret på en middelværdi fra to studier om biogaspotentialer af kvæggylle (Møller et al., 2004a,b). Gylle fra udendørs lageret køres ud i april og tømmes månedligt i perioden maj til september. Metanudledning estimeres per ton gødning af dyr, dvs. eksklusiv strøelse og vaskevand.

Der fremgår af tabel 6.2 at effekten af ugentlig udslusning fra svinestalde, samt daglig udslusning i kvægstalde giver store metanreduktioner i staldene, men øget metanudledning fra lageret. Dette skyldes at en øget mængde omsætteligt organisk materiale og dermed potentialet for metanproduktion tilføres lageret, når det fjernes hyppigere fra stalden. For kvæggylle er reduktionen 37 kg CO_2 -ækv. / ton gødning af stald, og for svinegylle er det 17 kg CO_2 -ækv. / ton gødning af stald. Denne forskel skyldes dels at hyppig udslusning i kvægstalden er dagligt og at kummearealet bliver reduceret væsentligt ved ombygning af kvægstalden. Derudover er metanbidraget fra lageret mindre for kvæggylle da det udkøres oftere og dermed ikke når at udlede store mængder CO_2 derfra.

6.1.4 Samspil til andre virkemidler

Hyppig udslusning vil generelt være et foretrukket virkemiddel i svinestalde og kan kombineres med alle virkemidler i lageret. Den samlede strategi for at reducere drivhusgasudledning går generelt i retning af hyppig udslusning i stalden kombineret med et lagervirkemiddel. Dette skyldes, at ugentlig udslusning i svinestalde kan praktiseres uden større meromkostninger. Afhængigt af udslusningshyppighed vil der måske også være en betydelig gevinst ved at kombinere med forsuring af restgyllen. Denne kombinationsmulighed er dog ikke blevet undersøgt i praksis.

De mest oplagte virkemidler, som hyppig udslusning kan kombineres med, er:

- Bioforgasning - da den udslusede gylle vil indeholde en højere mængde omsætteligt organisk materiale (VS_d), som omsættes i biogasanlægget og øger metanudbyttet.
- Lagerforsuring – for eksempel lavdosis lagerforsuring, hvor et nyt pilotstudie har vist at metanudledningen kan reduceres betydeligt på en kost-effektiv måde (Ma et al., 2022). Strategien kan fx benyttes i sommerperioden, hvor det meste metan udledes fra lageret.
- Overdækning af gyllelagre kombineret med kontrolleret ventilering.
- Overdækning af gyllelagre og fakkelafløbbrænding af metan, når koncentrationen er tilstrækkelig høj.

Sampil med ovennævnte virkemidler er beskrevet i de følgende afsnit og dækkes ikke yderligere her.

6.1.5 Usikkerheder

I afsnit 6.1.3 blev variationen mellem rapporterede effekter af hyppig udslusning belyst. Variationen kan skyldes både usikkerhed i bidraget af enterisk metan fra dyrene og usikkerhed i form af de brugte målemetoder. Dertil kommer forskelle i general staldhygiejne, vaskehyppighed, dyrenes velbefindende, gulvtype og fodersammensætning. Særligt staldhygiejne og vaskeproceduren vurderes at have effekt på gyllens metanudledning, da gammel gylle vil pøde den friske udskilte gylle og fremskynde metanproduktionen (Dalby et al., 2021). Ngwabie et al. (2016) undersøgte effekten af mængden af gammel gylle, som står tilbage før frisk gylle blev tilsat i pilot lagertanke med kvæggylle. De fandt en lineær sammenhæng mellem mængden af gammel gylle i tanken til at starte med og den samlede metanudledning i vinterperioden (Ngwabie et al., 2016). Massé et al. (2016) undersøgte effekten af hyppigere tømning i kvæggyllelagre og målte 40-80% metanreduktion ved at tømme tankene 2-4 gange over sommeren (Massé et al., 2016). Dette er i god overensstemmelse med modelleringerne foretaget på kvæggylle her.

Den benyttede model er forbundet med flere usikre modelparameter, heriblandt LnA' som knytter sig til omsætning af total organisk materiale (VS_{tot}) i lageret. Der er benyttet en værdi på 30.3 for svinegylle og 30.2 for kvæggylle, men disse parametre er ikke blevet målt tilstrækkeligt og er estimeret ud fra LnA i stalden, som kun knytter sig til det let omsættelige organiske materiale (VS_d). Disse parametre bliver og vil blive nærmere undersøgt i pågående og fremtidige projekter (Petersen & Gyldekærne, 2020). Ydermere er mængden af VS_d i både svine- og kvæggylle forbundet med usikkerheder (Møller et al., 2004a,b), hvilket påvirker metanudledningsestimaterne i stalden.

Kvægstalde er sjældent dimensioneret ens og både ringkanalarealet, samt areal og volumen af tværkanaler vil variere ganske betydeligt i danske stalde. I ringkanaler udregnes kummearealet i modellen ud fra gangarealet, da dette typisk er målsat på staldtegninger, men kummearealet er reelt lidt mindre, da gulvelementerne i gangarealerne hviler på kanalvægge. Ligeledes er der usikkerhed omkring arealet og dybden af tværkanaler i kvægstalde. Kai et al. (2015) undersøgte forskellige kvægstaldes kummearealer og estimerede gyllens hydrauliske opholdstid (HRT). Her blev HRT estimeret for 6 kvægstalde til mellem 16 og 85 dage i kvægstalde med ringkanal eller bagskyl og 4 dage i en enkelt stald med drænet gulv (Kai et al., 2015). Til sammenligning er HRT i nærliggende modelleringer af kvægstald med ringkanal og kvægstald med daglig udslusning beregnet til hhv. 42 og 3 dage.

Referencer

- Adamsen, A.P. (2018). Measurement of climate gases from livestock barns with infrared photo-acoustic spectrometry (in Danish: Måling af klimagasser fra stalde med infrarød fotoakustisk spektrometri). Intern rapport fra SEGES.
- Adamsen, A.P. S., Hansen, M.J., Møller, H.B., (2021). Effekt af hyppig udslusning af gylle på metanproduktion, Notat fra DCA Nr. 2020-0166155, 9 s., jan. 12, 2021.
- Adamsen, A. P. S., & Kai, P., (2022). Faglig vurdering af tekniske- og driftsmæssige udfordringer ved ugentlig udslusning af gylle og gødning fra eksisterende staldsystemer, DCA. Nr. 2022-0376370, 15 s., jul. 04, 2022.
- Albrektsen, R., Mikkelsen, M.H., Gyldenkerne, S. (2021). Danish Emission Inventories for Agriculture (DCENumber 443).
- Børsting, C.F., Frydendahl, A.L. (2021). Normtal for husdyrgødning 2021.
- Dalby, F.R., Hafner, S.D., Petersen, S.O., VanderZaag, A.C., Habtewold, J., Dunfield, K., Chantigny, M.H., Sommer, S.G. (2021). Understanding methane emission from stored animal manure: A review to guide model development. In Journal of Environmental Quality (Vol. 50, Number 4). <https://doi.org/10.1002/jeq2.20252>
- Hansen, M.J., Guldberg, L.B., Feilberg, A. (2022). Frequent removal of slurry reduces methane emission from pig houses. GGAA.
- Holm, M. (2016). Klimagas emission fra danske slagtesvinestalde. Rapport fra Seges.
- Holm, M., Kasper, O.G., Sørensen, B. (2019). Ammoniak- og metanemission fra drægtighedsstalde (Nr 1910). Rapport fra Seges.
- Holm, M., Myllerup, M., Grønborg, S. (2022). Methane reduction from pig units with frequent flushing of manure or daily removal of manure by scraper. Zero Emission Agriculture.
- Hutchings, N.J., Lærke, P.E., Munkholm, L., Elsgaard, L., Kristensen, T., Rasmussen, J., Lund, P., Børsting, C., Løvendahl, P., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Gyldenkerne, S., Møller, H.B., Hansen, Mi. J., Feilberg, A., Adamsen, A.P. (2020). Opdatering af effekter og potentialer af klimavirkemidler til anvendelse i landbrug.
- Jørgensen, M., Bache, J. K., Granath, S. W. Y. 2022. Gylleudslusning ugentligt samt hver 14. dag i en slagtesvinestald med drænet gulv. SEGES Innovation. Meddelelse nr. 1253. 10 pp + appendicer.
- Kai, P., Adamsen, A.P. (2017). Fra produktionsbaseret til arealbaseret emissionsberegning del 2: Emissionsfaktorer.

- Kai, P., Birkmose, T., Petersen, S. (2015). Slurry volumes and estimated storage time of slurry in Danish livestock buildings.
- Kai, P., Tybirk, P., Holm, M., Jensen, H.B., Bækgaard, H. (2022). Kapitel 8 Tab af næringsstoffer fra stalde – Normtal for husdyrgødning 2021 / 2022. https://anis.au.dk/fileadmin/DJF/Anis/dokumenter_anis/normtal/Normtal_lagt_paa_i_2022/Kap_8_Stalde_2021-22_med_datablad.pdf
- Liu, D., Rong, L., Kamp, J., Kong, X., Adamsen, A.P., Chowdhury, A., Feilberg, A. (2020). Photoacoustic measurement may significantly overestimate NH₃ emissions from cattle 2 houses due to VOC interferences. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 259–272. <https://doi.org/doi.org/10.5194/amt-13-259-2020>
- Ma, C., Dalby, F.R., Feilberg, A., Jacobsen, B.H., Petersen, S.O. (2022). Low-Dose Acidification as a Methane Mitigation Strategy for Manure Management. *ACS Agricultural Science and Technology*, 2(3), 437–442. <https://doi.org/10.1021/acsagscitech.2c00034>
- Massé, D. I., Jarret, G., Hassanat, F., Benchaar, C., Saady, N.M.C. (2016). Effect of increasing levels of corn silage in an alfalfa-based dairy cow diet and of manure management practices on manure fugitive methane emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 221, 109–114. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.018>
- Møller, H.B., Sommer, S.G., Ahring, B.K. (2004a). Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy*, 26(5), 485–495. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.008>
- Møller, H.B., Sommer, S.G., Ahring, B.K. (2004b). Biological degradation and greenhouse gas emissions during pre-storage of liquid animal manure. *Journal of Environmental Quality*, 33(1), 27–36. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.2700>
- Ngwabie, N.M., Gordon, R.J., VanderZaag, A., Dunfield, K., Sissoko, A., Wagner-Riddle, C. (2016). The extent of manure removal from storages and its impact on gaseous emissions. *Journal of Environmental Quality*, 45(6), 2023–2029. <https://doi.org/10.2134/jeq2016.01.0004>
- Osada, T., Rom, H.B., Dahl, P. (1998). Continuous measurement of nitrous oxide and methane emission in pig units by infrared photoacoustic detection. *Transactions of the ASAE*, 41(4), 1109–1114.
- Petersen, S.O., Gyldenkerne, S. (2020). Redegørelse omkring forventede justeringer i beregning af metanemission fra husdyrgødning (Number Journal 2020-0066332).
- Petersen, S.O., Olsen, A.B., Elsgaard, L., Triolo, J.M., Sommer, S.G. (2016). Estimation of methane emissions from slurry pits below pig and cattle confinements. *PLoS ONE*, 11(8), 1–16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160968>

Ransbeeck, N. Van, Langenhove, H. Van, Demeyer, P. (2013). Indoor concentrations and emissions factors of particulate matter, ammonia and greenhouse gases for pig fattening facilities. *Biosystems Engineering*, 116, 518–528.

6.2 Forsuring af gylle i stalden (KVM6.2)

Forfattere: Peter Kai & Anders Peter Adamsen, begge fra Institut for Bio- og Kemiteknologi, og Søren O. Petersen, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Anders Feilberg, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Beskrivelse af teknologien er hovedsagelig fra DCA 130 (Olesen et al., 2018) og Adamsen et al. (2021)

Forsuring af gylle med syre kan ske ved iblanding af organiske eller mineralske syrer, især svovlsyre, eller ved tilsætning af kulhydratholdige substrat som kan omsættes til carboxylsyrer, især eddikesyre eller mælkesyre. Sidstnævnte kan især være relevante for økologisk husdyrproduktion.

Tilsætning af stærk syre til svinegylle bevirker, at gyllens pH-værdi falder, hvorved gyllens opløste indhold af ammoniak (NH_3) omdannes til ammonium (NH_4^+). Sidstnævnte er en positiv ladet ion som let opløses i vand, hvorimod ammoniak er en gas med lav opløselighed i vand og som derved let afgasses.

Typisk anvendes koncentreret svovlsyre, idet det er forholdsvis billigt og effektivt, men omvendt kan medføre dannelse af svovlbrinte, som er en giftig og ildelugtende gas, og dels er det en stærk ætsende syre, som skal håndteres forsigtigt og efter gældende forskrifter.

Forsuring med svovlsyre kan ske i kvægstalde, hvor gyllesystemet er udformet som ringkanalsystem, og i svinestalde (se figur 6.1). Svovlsyre kan også tilsættes til gyllelageret for at forhindre emission af ammoniak fra udbringning af gylle. Endelig kan tilsætning af svovlsyre i lavere doser end nødvendigt for at reducere emission af ammoniak ved udbringning, reducere dannelse og emission af metan i både stald og lagre. Dette behandles i kapitel 6.4.

6.2.1 Anvendelse

Der findes pt. to fabrikater af forsuringsanlæg i danske svinestalde, henholdsvis INFARMs "NH₄⁺ Staldforsuring" og JH Agros "JH forsuring NH₄⁺", der begges ejes af JH Agro A/S. De to fabrikater fungerer principielt ens, hvorfor der ikke er grund til at tillægge dem forskellige effekt. Det er dog pt. kun JH forsuring NH₄⁺, der forhandles, idet INFARM ikke længere markedsføres, men eksisterende anlæg serviceres af JH AGRO A/S.

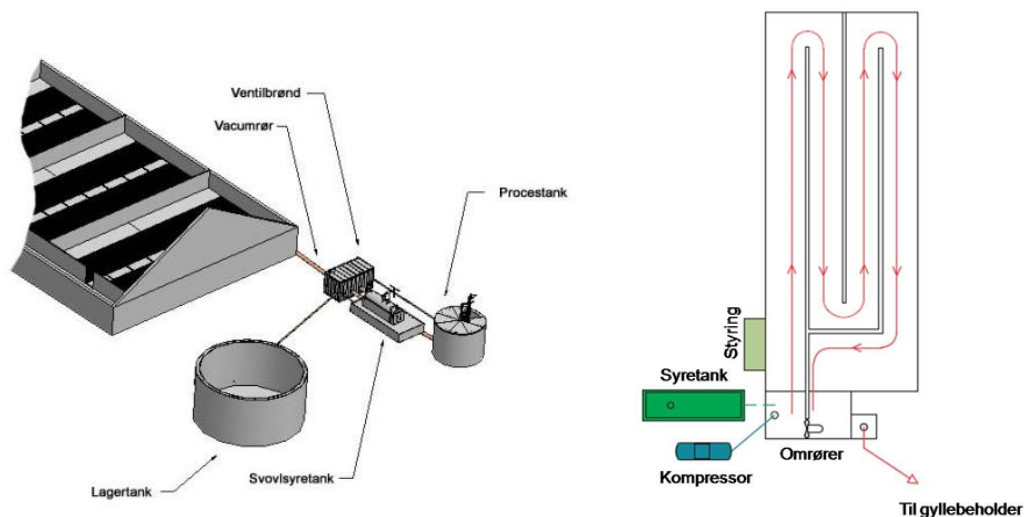
JH Agros forsuringsanlæg "JH forsuring NH₄⁺" til svinestalde virker ved, at al gylle i stalden dagligt føres ud til en ekstern procestank, hvor gyllen under omrøring tilsættes syre til en pH-værdi på 5,5. Der anvendes 93-96 % koncentreret svovlsyre. Efter forsuring pumpes en del af gyllen tilbage i stalden, så der er en gyllehøjde på ca. 20 cm i gyllekummerne. Overskydende gylle pumpes til lagertank. Tømning og fyldning af gyllekummerne og procestanken foregår via et ventilarrangement, der er plc-styret (dvs. computerstyret). Ifølge JH Agro, den eneste producent i Danmark, kan forsuringsanlægget behandle gyllen fra 800 – 1500

m² gyllekumme per ventil. Procestanken dimensioneres efter den maksimale mængde gylle, der kontrolleres af en given ventil.

Der anvendes 10 – 13 kg syre per ton svinegylle afhængig af tørstofindhold mv. (Riis, 2016; Riis og Jonassen, 2018). Det er undersøgt, om man kunne nøjes med at forsure to gange om ugen. Det medførte ikke et lavere syreforbrug, men til gengæld faldt reduktionseffektiviteten for ammoniak fra 62 % til 38 % (Riis & Jonassen, 2018).

I kvægstalde kan gylleforsuring anvendes i sengebåsestalde, der i køernes motions-/gangarealer har spaltegulv med underliggende gyllekanaler. Gyllekanalerne er opbygget med ringkanalsystem eller med bagskylsanlæg. Der formodes at være langt flere ringkanalstalde end stalde med bagskylsanlæg. Bagskylsanlæg er opbygget, så der fra fortanken kan returpumpes gylle ind i den ene ende af gyllekanalen samtidig med, at gyllen i modsatte ende af gyllekanalen løber ud i fortanken. Forsuringsanlæg til stalde med bagskylsanlæg er principielt opbygget på samme måde som svinestalde.

Ved ringkanalsystemet er gyllekanalerne i stalden forbundne med en omrørebrønd uden for stalden. En pumpe i omrørebrønden bevirker, at gyllen i stalden dagligt omrøres. Der kan dog stadig være døde områder i bl.a. hjørner af gyllekanalerne og ved mellemgange i stalden, hvor gyllen ikke sættes i bevægelse og derved reelt ikke omrøres. Ligeledes kan der opstå problemer med bundfald, når gyllen efter passage gennem smalle tværkanaler ledes over i brede langsgående kanaler, med deraf følgende reduktion i flowhastigheden. Ved gylleforsuring kobles forsuringsanlægget direkte til omrørebrønden, og fungerer derfor som et gennemløbsanlæg med kontinuerlig forsuring i modsætning til svinestalde, hvor en vis portion gylle behandles ad gangen. Forsuringsanlæg i ringkanalstalde kræver derfor ingen særlig procestank, som det er tilfældet med svinestalde. Syreforbruget er i en test i fire kvægstalde opgjort til mellem 5,4 og 6,3 kg/ton, dvs. noget lavere end i svinestalde (Andersen, 2013).



Figur 6.1 Skitse af forsuringsanlæg. T.v.: svinestald. T.h.: kvægstald med ringkanalsystem. Kilde: JH Agro A/S.

6.2.2 Relevans og potentiale

Forsøg i pilot-skala gyllebeholdere har vist en reduktion af udledning af metan på ~99% ved staldforsuret gylle lagret over 83 dage og uden tilførsel af ny gylle (Petersen et al., 2014). Et laboratorieforsøg har vist, at udledning af metan fra svovlsyrebehandlet kvæggylle var op til 87% lavere end fra den ubehandlede kontrolgylle ved lagring over 95 dage (Petersen et al., 2012). Forsøgene peger således entydigt på en reduktion af udledning af metan ved staldforsuring, både i stald og under lagring af gylle, idet det dog er vanskeligt at angive en størrelsesorden med sikkerhed.

I kvægstalde med ringkanalsanlæg kan der installeres forsuringsanlæg på eksisterende bedrifter, idet forsuringsanlægget kan placeres ved en udvendig omrøringsbrønd. Det kræver derfor ikke væsentlig ombygning af staldene.

Eksisterende kvægstalde med bagskyl bør også kunne etablere forsuringsanlæg uden større omkostninger sammenlignet med implementering i nye stalde, men det skal sikres, at svovlbrinten er afgasset, inden den forsurede gylle pumpes tilbage i stalden.

I svinestalde kan der også monteres staldforsuringsanlæg i eksisterende stalde, afhængigt af gyllesystemets opbygning, men det kræver en ombygning, idet der skal laves rørføringer, der kan lede den forsurede gylle tilbage til de enkelte sektioner. Der er en markant størrelsesøkonomi i forsuringsanlæg, så jo større stalde, jo bedre. For beregninger af anlægsomkostninger mv., henvises til teknologiblade om

svovlsyreforsuring af gylle (Miljøministeriet, 2011). Nye opdaterede Teknologibeskrivelser er publiceret af DCA i begyndelsen af 2023¹.

I nye svinestalde vil de nødvendige rørføringer kunne laves i forbindelse med etablering af forsøringsanlæg, hvilket vil reducere omkostningerne.

6.2.3 Effekt på drivhusgasudledning

Ammoniakdeposition er en indirekte kilde til lattergas, og derfor kan gylleforsuring potentielt reducere emissioner af lattergas ved at begrænse ammoniakfordampningen. På MST's Teknologiliste er ammoniakreduktionen fastsat til 64% for svinestalde og 50% for kvægstalde. En ny undersøgelse har dog dokumenteret, at effekten i kvægstalde kun er 33% (Kasper et al., 2022).

Effekten på ammoniak vil variere med staldtemperaturen og behovet for ventilation; således fandt Petersen et al. (2016), at reduktionen over hele produktionsperioder for slagtesvin var hhv. 66 og 71% forår og efterår, men kun 44% i en sommerperiode med stort behov for ventilation. Årsagen er, at forsuringen kun forhindrer ammoniaktab fra gyllekummer, ikke fra fugtige overflader på gulvniveau, som påvirkes af staldklimaet. Her antages en gennemsnitlig ammoniakreduktion på 60% ved staldforsuring uanset gylletype. Tilsvarende antages en ammoniakreduktion ved udbringning i marken fra staldforsuret gylle på 60% i overensstemmelse med MSTs Teknologiliste. I beregningen af den indirekte lattergasemission, som følge af ammoniakfordampning fra stald og lager, anvendes oplysninger om ammoniaktab i Normtal 2015. Ammoniaktabet efter udbringning er sat til 20%; ifølge Hansen et al. (2008) vil det være lavere ved udlægning i en voksende afgrøde (fx vintersæd). Reduktion af ammoniaktab giver mere kvælstof på ammoniakform i udbragt gylle, som kan fortrænge en tilsvarende mængde N i handelsgødning. Den samlede effekt på direkte og indirekte emissioner af N₂O tidligere opgjort til mellem 2 og 3,5 kg CO₂-ækv. per ton gylle (Olesen et al., 2018).

Danske forsøg med svovlsyre i laboratorieskala med kvæggylle (Petersen et al., 2012) viste reduktioner på 67-87% i metanudledningen over ca. 3 mdr. lagringsperiode. Andre laboratorieforsøg med kvæggylle, samt løbende tilsætning af frisk kvæggylle viste 89% metanreduktion (Fuchs et al., 2021). Forsøg med svinegylle i pilotskala har vist reduktioner på > 90% (Petersen et al., 2014) ved lagring over ca. 3 mdr. og uden tilførsel af ubehandlet gylle. Misselbrook et al. (2016) fandt i pilotskalaforsøg ved 7, 11 og 17 °C en reduktion af metanemissionen fra kvæggylle på hhv. 86, 91 og 63%, i overensstemmelse med de danske resultater.

Ved en undersøgelse i to sengebåsestalde med spaltegulv og ringkanal blev der i gennemsnit målt 16% lavere metanemission i perioder med forsuring sammenlignet med perioder uden (Kasper et al., 2022). Effekten af gylleforsuring på metanemissionen fra stalde vanskeliggøres af, at drøvtyggers

¹ <https://dca.au.dk/raadgivning/bat>

fordøjelsessystem bidrager med hovedparten af metanemissionen fra stalden, hvilket gør det vanskeligt at fastlægge den specifikke effekt af gylleforsuring i stalden. Effekterne er endnu ikke verificeret under praksisnære forhold, hvor metanemissionen fra gylle ikke kan adskilles fra den emission, som kommer fra dyrenes fordøjelse.

Det vurderes at 70% metanreduktion fra gyllen ved staldforsuring er realistisk for både kvæg- og svinegylle. Dette estimat er konservativt sat og kan vise sig at være højere når yderligere fuldskala dokumentation tilvejebringes. Staldforsuring med svovlsyre forventes også at hæmme metanemission under den efterfølgende lagring uden for stalden og her er vist højere reduktioner (Petersen et al., 2014), men over kortere perioder. Ma et al. (2022) underbygger at selv om pH-værdier stiger i lageret over tid, så vil metanemission fortsat være reduceret. Derfor forventes reduktionen i lageret ligeledes at være høj og fastsættes også til 70%. Potentialet for staldforsuring er estimeret i tabel 6.3.

Tabel 6.3 Estimeret metanreduktion i stald, lager og totalt ved staldforsuring og udslusning ved fuld kumme. I lageret antages forsuringseffekten at fortsætte. Enheder i pr. ton henviser til pr. ton gylle af dyr eller 1000 tons (kt) per staldtype. For kvægstalde er kun medtaget gødning fra stalde med ringkanal eller bagskyl. For svinestalde er medtaget gødning fra stalde hvor rørudslusning kan benyttes.

Dyre- og staldtype	Ref.	CH ₄ udledning, kg CH ₄ /ton			Udbredelse, %		Reduktion netto	
		Stald	Lager	Total	2020	Poten- tiale	kg CO ₂ e/ ton	kt CO ₂ e/ stald- type
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Ja	1,7	0,8	2,5	9	100	50	334
Kvæg, Sengebåse, spalter,bagskyl/ringkanalanlæg	Nej	0,5	0,2	0,8				
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Ja	1,9	2,5	4,4	2	100	86	404
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Nej	0,6	0,7	1,3				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv(25-49 % fast gulv)	Ja	1,5	2,6	4,1	2	100	81	304
Slagtesvin, Delvist spaltegulv(25-49 % fast gulv)	Nej	0,5	0,8	1,2				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv(50-75 % fast gulv)	Ja	1,1	2,8	3,8	2	100	75	77
Slagtesvin, Delvist spaltegulv(50-75 % fast gulv)	Nej	0,3	0,8	1,1				
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Ja	1,9	2,4	4,2	3	100	83	216
Søer, Drægtighedstalde,løs + individuel, delvis spalte	Nej	0,6	0,7	1,3				
Søer, Farestalde, kassesti,delvis spalte	Ja	2,5	2,2	4,6	3	100	91	92
Søer, Farestalde, kassesti,delvis spalte	Nej	0,7	0,7	1,4				
Søer, Farestalde, kassesti, fuldspalte	Ja	2,8	2,1	4,8	3	100	95	18
Søer, Farestalde, kassesti, fuldspalte	Nej	0,8	0,6	1,5				
Smågrise, Toklimastald m,delvis spaltegulv	Ja	1,5	2,4	3,8	1	100	75	178
Smågrise, Toklimastald m,delvis spaltegulv	Nej	0,4	0,7	1,1				
Smågrise, Drænet gulv + spalter (50/50)	Ja	2,6	2	4,6	1	100	90	48

Smågrise, Drænet gulv + spalter (50/50)	Nej	0,8	0,6	1,4				
Kvægstalde	Ja	1,7	0,8	2,5	9	100	50	334
Kvægstalde	Nej	0,5	0,2	0,8				
Svinestalde	Ja	1,8	2,5	4,2	2	100	83	1345
Svinestalde	Nej	0,5	0,7	1,3				

6.2.4 Samspil til andre virkemidler

Der kan højst anvendes 20% forsuret gylle i biogasanlæg, og det vil udløse ekstra-omkostninger til svovlrensning (Moset et al., 2012). Aktuelt er omfanget 0 - 20.000 tons forsuret gylle til biogas (Henrik B. Møller, Aarhus Universitet, pers. kommunikation). Hensynet til gasproduktion og udgifter til svovlrensning gør det indtil videre uinteressant at behandle forsuret gylle i biogasanlæg.

I laboratorieforsøg har AU undersøgt emission af lattergas efter udbringning af forsuret gylle (ikke publicerede data). Der blev ikke fundet nogen effekt af forsuringen af kvæg- og svinegylle efter tilførsel af forsuret kvæg- eller svinegylle til tre forskellige jordtyper.

Der er udbringningsmetoder er tilgængelige, som kan begrænse ammoniaktabet. Den marginale effekt af gylleforsuring på ammoniaktabet er derfor først og fremmest tabet i stalden. I lyset af udfordringerne med svovloverskud og driftsudgifter til svovlsyre, er det værd at overveje alternative strategier til gyllehåndtering. Et sådant alternativ kunne være lavdosis gylleforsuring med det formål at opnå en metanreduktion. Hidtidige forsøgsresultater giver anledning til at tro, at effekten på metanemission kan opnås med betydeligt lavere svovlsyremængder end effekten på ammoniak, fordi ikke kun pH er ansvarlig for hæmningen af metanproduktion (Ma et al., 2022). En mulig strategi kunne være at reducere opholdstiden for gylle i stalden kombineret med forsuring i lagertanken. Her vil der være praktiske udfordringer om behov for forsuring ved hver tilførsel af frisk gylle fra stalden; der er et videns- og udviklingsbehov vedrørende strategier til forsuring og omrøring i lagertanken.

6.2.5 Usikkerheder

Gylleforsuring reducerer ammoniaktabet under lagring og udbringning af gylle. Hvis der gødes efter normal for økonomisk optimal kvælstoftildeling uden at tage højde for øget andel af ammoniakkvælstof i gyllen, så vil det resultere i en øget kvælstoftilførsel til dyrkningsjorden, og dermed øget risiko for nitratudvaskning. Her antages, at øget ammoniakindhold i gyllen substituerer handelsgødning, og dette er indregnet i effekten på lattergasemission. I praksis kan en sådan effekt kræve at udnyttelseskravet øges for kvælstof i forsuret gylle.

Den højere N-tilgængelighed i forsuret gylle kunne tidligere omregnes til et forventet merudbytte i planteproduktionen på grund af relativt lave normer for N-gødskning. Undergødskning kan ikke længere

antages i dansk konventionelt landbrug, og dermed forringes økonomien i gylleforsuring. På det seneste er kvælstofgødning steget markant i pris, hvilket så igen forbedrer økonomien.

I beregningen af økonomien i gylleforsuring i stalden kan værdien af svovl fra svovlsyren indgå. Potentialet for besparelse af S-gødning er gennemsnitligt 22 kg S/ha (Eriksen, 2009), men lokalt vil potentialet variere som følge af sædskifte, dyretæthed og jordbundsforhold. Der findes ingen kortlægning af dyrkningsjordens svovlbalance, men tilførslen af svovl i forsuret gylle vil uanset afgrøde svare til, eller overstige, planternes behov. Substitution af svovl kan altså antages på det areal, som gødes med husdyrgødning.

Afgrødens behov kan variere mellem 10 og 50 kg S/ha, mens tilførslen vil være i størrelsesordenen 40-60 kg S/ha ved tilførsel af forsuret kvæggylle, og 50-80 kg S/ha ved tilførsel af svinegyلة ved typiske doseringer. Det giver et potentiale for udvaskning af sulfat, som blev diskuteret af Olesen et al. (2018)

I lyset af en forventet fortynding af sulfat på grund af mere regn, og den lavere biologiske aktivitet i vinterhalvåret, vurderes der at være begrænset risiko for, at udvaskning af sulfat fra marker gødet med forsuret gylle fører til fosformobilisering i vandløb og søer. Risikoen kan være større i vådområder, hvor vandet transporteres igennem en matrice med højt indhold af organisk stof, og hvor sulfatreduktion med udfældning af jernsulfid derfor i teorien kan begrænse tilbageholdelsen af fosfat. Der er behov for mere viden om den kvantitative betydning af disse processer, specielt i vådområder med afstrømning fra landbrugsarealer. Som en del af aftalen om Grøn Omstilling af dansk landbrug igangsat der ved AU i 2023 et projekt, som skal belyse miljømæssige og eventuelle økologiske effekter af at udbringe forsuret gylle.

Behovet for kalkning vil være større med anvendelse af forsuret gylle. Ammoniakbaseret gødning giver i forvejen en forsuring af dyrkningsjorden i det omfang N-tilførslen er større end den mængde, der optages af planter som nitrat og fjernes ved høst, eller som tabes via nitratudvaskning (Barak et al., 1997). Tilsætning af sulfat til gyllen i form af svovlsyre vil tilsvarende forsure jorden. I Europa svarer anvendelsen af kalk til jordbrugsformål til i gennemsnit 0,7 kg kalk/kg N tilført (Sutton et al., 2011). For eksemplet ville kalkbehovet som følge af N-gødsning alene være 70 kg kalk/ha. Anvendelsen af forsuret gylle kunne forøge kalkbehovet med hhv. 145 og 257 kg/ha/år for kvæg- og svinegyلة (Olesen et al., 2018). Den øgede kalkning vil også øge CO₂-udledningerne. Dette er dog ikke medregnet her.

Mange reducerede svovlforbindelser er flygtige og med en lav tærskelværdi for lugt. Gylleforsuring med svovlsyre i stalden kan derfor påvirke gyllens lugt. Praktiske erfaringer kan ikke underbygge, at forsuring mindsker eller forøger lugtgener, men at lugten ændrer karakter. Kontrollerede forsøg indikerer, at lugten under lagring efter tilsætning af svovlsyre præges relativt mindre af svovlbrinte, og mere af metanthiol (Eriksen et al., 2012). Ved udbringning af forsuret gylle er der målt højere koncentrationer af svovlbrinte og metanthiol (methylmerkaptan) umiddelbart efter udbringning og højere lugt af forsuret gylle sammenlignet med ikke-forsuret gylle under udbringning (Pedersen et al., 2021).

Referencer

- Adamsen, A.P S., Hansen, M.J., Møller, H.B., (2021). Effekt af hyppig udslusning af gylle på metanproduktion, Notat fra DCA Nr. 2020-0166155, 9 s., jan. 12, 2021.
- Andersen, M. (2013): JH-FORSURING NH₄⁺ Jørgen Hyldgård Staldservice A/S Test report version 1-5. AgroTech A/S. 55 p.
- Barak, P., Jobe, B.O., Krueger, A.R., Peterson, L.A., Laird, D.A., 1997. Effects of long-term soil acidification due to nitrogen fertilizer inputs in Wisconsin. *Plant Soil* 197, 61-69.
- Eriksen, J., 2009. Soil sulfur cycling in temperate agricultural systems. *Adv. Agron.* 102, 55-89.
- Eriksen, J., Andersen, A.J., Poulsen, H.V., Adamsen, A.P.S., Petersen, S.O., 2012. Sulfur turnover and emissions during storage of cattle slurry: Effects of acidification and sulfur addition. *J. Environ. Qual.* 41, 1633-1641.
- Fuchs, A., Dalby, F. R., Liu, D., Kai, P., Feilberg, A. (2021). Improved effect of manure acidification technology for gas emission mitigation by substituting sulfuric acid with acetic acid. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100263.
- Hansen, M.N., Sommer, S.G., Hutchings, N.J., Sørensen, P., (2008). Emission factors for calculation of ammonia volatilization by storage and application of animal manure. Aarhus University, Aarhus, DK.
- Holm, M. (2016): Daglig udslusning af gylle. Notat udarbejdet i forbindelse med GUDP-netværksprojektet "Månegrisen. Partnerskab om fremtidens bæredygtige og effektive svinestalde".
- Kasper, P. Dolriis, M.D., Fuchs, A., Kai, P., Riis, A.L. (2022). Svovlsyreforsuring i kvægstalde. Rapport, SEGES Innovation. Udgivet 14. marts 2022, 38 pp.
- Ma, C., Dalby, F.R., Feilberg, A., Jacobsen, B.H., Petersen, S.O. (2022). Low-Dose Acidification as a Methane Mitigation Strategy for Manure Management. *ACS Agricultural Science and Technology*, 2(3), 437-442. <https://doi.org/10.1021/acsagscitech.2c00034>
- Misselbrook, T., Hunt, J., Perazzolo, F., Provolò, G. (2016). Greenhouse Gas and Ammonia Emissions from Slurry Storage: Impacts of Temperature and Potential Mitigation through Covering (Pig Slurry) or Acidification (Cattle Slurry). *J. Environ. Qual.* 45:1520-1530.
- Moset, V., Cerisuelo, A., Sutaryo, S., Møller, H.B. (2012). Process performance of anaerobic co- digestion of raw and acidified pig slurry. *Water Research*, 46(16), 5019-5027. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.06.032>
- Pedersen, P. & Albrechtsen, K. (2012): JH forsøringsanlæg i slagtesvinestald med drænet gulv. Meddelelse nr. 932, Videncenter for Svineproduktion, Den Rullende Afprøvning, 23 pp.
- Olesen et al. (2018) Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget. DCA rapport 130

- Pedersen J, Nyord T, Hansen M J, Feilberg A. 2021. Måling af lugt ved udbringning af forsuret gylle. 19 sider. Rådgivningsrapport fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 24-11-2021
- Petersen, S.O., Højberg, O., Poulsen, M., Schwab, C., Eriksen, J. (2014): Methanogenic community changes, and emissions of methane and other gases, during storage of acidified and untreated pig slurry. *J. Appl. Microbiology* 117, 160-172.
- Petersen, S. O., Hutchings, N. J., Hafner, S. D., Sommer, S. G., Hjorth, M., & Jonassen, K. (2016). Ammonia abatement by slurry acidification: A pilot-scale study of three finishing pig production periods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 216, 258-268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.09.042>
- Riis, A.L. (2016): Effekt af JH forsuring NH_4^+ i slagtesvinestalde med drænet gulv. Videncenter for Svineproduktion, Den Rullende Afprøvning, meddelelse nr. 1078, 22 p.
- Riis, A.L., Jonassen, K.E.N. (2018): Test af forsuringshyppighed i svinestalde. SEGES Svineproduktion, Meddelelse nr. 1130, 12 p.
- Sommer, S.G., T.J. Clough, N. Balaine, S.D. Hafner, Cameron, K.C. (2017). Transformation of Organic Matter and the Emissions of Methane and Ammonia during Storage of Liquid Manure as Affected by Acidification. *J. Environ. Qual.* 46:514-521.
- Sutton, M.A., Howard, C.M., Erisman, J.W., Billen, G., Bleeker, A., Grennfelt, P., van Grinsven, H., Bruna Grizetti, B., 2011. The European Nitrogen Assessment: Sources, Effects and Policy Perspectives. Cambridge University Press.

6.3 Køling af gylle i grisestalde (KVM6.3)

Forfattere: Peter Kai og Anders Peter Adamsen, begge fra Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Lise Bonne Guldborg, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Gyllekøling er en teknologi, som er udviklet til reduktion af ammoniakemission fra gyllekummer og -kanaler under spaltegulvet i grisestalde. Ammoniakemission udgør en indirekte kilde til lattergas, og reduktion af ammoniakemissionen fra stalde vil derfor reducere den indirekte lattergasemission. Desuden øges gyllens kvælstofværdi og kan, trods et formodet marginalt større tab under lagring af gylle i gyllebeholder inden udbringning, substituere handelsgødning svarende til den forøgede netto-ammoniummængde i gyllen på udbringningstidspunktet. Denne substituerings er også en forudsætning for, at en reduktion af de indirekte lattergasemissioner er effektiv.

En sænkning af gyllens temperatur hæmmer også den biologiske omsætning i gyllen, og fører blandt andet til lavere metan- og lugtemissioner. Ikke-omsat organisk stof i gyllen overføres med gyllen til gyllebeholderen, hvor det vil give anledning til øget metanproduktion under den efterfølgende lagring. Størst effekt af gyllekøling vil derfor opnås, hvis gyllen efter udslusning afgasses i et biogasanlæg, idet der potentielt opnås både metanreduktion og en øget bioenergiproduktion. Andre virkemidler til at reducere metanemission fra lagre er forsurening, overdækning af gylletanke med ventileret oxidation eller opsamling af gas fra overdækkede gylletanke og afbrænding i en fakkel.

Gyllekøling foretages i reglen ved anvendelse af varmepumpe og er en energikrævende proces. Økonomien afhænger i høj grad af, i hvilket omfang den indvundne varmeenergi kan udnyttes til fx rumopvarmning, hvorfor virkemidlet primært er relevant for bedrifter med smågriseproduktion.

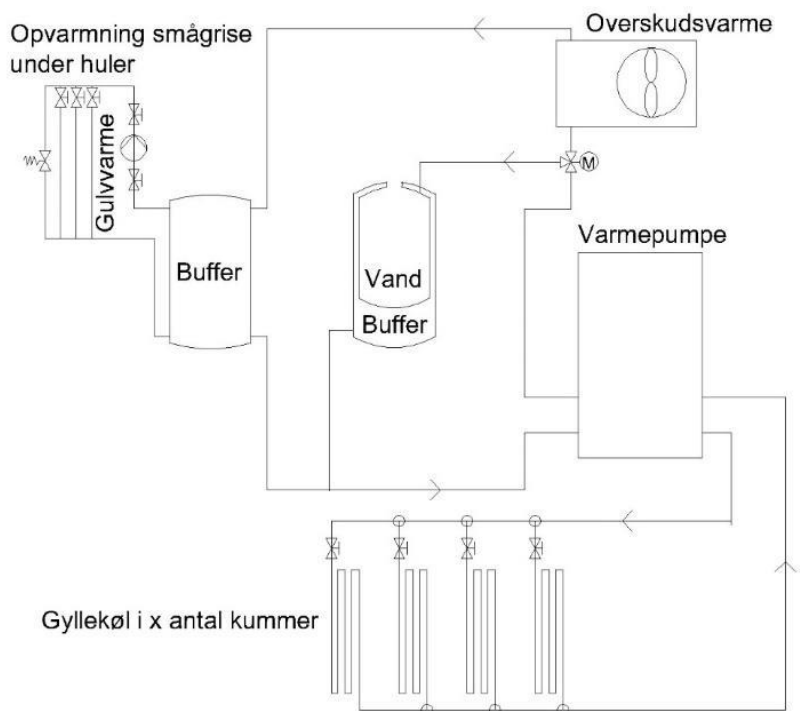
6.3.1 Anvendelse

I Danmark etableres gyllekøling typisk ved nedstøbning af slanger af polyetylen (PE) i bunden af gylle- eller gødningskanalerne i stalden. Typisk udlægges køleslangerne oven på armeringsnettet og overstøbes med beton. Der isoleres normalt ikke under betonlaget. Slangerne udlægges typisk med en afstand på 40 cm. Slangerne kan også udlægges direkte oven på kanalbunden, hvorved der formodentlig kan opnås en større ammoniakreduktion men med risiko for problemer i forbindelse af udslusning af gylle i form af bundfældning og risiko for brud på køleslanger ved mekanisk rengøring af kummerne, selvom Pedersen (1997) bemærker, at "placering af kølerør på bunden i gyllekummens længderetning ikke havde nogen negativ indflydelse på udslusning af gylle". Der er os bekendt ingen erfaringer med denne fremgangsmåde fra andre stalde.

Køleslangerne fyldes med vand tilsat frostvæske og forbindes med en varmepumpe. Varmepumpen overfører energi (varme) fra kølevandskredsløbet (køleslangerne) til en varmtvandsbeholder på varmepumpens varmeside. Det varme vand kan bruges til opvarmning af stalde, servicerum, vådfoder,

vaskevand eller boliger. Overskydende varme må fjernes med en luftkølet kondensator eller på andet vis for, at systemet kan fungere.

Det er almindeligt at dimensionere gyllekøling efter varmebehovet andre steder på bedriften, fx smågrisestalde. Det betyder, at der oftest kun køles i den periode, hvor der anvendes varme. Såfremt gyllekølingen skal anvendes ud over det antal timer, der er behov for varme, skal der tilføjes en luftkølet kondensator til at bortskaffe overskydende varme.



Figur 6.2 Skitse af gyllekølingsanlæg med gyllekøling, varmepumpe og varmeafsætning i smågrisehuler i fare-stalden. Desuden er der vist en luftkølet kondensator til afsætning af overskudsvarme. Miljøstyrelsen (2011).

Der findes eksempler på kvægstalde, som har nedlagt køleslanger i gyllekanalerne med henblik på indvinding af varmeenergien fra gyllen (alternativ til jordvarme), men der foreligger ingen måledata i forhold til NH_3 og andre gasser fra moderne stalde. Gyllekøling er derfor kun optaget på miljøstyrelsens teknologiliste til brug i svinestalde.

6.3.2 Relevans og potentiale

Kvægstalde er åbne og har en gennemsnitstemperatur i gyllekanalerne, som kun er få grader over udetemperaturen, hvilket begrænser effekten af gyllekøling. Desuden er gyllehøjden i gyllekanalerne i kvægstalde typisk mellem 40 og 80 cm, hvilket vanskeliggør nedkøling via køleslanger nedstøbt i kanalbunden. Gyllekøling er derfor ikke aktuel i kvægstalde.

Griseproduktion foregår typisk i isolerede stalde med mekanisk ventilation, som regulerer staldtemperaturen i forhold til grisenes krav. Dette giver et stort potentiale for ammoniak- og metanfordampning, og her har gyllekøling potentiale til at reducere emissionerne. Gyllekøling kan principielt anvendes i alle typer af grisestalde, hvor husdyrgødningen håndteres som gylle. I stalde med udeareal til økologisk produktion af grise vurderes effekten dog at være usikker. Der er i det følgende estimeret effekter for alle kategorier af grise i stalde med gyllesystem baseret på rørudslusning.

En opgørelse omfattende danske miljøgodkendelser i perioden 2007-2016 viser, at ca. 1800 miljøgodkendelser eller omkring 20% af alle miljøgodkendelser indeholder en eller anden form for teknologi til at reducere ammoniakemission (Albrechtsen et al., 2021). Af disse indgår gyllekøling i grisestalde i ca. 460 realiserede miljøgodkendelser og med en gennemsnitlig køleeffekt svarende til en beregnet ammoniakreduktion på 19,6%. Dette svarer til en årsmiddel køleeffekt på ca. 26 W/m². Baseret på analysen estimeres omfanget af gyllekøling i danske grisestalde i 2017 at være hhv. 3,4% af de producerede slagtegrise, 7,4% af årssøerne og 5,3% af de producerede smågrise.

En GIS-analyse omhandlende udbredelse af gyllekøling i danske grisestalde gennemført af firmaet Conterra viste, at mindst 4,4% af de producerede slagtegrise, mindst 10,2% af årssøerne og mindst 5,1% af de producerede smågrise i 2021 blev produceret i stalde med gyllekøling (Nehmdahl, 2022). Tallene kan være højere, da det ikke var muligt at verificere, om alle miljøgodkendelser med gyllekøling var blevet realiseret. Undersøgelsen viser endvidere, at der i gennemsnit af godkendelserne blev anvendt en årsmiddel køleeffekt på 16,8 W/m².

Principielt kan gyllekøling installeres i de fleste grisestalde med gyllesystemer med rørudslusning og mekanisk udmugning. Ved nyetablering nedstøbes køleslangerne i gyllekanalernes betonbund. Dette vurderes ikke at være muligt i eksisterende stalde. Udlægning af køleslanger oven på bunden af gyllekanalerne er teknisk muligt i stalde med rørudslusning, men kan ikke anvendes i stalde med mekanisk udmugning. Forsøg med gyllekøling i en slagtegrisestald med fuldspaltegulv og rørudslusning viste, at køleslangerne kan udlægges oven på kanalbunden uden væsentlig negativ indvirkning på udslusningsfunktionen, når køleslangerne ligger i stiens længderetning (Pedersen, 1997). Hvor tit gyllen blev udsluset, er ikke angivet, men det formodes, at gyllekummerne blev tømt, når de var ved at være fyldt op, dvs. et par gange i løbet af et hold grise. Hyppig udslusning af gyllen vurderes imidlertid at være problematisk, fordi køleslangerne kan have en negativ indflydelse på udslusningsfunktionen, når der ikke er ret meget gylle i gyllekanalerne.

Eftermontering af gyllekøling i eksisterende grisestalde vurderes at være markant dyrere end ved nyetablering, hvilket vil være en væsentlig hindring for evt. øget udbredelse i eksisterende stalde. For nye stalde er omkostningerne til investering og drift af gyllekøling en barriere for udbredelsen, mens behovet for at opfylde miljøkrav er et væsentligt incitament.

Der arbejdes på at reducere energiforbrug ved bl.a. såkaldt frikøling, hvor den opsamlede varme i kølevandet sænkes ved direkte køling med en luftkondensator, dvs. uden anvendelse af en kompressorkøling. Kravet til frikøling er, at udeluftens temperatur er mindst 2 – 3 °C lavere end fremløbstemperaturen af kølevæsken. Med typiske fremløbstemperaturer på 11 – 13 °C i kølevandet, når det returnerer fra stalden, betyder at udetemperaturen skal være 9 °C eller lavere (Klimadan, 2020). Klimadan angiver at frikøling kan udføres med et energiforbrug på 10 – 15% af en varmepumpes energiforbrug. Frikøling er kun interessant, hvor varmen ikke kan nyttiggøres.

6.3.3 Effekt på drivhusgasudledning

Gyllekøling er et potentielt klimavirkemiddel, som reducerer ammoniakemissionen og dermed den indirekte emission lattergas samt emissionen af metan fra gylle i stalden. Med den fornødne dokumentation for tiltagets udbredelse kan effekterne umiddelbart inkluderes i den nationale opgørelse. Denne dokumentation skal omfatte mængden af gylle, der køles, samt en dokumentation af effekten for konkrete stald- og kølesystemer, hvor gyllens temperatur har afgørende betydning for effekten.

Metan

Der er en veldokumenteret sammenhæng mellem dannelsen af metan som funktion af gyllens temperatur (fx Petersen et al., 2016). Ved at modellere produktion af og den tilhørende omsætning af organisk stof med gyllens gennemsnitlig opholdstid kan man beregne den akkumulerede metanproduktion i stald og lager, hvilket også er metoden for de nationale opgørelser (Albrechtsen et al., 2016). Men mange stipladser (det behøver ikke at være hele stalden) med gyllekøling er dimensioneret efter varmebehovet på gården, hvilket er størst om vinteren, og dels varierer betragteligt mellem de enkelte bedrifter.

I forhold til metanproduktion er udfordringen med gyllekøling dels at kende temperaturen i gyllesøjlen, at vurdere påvirkning af gylleresten (inokulum) efter udslusning på metanproduktion fra frisk gylle, omsættelighed af udskilt organisk materiale, pH osv. Eksempelvis har forsøg vist, at gyllekøling med en konstant køleeffekt på 26 W/m² i slagtegrisestalde med rørudslusning giver et gennemsnitligt temperaturfald i gyllen 10 cm over bunden på 2,4 °C og ved bunden på 4,5 °C i forhold til en nabostaldsektion uden gyllekøling. Den gennemsnitlige gyllehøjde i staldene var 19-20 cm, og køleslangerne var nedstøbt i betonbunden (Holm et al., 2017).

En analyse af miljøgodkendelser og omfang af gyllekøling i danske svinestalde har vist, at der i gennemsnit installeres en kølekapacitet på 20 W/m² produktionsareal i miljøgodkendelserne (Nehmdahl et al., 2022). I gennemsnit forudsættes varmepumperne dog kun i drift i 7336 timer om året, hvilket giver en gennemsnitlig køleeffekt over året på 16,8 W/m². Samtidig har forsøg vist, at gyllens temperatur i gennemsnit falder med ca. 1,1 °C pr. 10 W/m² køleeffekt (udledt af Holm et al., 2017). Ved en gennemsnitlig årlig køleeffekt på 16,8 W/m² kan det derfor forventes, at gyllens gennemsnitstemperatur falder med 1,8 °C ved en gennemsnitlig gyllehøjde på ca. 20 cm. Disse forudsætninger er anvendt som input ved beregning

af klimaeffekten af gyllekøling i relevante typer svinestalde. Ved beregningerne er det forudsat, at gyllen efter udslusning fra stalden lagres uden yderligere behandling i gyllebeholder indtil udbringning.

Tabel 6.4 viser værdier for metanemission fra slagtegrise-, so- og smågrise-stalde og metanproduktionen i efterfølgende lagring i gyllebeholder inden udbringning og hhv. uden og med gyllekøling. Metanværdierne for slagtegrise-stalde er beregnet som et vægtet gennemsnit af metanproduktionen i stalde og lager for hhv. stalde med drænet gulv og spaltegulv, stalde med 25-49% fast gulv samt stalde med 50-75% fast gulv. For søer er værdierne beregnet som et vægtet gennemsnit af hhv. farestalde med fuldspaltegulv, farestalde med delvist fast gulv og løbe-/drægtighedsstalde med løsdriftstier med delvist fast gulv. For smågrise-stalde er værdier beregnet som et vægtet gennemsnit af hhv. toklimastalde med delvist fast gulv og stalde med drænet gulv og spaltegulv. Vægtningen er baseret på aktivitetsdata fra DCE af som vist i Adamsen et al. (2021)

Tabel 6.4 Metanemission fra grise-stalde med rørudslusning uden og med gyllekøling (16,8 W/m²) (kg CH₄/ton gylle af dyr).

Dyretype		Gyllekøling	Stald	Lager	I alt
Grise		-	1,86	2,42	4,28
		+	1,48	2,54	4,08
	Slagtegrise	-	1,67	2,57	4,24
		+	1,39	2,66	4,05
	Søer	-	2,07	2,30	4,37
		+	1,74	2,41	4,14
	Smågrise	-	2,17	2,12	4,29
		+	1,41	2,37	3,78

Note: Slagtegrise-stalde: vægtet gns. af CH₄-produktion i hhv. stalde med drænet gulv og spaltegulv, stalde med 25-49% fast gulv og stalde med 50-75% fast gulv. Søer: vægtet gennemsnit af hhv. farestalde med fuldspaltegulv, farestalde med delvist fast gulv og løbe-/drægtighedsstalde, løsdriftstier med delvist fast gulv. Smågrise: vægtet gennemsnit af hhv. toklimastalde med delvist fast gulv og stalde med drænet gulv og spaltegulv.

Tabel 6.5 viser den beregnede effekt på metanproduktionen ved anvendelse af gyllekøling i grise-stalde. Som grundlag for beregningerne er anvendt den tidligere nævnte model, der beregner produktionen af metan baseret på Arrhenius-ligningen (Adamsen et al., 2021).

Tabel 6.5 Metanreduktion i stald, lager og total i grisestalde med gyllekøling ved en årsmiddel køleeffekt på 16,8 W/m² i stalde med rørudslusning.

Dyretype		CH ₄ reduktion stald (%)	CH ₄ reduktion lager (%)	CH ₄ reduktion i alt (%)	CH ₄ reduktion i alt, kg/ton gylle ab dyr	GWP, g CO ₂ e/g CH ₄	Reduktion i CH ₄ - emission, kg CO ₂ e/ ton gylle ab dyr
Grise		20,2	-5,2	5,9	0,254	28	7,1
	Slagtegrise	16,7	-3,5	4,4	0,187	28	5,2
	Søer	15,9	-4,7	5,1	0,221	28	6,2
	Smågrise	35,1	-11,7	11,9	0,512	28	14,3

Lattergas

Der er ikke fundet dokumentation for, at gyllekøling påvirker den direkte udledning af lattergas fra stalde. Gyllekøling reducerer derimod ammoniakfordampningen fra gyllekummerne i stalden og bidrager dermed til at reducere den indirekte udledning af lattergas.

Gyllekøling er optaget på Miljøstyrelsens teknologiliste for staldindretning. For grisestalde med rørudslusning er følgende sammenhæng mellem køleeffekt (x, W/m²) og reduktion i ammoniakfordampning op til 30% angivet:

$$\text{Reduktion (\%)} = 0,85 \cdot x - 0,004 \cdot x^2$$

Mekanisk udmugning giver større effekt end rørudslusning, fordi gyllehøjden er lavere end i stalde med rørudslusning. For grisestalde med mekanisk udmugning (linespilsanlæg) angiver Miljøstyrelsens teknologiliste følgende sammenhæng mellem køleeffekt og reduktion i ammoniakfordampning op til 34%:

$$\text{Reduktion (\%)} = 1,66 \cdot x - 0,02 \cdot x^2$$

Ifølge formlerne reducerer en konstant køleeffekt på 16,8 W/m² gyllekumme ammoniakemissionen fra stalden med 13,2% i stalde med rørudslusning, mens der i stalde med mekanisk udmugning opnås en reduktion på 22,2%. Ligesom for metan medfører en lavere ammoniakemission fra stalden alt andet lige, at lageret tilføres mere ammonium-N, hvilket fører til en marginalt højere ammoniakemission fra lageret.

Tabel 6.5 viser den vægtede ammoniakemission pr. ton gylle ab dyr for grisestalde med og uden gyllekøling. Værdierne angivet for hver dyrekategori repræsenterer et vægtet gennemsnit af de hyppigst forekommende staldtyper. Værdierne anvendes som grundlag for en beregning af reduktionen i den indirekte lattergasemission som beregnes på grundlag af ammoniakemissionen (tabel 6.7).

Tabel 6.6 Ammoniakemission fra stald, lager og total i grisestalde uden og med gyllekøling (16,8 W/m²) (kg NH₃-N/ton gylle ab dyr)

Dyretype		Gyllekøling	Stald	Lager	I alt
Grise		-	0,546	0,067	0,613
		+	0,474	0,069	0,543
	Slagtegrise	-	0,685	0,075	0,759
		+	0,595	0,077	0,671
	Søer	-	0,688	0,092	0,780
		+	0,597	0,094	0,692
	Smågrise	-	0,336	0,062	0,398
		+	0,292	0,063	0,354

Tabel 6.7 Ammoniakemission og afledt indirekte lattergasproduktion i stald, lager og total i grisestalde med gyllekøling ved en årsmiddel køleeffekt på 16,8 W/m² i stalde med rørudslusning.

Dyretype		NH ₃ -N reduktion stald og lager (%)	NH ₃ -N reduktion, kg NH ₃ -N/ton gylle ab dyr	Reduktion i indirekte lattergas, kg N ₂ O-N/kg NH ₃ -N	GWP, kg CO ₂ e/kg N ₂ O	Reduktion i indirekte lattergasemission, kg CO ₂ e / ton gylle ab dyr
Grise		11,3	0,080	0,01	265	0,33
	Slagtegrise	11,6	0,088	0,01	265	0,37
	Søer	11,3	0,088	0,01	265	0,37
	Smågrise	10,8	0,043	0,01	265	0,18

Energiforbrug

Gyllekøling er forbundet med et forbrug af elektrisk energi, som primært går til drift af cirkulationspumper og varmepumpe (kompressor). Typisk er køleeffekten ca. 2,5 gange varmepumpens effektoptag (køleeffektfaktor), og varmeeffekten er ca. 3,5 gange effektoptaget (varmeeffektfaktor). Dette afhænger dog af lokale forhold som slangelængder, -tykkelser, antal ventiler, og ikke mindst af gylletemperaturesen og temperaturen i varmtvandsbeholderen, hvor varmepumpen afleverer den indvundne varmeenergi.

Elforbruget til gyllekøling i er i en BAT-teknologibeskrivelse estimeret for forskellige køleeffekter fra 10 til 40 W/m² produktionsareal i grisestalde (Kai et al., 2022). Ud over anlæggets køleeffektfaktor afhænger elforbruget af den årlige gennemsnitlige køleeffekt per m² gyllekumme, og dermed afhænger elforbruget af stiernes gulvprofil samt, om der er gyllekanal under inspektionsgangen. Estimerede værdier for elforbrug og deraf følgende CO₂-emission forbundet med gyllekøling i grisestalde ved en årsmiddel køleeffekt på 16,8 W/m² produktionsareal i stalden er vist i tabel 6.8. For hver dyrekategori er der beregnet et vægtet gennemsnit af de hyppigst forekommende staldtyper.

Tabel 6.8 Elforbrug ved gyllekøling ved en årsmiddel køleeffekt på 16,8 W/m² i grisestalde med rørudslusning (mod. e. Kai et al., 2022).

Dyrekategori		Elforbrug, kWh/ton gylle ab dyr	CO ₂ emission ved elproduktion, kg CO ₂ e./kWh	CO ₂ emission ved elproduktion, Kg CO ₂ e/ton gylle ab dyr
Grise		21,3	0,070	1,5
	Slagtegrise	20,2	0,070	1,4
	Søer	25,9	0,070	1,8
	Smågrise	18,1	0,070	1,3

Ved beregningerne af udledningen af CO₂-ækv. forbundet med elforbrug er der ikke taget hensyn til i hvilket omfang den producerede varmeenergi anvendes til opvarmning af stalde eller lignende. Substitution af anden opvarmingskilde med varme indvundet fra gyllekøling reducerer udledningen af CO₂-ækv., men en præcis beregning vanskeliggøres af, at behovet for opvarmning af staldene afhænger af årstiden og af grisenes alder.

Samlet effekt på drivhusgasudledning

Nettoeffekten af gyllekøling på udledningen af CO₂-ækv. fra grisestalde er vist i tabel 6.9. Tabellen viser både den overordnede nettoeffekt for grise som helhed og opdelt på hhv. slagtegrise, søer og smågrise.

Tabel 6.9 Samlet effekt af gyllekøling ved en årsmiddel køleeffekt 16,8 W/m² produktionsareal i stalde med rørudslusning på drivhusgasemissionen (kg CO₂e per. ton gylle ab dyr).

Dyretype		Reduceret metan-emission	Reduceret indirekte lattergasemission	Øget energiforbrug	Samlet effekt
Grise		7,1	0,33	1,5	6,0
	Slagtegrise	5,2	0,37	1,4	4,2
	Søer	6,2	0,37	1,8	4,7
	Smågrise	14,3	0,18	1,3	13,2

6.3.4 Samspil til andre virkemidler

Hyppig udslusning: Gyllekøling (med nedstøbte køleslanger) kan kombineres med hyppig udslusning i stalde med rørudslusning og mekanisk udmugning, og dette vil øge reduktionseffekterne for både metan og ammoniak. Hovedeffekten vil dog skyldes effekten af hyppig udslusning. Incitamentet for at tilvælge gyllekøling i kombination med hyppig udslusning i stalde med rørudslusning kan være begrundet i opfyldelse af ammoniakreduktionskrav – hyppig udslusning påvirker så vidt vides ikke ammoniakemissionen – samt i at gyllekøling under visse omstændigheder kan levere relativ billig energi til fx opvarmning af bygninger og brugsvand i stalde, boliger og lignende.

Biogas: Gyllekøling medfører en mindre omsætning af organisk stof i stalden, hvilket betyder at mere organisk stof flyttes til lageret eller anvendes på biogasanlæg. Her vil det betyde en øget biogasproduktion.

Forsuring: Gyllekøling vurderes ikke at bidrage med yderligere reduktion af drivhusgasemissionerne i kombination med forsuring af gyllen i stalden. Gyllekøling i stalden i kombination med lav-dosis forsuring i lageret vil derimod øge den samlede reduktionseffekt på udledningen af metan fra stald og lager, fordi gyllekølingen påvirker metandannelsen i stalden, og lagerforsuringen påvirker metandannelsen i lageret.

Opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding: Gyllekøling påvirker alene emissionerne metan og ammoniak i stalden. I kombination med opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding af metanen vil der kunne opnås en additiv reduktionseffekt på den samlede metanemission fra stald og lager.

Overdækning af gylletanke med ventileret flydelag: Gyllekøling påvirker alene emissionerne metan og ammoniak i stalden. I kombination med overdækning af gylletanke med ventileret flydelag vil der kunne opnås en additiv reduktionseffekt på den samlede metanemission fra stald og lager.

6.3.5 Usikkerheder

Der indsamles ikke systematisk data vedrørende anvendelse af miljøteknologi i danske grisestalde. En miljøgodkendelse af en husdyrproduktion ledsages typisk af krav om anvendelse af ammoniak- eller lugtreducerende teknologi. Erhvervelse af en miljøgodkendelse er dog ingen garanti for at et projekt realiseres, og derfor kan man ikke bare udarbejde en statistik baseret på miljøgodkendelser, og derfor må flere kriterier nødvendigvis anvendes for at få et retvisende billede af udbredelsen.

I den foreliggende analyse er der taget udgangspunkt i en årsmiddel køleeffektfaktor på 16,8 W/m² produktionsareal i staldene. Der er dog stor forskel på årsmiddel køleeffekten i den enkelte stald. Ifølge en analyse foretaget af firmaet ConTerra var den gennemsnitlige kapacitet af gyllekølingsanlæg anført i danske miljøgodkendelser 20 W/m². Variationen var dog stor: 3 – 40 W/m² (Nehmdahl, 2022). Den faktiske køleeffekt afhænger også af antallet af driftstimer pr. år, og der viste ConTerras undersøgelse, at gyllekølingsanlæggene formodes at være i drift i gennemsnit 7336 timer pr. år. Men også her er der stor variation: 1116 – 8760 timer pr. år (Nehmdahl, 2022).

Effekten af gyllekøling på ammoniakemissionen er hovedsageligt baseret på målinger foretaget i slagtegrisestalde, idet den målte effekt formodes at kunne anvendes i andre typer af grisestalde. Dette er dog forbundet med en øget usikkerhed, da sammensætningen af gylle varierer mellem dyregrupper, ligesom staldenes indretning varierer.

Effekten af gyllekøling på udledningen af metan i de enkelte staldtyper bygger på modelberegninger ved anvendelse af normtal for udskillelse og omsætning af husdyrgødning. Der foreligger imidlertid ikke konkrete staldmålinger, der direkte dokumenterer sammenhængen mellem køleeffekt og metanudledning.

Referencer

- Adamsen, A.P S., Hansen, M.J., Møller, H.B., (2021). Effekt af hyppig udslusning af gylle på metanproduktion, Notat fra DCA Nr. 2020-0166155, 9 s., jan. 12, 2021.
- Albrektsen, R., Mikkelsen, M.H., Gyldenkerne, S. 2021. Danish emission inventories for agriculture. Inventories 1985 – 2018. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 202 pp. Scientific Report No. 443. <http://dce2.au.dk/pub/SR443.pdf>
- Byggeri & Teknik (2020). Materiale udleveret på møde om gyllekøling i svinestalde den 29. sept. 2020 mellem Peter Kai og Anders Peter Adamsen, AU, og Svinerådgivningen, Sagro og Byggeri & Teknik.
- Energistyrelsen (2021). Basisfremskrivninger.
<https://ens.dk/service/fremskrivninger-analyser-modeller/basisfremskrivninger>.
- Holm, M., K.B. Sørensen, M.B.F. Nielsen (2017). Ammoniak- og lugtreduktion ved gyllekøling i slagtesvinestalde. Meddelelse nr. 1105, Videncenter for Svineproduktion, Den Rullende Afprøvning.
- Holm, M., K.B. Sørensen (2019). Ammoniak og metanemission fra drægtighedsstalde. Erfaring nr. 1910. Videncenter for Svineproduktion, Den Rullende Afprøvning.
- Kai, P., A.P. Adamsen (2017). Fra produktionsbaseret til arealbaseret emissionsberegning. Del 2: Emissionsfaktorer. Institut for Ingeniørvidenskab, Aarhus Universitet. Danmark. Technical report BCE –TR-12. 89 pp.
- MELT (2017). Gyllekølings reducerende effekt på ammoniak og lugtemission.
<https://mst.dk/media/169085/indstilling-af-gyllekoeling-mediarkiv.pdf>
- Miljøministeriet (2010). Forudsætninger for de økonomiske beregninger ved gyllekøling. Søer og smågrise. Udarbejdet af NIRAS.
- Miljøstyrelsen (2011). Køling af gylle i stalde til søer og smågrise. Teknologiblad 26.1.2011, 10 sider.
- Nehmdahl, H. (2022). Dokumentation af udbredelse- og aktivitetsdata af gyllekøling i Danmark. Rapport udarbejdet af Conterra Aps for Miljøministeriet.
- Pedersen, P. (1997). Køling af gylle i slagtesvinestalde med fuldspaltegulv. Landsudvalget for svin, Meddelelse nr. 357, 6 pp.
- Pedersen, P. (2005). Linespilsanlæg med køling i drægtighedsstalde. Meddelelse nr. 694, Landsudvalget for Svin og Videncenter for Svineproduktion.
- RAV (2019). Regeling ammoniak en veehouderij. D 3 diercategorie vleesvarkens, opfokberen van ca. 25 kg tot 7 maanden, opfokzeugen van ca. 25 kg tot eerste dekking.
<https://www.infomil.nl/onderwerpen/landbouw/stalsystemen/emissiefactoren-per/map-staltpen/3-diercategorie-0/>

6.4 Lav-dosis forsuring i gyllelagre (KVM6.4)

Forfatter: Søren O. Petersen, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Lise Bonne Guldberg, Institut for Bio- og Kemiteknologi

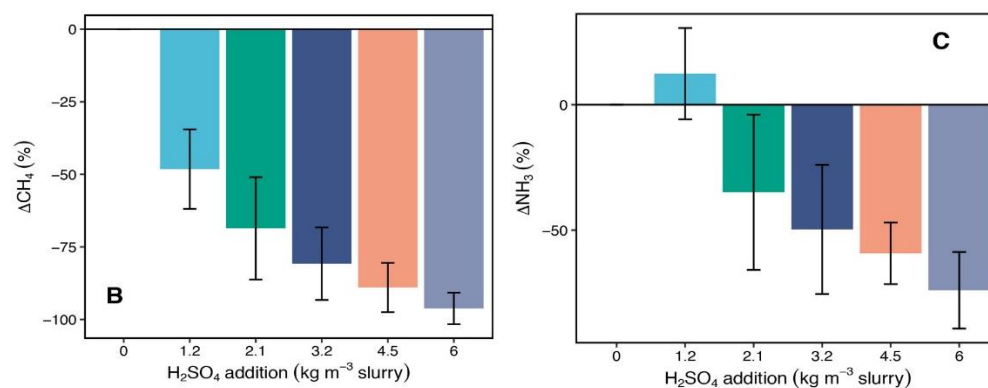
Forsuring af gylle i lagertanken er en velkendt praksis, der anvendes for at begrænse ammoniaktab i forbindelse med den efterfølgende udbringning. Krav til forbruget af 96% koncentreret svovlsyre (se tabel 6.10) er beskrevet i den gældende gødningsbekendtgørelse (BEK 1142 af 10. juli 2022).

Tabel 6.10 Krav til syretilsætning (kg/ton) ved lagerforsuring før udbringning.

	Under udbringning	I lageret, max 72 før udbringning	I lageret, max 4 uger før udbringning
Kvæggylle	3,0	3,0	4,4
Svinegylle	2,9	2,9	5,7
Afgasset kvæg- og svinegylle	11,0	11,0	14,0

Det er velkendt, at gylleforsuring også hæmmer emissionen af metan under opbevaring af gylle, men det forudsætter forsuring ved lagringens begyndelse, og de aktuelle regler for lagerforsuring er dermed uforenelige med brug af forsuring som klimavirkemiddel.

Et lagringsforsøg i pilotskala blev gennemført i 2021 som led i klimaforskningsprojektet "Integreret reduktion af metanemission fra husdyrgødning" (INTERMET), hvor effekten af at forsure svinegylle med forskellige doser blev undersøgt (Ma et al., 2022). Den højeste dosis var 6 kg/ton svarende til normal forsuring, og derudover omfattede forsøget behandlinger med ubehandlet svinegylle og gylle med ca. 20, 40, 60 og 80% af normal dosis. Metan- og ammoniakemission, såvel som emission af lugtstoffer, blev fulgt i 8 uger; den samlede emission i perioden er vist i figur 6.3. Resultaterne viste en gradvist mere effektiv metanreduktion med stigende syredosering, og det samme var tilfældet for ammoniak.



Figur 6.3 Ændring i emission af metan (t.v.) og ammoniak (t.h.) under otte uges lagring efter forsuring med forskellige doser af 96% svovlsyre (Ma et al., 2022).

6.4.1 Anvendelse

Lagerforsuring er en kendt teknologi, og der er allerede i dag maskinstationer, som leverer denne ydelse. Gylleomrøring uden forsuring er ligeledes kendt praksis, som altid finder sted forud for udbringning. Virkemidlet er således tilgængeligt for alle bedrifter, som ikke gør brug af andre metanreducerende virkemidler. Men der er som sagt tale om en alternativ anvendelse af forsuring, som ikke opfylder kravene til at bruge forsuring som ammoniakvirkemiddel.

6.4.2 Relevans og potentiale

Der er omkostninger forbundet med gylleforsuring, dels i form af indkøb af syre, men også omrøring i forbindelse med tilsætning. Forskellige strategier kan tænkes anvendt, såsom forsuring flere gange i lagringsperioden, eller forsuring en enkelt gang og efterfølgende omrøring i løbet af lagringsperioden, som skal sikre at ubehandlet gylle tilført fra stalden blandes op med allerede fursuret gylle. Det sidste scenarie har den fordel, at syrekonsentrationen så vil være relativt høj sommer og efterår, hvor potentialet for metan- og ammoniakemission også er størst. Behovet for omrøring er ukendt.

6.4.3 Effekt på drivhusgasudledning

I ovennævnte undersøgelse (Ma et al., 2022) blev der lavet foreløbige beregninger af omkostningseffektivitet for drivhusgasreduktion, som indikerede at forsuring med 2 kg/ton gav den bedste økonomi. Her viste forsøget en 70% reduktion af metanemissionen, mens reduktionen af ammoniakemission var mindre end 50%. Sammenlignelige resultater er rapporteret fra Canada i et pilotskalaforøg med fortyndet kvæggylle (Sokolov et al., 2021). Med priser på under 50€ (350-400 kr.) pr. ton CO₂-ækv. ved et omrøringsbehov på 1-3 gange i lagringsperioden synes dette at være en omkostningseffektiv strategi.

I beregningen af omkostningseffektivitet blev der taget højde for effekten på tab af ammoniak, som er en indirekte kilde til lattergas. Det blev antaget, at differencen mellem forsøgsbehandlinger vil afspejles i forbruget af handelsgødning.

Reduktion af metan fra lavdosis forsuring i lageret ses i tabel 6.11.

Tabel 6.11 Estimeret metanreduktion i stald, lager og totalt ved udslusning af gylle ved fuld kumme og lav-dosis forsuring i lager. For kvægstalde er medtaget gødning fra stalde med ringkanal eller bagskyl, fastdrænet gulv med skraber, spaltegulv med skraber og fast gulv med 2% hæld og skraber. De sidste to kolonner viser reduktion i CO₂-ækv. (CO₂e per ton gylle af dyr og i 1000 tons (kt) per stalddtype. For svinestalde er medtaget gødning fra stalde, hvor rørudslusning kan benyttes. Enheder i pr. ton henviser til pr. ton gylle af dyr.

Dyre-og stalddtype	Ref.	CH ₄ udledning kg CH ₄ /ton			Udbredelse, %		Reduktion netto	
		Stald	Lager	Total	2020	Potenti- ale	kg CO ₂ e/ ton	kt CO ₂ e/ stald- type
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Ja	1,7	0,8	2,5	0	100	16	117
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Nej	1,7	0,2	2				
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, skraberanlæg	Ja	0,1	0,9	1,1	0	100	18	49
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, skraberanlæg	Nej	0,1	0,3	0,4				
Kvæg, Sengebåse, spalter, skraberanlæg	Ja	0,1	0,9	1,1	0	100	18	63
Kvæg, Sengebåse, spalter, skraberanlæg	Nej	0,1	0,3	0,4				
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, 2% hæld, skrab	Ja	0,1	0,9	1,1	0	100	18	17
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, 2% hæld, skrab	Nej	0,1	0,3	0,4				
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Ja	1,9	2,5	4,4	0	100	49	235
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Nej	1,9	0,7	2,7				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Ja	1,5	2,6	4,1	0	100	51	195
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Nej	1,5	0,8	2,3				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Ja	1,1	2,8	3,8	0	100	54	57
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Nej	1,1	0,8	1,9				
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Ja	1,9	2,4	4,2	0	100	46	124
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Nej	1,9	0,7	2,6				
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Ja	2,5	2,2	4,6	0	100	43	45
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Nej	2,5	0,7	3,1				
Søer, Farestalde, kassesti, fuldspalte	Ja	2,8	2,1	4,8	0	100	40	8
Søer, Farestalde, kassesti, fuldspalte	Nej	2,8	0,6	3,4				
Smågrise, Toklimastald m, delvis spaltegulv	Ja	1,5	2,4	3,8	0	100	46	110
Smågrise, Toklimastald m, delvis spaltegulv	Nej	1,5	0,7	2,2				
Smågrise, Drænet gulv + spalter (50/50)	Ja	2,6	2	4,6	0	100	39	21
Smågrise, Drænet gulv + spalter (50/50)	Nej	2,6	0,6	3,2				
Kvægstalde	Ja	0,9	0,9	1,8	0	100	17	247
Kvægstalde	Nej	0,9	0,3	1,2				
Svinestalde	Ja	1,8	2,5	4,2	0	100	48	794
Svinestalde	Nej	1,8	0,7	2,5				

6.4.4 Samspil til andre virkemidler

Der er en konflikt mellem anvendelsen af gylleforsuring som klimavirkemiddel og som kvælstofvirkemiddel. En effektiv hæmning af metanemissionen kræver en behandling ved lagringens begyndelse, og formentlig kan syreforbruget reduceres væsentligt. I modsætning hertil kræver en effektiv hæmning af ammoniakemissionen ved udbringning, at forsuring sker sent i lagringsperioden, og at syremængderne i tabel 6.10 anvendes. Der er et oplagt potentiale for synergi med hyppig udslusning, således af forsuring af gylle sker så tidligt i lagringsperioden som muligt.

6.4.5 Usikkerheder

Det er uklart, hvilken grad af opblanding det kræver at sikre en effektiv metanreduktion igennem hele lagringsperioden. Skal opblanding af gyllen ske hver gang, der tilføres frisk gylle, eller er færre gange tilstrækkeligt? Kan metoden til udpumpning af gylle fra stalden justeres, så der sikrer en bedre kontakt med den allerede forsurede gylle i lagertanken? Strategier til lavdosis-forsuring vil blive undersøgt i et nyt projekt med finansiering fra "Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug" af 4. oktober 2021.

Risici for miljøeffekter ved udbringning af forsuret gylle blev diskuteret af Jensen et al. (2018) i lyset af, at tilførslen af svovl til jorden i form af sulfat er mindst dobbelt så stor som afgrødens behov. Den videre skæbne af sulfat i miljøet er ukendt, men potentielt kan sulfat føre til mobilisering af fosfor i vådområder eller sedimenter (Zak et al., 2006). Med den stigende udbredelse af gylleforsuring ved udbringning er det påtrængende nødvendigt at vurdere risikoen for, at dette sker under danske forhold. Med lavdosis-forsuring vil svovlmængden være langt bedre afstemt med afgrødernes behov, og risikoen for sulfatudvaskning og fosformobilisering tilsvarende mindre. Miljøeffekter af gylleforsuring vil også blive undersøgt i et nyt projekt med finansiering fra "Aftale om grøn omstilling af dansk landbrug".

Referencer

- Jensen, J., Krogh, P.H., Sørensen, P., Petersen, S.O. (2018). Potentielle miljøeffekter ved anvendelse af forsuret gylle på landbrugsjord. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, nr. 257, bind 257, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi.
- Ma, C., Dalby, F.R., Feilberg, A., Jacobsen, B.H., Petersen, S.O. (2022). Low-dose acidification as a methane mitigation strategy for manure management. *Agricultural Science and Technology* 2, 437-442.
- Sokolov, V., Habtewold, J., VanderZaag, A., Dunfield, K., Gregorich, E., Wagner-Riddle, C., Venkiteswaran, J. J., Gordon, R. (2021). Response curves for ammonia and methane emissions from stored liquid manure receiving low rates of sulfuric acid. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5 (224), 678992.
- Zak, D., Kleeberg, A., Hupfer, M. (2006). Sulphate-mediated phosphorus mobilization in riverine sediments at increasing sulphate concentration, River Spree, NE Germany. *Biogeochemistry* 80, 109-119.

6.5 Gylle og bioforgasning (reference for hyppig udslusning af gylle og bioforgasning) (KVM6.5)

Forfattere: Anders Peter Adamsen og Frederik Rask Dalby, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Henrik B. Møller, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Dette afsnit beskriver almindelig håndtering af gylle som efterfølgende anvendes i et biogasanlæg (bioforgasses). Emnet er udførligt behandlet i DCA-rapport nr. 175 (Olesen et al., 2020), som også er publiceret som en fagfællebedømt artikel (Møller et al., 2022).

6.5.1 Anvendelse

Bioforgasning af gødning kan anvendes på alle typer gødninger, på nær forsuret gylle, hvor kun en mindre andel kan anvendes uden at hæmme biogasudbyttet og forøge svovlbrinteindholdet i biogassen. Gylle fra kvægstalde med sand i sengebåse kan dog være problematiske at anvende til bioforgasning. Faste gødningstyper, fx hønsemøg med højt fosfor- og kvælstofindhold, kan være ligeledes problematiske, og kan kun tilsættes i mindre andele.

6.5.2 Relevans og potentiale

Bioforgasning er relevant for alle typer husdyrgødning, også dybstrøelse, men det kræver at biogasanlægget er dimensioneret til at håndtere gylle med højere tørstofindhold.

Potentialet er nærmest at alt husdyrgødning kan bioforgasses. Det kræver dog en kraftig udbygning af hele biogassektoren og gasledningsnettet, men potentialet er der.

6.5.3 Effekt på drivhusgasudledning

For svinegylle antages et gennemsnitligt udbytte på 335 liter metan ved standard tryk og temperatur per kg organisk stof (VS) ved opholdstid på 30 dage (Møller et al., 2022). Det svarer til at 24 vægtprocent af organisk stof omsættes til metan.

For kvæggylle antages et gennemsnitligt udbytte på 230 liter metan per kg organisk stof ved en opholdstid på 30 dage (Møller et al., 2022). Det svarer til at 17 vægtprocent af organisk stof omsættes til metan.

Det antages at 1 kg metan i biogas kan fortrænge 1 kg metan i naturgas. Et kg naturgas har en gennemsnitlig udledning på 0,068 kg CO₂-ækv. per MJ (BioGrace, 2015). Da et kg metan indeholder 50,4 MJ energi (nedre brændværdi) betyder det, at et kg produceret metan i biogas ved fortrængning af naturgas vil have en negativ emission på 3,4 kg CO₂-ækv., da biogas i sig selv ikke bidrager til mer-emission af CO₂, udover de emissioner der er forbundet med brug af fossile brændstoffer til proces og transport af biomasse samt lækage af metan fra anlægget.

I DCA-rapporten "Bæredygtig biogas" er der for et anlæg med 40% svinegylle, 40% kvæggylle og resten som dybstrøelse beregnet, at metan i biogas erstatter fossilt metan i naturgas som dermed har en negativ emission på 48,35 kg CO₂-ækv. per ton biomasse (Olesen et al., 2020, tabel 7.1 M1a). Dertil skal der lægges emissioner af fossilt CO₂ til proces, transport og lækage af metan på anlægget, hvilket udgør 9,4 kg CO₂-ækv. per tons biomasse, hvilket udgør 19% af den negative emission af biogas ved fortrængning af naturgas. Hvis man korrigerer den negative emission på 3,4 kg CO₂-ækv. per kg metan ved fortrængning af naturgas med emissionerne fra proces, transport og lækager, så fås en negativ nettoemission på 2,8 kg CO₂-ækv. per kg metan i biogas ved anvendelse i naturgasnettet.

For svinegylle tilført biogasanlægget vil der således være en negativ emission på 0,24 kg CH₄ per kg VS · 2,8 kg CO₂-ækv. per kg CH₄ tilført ved fortrængning af naturgas, hvilket giver 0,67 kg CO₂-ækv. per kg VS.

For kvæggylle tilført biogasanlægget vil der således være en emission på 0,17 kg CH₄ per kg VS · 2,8 kg CO₂-ækv. per kg CH₄ tilført ved fortrængning af naturgas, hvilket giver 0,48 kg CO₂-ækv. per kg VS.

Emission af metan fra stalde, afhentningstanke, biogasanlæg og gylletanke nyttiggøres ikke som biogas og har en emission på 28 kg CO₂-ækv. per kg metan. Emissioner fra lattergas udgør under 1% af den samlede emission af CO₂-ækv. og indregnes derfor ikke. Det antages at kulstoflagring af afgasset gylle i forhold til ikke-afgasset gylle vil være på samme niveau.

Tabel 6.12 Estimeret metanreduktion i stald, lager og totalt ved udslusning af gylle ved fuld kumme, ophold i afhentningstank i 2 dage og bioforgasning. For kvægstalde er medtaget gødning fra stalde med ringkanal eller bagskyl, fastdrænet gulv med skraber, spaltegulv med skraber og fast gulv med 2% hæld og skraber. Kolonnen "Fortrængning" viser emission i CO₂-ækv. ved anvendelse af den producerede biogas til erstatning af naturgas. De sidste to kolonner viser reduktion i CO₂-ækv. (CO₂e per ton gylle af dyr og i 1000 tons (kt) per staldtype. For svinestalde er medtaget gødning fra stalde hvor rørudslusning kan benyttes. For referencestalde er bioforgasning ikke medregnet.

Dyre-og staldtype	Ref.	CH ₄ udledning, kg CH ₄ /ton			Fortrængning , kg CO ₂ /ton	Udbredelse, %		Reduktion netto	
		Stald	Lager	Total		2020	Potentiale	kg CO ₂ e/ ton	kt CO ₂ e/ Stald-type
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Ja	1,7	0,8	2,5	0	27	100	47	252
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Nej	1,8	0,3	2,1	35				
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, skraberanlæg	Ja	0,1	0,9	1,1	0	27	100	53	104
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, skraberanlæg	Nej	0,2	0,3	0,6	40				
Kvæg, Sengebåse, spalter, skraberanlæg	Ja	0,1	0,9	1,1	0	27	100	53	136

Kvæg, Sengebåse, spalter, skraberanlæg	Nej	0,2	0,3	0,6	40				
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, 2% hæld, skrab	Ja	0,1	0,9	1,1	0	27	100	53	38
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, 2% hæld, skrab	Nej	0,2	0,3	0,6	40				
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Ja	1,9	2,5	4,4	0	18	100	96	377
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Nej	2,1	0,1	2,2	34				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Ja	1,5	2,6	4,1	0	18	100	101	317
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Nej	1,7	0,1	1,8	36				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Ja	1,1	2,8	3,8	0	18	100	106	91
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Nej	1,3	0,1	1,4	38				
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Ja	1,9	2,4	4,2	0	18	100	91	201
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Nej	2,0	0,1	2,1	32				
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Ja	2,5	2,2	4,6	0	18	100	84	72
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Nej	2,6	0,1	2,7	30				
Søer, Farestalde, kassesti, fuldspalte	Ja	2,8	2,1	4,8	0	18	100	80	13
Søer, Farestalde, kassesti, fuldspalte	Nej	2,9	0,1	3,0	28				
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Ja	1,5	2,4	3,8	0	18	100	90	177
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Nej	1,6	0,1	1,8	32				
Smågrise, Drænet gulv + spalter (50/50)	Ja	2,6	2,0	4,6	0	18	100	76	33
Smågrise, Drænet gulv + spalter (50/50)	Nej	2,7	0,1	2,8	27				
Kvægstalde	Ja	0,9	0,9	1,8	0	27	100	50	530
Kvægstalde	Nej	1,0	0,3	1,3	37				
Svinestalde	Ja	1,8	2,5	4,2	0	18	100	94	1274
Svinestalde	Nej	1,9	0,1	2,0	34				

6.5.4 Samspil til andre virkemidler

Bioforgasning af husdyrgødning har et stort positivt samspil med hyppig udslusning og køling af gylle i stalde. Bioforgasning har negativt samspil med forsuring af gylle i stalden, da forsuring med svovlsyre hæmmer metanproduktionen både i stald, lagre og lagre. Den afgassede gylle kan ved lagring forsures for at reducere emission af ammoniak, hvilket også vil reducere metanemission ved den efterfølgende lagring. Den afgassede gylle kan også opbevares med i lagre med teltoverdækning og ventileret flydelag eller i lagre med teltoverdækning og opsamling af gas med afbrænding i fakkelt.

6.5.5 Usikkerheder

Der er en lang række usikkerheder ved bioforgasning af husdyrgylle. Det er især metan-udbytter, indhold af tørstof og organisk stof i gødning, procesforhold, lækager på anlæg, samt anvendelse af biogas.

Referencer

Adamsen, A.P.S., Hafner, S.D. (2021). Emissionsfaktorer for ammoniak fra ALFAM2 for afgasset biomasse. Rådgivningsnotet fra DCA.

BioGrace (2015). BioGrace-1 Excel tool. Version 4d.
<https://www.biograce.net/content/ghgcalculationtools/recognisedtool/>

Hafner, S.D., Nyord, T., Sommer, S.G., Adamsen, A.P.S. (2021). Estimation of Danish emission factors for ammonia from field-applied liquid manure for 1980 to 2019. 138 pages. Advisory report from DCA – Danish Centre for Food and Agriculture, Aarhus University, submitted: 23-09-2021

Møller, H.B., Sørensen, P., Olesen, J.E., Petersen, S.O., Nyord, T., Sommer, S.G. (2022). Agricultural Biogas Production—Climate and Environmental Impacts. Sustainability (Switzerland), 14(3), [1849].
<https://doi.org/10.3390/su14031849>

Olesen, J.E., Møller, H.B., Petersen, S.O., Sørensen, P., Nyord, T., Sommer, S.G. (2020). Bæredygtig biogas - klima og miljøeffekter af biogasproduktion. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, DCA rapport Nr. 175 <https://dcapub.au.dk/djfpublikation/index.asp?action=show&id=1454>

6.6 Opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (KVM6.6)

Forfatter: Anders Peter Adamsen, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Lise Bonne Guldborg, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fakkelaafbrænding (på engelsk flaring) er en velkendt teknik til håndtering af gasser fra indvinding af olie- og naturgas. Det anvendes også på lossepladser med lav gasproduktions. Endvidere har de fleste biogasanlæg også fakler til afbrænding af gas ved driftstop.

I en undersøgelse i staten New York blev der etableret overdækning, opsamling og direkte afbrænding (flaring) på 3 gårde med kvæg (Wightman & Woodbury, 2016). De tre gårde havde i gennemsnit 800 malkekøer og opbevaringskapacitet til 6 måneder. Langt størstedelen af metan bliver produceret i sommer og efteråret, hvor der også er den højeste andel af metan, og afbrænding derfor er muligt uden støttebrændsel. Forfatterne beregnede, at 80% af den opsamlede metan blev omsat, men aktuel omsætning og eventuelle dannelse af uønskede gasser, fx nitrogenoxider, er blev ikke undersøgt.

I GUDP-projektet LESS vil teknologien blive udviklet de kommende to år samt testet og dokumentet. Der kan være behov for yderligere at dokumentere teknologien på flere end den tank, der bliver opstillet i LESS-projektet. Det foreslås at lave test af 3 tanke med svinegylle og 3 tanke med kvæggylle over et år i 2024-25. Der er behov for at teste gyllelagre fra både kvæg og svin, da der er stor forskel på udbringningsmønstre (fx Birkmose, 2020).

Opsamling af gas fra tætte overdækkede gyllebeholdere vil kræve en ændring af det nuværende praksis for overdækkede gyllebeholdere, som skal sikre, at der ikke kan opbygges koncentrationer af metan over dets nedre eksplosionsgrænse, som er ca. 5 procent ved kontakt med atmosfærisk luft (Landbrugets Byggeblad 103.04-29 af 02-06-2009). Det kan være, at der skal opstilles ATEX-krav til pumper og andre komponenter mellem gyllelagret og afbrændingsenhed.

Det forventes, at teknologien er færdigudviklet og dokumentet i LESS (GUDP) ved udgangen af 2024. En dokumentation på teknologilisteniveau af 4 – 6 gylletanke vil kunne ske i 2024 – 2025.

6.6.1 Anvendelse

Teknologien kan anvendes på forholdsvis tætte gyllelagre, dvs. gylletanke med overdækning og overdækkede gyllelaguner.

6.6.2 Relevans og potentiale

Teknologien er relevant for alle type landbrug med gylletanke eller overdækkede laguner. Det er klart mest relevant at opsamle den producerede gas og udnytte den til energiformål, men det vil i mange tilfælde ikke være logistisk muligt og heller ikke lønsomt. Ved at brænde metan (og formentlig også dele af ammoniak og svovlbrinte) oxideres metan til CO₂ med en langt mindre drivhusgasvirkning.

Der er store potentialer ved at opsamle og afbrænde gassen fra overdækkede gyllebeholdere og laguner. I et netop bevilliget GUDP-projekt Low Emission Slurry Storages (LESS) skal AU sammen med Landia og underleverandører videreudvikle og dokumentere teknologien de kommende år.

6.6.3 Effekt på drivhusgasudledning

Det forventes, at mindst 80% af den producerede metan kan opsamles fra gyllelagre ved at tætnede eksisterende teltoverdækninger. Det forventes at gennemsnitlig 80% af det opsamlede metan kan omsættes (oxideres) i en fakkell. Det giver en samlet effekt på 64%. Estimeret reduktion af metan er angivet i tabel 6.13.

Tabel 6.13 Estimeret metanreduktion i stald, lager og totalt ved udslusning af gylle ved fuld kumme af afbrænding af metan i lager. For kvægstalde er medtaget gødning fra stalde med ringkanal eller bagskyl, fastdrænet gulv med skraber, spaltegulv med skraber og fast gulv med 2% hæld og skraber. For svinestalde er medtaget gødning fra stalde hvor rørudslusning kan benyttes. De sidste to kolonner viser reduktion i CO₂-ækv. (CO₂e per ton gylle af dyr og i 1000 tons (kt) per staldtype.

Dyre-og staldtype	Ref.	CH ₄ udledning, kg CH ₄ /ton			Udbredelse, %		Reduktion netto	
		Stald	Lager	Total	2020	Potentielle	kg CO ₂ e/ton	kt CO ₂ e/Stald type
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Ja	1,7	0,8	2,5	0	100	14	103
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Nej	1,7	0,3	2				
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, skraberanlæg	Ja	0,1	0,9	1,1	0	100	16	43
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, skraberanlæg	Nej	0,1	0,3	0,5				
Kvæg, Sengebåse, spalter, skraberanlæg	Ja	0,1	0,9	1,1	0	100	16	56
Kvæg, Sengebåse, spalter, skraberanlæg	Nej	0,1	0,3	0,5				
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, 2% hæld, skrab	Ja	0,1	0,9	1,1	0	100	16	16
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, 2% hæld, skrab	Nej	0,1	0,3	0,5				
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Ja	1,9	2,5	4,4	0	100	45	216
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Nej	1,9	0,9	2,8				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Ja	1,5	2,6	4,1	0	100	47	180
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Nej	1,5	0,9	2,4				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Ja	1,1	2,8	3,8	0	100	49	51
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Nej	1,1	1	2,1				
Søer, Drægtighedsstalde, løs + individuel, delvis spalte	Ja	1,9	2,4	4,2	0	100	42	113
Søer, Drægtighedsstalde, løs + individuel, delvis spalte	Nej	1,9	0,8	2,7				
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Ja	2,5	2,2	4,6	0	100	39	41
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Nej	2,5	0,8	3,2				
Søer, Farestalde, kassesti, fuldspalte	Ja	2,8	2,1	4,8	0	100	37	7

Søer, Farestalde, kassesti, fuldspalte	Nej	2,8	0,7	3,5				
Smågrise, Toklimastald m, delvis spaltegulv	Ja	1,5	2,4	3,8	0	100	42	101
Smågrise, Toklimastald m, delvis spaltegulv	Nej	1,5	0,8	2,3				
Smågrise, Drænet gulv + spalter (50/50)	Ja	2,6	2	4,6	0	100	35	19
Smågrise, Drænet gulv + spalter (50/50)	Nej	2,6	0,7	3,3				
Kvægstalde	Ja	0,9	0,9	1,8	0	100	15	218
Kvægstalde	Nej	0,9	0,3	1,3				
Svinestalde	Ja	1,8	2,5	4,2	0	100	44	727
Svinestalde	Nej	1,8	0,9	2,6				

6.6.4 Samspil til andre virkemidler

Positivt samspil med teknologier der hurtigt får flyttet organisk materiale, der er substrat for metandannelsen ud i lagre, dvs. hyppig udslusning, gyllekøling og staldforsuring.

Positivt samspil ved afgasset gylle, da fakkelaftbrænding forventes at forbrænde ammoniak.

6.6.5 Usikkerheder

Fakkelaftbrænding i lille skala er kendt for gamle lossepladser, hvor man ikke kan udnytte metan lønsomt. Disse systemer er forholdsvis dyre.

Der er usikkerhed forbundet med opsamling af gyllegas fra gyllelagre og omsætning af metan (og ammoniak) i gasfakler. Især under vinterhalvåret vil der kunne være problemer med at sikre en tilstrækkelig høj koncentration af metan til at faklen kan brænde effektivt (Wightman & Woodbury, 2016).

Der er risiko for at kvælstof omkring flammen og ammoniak i den tilførte gas kan danne kvælstofoxider. Faklen skal udvikles og dokumenteres i førnævnte LESS-projekt.

Referencer

Birkmose, T. (2020). Aktivitetsdata for udbragt husgyrgødning, 2016-2020. SEGES. 6 sider.

Wightman, J. L., Woodbury, P.B. (2016). New York Dairy Manure Management Greenhouse Gas Emissions and Mitigation Costs (1992-2022). J. Environ. Qual., 45, 266-275. doi:10.2134/jeq2014.06.0269.

6.7 Overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (KVM6.7)

Forfatter: Søren O. Petersen, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Lise Bonne Guldborg, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Mere end 90 % af husdyrgødningen i Danmark håndteres som gylle, og det meste udbringes om foråret. Under opbevaringen kan den biologiske omsætning i gyllen føre til udledning af drivhusgasser, primært i form af metan. Hvor meget metan der udledes fra lagertanke vil afhænge af en række faktorer, bl.a. opholdstid i stalden og eventuel behandling før lagring.

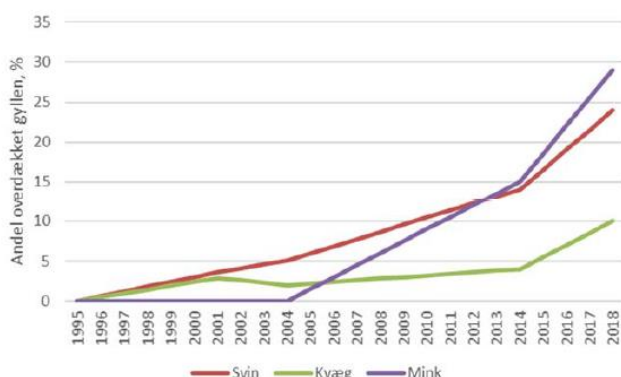
Flydelag kan indeholde metanoxiderende bakterier (Petersen et al., 2005), og da metan har en drivhuseffekt, som er 28 gange større end CO₂ (med 100 års tidshorisont), er metanoxidation i flydelag et potentielt klimavirkemiddel. Det internationale klimapanel, IPCC, har i de gældende guidelines (IPCC, 2006) forudsat, at et naturligt flydelag kan fjerne 40 % af den metan, som produceres i gyllen under lagring. En stor del af metanemissionen sker dog via sprækker i flydelaget og fortyndes hurtigt i atmosfæren, hvad der gør effektiviteten af den mikrobielle metanfjernelse usikker (Duan et al., 2017). En mere effektiv metanfjernelse kræver formentlig en kombination af flydelag og en overdækning, som forlænger opholdstiden for metan i luften over flydelaget og dermed sikrer en bedre forsyning med metan til de metanoxiderende bakterier (Petersen et al., 2013). En opdatering af guidelines (IPCC, 2019) angiver, at fast overdækning kan give en 25-50% metanfjernelse (variationsbredde 0-90%).

En variationsbredde på 0-90% er ikke et godt grundlag for at anvende metanoxidation som klimavirkemiddel, og variationen skyldes muligvis flydelagets egenskaber. Det er baggrunden for en dansk udviklingsindsats indenfor rammerne af klimaforskningsprojektet "Integreret reduktion af metanemission fra husdyrgødning" (INTERMET), som sigter mod at optimere betingelserne for metanoxidation gennem kontrolleret ventilation. Denne indsats bygger på overvejelser, som blev præsenteret i Olesen et al. (2018; afsnit 5.2). En prototype af en ny ventilationsteknologi er blevet afprøvet i pilotskala i 2021. Prototypen, udviklet med bistand fra ventilationsfirmaet SKOV A/S, har en selvregulerende ventilation, som styres med henblik på at optimere tilgængeligheden af metan og ilt for metanoxiderende bakterier. En detaljeret beskrivelse af teknologi og styringsprincipper forventes at blive offentliggjort i løbet af 2023.

Der er via Innovationsfonden (Innmission 3) givet en bevilling til afprøvning af kontrolleret ventilation på et fuldskala-gyllelager i 2023. I det nye projekt skal strategier til stabilisering af flydelaget under omrøring og tømning/fyldning også undersøges, idet udviklingen af flydelagets mikrobiologi er en langsom proces og potentielt kan begrænse omfanget af metanoxidation hen over sommeren.

6.7.1 Anvendelse

Andelen af lagre med fast overdækning er i vækst (se figur 6.4) og repræsenterede i 2018 omkring 10% af kvæggylle, og 25% af svinegylle (Mikkelsen & Albrechtsen, 2020). Hvordan en fast overdækning påvirker betingelserne for flydelagsdannelse er endnu dårligt belyst. Hvis det lykkes at dokumentere en væsentlig forbedring af metanfjernelse med kontrolleret ventilation af overdækkede gyllebeholdere, vil det formentlig være en omkostningseffektiv løsning for lagre med eksisterende teltoverdækning, selvom det skal understreges at der kan være behov for modifikation af teltoverdækningen for at begrænse et eksisterende passivt luftskifte.



Figur 6.4 Estimeret andel af gylle i gyllebeholdere med fast overdækning (gengivet efter Mikkelsen & Albrechtsen, 2020).

6.7.2 Relevans og potentiale

Sammenlignet med vurderingen af dette virkemiddel i Olesen et al. (2018) er der sket en afklaring i form af et "proof-of-concept" for en teknisk løsning til dynamisk ventilationskontrol, og der er taget initiativ til afprøvning i fuld skala. Der savnes fortsat viden om forekomst af flydelag i lagre med fast overdækning, og udvikling af metoder til omrøring, import og eksport af gylle til lageret, som ikke destruerer flydelaget.

Tiltaget er ikke relevant for forsuret gylle og afgangset gylle, der er selvstændige virkemidler mod metanemission. Principielt kan virkemidlet anvendes på alle bedrifter med opbevaring af ubehandlet gylle, herunder økologiske brug, hvis teknologiens effektivitet kan dokumenteres under praktiske lagringsforhold. Teknologien forventes, i tilfælde af positiv afprøvning i fuld skala, at kunne kombineres med eksisterende teltoverdækning, eller den kan implementeres sammen med teltoverdækning på lagre, hvor dette endnu ikke er etableret.

6.7.3 Effekt på drivhusgasudledning

Mængden af gylle, som opbevares i lagertanke, varierer i løbet af året, og afhænger af sædskifte. Tilsvarende vil gyllens temperatur variere med lufttemperaturen over døgnet og i løbet af året, ligesom der

også vil være en temperaturgradient med afstanden til gyllens/flydelagets overflade. Tilsammen betyder disse forhold, at der er stor variation i potentialet for metanproduktion i gyllen, og dermed også i betingelserne for metanoxidation i flydelag. Overdækning med ventilationskontrol sigter mod at optimere betingelserne for metanoxidation i dette variable miljø. Pilotskala-forsøg i 2021 fandt, at ventilationskontrollen kunne tilpasse sig metanemissionens døgnvariation, såvel som sæsonvariation. Effektiviteten med hensyn til metanfjernelse voksede hen over sommeren, muligvis som følge af stigende lagringstemperatur og metanproduktion, og vækst i antallet af aktive metanoxiderende bakterier.

Måleresultater vedrørende metanreduktion med dynamisk ventilationskontrol er endnu ikke tilgængelige. I en tidligere vurdering af effekten af overdækning af gyllelagre med flydelag blev potentialet angivet til 40% reduktion (Petersen & Hutchings, 2020); resultaterne med den nye teknologi er konsistente med denne vurdering, og med vurderingen af 25-50% metanreduktion med overdækning fra IPCC (IPCC, 2019). I dette arbejde regner der derfor med en reduktion på 40%.

Reference-situationen i forhold til ammoniakemission er gyllelager med teltoverdækning, og her forventes ingen ændring i emissionen (Olesen et al., 2018). Reference-situationen i forhold til lattergasemission er gyllelager med veludviklet flydelag. Der forventes ingen ændring i potentialet for lattergasemission (IPCC, 2019).

Tabel 6.14 Estimeret metanreduktion i stald, lager og totalt ved udslusning af gylle ved fuld kumme og overdækning med ventileret flydelag i lager. For kvægstalde er medtaget gødning fra stalde med ringkanal eller bagskyl, fastdrænet gulv med skraber, spaltegulv med skraber og fast gulv med 2% hæld og skraber. For svinestalde er medtaget gødning fra stalde hvor rørdslusning kan benyttes. Enheder i pr. ton henviser til pr. ton gylle af dyr eller 1000 tons (kt) per staldtype.

Dyre-og staldtype	Ref.	CH ₄ udledning, kg CH ₄ /ton			Udbredelse, %		Reduktion netto	
		Stald	Lager	Total	2020	Potenti ale	kg CO ₂ e/ ton	kt CO ₂ e/ Staldty pe
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Ja	1,7	0,8	2,5	0	100	9,0	66
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Nej	1,7	0,5	2,2				
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, skraberanlæg	Ja	0,1	0,9	1,1	0	100	10	27
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, skraberanlæg	Nej	0,1	0,5	0,7				
Kvæg, Sengebåse, spalter, skraberanlæg	Ja	0,1	0,9	1,1	0	100	10	35
Kvæg, Sengebåse, spalter, skraberanlæg	Nej	0,1	0,5	0,7				
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, 2% hæld, skrab	Ja	0,1	0,9	1,1	0	100	10	10
Kvæg, Sengebåse, fast gulv, 2% hæld, skrab	Nej	0,1	0,5	0,7				
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Ja	1,9	2,5	4,4	0	100	28	134
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Nej	1,9	1,5	3,4				

Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Ja	1,5	2,6	4,1	0	100	29	111
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Nej	1,5	1,6	3,1				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Ja	1,1	2,8	3,8	0	100	31	33
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Nej	1,1	1,7	2,7				
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Ja	1,9	2,4	4,2	0	100	26	70
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Nej	1,9	1,4	3,3				
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Ja	2,5	2,2	4,6	0	100	24	25
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Nej	2,5	1,3	3,8				
Søer, Farestalde, kassesti, fuldspalte	Ja	2,8	2,1	4,8	0	100	23	5,0
Søer, Farestalde, kassesti, fuldspalte	Nej	2,8	1,2	4,0				
Smågrise, Toklimastald m, delvis spaltegulv	Ja	1,5	2,4	3,8	0	100	26	62
Smågrise, Toklimastald m, delvis spaltegulv	Nej	1,5	1,4	2,9				
Smågrise, Drænet gulv + spalter (50/50)	Ja	2,6	2,0	4,6	0	100	22	12
Smågrise, Drænet gulv + spalter (50/50)	Nej	2,6	1,2	3,8				
Kvægstalde	Ja	0,9	0,9	1,8	0	100	10	145
Kvægstalde	Nej	0,9	0,5	1,5				
Svinestalde	Ja	1,8	2,5	4,2	0	100	27	464
Svinestalde	Nej	1,8	1,5	3,2				

6.7.4 Samspil til andre virkemidler

Overdækning med kontrolleret ventilation er komplementær til andre virkemidler, herunder forsuring i lagertanken (afsnit 6.2) og biogasbehandling før lagring (afsnit 6.5).

6.7.5 Usikkerheder

Der er endnu ikke erfaringer med tætning af eksisterende teltoverdækning med henblik på at kontrollere ventilationen. Ligeledes er der behov for praktiske erfaringer med omrøring, tømning og påfyldning af gylle uden, eller med en begrænset, destruktion af flydelaget. Årsagen hertil er, at flydelagets mikrobiologi udvikler sig langsomt, og metanoxiderende bakterier kræver et delvist udtørret og kvælstoffattigt miljø (Duan et al., 2012; 2017).

Referencer

- Duan, Y.-F., Elsgaard, L., Petersen, S.O. (2012). Inhibition of methane oxidation in slurry surface crust by inorganic nitrogen. J. Environ. Qual. 42, 507-515.
- Duan, Y.-F., Reinsch, S., Ambus, P., Elsgaard, L., Petersen, S.O. (2017). Methanotrophic activity in slurry surface crusts as influenced by CH_4 , O_2 , and inorganic N. Journal of Environmental Quality 46, 767-775.

- IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, Forestry and Other Land Use, vol 4. Intergovernmental Panel on Climate Change, IGES, Hayama, Kanagawa, Japan.
- IPCC (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland.
- Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R. (2020). Forbedring af datagrundlaget for opgørelse af ammoniakemissionen fra landbruget. Notat af 29. januar 2020. DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. 26 pp.
- Olesen, J.E., Petersen, S.O., Lund, P., Jørgensen, U., Kristensen, T., Elsgaard, L., Sørensen, P., Lassen, J. (2018). Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget. DCA rapport, nr. 130, bind 130, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug,
- Petersen, S.O., Amon, B., Gattinger, A. (2005). Methane oxidation in slurry storage surface crusts. J. Environ. Qual. 34: 455-461.
- Petersen, S.O., Dorno, N., Lindholst, S., Feilberg, A., Eriksen, J. (2013). Emissions of CH_4 , N_2O , NH_3 and odorants from pig slurry during winter and summer storage. Nutr. Cycl. Agroecosys. 95:103-113.
- Petersen, S.O., Hutchings, N. (2020). 'Opdatering af klimaeffekter for virkemidler i landbruget bl.a. som følge af nyt kvælstofvirkemiddelkatalog - med tilføjelse', Nr. 2020-0089474, 23 s., aug. 18, 2020.

6.8 Afbrænding og pyrolyse af husdyrgødning (fiberfraktion efter separering) (KVM6.8)

Forfattere: Peter Sørensen og Nicholas J. Hutchings, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Henrik B. Møller, Institut for Bio- og Kemiteknologi

En betydelig del af dette afsnit er kopieret fra "Virkemidler til reduktion af kvælstofudvaskningen" (Eriksen et al., 2020, side 256-269) suppleret med nye informationer. Udnyttelseskravene for husdyrgødning er ændret fra 2020-21 og har betydning for effekten på drivhusgasser, og de nye udnyttelseskrav er anvendt her.

6.8.1 Anvendelse

Dette virkemiddel er defineret som afbrænding eller pyrolyse af fiberfraktion fra separering af biogasgødning eller afbrænding af fast fjerkrægødning. Afbrænding/pyrolyse af husdyrgødning giver muligheder for at reducere kvælstofudvaskningen og fosforoverskuddet i husdyrintensive områder. Det er alene fast husdyrgødning, herunder fiberfraktion efter separering af gylle, der kan komme på tale til afbrænding. Ved afbrænding og pyrolyse tabes størstedelen af gødningens kvælstof til luften, til gengæld giver det mulighed for en energiproduktion. Størstedelen af kvælstoftabet sker som uskadelig frit kvælstof (N_2), der i forvejen udgør den største del af atmosfærens indhold af gasmolekyler. Under afbrændingen sker der dog også en emission af NO_x forbindelser og en betydelig del af svovlindholdet tabes som SO_2 . Samtidigt vil en del af det tabte kvælstof blive erstattet med kunstgødning, hvortil der er knyttet en emission af drivhusgasser ved produktion af gødningen.

Den langsigtede kvælstofudvaskning fra organisk bundet kvælstof i husdyrgødning er større end ved tilførsel af mineralsk kvælstof (Sørensen & Børgesen, 2015), og ved at fjerne det organiske kvælstof kan udvaskningen derved reduceres. En reduktion af nitratudvaskningen har en indirekte effekt på emissionen af lattergas. Med dette virkemiddel afbrændes eller pyrolyseres fast husdyrgødning, der hovedsageligt indeholder organisk bundet kvælstof, og i stedet anvendes mineralsk kvælstof i handelsgødning.

I fremtiden forventes pyrolyse eller termisk forgasning, og dermed produktion af biokul/biochar, at blive mere udbredt end afbrænding af husdyrgødning. Derved kan opnås en binding af stabilt kulstof i jorden. Ved pyrolyse/forgasning fås de samme effekter som ved afbrænding, men samtidigt en øget kulstofbinding i jorden og et lavere energiudbytte.

6.8.2 Relevans og potentiale

Afbrænding og pyrolyse af husdyrgødning kræver godkendte anlæg til forbrændingen. Det vurderes, at det med de nuværende krav til kontrol med emissioner ved afbrænding kun vil være realistisk at gennemføre afbrænding i større centrale anlæg. Det kræver omfattende investeringer at etablere sådanne

anlæg, men i bl.a. Holland og England findes anlæg til afbrænding af fast fjerkrægødning. Der har tidligere været planer om etablering af forbrændingsanlæg i forbindelse med større biogasanlæg i Danmark, og der er i perioder sket afbrænding på større anlæg i Danmark. Fjerkrægødning er mest velegnet til afbrænding pga. et højt tørstofindhold.

De beregnede effekter på nitratudvaskning er bl.a. afhængige af, hvor stor en kvælstof-andel der fjernes med fiberfraktionen og af de gældende udnyttelseskrav til husdyrgødningen. Der er regnet med de nye udnyttelseskrav på 80% for svinegylle, 75% for kvæggylle og 70% for fast fjerkrægødning, gældende fra gødningsåret 2020-21. Ved beregning af effekten af afbrænding af fiberfraktion er der regnet med det gældende udnyttelseskrav for den resterende væskefraktion på 85 %.

I princippet kan stort set al fast husdyrgødning afbrændes, herunder fibre efter gylleseparation. I praksis anvendes det stort set ikke, da økonomien ikke er rentabel i forhold til alternative muligheder. Med de nuværende rammevilkår forventes afbrænding af husdyrgødning ikke at blive udbredt.

Den nuværende lovgivning på området favoriserer afbrænding af fiberfraktionen efter bioforgasning, idet der skal betales affaldsafgift ved afbrænding af ikke-forgassede fibre.

I tabel 6.15 er vist de forudsætninger, der er brugt ved beregningen af effekten ved forbrænding og pyrolyse af fiberfraktioner, der er baseret på ekspertvurderinger lavet af Henrik B. Møller og Peter Sørensen, Aarhus Universitet. Forudsætningerne for beregning af nitratudvaskning fra mineralsk N og organisk N i fiberfraktion er beskrevet i Eriksen et al. (2020).

Tabel 6.15 Forudsætninger brugt ved beregning af udvaskningseffekt af separering af bio-afgasset svine- og kvæggylle og afbrænding af fiberfraktion, beregnet som % af total N i den ubehandlede gylle med en 3-årig horisont. Forudsætningerne er baseret på ekspertvurderinger (Henrik B. Møller og Peter Sørensen, Aarhus Universitet).

	Svinegylle afgasset	Kvæggylle afgasset
Total kvælstof i fiberfraktion	16,3	25
Organisk kvælstof i fiberfraktion	7,5	18
Ammonium-N i fiber	8,75	7
Udvaskning fra fiberfraktion	3,8	6,5
Udnyttelseskrav af væskefraktion (85 % af væskefraktion)	71,2	63,7
Udnyttelseskrav før separation	80	75
Øget forbrug af handelsgødning ved afbrænding	8,8	11,3
Øget udvaskning fra handelsgødning	1,6	2,0
Nettoudvaskning fra fiberfraktion ¹⁾	2,2	4,5

¹⁾ Beregnet som differens mellem udvaskning fra fiberfraktion – udvaskning fra substituerende handelsgødning.

Effekten af afbrænding/pyrolyse af fiberfraktion på udvaskningen, der opnås inden for en 3-årig tidshorisont, er beregnet til 2,2 % af total N i ubehandlet gødning for afgasset svinegylle og 4,5 % af total N for afgasset kvæggylle. Der vil være en større effekt på længere sigt.

I tabel 6.16 er vist forudsætninger anvendt for beregning af effekter på N udvaskning af afbrænding af fast fjerkrægødning og fjerkrædybstrøelse. Beregningen af nitratudvaskning er nærmere beskrevet i Eriksen et al. 2020. Det antages at der ved afbrænding af 100 kg N i fjerkrægødning erstattes med 70 kg N i handelsgødning, svarende til udnyttelseskravet.

Tabel 6.16 Forudsætninger og beregning af effekt af afbrænding af fjerkrædybstrøelse på kvælstofudvaskning på 3-årig horisont sammenlignet med tilsvarende tilførsel af handelsgødning (ved 70 % udnyttelseskrav) angivet som % af total N i ubehandlet husdyrgødning. Forudsætninger er baseret på ekspertvurdering (Peter Sørensen, Aarhus Universitet). Det antages at 100 kg N i afbrændt fjerkrægødning erstattes med 70 kg N i handelsgødning.

	Dybstrøelse	Handelsgødning
Mineralsk N + N mineraliseret i 1. vækstsæson, (18 % udvaskes)	60	70
Organisk kvælstof, 29 % udvaskes	30	0
Ammoniaktab	10	0
Total N i gødning	100	70
Nitrat udvaskning	19,5	12,6
Ekstra udvaskning fra dybstrøelse	6,9	

Afbrænding af fjerkrædybstrøelse forventes at reducere kvælstofudvaskningen med 6,9 kg N/100 kg total N i gødningen inden for en 3-årig horisont (tabel 6.16).

I tabel 6.17 findes beregninger af de potentielle effekter på kvælstofudvaskning ved afbrænding af fiberfraktion, hvis hele produktionen af svine- og kvæggylle separeres og afbrændes efter bioforgasning, og tilsvarende hvis al den producerede fjerkrædybstrøelse afbrændes.

Gylle fra kvæg og svin indberettes i gødningsregnskaber både som blandet gylle, kvæggylle, svinegylle og afgasset biomasse. Fordelingen mellem svinegylle og kvæggylle i tabel 6.17 er estimeret ud fra fordelingen mellem kvæggødning og svinegødning i gødningsindberetninger og den samlede mængde kvælstof i gylle.

Tabel 6.17 Årlig produktion af kvælstof i gylle og fast fjerkrægødning/fjerkrædybstrøelse i 2016-17 og potentielle effekter på kvælstofudvaskningen over en 3-årig tidshorisont hvis hele produktionen af gylle afgasses, separeres og fiberfraktion afbrændes og al fast fjerkrægødning afbrændes. Mængden af fjerkrædybstrøelse er estimeret med antagelse om, at fjerkrægødning, der ikke er indberettet som fjerkrægylle i gødningsregnskaber, findes som fast fjerkrægødning/dybstrøelse (AU udtræk fra gødningsregnskaber, 2019).

Gødningstype	Mængde (tons N/år) ¹⁾	Reduktion i N udvaskning ved afbrænding (% af total N) ²⁾	Samlet reduktion i N udvaskning ved behandling af al gødning (tons N/år)
Svinegylle	75.000	2,2	1.650
Kvæggylle	99.000	4,5	4.455
Fast fjerkrægødning/fjerkrædybstrøelse	7.800	6,9	540

1. Kvælstof i ubehandlet gylle og dybstrøelse
2. Relateret til kvælstof i ubehandlet gylle

6.8.3 Effekt på drivhusgasudledning

Ud over en reduktion i kvælstofudvaskning, vil afbrænding af fiberfraktion reducere kvælstof og kulstoftilførsel til jorden og reducere ammoniakemission, men øge kvælstofinput i handelsgødning (tabel 6.18) og emission af NO_x. Ved pyrolyse øges dog kulstofbindingen i jorden (Elsgaard et al. 2022). Reduktionen i kulstofinput ved afbrænding beregnes her på baggrund af C:N forholdet i den pågældende husdyrgødning. Det er antaget, at organisk kvælstof i fiberfraktionen fra kvæg- og svinegylle udgør henholdsvis 76 % og 46 % af total-kvælstof. Kulstofindholdet i fiberfraktionen beregnes fra et estimeret C/N forhold på 11 for både svine- og kvæggylle, baseret på analyser af afgasset fiberfraktion fra dekantercentrifuge med forskellig oprindelse (Møller et al. 2002; Petersen & Sørensen, 2009). For fast fjerkrægødning/fjerkrædybstrøelse er et C:N forhold på 7,4 (Kristensen, 2006) benyttet i beregningerne. Reduktionen i ammoniakemission beregnes på baggrund af en separeringsprocent for kvælstof på 20 % (andel af gylle-kvælstof som bliver i den faste fraktion) (Møller et al., 2002) og en ammoniakemissionsfaktor for udbragt husdyrgødning på 9,1 %, som er faktoren brugt i afrapportering under UNFCCC (DCE, 2020). Det antages, at en afbrænding af fiberfraktion ikke giver anledning til en ændring i ammoniak- og lattergasemission fra lager. I praksis, er et fald i ammoniak- og lattergasemission muligt, hvis fiberfraktionen bliver afbrændt umiddelbart efter separation eller/og de separerede produkter bliver opbevaret uden ilttilgang. Alternativt, er højere emissioner fra lager muligt, hvis opbevaringen foregår under forhold med høj lufttilgang.

Tabel 6.18 Oversigt over ændringer i N tilførsler og N-udvaskning ved afbrænding eller pyrolyse af afgasset fiber fra gylle og afbrænding af fast fjerkrægødning.

	Gødningstype		
	Svinegylle	Kvæggylle	Fjerkrædybstrøelse
	(% af total N i ubehandlet gødning)		
N input i handelsgødning	8,8	11,3	70
N input i husdyrgødning	-16	-25	-100
N-udvaskning	-2,2	-4,5	-6,9

Beregningsgrundlaget er:

Ændring i direkte lattergasemission = (ændring i husdyrgødning kvælstofinput - øget handelsgødning kvælstofinput) * direkte lattergasemissionsfaktor (N₂O-N)

Ændring i indirekte lattergasemission = (ændring i NH₃ emission fra husdyrgødning - ændring i NH₃ emission fra handelsgødning) * direkte lattergasemissionsfaktor (N₂O-N) + reduktion i kvælstofudvaskning * lattergasemissionsfaktor (N₂O-N) for udvaskning

En oversigt over ændringer i kvælstof- og kulstofinput og emissioner er vist i tabel 6.19. Ændringen i kulstoflagring i jorden er beregnet med en antaget andel langtidslagring (20 år) af tilført kulstof til jorden på 12 % (Thomsen et al., 2013; Maillard & Angers, 2014). En oversigt over emissioner i CO₂-ækvivalenter er vist i tabel 6.20.

Tabel 6.19 Antagne ændringer i kvælstof- og kulstofinput og emissioner ved afbrænding af fiberfraktion af al svine- og kvæggylle i Danmark (efter afgasning), samt afbrænding af al fast fjerkrægødning. Der er her antaget en fuldstændig forbrænding og ikke produktion af biochar ved termisk forgasning. Der er ikke taget højde for øget behov for transport i forbindelse med afbrænding.

Gødningstype	Ændring i husdyrgødning kvælstof input	Øget handelsgødning kvælstof input	Ændring i NH ₃ emission fra husdyrgødning	Ændring i NH ₃ emission fra handelsgødning	Kulstof afbrændt	Ændring i kulstoflagring i jorden
	(tons N/år)				(tons C/år)	
Svinegylle	-12.000	6.600	-1.092	264	132.000	-15.840
Kvæggylle	-24.750	11.187	-2.252	447	272.250	-32.670
Fast fjerkrægødning/ fjerkrædybstrøelse	-7.800	5.460	-780	218	57.720	-6.926
Total	-44.550	23.247	-4.124	930	461.970	-55.436

Tabel 6.20 Drivhusgas opgørelse ved afbrænding af fiberfraktion af al svine- og kvæggylle i Danmark (efter afgangning), samt afbrænding af al fast fjerkrægødning.

Gødningstype	Reduktion i indirekte N ₂ O fra N-udvaskning	Reduktion i direkte N ₂ O emission	Reduktion i indirekte N ₂ O fra NH ₃ emission	Effekt af ændret kulstoflagring i jorden	Total reduktion
	(t CO ₂ ækv/år)				
Svinegylle	3.554	25.287	3.877	-58.080	-25.361
Kvæggylle	9.597	63.514	8.451	-119.790	-38.228
Fast fjerkrægødning/ fjerkrædybstrøelse	1.159	10.958	2.630	-25.397	-10.650
Total	14.310	99.759	14.959	-203.267	-74.239

Energiproduktionen, der kan erstatte fossile energikilder, er beregnet som fiberens effektive brændværdi, fratrullet energiforbruget til separering (Eriksen et al., 2014). Energiforbruget til separering beregnes på baggrund af mængden af behandlet gylle og energiforbruget pr. tons behandlet gylle. Mængden af behandlet gylle er beregnet fra den total-N koncentration i svinegylle og kvæggylle, som er antaget til at være henholdsvis cirka 4,2 og 3,63 kg N/tons (Kristensen, 2009). Energiforbruget til separation er i FarmTests med repræsentative teknologier (Pedersen, 2009; Frandsen, 2010) målt til 1,3 kWh/ton for svinegylle og 2,0 kWh ton⁻¹ for kvæggylle, svarende til 4,7 og 7,2 MJ/ton behandlet. Der er taget udgangspunkt i separering med dekantercentrifuge.

Den effektive brændværdi (netto brændværdi) er sat til 8,8 MJ/kg tørstof baseret på målinger af brændværdien ved samforbrænding af fugtig afgasset fiberfraktion sammen med halm (Kristensen et al., 2009). I forsøgene er anvendt en fiberfraktion med 30-35% tørstof. Omregningen fra kulstof til tørstof er baseret på værdien 37,4 % C i tørstof målt for afgasset dekanter-centrifugeret fiber (Petersen & Sørensen, 2008). Det betyder en netto brændværdi på 23,5 GJ/ton C. Det er usikkert hvad det betyder for drivhusgasbalancen hvis fiberfraktion tørres før afbrænding.

Tabel 6.21 Opgørelse af energiproduktion ved afbrænding af fiberfraktion af al svine- og kvæggylle i Danmark (efter afgangning), samt afbrænding af al fast fjerkrægødning.

Gødningstype	Friskvægt, før separering	Energi til separering	Nettoenergiproduktion ved afbrænding	Nettoenergi *)	
	(tons/år)	(GJ/år)	(GJ/år)	(GJ/år)	(t CO ₂ -ækv./år)
Svinegylle	17.857.143	83.929	3.103.720	3.019.791	172.128
Kvæggylle	27.272.727	196.364	6.401.422	6.205.058	353.688
Fast fjerkrægødning/ fjerkrædybstrøelse	296.578	0	1.357.172	1.357.172	77.359
Total	45.426.448	280.292	10.862.314	10.582.021	603.175

*) Nettoenergi = nettoenergi ved afbrænding – energi til separering

Der er ikke fundet målinger af effektiv brændværdi af fjerkrægødning og der er anvendt samme effektive brændværdi på 23,5 GJ/tons C, som for afgasset fiber. Mængden af kulstof afbrændt er estimeret i tabel 6.19. I tabel 6.21 er produktionen af nettoenergi beregnet og værdien af at substituere naturgas sat til 57 kg CO₂-ækv/GJ (Iversen et al., 2005).

I tabel 6.22 er drivhusgaseffekten opgjort pr. tons kvælstof i behandlet gødning, og der er både lavet beregninger for afbrænding og pyrolyse af afgasset fiber fra gylle. Ved pyrolyse opnås en øget kulstofbinding i jorden, men til gengæld en lavere energiproduktion. Ved pyrolyse er antaget en øget kulstofbinding på netto 0,29 tons CO₂-ækv./tons tørstof i fiberfraktion fra både kvæg og svin (Elsgaard et al. 2022). Elsgaard et al. (2022) angiver et energiforbrug på 5,1 GJ/tons fiber tørstof til en nødvendig tørring til 90% tørstof og 0,9 GJ/tons tørstof til eventuel pelletering og energiudbyttet i pyrolyse-olie og gas antages til 7,3 GJ/ton tørstof i fiber. Det er her indregnet at 80% af energiforbruget ved tørring kan genindvindes (Henrik Møller, AU, Personlig kommunikation), og der er ikke medregnet energiforbrug til eventuel pelletering. Dermed fås et nettoenergiudbytte på 6,3 GJ/tons tørstof i fiber ved pyrolyse. Ved omregning til effekt per tons behandlet N i gylle er antaget at fiberfraktioner fra dekantercentrifuge indeholder 0,027 tons tørstof/kg N (Møller et al., 2002). Energiudbyttet ved afbrænding af fiberfraktion er beregnet uden at tage hensyn til genvinding af energi ved tørring, idet vi kun har fundet energidata fra afbrænding af ikke-tørret fiberfraktion. For alle tre gødningstyper ses samlet set en reduktion i drivhusgasemissionen. Reduktionen pr. tons behandlet kvælstof (kvælstofmængde i gylle til biogasanlæg) er opgjort til 1,9 tons CO₂-ækv. for svinegylle ved afbrænding, 4,1 tons CO₂-ækv. for kvæggylle og 0,9 tons CO₂-ækv. for fjerkrægødning. Ved pyrolyse fås en større reduktion end ved afbrænding med en reduktion på 3,3 tons CO₂-ækv. for svinegylle og 5,5 tons CO₂-ækv. for kvæggylle. Det skal nævnes at energiudbyttet ved afbrænding typisk vil være i form af varme, mens der ved pyrolyse produceres olie og gas, der potentielt kan have en større værdi. Effekten per tons behandlet gødning kan omregnes fra **Tabel 6.22** ved at antage 4,2 kg N/ton i svinegylle, 3,63 kg N/ton i kvæggylle og 26,3 kg N/ton i fast fjerkrægødning.

I tabel 6.22 er ikke indregnet effekt af emission fra produktionen af den øgede mængde handelsgødning der forventes brugt ved afbrænding/pyrolyse, idet denne emission ikke sker i Danmark. Ved en emissionsfaktor ved produktion af N gødning på 5,6 kg CO₂ kg⁻¹ N (Chojnacka et al., 2019) fås per tons N i behandlet gødning en øget emission ved produktion af handelsgødning på (88 kg N/tons N * 5,6 kg CO₂ kg⁻¹ N) = 0,5 tons CO₂-ækv./tons behandlet N for svinegylle, (113 kg N/tons N * 5,6 kg CO₂ kg⁻¹ N) = 0,6 tons CO₂-ækv./tons behandlet N for kvæggylle og (700 kg N/tons N * 5,6 kg CO₂ kg⁻¹ N) = 3,9 tons CO₂-ækv./tons behandlet N for fjerkrægødning. Det betyder således for fjerkrægødning, at en lille reduktion i drivhusgasudledningen ændres til en øget emission, hvis emissionen fra produceret handelsgødning inkluderes. For kvæg- og svinegylle beregnes stadig en reduktion i emissionen, hvis emissionen fra ekstra produceret handelsgødning medregnes.

Tabel 6.22 Drivhusgaseffekter ved afbrænding og pyrolyse af fiberfraktion af svine- og kvæggylle (efter afgasning), samt afbrænding af fast fjerkrægødning opgjort per tons N i ubehandlet gødning (N i gylle før separering). Negative tal indikerer reduceret drivhusgas emission. Energiproduktionen antages at substituere fossil energi. Effekten af øget produktion af handelsgødning ved afbrænding og pyrolyse er ikke inkluderet.

Gødningstype	Indirekte N ₂ O fra N udvaskning	Direkte N ₂ O emission	Indirekte N ₂ O fra NH ₃ emission	Ændring i kulstoflagring i jorden	Samlet mark effekt	Energi-produktion	Samlet effekt*
	(tons CO ₂ -ækv./tons behandlet N)						
Svinegylle, afbrænding	-0,04	-0,30	-0,05	0,77	0,39	-2,3	-1,9
Svinegylle, pyrolyse	-0,04	-0,30	-0,05	-1,29	-1,68	-1,6	-3,3
Kvæggylle, afbrænding	-0,11	-0,75	-0,10	1,60	0,63	-4,7	-4,1
Kvæggylle, pyrolyse	-0,11	-0,75	-0,10	-2,02	-2,98	-2,5	-5,5
Fast fjerkrægødning/ fjerkrædybstrøelse, afbrænding	-0,01	-0,13	-0,03	0,34	0,16	-1,0	-0,9

* Der er pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord (LULUCF) skal beregnes med henblik på at indregne det i landbrugets udledninger og i hvilken udstrækning det vil blive muligt. Der tages derfor forbehold mht. at LULUCF bidraget kan adderes direkte til de øvrige poster – som det er gjort her – for at beregne netto klimaeffekten af virkemidlerne.

6.8.4 Samspil til andre virkemidler

Virkemidlet spiller blandt andet sammen med efterafgrøder, idet effekten af afbrænding bl.a. skyldes en reduktion i mineraliseret N om efteråret, der i højere grad er udsat for udvaskning. Ved etablering af efterafgrøder reduceres især udvaskning fra N mineraliseret om efteråret og dermed vil der være et samspil. Endvidere vil der være et samspil til virkemiddel med ændrede udnyttelseskrav for husdyrgødning.

6.8.5 Usikkerheder

Effekten af afbrænding/pyrolyse beregnes som en sum af en række både positive og negative effekter. Det betyder at den relative usikkerhed er stor, idet der er betydelig usikkerhed på de enkelte komponenter. Den samlede usikkerhed vurderes til højere end +/- 100 % af de estimerede værdier.

Vidensbehov

Der er bl.a. behov for bedre viden omkring netto-energiproduktion ved afbrænding af forskellige typer husdyrgødning under praktiske forhold. Energiproduktionen har betydelig indflydelse på den beregnede drivhusgaseffekt.

Referencer

- Chojnacka, K., Kowalski, Z., Kulczycka, J., Dmytryk, A., Górecki, H., Ligas, B., Gramza, M. (2019). Carbon footprint of fertilizer technologies. *Environmental Management* 231, 962-967.
- DCE (2020). National Inventory Submissions 2020; Denmark. <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2020>
- Elsgaard, L., Adamsen, A. P. S., Møller, H. B., Winding, A., Jørgensen, U., Mortensen, E. Ø., Arthur, E., Abalos, D., Andersen, M. N., Thers, H., Sørensen, P., Dilnessa, A. A., & Elofsson, K. (2022). Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture: - Biochar production, use and effect in soil agroecosystems (part 1) and Economic assessment of biochar production and use (part 2). DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport Nr. 208 <https://dcapub.au.dk/djfpublikation/djfpdf/DCArapport208.pdf>
- Eriksen J. et al (2014). Virkemidler til realisering af 2. generations vandplaner og målrettet arealregulering. DCA Rapport nr 52.
- Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H., Baattrup-Pedersen, A., Strandberg, B., Christensen, B.T., Boelt, B., Iversen, B.V., Kronvang, B., Børgesen, C. D., Abalos Rodriguez, D., Zak, D.H., Hansen, E.M., Blicher-Mathiesen, G., Rubæk, G.H., Ørum, J.E., Rasmussen, J., ... Jørgensen, U. (2020). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet - DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport Nr. 174 <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>
- Frandsen, T.Q. (2010). Separering af svinegylle med SepKon SK-4. Videncentret for Landbrug. Farm-Test nr. 45 (Bygninger), 17 pp.
- Iversen, P.A. et al. (2005). Rapport fra arbejdsgruppen om afbrænding af fraktioner af husdyrgødning. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, 125 pp.
- Kristensen, E.F., Kristensen, J.K., Sørensen, P., Hansen, M.N. (2009). Forbrænding af separeret husdyrgødning i mindre fyringsanlæg. Grøn Viden DJF Husdyrbrug nr. 50. 8pp.
- Kristensen, I.S. (2006). Næringsstofindhold i 650 husdyrgødningsprøver fra Landsforsøgene. Ikke-publiseret data analyse. Danmarks Jordbrugsforskning. Okt. 2006.
- Maillard, E., Angers, D.A., (2014). Animal manure application and soil organic carbon stocks: a meta-analysis. *Glob Chang Biol* 20, 666-679.
- Møller, H.B., Sommer, S.G., Ahring, B.K. (2002). Separation efficiency and particle size distribution in relation to manure type and storage conditions. *Bioresource Technology* 85, 189-196.
- Pedersen, T.R. (2009). Separering af kvæggylle med Kemira 812P. FarmTest nr. 40 (Bygninger), 24 pp.

- Petersen, J., Sørensen, P. (2008). Loss of nitrogen and carbon during storage of the fibrous fraction of separated pig slurry and influence on nitrogen availability. *Journal of Agricultural Science* 146, 403-413.
- Sørensen, P., Børgesen, C.D. (2015). Kvælstofudvaskning og gødningsvirkning ved anvendelse af afgasset biomasse. DCA rapport nr 65. 46 s.
- Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Møller, H.B., Sørensen, P., Christensen, B.T. (2013). Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces. *Soil Biology & Biochemistry* 58, 82-87.

6.9 Hyppig udslusning af gylle fra stalde og bioforgasning (KVM6.9)

Forfattere: Frederik Rask Dalby og Anders Peter Adamsen, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Peter Kai, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Bioforgasning er oplagt at kombinere med hyppig udslusning da hyppigt udsluset gylle indeholder en højere mængde omsætteligt organisk materiale (VS_d), som omsættes i biogasanlægget og øger metanudbyttet, hvorved metanudledningen fra lagring af gylle i stald og gyllebeholder samtidigt reduceres. Feng et al. (2022) undersøgte effekten af hyppigt udsluset svinegylle på metanudledning umiddelbart efter udslusning og fandt et langt mindre metantab i stalden fra hyppigt udsluset gylle. Dette kan skyldes at inokulum ikke når at tilpasse sig i gyllen og dermed ikke udleder metan umiddelbart efter udslusning. At gyllen ikke udleder store mængder metan efter udslusning er vigtigt, da gyllen kortvarigt opbevares i fortanke før det afhentes til biogasanlægget. Det vigtigt at logistikken er nøje planlagt mellem gård og biogasanlæg, da det organiske materiale ellers delvist nedbrydes i fortanken, før det udnyttes i biogasanlægget.

6.9.1 Anvendelse

Der henvises til afsnittet om bioforgasning med standard udslusning af svine- og kvæggylle.

6.9.2 Relevans og potentiale

Kombinationen af hyppig udslusning og bioforgasning er yderst relevant og strategisk smart i forhold til at øge energiudbyttet fra gylle og samtidig reducere metanudledningen fra stalde og gyllebeholdere. Dette kræver dog udbygning af biogassektoren, samt stiller højere krav til logistikken end bioforgasning af standard udsluset gylle. Der henvises til afsnittene for mere information om hyppig udslusning og bioforgasning som separater klimavirkemidler.

6.9.3 Effekt på drivhusgasudledning

Da en mindre del af det let omsættelige organiske materiale bliver omsat i stalde med hyppig udslusning, vil den relative andel af organisk materiale som omsættes i biogasanlægget højst sandsynligt stige. Omsætning af organisk materiale i biogasanlægget reducerer mængden af organisk materiale, som er tilgængeligt for metanogener (mikroorganismer som danner metan) ude i efterlageret til biogasanlægget. Adamsen et al. (2021) modellerede effekten af bioforgasning af svinegylle. Det samme princip benyttes i nærværende sektion for både svine- og kvæggylle. Det antages at gyllen i gennemsnit opbevares i en fortank i 2 dage, før det afhentes til biogasanlægget. Omsætningen af VS_{tot} i biogasanlægget omregnes fra den specifikke metanproduktion i fuldskala biogas reaktorer (Møller et al., 2022) og sættes til 73% for svinegylle og 52% for kvæggylle. Fortrængning af naturgas-metan med biogas-metan regnes som tidligere beskrevet. Samlet reduktionseffekt er angivet i tabel 6.23.

Tabel 6.23 Estimeret metanreduktion i stald, lager og totalt ved hyppig udslusning af gylle i stalden og bioforgasning før lageret. Gylle opbevares 2 dage i fortanke før bioforgasning. For kvægstalde er medtaget gødning fra stalde med ringkanal eller bagskyl. For svinestalde er medtaget gødning fra stalde hvor hyppig udslusning kan praktiseres. Kolonnen "Fortrængning" viser emissioner ved anvendelse af biogas til erstatning af naturgas. Enheden for CH₄ per ton er CH₄ per ton gylle af dyr. De sidste to kolonner viser reduktion i CO₂-ækv. (CO₂e per ton gylle af dyr og i 1000 tons (kt) per stalddtype.

Dyre-og stalddtype	Ref.	CH ₄ udledning, kg CH ₄ /ton			Fortrængning, kg CO ₂ /ton	Udbredelse, %		Reduktion netto	
		Stald	Lager	Total		2020	Potentiale	kg CO ₂ e/ton	kt CO ₂ e/Stalddtype
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Ja	1,7	0,8	2,5	0	0	100	95	697
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Nej	0,2	0,3	0,6	40				
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Ja	1,9	2,5	4,4	0	0	100	131	628
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Nej	1,0	0,1	1,1	39				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Ja	1,5	2,6	4,1	0	0	100	126	482
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Nej	0,9	0,1	1,0	40				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Ja	1,1	2,8	3,8	0	0	100	120	126
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Nej	0,8	0,1	1	40				
Søer, Drægtighedsstalde, løs + individuel, delvis spalte	Ja	1,9	2,4	4,2	0	7	100	126	315
Søer, Drægtighedsstalde, løs + individuel, delvis spalte	Nej	1,0	0,1	1,1	37				
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Ja	2,5	2,2	4,6	0	0	100	132	138
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Nej	1,1	0,1	1,2	37				
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Ja	1,5	2,4	3,8	0	0	100	116	278
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Nej	0,8	0,1	1,0	36				
Kvægstalde	Ja	1,7	0,8	2,5	0	0	100	95	697
Kvægstalde	Nej	0,2	0,3	0,6	40				
Svinestalde	Ja	1,7	2,5	4,2	0	1	100	126	1970
Svinestalde	Nej	0,9	0,1	1,1	38				

6.9.4 Samspil til andre virkemidler

Lagervirkemidler (afbrænding af metan, lav-dosis forsuring, ventileret flydelag) vil have en yderligere, men dog begrænset effekt på den afgassede gylle. Den begrænsede effekt af yderligere lagervirkemidler skyldes, at det meste af det omsættelige organiske materiale allerede er omsat i biogasanlægget. Dermed er potentialet for metanudledning i forvejen lavt fra den afgassede gylle.

6.9.5 Usikkerheder

Der er ikke yderligere usikkerheder i forhold til de usikkerheder, som allerede er beskrevet i afsnit omkring hyppig udslusning og bioforgasning.

Referencer

- Feng, L., Guldberg, L. B., Hansen, M. J., Ma, C., Ohrt, R. V. & Møller, H. B. (2022). Impact of slurry removal frequency on CH₄ emission and subsequent biogas production; a one-year case study. *Waste Management*, 149, 199–206.
- Adamsen, A.P S., Hansen, M.J., Møller, H.B., (2021). Effekt af hyppig udslusning af gylle på metanproduktion, Notat fra DCA Nr. 2020-0166155, 9 s., jan. 12, 2021.
- Møller, H.B., Sørensen, P., Olesen, J.E., Petersen, S.O., Nyord, T., Sommer, S.G. (2022). Agricultural Biogas Production—Climate and Environmental Impacts. *Sustainability* (Switzerland), 14(3), [1849]. <https://doi.org/10.3390/su14031849>

6.10 Hyppig udslusning af gylle fra stalde og overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (KVM6.10)

Forfattere: Frederik Rask Dalby og Anders Peter Adamsen, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Peter Kai, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Dette er en kombinationsteknologi, hvor hyppig udslusning fra stalde kombineres med overdækning og gylletanke med ventileret flydelag. Hyppig udslusning formindsker emission af metan fra stalden, men udleder mere organisk materiale til gylletanke, hvor det også kan omsættes til metan, men dog med en lavere produktionsrate på grund af en lavere temperatur i gylle. Overdækning af gylletanke med ventileret flydelag reducerer udledningen af metan dannet i gyllen under lagring i gylletanke.

6.10.1 Anvendelse

Kan anvendes på alle stalde med mulighed for hyppig udslusning og med overdækkede gylletanke.

6.10.2 Relevans og potentiale

Teknologikombinationen er relevant for alle stalde hvor hyppig udslusning kan praktiseres. Dog er der ikke regnet på kvægstalde hvor hyppig udslusning allerede praktiseres, f.eks. kvægstalde med fast gulv og skraber. Se mere information om de to virkemidler i afsnit 6.1 og 6.7.

6.10.3 Effekt på drivhusgasudledning

Reference er stalde uden hyppig udslusning og uden gylletanke med overdækning og ventileret flydelag. Reduktionseffekter er angivet i tabel 6.24.

Tabel 6.24 Estimeret metanreduktion i stald, lager og totalt ved hyppig udslusning af gylle i stalden og overdækning med ventileret flydelag i lageret. For kvægstalde er medtaget gødning fra stalde med ringkanal eller bagskyl. For svinestalde er medtaget gødning fra stalde hvor hyppig udslusning kan praktiseres. Enheden for kg CH₄ per ton er kg CH₄ per ton gylle af dyr. De sidste to kolonner viser reduktion i CO₂-ækv. (CO₂e per ton gylle af dyr og i 1000 tons (kt) per staldtype.

Dyre- og staldtype	Ref.	CH ₄ -udledning, kg CH ₄ / ton			Udbredelse, %		Reduktion netto	
		Stald	Lager	Total	2020	Potentiale	kg CO ₂ e/ ton	kt CO ₂ e/Stald-type
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Ja	1,7	0,8	2,5	0	100	51	374
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Nej	0,1	0,5	0,7				
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter	Ja	1,9	2,5	4,4	0	100	54	259

(33/67)								
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Nej	0,8	1,7	2,5				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Ja	1,5	2,6	4,1	0	100	47	180
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Nej	0,7	1,7	2,4				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Ja	1,1	2,8	3,8	0	100	41	43
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Nej	0,6	1,7	2,4				
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Ja	1,9	2,4	4,2	0	100	52	140
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Nej	0,7	1,6	2,4				
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Ja	2,5	2,2	4,6	0	100	59	62
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Nej	0,9	1,6	2,5				
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Ja	1,5	2,4	3,8	0	100	45	108
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Nej	0,6	1,6	2,2				
Kvægstalde	Ja	1,7	0,8	2,5	0	100	51	374
Kvægstalde	Nej	0,1	0,5	0,7				
Svinestalde	Ja	1,7	2,5	4,2	0	100	50	790
Svinestalde	Nej	0,7	1,7	2,4				

6.10.4 Samspil til andre virkemidler

Overdækning med kontrolleret ventilation er komplementær til andre virkemidler, herunder lav-dosis forsuring i lagertanken (afsnit 6.4) og biogasbehandling før lagring (afsnit 6.5).

6.10.5 Usikkerheder

Der er endnu ikke erfaringer med tætning af eksisterende teltoverdækning med henblik på at kontrollere ventilationen. Ligeledes er der behov for praktiske erfaringer med omrøring, tømning og påfyldning af gylle uden, eller med en begrænset, destruktion af flydelaget. Årsagen hertil er, at flydelagets mikrobiologi udvikler sig langsomt, og metanoxiderende bakterier kræver et delvist udtørret og kvælstoffattigt miljø (Duan et al., 2012; 2017).

Referencer

Duan, Y.-F., Elsgaard, L., Petersen, S.O. (2012). Inhibition of methane oxidation in slurry surface crust by inorganic nitrogen. J. Environ. Qual. 42, 507-515.

- Duan, Y.-F., Reinsch, S., Ambus, P., Elsgaard, L., Petersen, S.O. (2017). Methanotrophic activity in slurry surface crusts as influenced by CH_4 , O_2 , and inorganic N. *Journal of Environmental Quality* 46, 767–775.
- IPCC (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Agriculture, Forestry and Other Land Use, vol 4. Intergovernmental Panel on Climate Change, IGES, Hayama, Kanagawa, Japan.
- IPCC (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S. (eds). Published: IPCC, Switzerland.
- Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R. (2020). Forbedring af datagrundlaget for opgørelse af ammoniakemissionen fra landbruget. Notat af 29. januar 2020. DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. 26 pp.
- Olesen, J.E., Petersen, S.O., Lund, P., Jørgensen, U., Kristensen, T., Elsgaard, L., Sørensen, P., Lassen, J. (2018). Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget. DCA rapport, nr. 130, bind 130, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug,
- Petersen, S.O., Amon, B., Gattinger, A. (2005). Methane oxidation in slurry storage surface crusts. *J. Environ. Qual.* 34: 455-461.
- Petersen, S.O., Dorno, N., Lindholst, S., Feilberg, A., Eriksen, J. (2013). Emissions of CH_4 , N_2O , NH_3 and odorants from pig slurry during winter and summer storage. *Nutr. Cycl. Agroecosys.* 95:103-113.
- Petersen, S.O., Hutchings, N. (2020). 'Opdatering af klimaeffekter for virkemidler i landbruget bl.a. som følge af nyt kvælstofvirkemiddelkatalog - med tilføjelse', Nr. 2020-0089474, 23 s., aug. 18, 2020.

6.11 Hyppig udslusning af gylle fra stalde og opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (KVM6.11)

Forfattere: Frederik Rask Dalby og Anders Peter Adamsen, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Peter Kai, Institut for Bio- og Kemiteknologi

6.11.1 Anvendelse

Der henvises til afsnit om hyppig udslusning (6.1) og opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (6.6).

6.11.2 Relevans og potentiale

Relevans og potentiale er beskrevet i tidligere afsnit for virkemidlerne er beskrevet i 6.1 og 6.6

6.11.3 Effekt på drivhusgasudledning

Ved kombination af hyppig udslusning og efterfølgende opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding opnås høje reduktionspotentialer. For lagerdelen regnes med 64% reduktion i forhold til referencesituationen. Disse er angivet i tabel 6.25.

Tabel 6.25 Estimeret metanreduktion i stald, lager og totalt ved hyppig udslusning af gylle i stalden og afbrænding af metan i lageret. For kvægstalde er medtaget gødning fra stalde med ringkanal eller bagskyl. For svinestalde er medtaget gødning fra stalde hvor hyppig udslusning kan praktiseres. Enheden for CH₄ per ton er CH₄ per ton gylle af dyr. De sidste to kolonner viser reduktion i CO₂-ækv. (CO₂e per ton gylle af dyr og i 1000 tons (kt) per staldtype.

Dyre- og staldtype	Ref.	CH ₄ udledning kg CH ₄ / ton			Udbredelse, %		Reduktion netto	
		Stald	Lager	Total	2020	Potentiale	kg CO ₂ e/ ton	kt CO ₂ e/ Staldtype
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Ja	1,7	0,8	2,5	0	100	57	418
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Nej	0,1	0,3	0,5				
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Ja	1,9	2,5	4,4	0	100	73	350
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Nej	0,8	1,0	1,8				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Ja	1,5	2,6	4,1	0	100	67	256
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Nej	0,7	1,0	1,7				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Ja	1,1	2,8	3,8	0	100	61	64
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Nej	0,6	1,0	1,7				
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Ja	1,9	2,4	4,2	0	100	70	188
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Nej	0,7	1,0	1,7				
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Ja	2,5	2,2	4,6	0	100	77	80

Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Nej	0,9	1,0	1,9				
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Ja	1,5	2,4	3,8	0	100	63	151
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Nej	0,6	0,9	1,6				
Kvægstalde	Ja	1,7	0,8	2,5	0	100	57	418
Kvægstalde	Nej	0,1	0,3	0,5				
Svinestalde	Ja	1,7	2,5	4,2	0	100	69	1090
Svinestalde	Nej	0,7	1,0	1,7				

6.11.4 Samspil til andre virkemidler

Der er mulighed for at kombinere med flere virkemidler i lageret, hvor den yderligere reduktion af metan dog vil være begrænset.

6.11.5 Usikkerheder

Der knytter sig de samme usikkerheder til denne teknologi som tidligere beskrevet for hyppig udslusning (6.1) og gas opsamling med afbrænding (6.6)

6.12 Hyppig udslusning af gylle og lavdosis forsuring i lageret (KVM6.12)

Forfatter: Frederik Rask Dalby, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Peter Kai, Institut for Bio- og Kemiteknologi

6.12.1 Anvendelse

Der henvises til afsnit omkring hyppig udslusning (6.1) og lavdosis forsuring i lageret (6.4)

6.12.2 Relevans og potentiale

Relevans og potentiale er beskrevet i tidligere afsnit for virkemidlerne i 6.1 og 6.4. Potentialer og reduktionseffekter er angivet i tabel 6.26.

6.12.3 Effekt på drivhusgasudledning

Effekterne er vist i tabel 6.26. Der regnes med 70% reduktion i lageret i forhold til referencesituationen.

Tabel 6.26 Estimeret metanreduktion i stald, lager og totalt ved hyppig udslusning af gylle i stalden og lavdosis forsuring i lageret. For kvægstalde er medtaget gødning fra stalde med ringkanal eller bagskyl. For svinestalde er medtaget gødning fra stalde hvor hyppig udslusning kan praktiseres. Enheden for CH₄ per ton er CH₄ per ton gylle af dyr. De sidste to kolonner viser reduktion i CO₂-ækv. (CO₂e per ton gylle af dyr og i 1000 tons (kt) per staldtype.

Dyre-og staldtype	Ref.	CH ₄ -udledning kg CH ₄ ton			Udbredelse, %		Reduktion netto	
		Stald	Lager	Total	2020	Potentiale	kg CO ₂ e/ ton	kt CO ₂ e/ Staldtype
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Ja	1,7	0,8	2,5	0	100	59	433
Kvæg, Sengebåse, spalter, bagskyl/ringkanalanlæg	Nej	0,1	0,3	0,4				
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Ja	1,9	2,5	4,4	0	100	78	374
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Nej	0,8	0,9	1,6				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Ja	1,5	2,6	4,1	0	100	72	275
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Nej	0,7	0,9	1,6				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Ja	1,1	2,8	3,8	0	100	65	68
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Nej	0,6	0,9	1,5				
Søer, Drægtighedsstalde, løs + individuel, delvis spalte	Ja	1,9	2,4	4,2	0	100	75	202
Søer, Drægtighedsstalde, løs + individuel, delvis spalte	Nej	0,7	0,8	1,6				
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Ja	2,5	2,2	4,6	0	100	81	85
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Nej	0,9	0,8	1,7				
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Ja	1,5	2,4	3,8	0	100	67	160

Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Nej	0,6	0,8	1,4				
Kvægstalde	Ja	1,7	0,8	2,5	0	100	59	433
Kvægstalde	Nej	0,1	0,3	0,4				
Svinestalde	Ja	1,7	2,5	4,2	0	100	74	1169
Svinestalde	Nej	0,7	0,8	1,6				

6.12.4 Samspil til andre virkemidler

Der kan kombineres med andre virkemidler i lageret eller, men effekten vil være begrænset.

6.12.5 Usikkerheder

Se afsnit omkring usikkerheder for virkemidlerne hyppig udslusning (6.1) og lav-dosis forsuring (6.4).

6.13 Køling af svinegylle i stalde og bioforgasning (KVM6.13)

Forfatter: Frederik Rask Dalby, Institut for Bio- og Kemiteknologi

Fagfællebedømmer: Peter Kai, Institut for Bio- og Kemiteknologi

6.13.1 Anvendelse

Der henvises til afsnit omkring gyllekøling (6.3) og bioforgasning (6.5).

6.13.2 Relevans og potentiale

Køling er relevant i udvalgte svinestalde og bioforgasning vil kunne benyttes for alle svinegylle.

6.13.3 Effekt på drivhusgasudledning

Antagelser: Der er kun regnet med reduktioner ift. reduktion af metanudledninger da effekten på ammoniak og afledt lattergas produktion samt energiforbrug ved køling i stalden er ganske lille, jf. afsnit 6.3 om gyllekøling. Gylletemperaturen sættes til 16,8 °C i stalden. Reduktionseffekter er angivet i tabel 6.27. Bemærk at effekten i stalden alene er mindre end for gyllekøling uden efterfølgende bioforgasning (se afsnit 6.3). Dette skyldes at der også udledes en smule metan fra fortanken før bioforgasning og denne udledning indregnes som et bidrag fra stalden.

Tabel 6.27 Estimeret metanreduktion i stald, lager og totalt ved gyllekøling i stalden og bioforgasning før lageret. Gylle opbevares 2 dage i fortanke før bioforgasning. For svinestalde er medtaget gødning fra stalde hvor rørudslusning kan praktiseres. Kvægstalde er ikke beregnet da gyllekøling her ikke er relevant. Enheden for CH₄ per ton er CH₄ per ton gylle af dyr. Kolonnen "Fortrængning" viser emissioner fra biogas ved erstatning af naturgas. De sidste to kolonner viser reduktion i CO₂-ækv. (CO₂e per ton gylle af dyr og i 1000 tons (kt) per staldtype.

Dyre- og staldtype	Ref.	CH ₄ udledning kg CH ₄ / ton			Fortrængning, kg CO ₂ /ton	Udbredelse, %		Reduktion netto	
		Stald	Lager	Total		2020	Potentiale	kg CO ₂ e/ton	t CO ₂ /Staldtype
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Ja	1,9	2,5	4,4	0	1	100	106	503
Slagtesvin, Drænet gulv + spalter (33/67)	Nej	1,8	0,1	1,9	36				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Ja	1,5	2,6	4,1	0	1	100	109	413
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (25-49 % fast gulv)	Nej	1,4	0,1	1,5	37				
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Ja	1,1	2,8	3,8	0	1	100	113	117
Slagtesvin, Delvist spaltegulv (50-75 % fast gulv)	Nej	1,1	0,1	1,2	39				
Søer, Drægtighedsstalde, løs + individuel, delvis	Ja	1,9	2,4	4,2	0	1	100	101	269

spalte									
Søer, Drægtighedstalde, løs + individuel, delvis spalte	Nej	1,7	0,1	1,8	34				
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Ja	2,5	2,2	4,6	0	1	100	96	99
Søer, Farestalde, kassesti, delvis spalte	Nej	2,2	0,1	2,3	31				
Søer, Farestalde, kassesti, fuldspalte	Ja	2,8	2,1	4,8	0	1		93	18
Søer, Farestalde, kassesti, fuldspalte	Nej	2,5	0,1	2,6	30				
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Ja	1,5	2,4	3,8	0	1	100	99	235
Smågrise, Toklimastald m. delvis spaltegulv	Nej	1,4	0,1	1,5	33				
Smågrise, Drænet gulv + spalter (50/50)	Ja	2,6	2	4,6	0	1	100	89	47
Smågrise, Drænet gulv + spalter (50/50)	Nej	2,3	0,1	2,4	29				
Svinestalde	Ja	1,8	2,5	4,2		1	100	104	1702
Svinestalde	Nej	1,6	0,1	1,7					

6.13.4 Samspil til andre virkemidler

Virkemidler som har en effekt i lageret vil kunne benyttes efter bioforgasning. Effekten på total reduktion vil dog være begrænset da bioforgasningen vil reducere metan potentialet i den afgassede gylle betragteligt.

6.13.5 Usikkerheder

Der er ikke yderligere usikkerheder knyttet til denne teknologikombination i forhold til usikkerheder, som allerede er beskrevet for de to teknologier (gyllekøling og bioforgasning).

7 Afgrødeproduktion

7.1 Efterafgrøder (KVM7.1)

Forfattere: Nicholas John Hutchings, Elly Møller Hansen, Ingrid K. Thomsen, alle fra Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

I dette kapitel tages udgangspunkt i beskrivelsen af de to N-virkemidler: Efterafgrøder og Efterafgrøder indeholdende kvælstoffikserende arter, der fremgår af henholdsvis Hansen et al. (2020a) og Hansen et al. (2020b). Efterafgrøder påvirker først og fremmest klimaregnskabet ved reduceret nitratudvaskning lattergasemission fra planterester, kulstoflagring i jord samt fossilt energiforbrug. Effekt på drivhusgasudledningen er uændret i forhold til Hansen et al. (2020a og 2020b).

7.1.1 Anvendelse

Efterafgrøder er en effektiv måde at reducere udvaskningen af kvælstof i efteråret, da en veletableret afgrøde i perioder med nedbørsoverskud og dermed afstrømning vil kunne optage overskydende kvælstof, der ellers ville kunne udvaskes. Efterafgrøder kan dog vanskeligt dyrkes efter sent høstede afgrøder som fx roer og kartofler.

For dyrkning af ikke-kvælstoffikserende pligtige og husdyrefterafgrøder gælder følgende regler (Landbrugsstyrelsen, 2022):

- Følgende efterafgrødetyper kan anvendes: korsblomstrede afgrøder, korn, rent græs uden kløver, honningurt, cikorie, klinte, hjulkrone, morgenfrue samt frøgræs, der efter høst fortsætter som efterafgrøde.
- Efterafgrøderne skal senest være etableret 1. august med følgende undtagelser: Korsblomstrede afgrøder, klinte, hjulkrone, morgenfrue, honningurt, almindelig rug, stauderug, hybridrug, vårbyg og havre kan etableres til og med 20. august med mulighed for at udskyde etableringstidspunktet til og med 7. september, når der korrigeres i kvælstofkvoten.
- Efterafgrøderne skal sås på arealer med korn eller andre afgrøder med tilsvarende høsttidspunkt og kan desuden etableres som udlæg i majs.
- Efterafgrøderne må ikke destrueres før 20. oktober. Dog må efterafgrøder i majs tidligst destrueres 1. marts.
- Arealer med pligtige efterafgrøder skal efterfølges af en forårssået afgrøde.
- Efter dyrkning af efterafgrøder fratrækkes den samlede kvælstofkvote en eftervirkning på 17 eller 25 kg N/ha hhv. under og over 80 kg N/ha i organisk gødning.

Siden 2021 har det under visse betingelser været muligt at benytte efterafgrødeblandinger indeholdende kvælstoffikserende arter som alternativ til pligtige efterafgrøder (Landbrugsstyrelsen, 2021). For disse blandinger gælder, at et øget input af kvælstof til jorden (pga. de kvælstoffikserende arters fiksering af kvælstof fra luften) øger risikoen for udvaskning i forhold til, hvis der udelukkende blev dyrket ikke-kvælstoffikserende arter som efterafgrøde. Der er derfor opstillet betingelser for dyrkning af efterafgrødeblandinger indeholdende kvælstoffikserende arter, som har til formål at tilstræbe samme udvaskningsreducerende effekt, som ved dyrkning af pligtige efterafgrøder. Af Landbrugsstyrelsen (2022) fremgår gældende betingelser, hvoraf kan nævnes følgende, der har størst dyrkningsmæssig betydning:

- Blandingen må højst indeholde 25 % kvælstoffikserende arter (beregnet ud fra frøantal), mens den resterende del af blandingen skal udgøres af godkendte arter af efterafgrøder.
- Der må kun bruges udvalgte vinterfaste kvælstoffikserende arter.
- Arealet må tidligst nedpløjes, nedvisnes eller på anden vis destrueres 1. februar.
- Arealet skal efterfølges af en forårssået afgrøde.
- Efter dyrkning af efterafgrødeblandinger indeholdende kvælstoffikserende arter fratrækkes den samlede kvælstofkvote en eftervirkning på 50 kg N/ha.

For opgørelsen af efterafgrøders kvælstofreducerende effekt er referencesituationen defineret som jord uden efterafgrøder (Hansen et al., 2020a). Referencesituationen vil være forskellig ved anvendelse af frøgræs som efterafgrøde, men dette har ikke indgået i effektfastsættelsen.

7.1.2 Relevans og potentiale

Efterafgrøder dyrkes før vårsæede afgrøder, men kan ikke dyrkes efter sent høstede afgrøder som fx roer og kartofler (Landbrugsstyrelsen, 2022). Ud fra disse forudsætninger blev det maksimale potentiale baseret på toårige afgrødefølger for 2013-2016 beregnet til på 700.000-850.000 ha for konventionelle og økologiske bedrifter ekskl. frøgræs (Thomsen & Ørum, 2016). For årene 2017-19 var det tilsvarende potentiale for efterafgrøder på 700.000-1.000.000 ha (Eriksen et al., 2020). Opgørelsesmetoden for de ovennævnte potentialer betyder, at potentialet kan blive overestimeret, hvis der indgår år, hvor specielle forhold gør sig gældende. Således kan regnfulde efterår betyde, at en planlagt etablering af vintersæd må opgives, og at der i stedet etableres vårsæd det efterfølgende forår. Sådanne arealer vil blive indregnet i det maksimale potentiale, selvom tidspunktet, hvor etablering af vintersæd må opgives, ligger så sent, at der i praksis ikke kan etableres efterafgrøder. Det skal derudover bemærkes, at der i det angivne maksimale potentiale ikke er foretaget reduktion i henhold til allerede gældende krav til fx pligtige eller husdyrefterafgrøder.

Frøgræs kan i det sidste brugsår fungere som efterafgrøde før omlægning til vårsæd. I 2013-2016 svarede sidste brugsår af frøgræs til 50.000-60.000 ha (Thomsen & Ørum, 2016) og et tilsvarende areal er beregnet for 2017-19 (Eriksen et al., 2020). Dette areal kan potentielt bruges som enten mellemafgrøde eller efterafgrøde og indgår derfor som potentiale for begge virkemidler.

7.1.3 Effekt på drivhusgasudledning

Referencesituationen for efterafgrøder er et kornsædskifte uden efterafgrøder.

I N-virkemiddelkataloget (Hansen et al., 2020a) er efterafgrøders udvaskningsreducerende effekt i rodzonen fastlagt som angivet i tabel 7.1. Effekten er fastlagt på baggrund af revurdering i 2014 (Hansen et al., 2014; Hansen & Thomsen, 2014) og 2020 (Hansen et al., 2020a) og forudsætter, at efterafgrøder på lerjord pløjes eller på anden måde destrueres sent efterår, og at efterafgrøder på sandjord pløjes eller destrueres i det tidlige forår. Med gældende betingelser for dyrkning af efterafgrødeblandinger indeholdende kvælstoffikserende arter, som antages destrueret tidligst 1. februar, vurderes at kunne opnå samme udvaskningsreducerende effekt som i tabel 7.1.

Tabel 7.1 Efterafgrøders udvaskningsreducerende effekt i rodzonen (Hansen et al., 2020a). For ikke-kvælstoffikserende efterafgrøder forudsættes, at efterafgrøder på lerjord pløjes eller på anden måde destrueres sent efterår, og at efterafgrøder på sandjord pløjes i det tidlige forår. For efterafgrødeblandinger indeholdende kvælstoffikserende arter forudsættes, at efterafgrøderne tidligst nedpløjes, nedvisnes eller på anden vis destrueres 1. februar. Værdier i parentes er estimeret. Effekt af efterafgrøder på humusjord samt svær til meget svær lerjord indgår ikke i estimererne for lerjord.

	Under 80 kg N/ha i organisk gødning		Over 80 kg N/ha i organisk gødning ¹⁾	
	Ler	Sand	Ler	Sand
Udvaskningsreduktion (kg N/ha)	12	32	(24)	45

Efterafgrøder påvirker flere poster i klimaregnskabet, herunder lattergasemission fra planterester, nitratudvaskning, kulstoflagring i jord samt fossilt energiforbrug. I princippet vil efterafgrøder også påvirke ammoniakemission fra planterester, men da effekten sandsynligvis er lille, og der ikke findes anerkendte metoder til at beregne effekten, ses bort fra dette her. Der er desuden set bort fra risiko for efterfølgende udvaskning efter mineralisering af destruerede efterafgrøder, da dette afhænger af, om der fx fortsat dyrkes efterafgrøder. Efterafgrøder mindsker desuden jordens indhold af mineralsk kvælstof, hvilket kan reducere potentialet for emission af lattergas, men datagrundlaget for at kvantificere dette er utilstrækkeligt. Effekt på drivhusgasemissionen ved en lavere gødningstilførsel til efterfølgende afgrøder indgår i tabel 7.2 under punktet "Eftervirkning". Da efterafgrødernes kvælstofoptagelse er meget varierende, er effekten på drivhusgasemissioner tilsvarende varierende.

Planteresterne i beregningerne af drivhusgasemission inkluderer både over- og underjordisk biomasse. Der kan forventes stor variation i kvælstofoptagelsen i efterafgrøder afhængig af klima- og dyrkningsforhold.

Ifølge Hansen et al. (2020a) er den gennemsnitlige kvælstofoptagelse for efterafgrøder 28 kg N/ha, og dette tal anvendes i emissionsberegningerne uden differentiering mellem jordtyper og tilførsel af organisk gødning. Til estimering af kvælstofindhold i rødder af ikke-kvælstoffikserende efterafgrøder, er anvendt værdier fra IPCC (2006). Her angives, at kvælstofkoncentrationen i de overjordiske planterester af ikke-kvælstoffikserende grovfoderafgrøder er 15 g N/kg tørstof, rodbiomassen som andel af overjordisk biomasse er 0,54 og kvælstofkoncentrationen i rødderne er 12 g N/kg ts. Kvælstofindholdet i rødder kan således beregnes til 12,1 kg N/ha, og den totale mængde kvælstof i planterester er således 40,1 kg N/ha.

Hansen et al. (2017) vurderede det totale kvælstofindhold i efterafgrøder indeholdende kvælstoffikserende arter til 100 kg N/ha, og ved en eftervirkning på 50 kg N/ha forventedes samme udvaskningsreduktion som for efterafgrøder uden kvælstoffikserende arter. Det bemærkes, at IPCC (2006) beregner kvælstofindhold i rødder som en funktion af de overjordiske biomasse, mens Hu et al. (2018) fandt, at rodbiomasse for konventionelle og økologiske efterafgrøder bedre kunne beregnes som konstante værdier. Da den danske indberetning under UNFCCC benytter IPCC (2006), er denne metode også benyttet her.

Der er stor usikkerhed forbundet med bestemmelse af C-input fra efterafgrøder og ikke mindst fra rødder og rhizodeposition. Estimaterne er ofte beregnet ud fra efterafgrødernes overjordiske tørstofproduktion eller N-indhold og konverteret til C-indhold i rødder vha. af diverse omregningsfaktorer. Desuden kan estimaterne være med eller uden rhizodeposition, som oftest ikke kvantificeres ved traditionelle rodbestemmelser. Taghizadeh-Toosi & Olesen (2016) estimerede for en græs-efterafgrøde et C-input på 2,2 t C ha⁻¹år⁻¹ inklusiv rhizodeposition, mens Jensen et al. (2021) ligeledes for en græsefterafgrøde estimerede et C-input på 1,7 t C ha⁻¹år⁻¹ inklusiv rhizodeposition. Det er uvist, om andre efterafgrøder kan udvise årlige C-input af samme størrelsesorden, men det anslås, at et generelt estimat vil være 1,7 – 2,2 t C ha⁻¹år⁻¹. Hvis der indføres ekstra hektar med efterafgrøder i den nationale emissionsopgørelse, er det DCE's vurdering, at ca. 12 % af den årligt tilførte mængde C bliver indlejret i jordens kulstofpulje, svarende til 0,264 ton C/ha/år (Mikkelsen et al., 2022). I den nationale opgørelse, hvor der anvendes en dynamisk modellering med C-TOOL, er C-input 2,2 ton C/ha/år. Kulstoflagring fra en efterafgrøde estimeres her til at være lig med 0,27 tons C/ha, som i Olesen et al. (2018). Dermed er der god overensstemmelse mellem kulstoflagring i Olesen et al. (2018) og de nationale beregninger.

Der vil være en begrænset merforbrug af fossil energi til såning, her estimeret til at være 1,7 l dieselolie/ha eller 4,7 kg CO₂-ækv./ha. Reduktionen i kvælstofudvaskningen er som i tabel 7.2 og 7.3. Tilførslen af kvælstof reduceres som følge af eftervirkningen af efterafgrøder med 17 og 25 kg N/ha for ikke-fikserende efterafgrøder med hhv. under og over 80 kg N/ha i organisk gødning, og 50 kg N/ha for fikserende efterafgrøder uanset kvælstoftilførslen (Landbrugsstyrelsen, 2022).

De samlede reduktioner i drivhusgasemissioner for ikke-fikserende og fikserende efterafgrøder er vist i tabel 7.2 og 7.3. Da der er store usikkerheder tilknyttet de enkelte poster, kan reduktionen for ikke-fikserende

efterafgrøder regnes til en gennemsnit på 960 kg CO₂-ækv./ha og for fikserende efterafgrøder til 831 kg CO₂-ækv./ha.

Tabel 7.2 Oversigt over effekt på N-balance og reduktion i drivhusgasemissioner af ikke-kvælstoffikserende efterafgrøder.

	Under 80 kg N/ha i husdyrgødning og anden organisk gødning		Over 80 kg N/ha i husdyrgødning og anden organisk gødning	
	Ler	Sand	Ler	Sand
	(kg N/ha)			
Eftervirkning	17	17	25	25
Afgrøderester	-40	-40	-40	-40
Udvaskningsreduktion	12	32	24	45
	(kg CO ₂ -ækv/ha)			
Handelsgødning	71	71	104	104
Afgrøderester	-167	-167	-167	-167
Udvaskningsreduktion	23	61	46	86
Fossilenergi	-5	-5	-5	-5
Kulstoflagring	990	990	990	990
Nettoeffekt*	912	950	968	1008

* Der er pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord (LULUCF) skal beregnes med henblik på at indregne det i landbrugets ud-ledninger og i hvilken udstækning det vil blive muligt. Der tages derfor forbehold mht. at LULUCF bidraget kan adderes direkte til de øvrige poster – som det er gjort her – for at beregne netto klimaeffekten af virkemidlerne.

Tabel 7.3 Oversigt over effekt på N-balance og reduktion i drivhusgasemissioner af efterafgrødeblandinger indeholdende kvælstoffikserende arter.

	Under 80 kg N/ha i husdyrgødning og anden organisk gødning		Over 80 kg N/ha i husdyrgødning og anden organisk gødning	
	Ler	Sand	Ler	Sand
	(kg N/ha)			
Eftervirkning	50	50	50	50
Afgrøderester	-100	-100	-100	-100
Udvaskningsreduktion	12	32	24	45
	(kg CO ₂ -ækv/ha)			
Handelsgødning	208	208	208	208
Afgrøderester	-416	-416	-416	-416
Udvaskningsreduktion	23	61	46	86
Fossilenergi	-5	-5	-5	-5
Kulstoflagring	990	990	990	990
Nettoeffekt*	800	838	823	863

* Der er pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord (LULUCF) skal beregnes med henblik på at indregne det i landbrugets ud-ledninger og i hvilken udstækning det vil blive muligt. Der tages derfor forbehold mht. at LULUCF bidraget kan adderes direkte til de øvrige poster – som det er gjort her – for at beregne netto klimaeffekten af virkemidlerne.

7.1.4 Samspil til andre virkemidler

Efterafgrøder kan ikke anvendes sammen med andre fladevirkemidler, der involverer plantedyrkning om efteråret, men kan anvendes samtidigt med fladevirkemidler, der involverer gødskning. I disse tilfælde forventes effekterne ikke at være additive. Reduceret kvælstofudvaskning ved dyrkning af efterafgrøder vil betyde, at der kvantitativt kan fjernes mindre kvælstof ved samtidig anvendelse af dræn- og vandløbsvirkemidler.

7.1.5 Usikkerheder

Effekten af ikke-kvælstoffikserende efterafgrøder er baseret på forholdsvis mange forsøg, men der er betydelig variation i udvaskningsreduktionen. Størst usikkerhed knytter sig til udvaskningsreduktionerne efter majs, hvor det er uvist, i hvor høj grad der kan generaliseres ud fra de gennemsnitlige resultater. De gennemsnitlige værdier for efterafgrøder i korn vurderes som værende relativt sikkert bestemt for de mest almindelige jordtyper. Der savnes dog forsøg med og uden efterafgrøder på arealer med en langvarig dyrkningshistorie med tilførsel af husdyrgødning og dyrkning af kløvergræs. Desuden savnes der forsøg på svær lerjord samt silt- og humusjord.

Effekten af efterafgrødeblandinger indeholdende kvælstoffikserende arter er baseret på relativt få forsøg, og der er mange mulige arter af kvælstoffikserende efterafgrøder, hvis vinterfasthed er mangelfuldt dokumenteret. Ligeledes savnes der viden om konkurrenceforhold mellem kvælstoffikserende og ikke-kvælstoffikserende arter under forskellige jordfrugtbarhed, klimaforhold mm. Endelig savnes der mere viden om, hvad bælgeplanteblandingers lavere C/N forhold betyder både for evt. udvaskning i løbet af vinteren og det tidlige forår samt for evt. øget kvælstofoptagelse i den efterfølgende afgrøde.

Referencer

- Eriksen, J, Thomsen, IK, Hoffmann, CC, Hasler, B, Jacobsen, BH, Baattrup-Pedersen, A, Strandberg, B, Christensen, BT, Boelt, B, Iversen, BV, Kronvang, B, Børgesen, CD, Abalos Rodriguez, D, Zak, DH, Hansen, EM, Blicher-Mathiesen, G, Rubæk, GH, Ørum, JE, Rasmussen, J, Audet, J, Olesen, JE, Elsgaard, L, Munkholm, LJ, Jørgensen, LN, Martinsen, L, Bruus, M, Carstensen, MV, Pedersen, MF, Nørremark, M, Hutchings, N, Gundersen, P, Kudsk, P, Sørensen, P, Lærke, PE, Gislum, R, van't Veen, SGM, Larsen, SE, Petersen, SO, Riis, T & Jørgensen, U 2020, Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. DCA rapport, nr. 174, bind 174, Aarhus Universitet - DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>
- Hansen, E.M., Thomsen, I.K. (2014). Bilag 3. Efterafgrøder: Revurdering af udvaskningsreducerende effekt. I: Eriksen, J., Jensen, P.N. og Jacobsen, B.H. (redaktører), Virkemidler til realisering af 2. generations vandplaner og målrettet arealregulering, side 241-254.
- Hansen, E.M., Thomsen, I.K., Rubæk, G.H., Kudsk, P., Jørgensen, L.N., Schelde, K., Olesen, J.E., Strandberg, M.T., Jacobsen, B.H., Eberhardt, J.M. (2014). Efterafgrøder. I: Eriksen, J., Jensen, P.N. og Jacobsen, B.H. (redaktører), Virkemidler til realisering af 2. generations vandplaner og målrettet arealregulering, side 21-35.
- Hansen, E.M., Sørensen, P., Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Rasmussen, J., Eriksen, J. (2017). Vurdering af kriterier for anvendelse af kvælstoffikserende arter som pligtige efterafgrøder. Notat til NaturErhvervstyrelsen 16. januar 2017. https://pure.au.dk/portal/files/108760403/f_lgebreve_notat_16_01_2017_NAER.PDF.

- Hansen, E.M., Thomsen, I.K., Kudsk, P., Strandberg, B., Bruus, M., Rubæk, G.H., Hutchings, N.J., Pedersen, M.F. (2020a). Efterafgrøder. I: Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C. C., Hasler, B., Jacobsen, B.H. (redaktører). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport nr. 174, side 33-58. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArap-port174.pdf>
- Hansen, E.M., Thomsen, I.K., Sørensen, P., Rasmussen, J., Eriksen, J., Olesen, J.E., Kudsk, P., Jørgensen, L.N., Strandberg, B., Bruus, M., Rubæk, G.H., Hutchings, N.J., Pedersen, M.F. (2020b). Efterafgrøder indeholdende kvælstoffikserende arter. I: Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C. C., Hasler, B., Jacobsen, B.H. (redaktører). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport nr. 174, side 59-73. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArap-port174.pdf>
- Hu, T., Sørensen, P., Olesen, J.E. (2018). Soil carbon varies between different organic and conventional management schemes in arable agriculture. *European Journal of Agronomy* 94, 79–88.
- IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. In: Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Nagara, T., Tanabe, K. (Eds.), Japan.
- Jensen, J.L., Eriksen, J., Thomsen, I.K., Munkholm, L.J., Christensen, B.T. (2021). Cereal straw incorporation and ryegrass cover crops: The path to equilibrium in soil carbon storage is short. *Eur. J. Soil Sci.*, 1-10.
- Landbrugsstyrelsen (2021). Vejledning om pligtige og husdyrefterafgrøder og dyrkningsrelaterede tiltag. Planperioden 1. august 2021 til 31. juli 2022. Version 2, juni 2021. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, Landbrugsstyrelsen. file:///C:/Data/myndighed/20211005_Afpudsning%20af%20MFO-gr%C3%A6s/Artikler/Vejledning_efterafgroeder_og_dyrkningsrelaterede_tiltag_2version_juni_2021.pdf
- Landbrugsstyrelsen (2022). Vejledning om pligtige og husdyrefterafgrøder og dyrkningsrelaterede tiltag. Planperioden 1. august 2022 til 31. juli 2023. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, Landbrugsstyrelsen. ISBN 978-87-7120-410-0
- Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Gyldenkerne, S. (2022). Sammenligning af klimaeffekter - Emissionsopgørelse, emissionsfremskrivning og Klimaeffekttabel. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 166 s. – Videnskabelig rapport nr. 501. <http://dce2.au.dk/pub/SR501.pdf>
- Olesen, J.E., Petersen, S.O., Lund, P., Jørgensen, U., Kristensen, T., Elsgaard, L., Sørensen, P., Lassen, J. (2018). Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget. DCA rapport 130.
- Taghizadeh-Toosi, A., Olesen, J.E. (2016). Modelling soil organic carbon in Danish agricultural soils suggests low potential for future carbon sequestration. *Agricultural Systems* 145, 83–89.

Thomsen, I.K., Ørum, J.E. (2016). Analyse af efterafgrødepotentialet i kystvandområderne når økologiske og konventionelle arealer adskilles. Notat til NaturErhvervstyrelsen 24. oktober 2016.
https://pure.au.dk/portal/files/115568880/F_lgebrev_notat_Efterafgr_depotentialer_241016.pdf

7.2 Mellemafgroeder (KVM7.2)

Forfattere: Nicholas John Hutchings, Ingrid K. Thomsen, Elly Møller Hansen, alle fra Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

I beskrivelsen af mellemafgroeder er der taget udgangspunkt i Thomsen et al. (2020), hvor det fremgår, at virkemidlet klimamæssigt influerer på kvælstofudvaskning og kulstoflagring samt på merforbrug af fossil energi.

7.2.1 Anvendelse

Mellemafgroeders udvaskningsreducerende effekt er baseret på optag og tilbageholdelse af kvælstof sensommer og tidligt efterår. Ifølge gældende regelsæt skal mellemafgroeder etableres senest 20. juli og må tidligst nedmuldes eller destrueres 20. september, hvorefter der skal dyrkes en vintersædsafgroede (Landbrugsstyrelsen, 2022). Som mellemafgroede kan anvendes olieræddike og/eller gul sennep. For opgørelsen af mellemafgroeders kvælstofreducerende effekt er referencesituationen defineret som vintersæd uden mellemafgroeder (Thomsen et al., 2020).

Ud over olieræddike og gul sennep kan frøgræs efter høst fortsætte som mellemafgroede indtil såning af en vintersædsafgroede (Landbrugsstyrelsen, 2022). Frøgræs har ikke indgået i fastsættelsen af mellemafgroeders udvaskningsreducerende effekt.

7.2.2 Relevans og potentiale

Mellemafgroeden skal ifølge Landbrugsstyrelsen (2022) efterfølges af en vintersædsafgroede, og det vurderes, at korsblomstrede mellemafgroeder især anvendes efter korn som forfrugt. Det totale potentiale antages således at være arealet med vintersæd med forfrugt af vår- eller vintersæd. Ifølge Thomsen & Ørum (2016) svarede dette areal summeret for konventionelle og økologiske bedrifter til ca. mellem 560.000-650.000 ha for årene 2013-16 baseret på toårige afgrødefølger i perioden. For årene 2017-19 var det totale potentiale for mellemafgroeder efter korn før vintersæd ud fra samme forudsætninger på 400.000-600.000 (Eriksen et al. 2020).

Frøgræs kan i det sidste brugsår fungere som mellemafgroede før omlægning til vintersæd. I 2013-16 svarede sidste brugsår af frøgræs til 50.000-60.000 ha (Thomsen & Ørum, 2016) og et tilsvarende areal er beregnet for 2017-19 (Eriksen et al. 2020). Dette areal kan potentielt bruges som enten mellemafgroede eller efterafgroede og indgår derfor som potentiale for begge virkemidler.

7.2.3 Effekt på drivhusgasudledning

Den udvaskningsreducerende effekt af mellemafgroeder er antaget at svare til halvdelen af effekten af efterafgroeder svarende til 14 kg N/ha (Thomsen et al., 2020). Det fossile energiforbrug er regnet som det

samme som for efterafgrøder, mens mellemafgørder ikke påvirker kvælstofnormerne, da disse ikke har en eftervirkning (Landbrugsstyrelsen, 2019). En reduktion i kvælstofudvaskningen på 14 kg N/ha svarer til en reduktion i den indirekte lattergasemission på 27 kg CO₂-ækv./ha. Mer-emissionen af lattergas fra planterester forventes at svare til 83 kg CO₂-ækv./ha, mens reduktionen pga. kulstoflagringen svarer til 495 kg CO₂-ækv./ha. Merforbrug af fossilt energi til såning er estimeret til at være 1,7 l dieselolie/ha eller 4,7 kg CO₂-ækv./ha. I alt vil mellemafgørder således bidrage med en reduktion i drivhusgasemission på 434 kg CO₂-ækv./ha. Der er dog pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord (LULUCF) skal beregnes med henblik på at indregne det i landbrugets udledninger og i hvilken udstrækning det vil blive muligt. Der tages derfor forbehold mht. at LULUCF bidraget kan adderes direkte til de øvrige poster. Der er ikke datagrundlag til at differentiere effekten i forhold til jordtype og husdyrintensitet.

7.2.4 Samspil til andre virkemidler

Mellemafgørder kan ikke anvendes sammen med andre fladevirkemidler, der involverer plantedyrkning om efteråret. Det gælder fx ift. tidlig såning af vintersæd, da destruktion af mellemafgørder først kan finde sted efter seneste frist for tidlig såning (Landbrugsstyrelsen, 2022). Mellemafgørder kan anvendes samtidigt med fladevirkemidler, der involverer gødskning, men effekterne forventes ikke at være additive. Reduceret kvælstofudvaskning på grund af mellemafgørder vil betyde, at der kvantitativt fjernes mindre kvælstof ved samtidig anvendelse af dræn- og vandløbsvirkemidler.

7.2.5 Usikkerheder

Der er gennemført en del forsøg med mellemafgørder, hvor der er bestemt enten kvælstofoptag efterår eller N_{min} i jord til forskellige tidspunkter. Desuden foreligger resultater fra en række udvaskningsforsøg, men der udestår forsøg med mellemafgørder, der kan dokumentere den nuværende omregningsfaktor 2:1 (Landbrugsstyrelsen, 2022) til efterafgrøder uanset jordtype og husdyrintensitet. Der udestår desuden eksperimentelle undersøgelser til belysning af den udvaskningsreducerende effekt af mellemafgørder bestående af frøgræs.

Referencer

Eriksen, J, Thomsen, IK, Hoffmann, CC, Hasler, B, Jacobsen, BH, Baattrup-Pedersen, A, Strandberg, B, Christensen, BT, Boelt, B, Iversen, BV, Kronvang, B, Børgesen, CD, Abalos Rodriguez, D, Zak, DH, Hansen, EM, Blicher-Mathiesen, G, Rubæk, GH, Ørum, JE, Rasmussen, J, Audet, J, Olesen, JE, Elsgaard, L, Munkholm, LJ, Jørgensen, LN, Martinsen, L, Bruus, M, Carstensen, MV, Pedersen, MF, Nørremark, M, Hutchings, N, Gundersen, P, Kudsk, P, Sørensen, P, Lærke, PE, Gislum, R, van't Veen, SGM, Larsen, SE, Petersen, SO, Riis, T & Jørgensen, U 2020, Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. DCA rapport, nr. 174, bind 174, Aarhus Universitet - DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>

Landbrugsstyrelsen (2022). Vejledning om pligtige og husdyrefterafgrøder og dyrkningsrelaterede tiltag. Planperioden 1. august 2022 til 31. juli 2023, maj 2022. https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Landbrug/Efterafgroeder_og_jordbearbejdning/Vejledning_efterafgroeder_og_dyrkningsrelaterede_tiltag_for_2022_2023_maj2022.pdf

Landbrugsstyrelsen (2022). Vejledning om pligtige og husdyrefterafgrøder og dyrkningsrelaterede tiltag. Planperioden 1. august 2022 til 31. juli 2023, maj 2022. https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Landbrug/Efterafgroeder_og_jordbearbejdning/Vejledning_efterafgroeder_og_dyrkningsrelaterede_tiltag_for_2022_2023_maj2022.pdf

Thomsen, I.K., Hansen, E.M., Boelt, B., Kudsk, P., Jørgensen, L.N., Strandberg, B., Bruus, M., Rubæk, G.H., Hutchings, N.J., Pedersen, M.F. (2020). Mellemafgroeder. I: Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H. (redaktører). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport nr. 174, side 74-86. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArap-port174.pdf>

Thomsen, I.K., Ørum, J.E. (2016). Analyse af efterafgrødepotentialet i kystvandområderne når økologiske og konventionelle arealer adskilles. Notat til NaturErhvervstyrelsen 24. oktober 2016. https://pure.au.dk/ws/files/115568880/F_lgebrev_notat_Efterafgr_depotentialer_241016.pdf

7.3 Tidlig såning af vintersæd (KVM7.3)

Forfattere: Nicholas John Hutchings, Ingrid K. Thomsen, Elly Møller Hansen, alle fra Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

Beskrivelsen af tidlig såning af vintersæd er baseret på Thomsen et al. (2020), som anfører, at virkemidlets effekt på klima begrænser sig til effekten på nitratudvaskning.

7.3.1 Anvendelse

Tidlig såning af vintersæd stiler mod at øge kvælstofoptagelsen gennem efteråret og dermed reducere kvælstofudvaskningen i forhold til en referencesituation, hvor vintersæd sås til normalt tidspunkt. Ifølge gældende regler defineres såning senest 7. september af vinterhvede, vinterbyg, vinterrug og tritcale som et virkemiddel, der kan bruges som alternativ til efterafgrøder (Landbrugsstyrelsen, 2022).

7.3.2 Relevans og potentiale

Det vurderes, at tidlig såning af vintersæd hovedsageligt vil blive praktiseret efter gode forfrugter som fx raps og ærter. Under den forudsætning beregnede Thomsen & Ørum (2016), at det totale potentiale summeret for konventionelle og økologiske bedrifter var mellem 170.000 – 190.000 ha for årene 2013-16 baseret på toårige afgrødefølger i perioden. For årene 2017-19 var potentialet for tidlig såning ud fra samme forudsætninger på 150.000-170.000 ha (Eriksen et al., 2020).

Tidlig såning af vintersæd kan i princippet også praktiseres efter andre forfrugter end raps og ærter, når blot høst af forfrugten er tilstrækkelig tidlig til, at såning af vintersæden kan finde sted senest 7. september. Betragtes hele arealet med vintersæd som et potentielt areal for tidlig såning, svarer dette summeret for konventionelle og økologiske bedrifter til mellem 800.000 og 900.000 ha for årene 2013-16 (Thomsen & Ørum, 2016). For 2017-19 var det totale vintersædsareal, og dermed det maksimale potentiale for tidlig såning, på 580.000-820.000 ha (Eriksen et al., 2020). Af dette potentiale er der i de år, hvor virkemidlet har kunnet anvendes, været udnyttet mellem ca. 13.000 og 160.000 ha (Thomsen & Hansen, 2019).

7.3.3 Effekt på drivhusgasudledning

Under antagelse af at tidlig såning af vintersæd ikke har signifikant effekt på udbyttet (Thomsen et al., 2020), er virkemidlets effekt på drivhusgasemissionen begrænset til effekten på nitratudvaskning.

Referencesituationen til tidlig såning af vintersæd er såning af vintersæd til normal tid. I forhold til denne reference er den udvaskningsreducerende effekt af tidlig såning af vintersæd estimeret til 17 kg N/ha (Thomsen et al., 2020), hvilket svarer til en reduktion i drivhusgasemissionen på 33 kg CO₂-ækv./ha. Der er ikke datagrundlag til at differentiere effekten i forhold til jordtype og husdyrintensitet.

7.3.4 Samspil til andre virkemidler

Tidlig såning af vintersæd vil ikke kunne bruges samtidigt med andre fladevirkemidler, der involverer plantedyrkning om efteråret som fx efter- og mellemafgroeder og brak. Tidlig såning kan anvendes samtidigt med fladevirkemidler, der involverer gødskning, men effekterne forventes ikke at være additive. Reduceret kvælstofudvaskning på grund af tidlig såning af vintersæd vil betyde, at der kvantitativt fjernes mindre kvælstof ved samtidig anvendelse af dræn- og vandløbsvirkemidler.

7.3.5 Usikkerheder

Effekten af tidlig såning af vintersæd er relativt sikkert bestemt, selvom forsøgene ikke dækker alle kombinationer af jordtyper, klimaforhold og arter af vintersæd. Der er ikke gennemført forsøg med tidlig såning på jord med høj tilførsel af husdyrgødning.

Referencer

Eriksen, J, Thomsen, I.K, Hoffmann, C.C, Hasler, B, Jacobsen, B.H, Baattrup-Pedersen, A, Strandberg, B, Christensen, B.T, Boelt, B, Iversen, B.V, Kronvang, B, Børgesen, C.D, Abalos Rodriguez, D, Zak, D.H, Hansen, E.M, Blicher-Mathiesen, G, Rubæk, G.H, Ørum, J.E, Rasmussen, J, Audet, J, Olesen, J.E, Elsgaard, L, Munkholm, L.J, Jørgensen, L.N, Martinsen, L, Bruus, M, Carstensen, M.V, Pedersen, M.F, Nørremark, M, Hutchings, N, Gundersen, P, Kudsk, P, Sørensen, P, Lærke, P.E, Gislum, R, van't Veen, S.G.M, Larsen, S.E, Petersen, S.O, Riis, T & Jørgensen, U 2020, Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. DCA rapport, nr. 174, bind 174, Aarhus Universitet - DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>

Landbrugsstyrelsen (2022). Vejledning om pligtige og husdyrefterafgroeder og dyrkningsrelaterede tiltag. Planperioden 1. august 2022 til 31. juli 2023, maj 2022. https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Landbrug/Efterafgroeder_og_jordbearbejdning/Vejledning_efterafgroeder_og_dyrkningsrelaterede_tiltag_for_2022_2023_maj2022.pdf

Thomsen, I.K., Hansen, E.M. (2019). Revurdering af omregningsfaktor for tidlig såning af vintersæd som alternativ til efterafgroeder. Notat til Landbrugsstyrelsen 12. august 2019. https://pure.au.dk/portal/files/161791404/Revurdering_af_omregningsfaktor_for_tidlig_s_ning_120819.pdf

Thomsen, I.K., Hansen, E.M., Kudsk, P., Jørgensen, L.N., Bruus, M., Strandberg, B., Rubæk, G.H., Hutchings, N.J., Pedersen, M.F. (2020). Tidlig såning af vintersæd. I: Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H. (redaktører). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport nr. 174, side 87-100. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>

- Thomsen, I.K., Pedersen, B.F., Hansen, E.M. (2019). Vurdering og genberegning af omregningsfaktor for tidlig såning af vintersæd som alternativ til efterafgrøder ifm. håndtering af dødvægtsproblematikken. Notat til Landbrugsstyrelsen 19. november 2019.
https://pure.au.dk/portal/files/172095832/Vurdering_og_genberegning_af_omregningsfaktor_for_tidlig_s_ning_November_2019.pdf
- Thomsen, I.K., Ørum, J.E. (2016). Analyse af efterafgrødepotentialet i kystvandområderne når økologiske og konventionelle arealer adskilles. Notat til NaturErhvervstyrelsen 24. oktober 2016.
https://pure.au.dk/ws/files/115568880/F_lgebrev_notat_Efterafgr_depotentialer_241016.pdf

7.4 Nedmuldning af halm før vintersæd (KVM7.4)

Forfattere: Nicholas John Hutchings, Ingrid K. Thomsen, Elly Møller Hansen, alle fra Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

I beskrivelsen af nedmuldning af halm før vintersæd som kvælstofvirkemiddel er der taget udgangspunkt i Thomsen et al. (2014, 2020). Her blev det vurderet, at nedmuldning af halm før vintersæd ikke var tilstrækkeligt sikker til at kunne anvendes som virkemiddel til reduktion af kvælstofudvaskningen.

Nedmuldning af halm før vintersæd blev i Thomsen et al. (2020) vurderet til ikke at have en netto klimaeffekt i forhold til, at halmen alternativt var anvendt til foder og strøelse, der senere ville blive udbragt til marken i form af gødning. Anvendes halmen i stedet til andre formål, fx fyring, hvor der ikke sker en tilbageførsel til marken, vil nedmuldningen kunne have en klimaeffekt i form af kulstofindlejring.

7.4.1 Anvendelse

En udvaskningsreducerende effekt af halmnedmuldning er baseret på, at halm med højt C:N-forhold efter indblanding i jorden medfører, at mikroorganismer immobiliserer uorganisk kvælstof. Det immobiliserede kvælstof tilbageholdes i jorden og vil på et senere tidspunkt remineraliseres. Når nedmuldning af halm som virkemiddel her alene fokuserer på vintersæd, skyldes det, at forbuddet mod jordbearbejdning forud for vårsæede afgrøder (Landbrugsstyrelsen, 2022) betyder, at halm før vårafgrøder ikke vil kunne indarbejdes efter den forudgående høst og dermed opnå en effekt via immobilisering.

7.4.2 Relevans og potentiale

Der kan potentielt nedmuldes halm på den del af vintersædsarealet, hvor forfrugten er korn. Af Thomsen & Ørum (2016) kan udledes, at dette areal for årene 2013-2016 svarer til ca. 625.000 ha.

7.4.3 Effekt på drivhusgasudledning

Da nedmuldning af halm før vintersæd vurderes ikke at være tilstrækkelig sikker til at kunne indgå som virkemiddel til reduktion af kvælstofudvaskningen (Thomsen et al., 2014), antages der ingen klimaeffekt i form af reduceret udvaskning.

Mht. en klimaeffekt i form af kulstoflagring afhænger effekten af, hvilken reference der anvendes for alternativ anvendelse af halmen. Ved en alternativ anvendelse af halmen til foder, strøelse eller biogas, hvor restprodukterne senere tilføres jorden, forventes på længere sigt ingen kulstoflagringseffekt i forhold til nedmuldning af frisk halm (Thomsen et al., 2013).

Hvis alternativet til nedmuldning af halm før vintersæd er fjernelse af halmen til fyringsformål, vil der være en klimaeffekt i form af kulstofindlejring. Baseret på Jensen et al. (2022) forventes det, at der ved tilførsel af

4 tons halm/ha med et kulstofindhold på 42 % vil være stabiliseret hhv. 0,24 og 0,05 tons kulstof svarende til, at hhv. 14 % og 3 % kulstof er indlejret i jorden efter hhv. 20 og 100 år.

7.4.4 Samspil til andre virkemidler

Nedmuldning af halm før vintersæd vil kunne anvendes sammen med andre fladevirkemidler som tidlig såning af vintersæd og mellemafgroeder. Kulstofindlejringen forventes ikke påvirket af, hvorvidt halmnedmuldning sker forud for tidlig eller normal såning af vintersæd. Effekten på kulstofindlejring ved samtidig anvendelse af nedmuldning af halm og dyrkning af mellemafgroeder antages at være additiv. Store mængder halm, der ligger snittet på jordoverfladen indtil mellemafgroeden nedmuldes, vil dog kunne hæmme væksten af mellemafgroeden. Omvendt vil mellemafgroeden ved samtidig halmnedmuldning ikke påvirkes negativt af trafik på marken i forbindelse med presning og fjernelse af halmen.

7.4.5 Usikkerheder

Der er gennemført adskillige studier med nedmuldning af halm, og sikkerheden på data må betragtes som relativ høj mht. effekt på både udvaskning og på kulstofindlejring.

Referencer

- Jensen, J.L., Thers, H., Elsgaard, L. (2022). Afklaring om videns- og ressourcebehov ved at integrere biochar i C-TOOL modellen til brug for emissionsopgørelser. 10 sider. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 17.05.2022. https://pure.au.dk/portal/files/269069435/Biokul_og_CTOOL_1705_2022.pdf
- Landbrugsstyrelsen (2022). Vejledning om pligtige og husdyrefterafgroeder og dyrkningsrelaterede tiltag. Planperioden 1. august 2022 til 31. juli 2023, maj 2022. https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Landbrug/Efterafgroeder_og_jordbearbejdning/Vejledning_etterafgroeder_og_dyrkningsrelaterede_tiltag_for_2022_2023_maj2022.pdf
- Thomsen, I.K., Hansen, E.M., Kudsk, P., Jørgensen, L.N., Bruus, M., Strandberg, B., Rubæk, G.H., (2020). Nedmuldning af halm før vintersæd. I: Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H. (redaktører). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport nr. 174, side 101-106. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArap-port174.pdf>
- Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Møller, H.B., Sørensen, P., Christensen, B.T. 2013. Carbon dynamics and retention in soil after anaerobic digestion of dairy cattle feed and faeces. Soil Biology and Biochemistry 58, 82-87.
- Thomsen, I.K., Hansen, E.M., Rubæk, G.H., Kudsk, P., Jørgensen, L.N., Schelde, K., Petersen, S.O., Strandberg, M.T. (2014). Nedmuldning af halm før vintersæd. I: Eriksen, J., Jensen, P.N. og Jacobsen, B.H.

(Redaktører), Virkemidler til realisering af 2. generations vandplaner og målrettet arealregulering, side 141-144. https://pure.au.dk/portal/files/84646400/Virkemiddelkatalog_web.pdf

Thomsen, I.K., Ørum, J.E. (2016). Analyse af efterafgrødepotentialet i kystvandområderne når økologiske og konventionelle arealer adskilles. Notat til NaturErhvervstyrelsen 24. oktober 2016.
https://pure.au.dk/ws/files/115568880/F_lgebrev_notat_Efterafgr_depotentialer_241016.pdf

7.5 Halm til forgasning (pyrolyse) med biochar retur (KVM7.5)

Forfatter: Lars Elsgaard, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

Biochar tiltrækker sig i øjeblikket opmærksomhed som en negativ kulstof-emissionsteknologi i lande, der er forpligtet til ambitiøse klimamål, såsom Danmark, med et mål om 70 % reduktion af drivhusgasemissioner inden 2030. Da dette mål er baseret på netto reduktioner, kan det delvist realiseres ved initiativer, der kompenserer for CO₂-udledningen gennem kulstofbinding, hvor pyrolyse af biomasse foreslås at være et vigtigt element (Klimarådet, 2020). Den hastigt stigende interesse for biochar betyder dog, at empirisk dokumentation og mekanistisk forståelse halter bagud, når det kommer til at vurdere langsigtede agronomiske og miljømæssige effekter af biochar. Denne forskning er nødvendig i forhold til dokumentation af den pyrogene kulstoflagring samt biochars vedvarende effekter på jordens økosystem, herunder såvel positive som potentielt negative effekter fx fra uønskede indholdsstoffer som PAH'er i biochar. De nedenstående beskrivelser og scenarier bygger på den tilgængelige viden med disse forbehold.

7.5.1 Anvendelse

Biochar er den faste kulstof-fraktion, der fremkommer ved termisk forgasning eller pyrolyse af forskellige typer biomasse. Biochar, der indarbejdes i jorden, kan øge jordens vandholdende evne, pH og evne til at tilbageholde næringsstoffer i rodzonen. Dette skyldes primært biochars porøse struktur og overfladeegenskaber. På baggrund af disse egenskaber er biochar gennem det seneste årti blevet undersøgt og foreslået til jordforbedring (Lehmann & Joseph, 2015). Det er dog klimaeffekten i forhold til kulstof (C) lagring, der tiltrækker størst opmærksomhed (Woolf et al., 2021). Som følge af den termiske behandling ved høj temperatur (typisk 400-700 grader) er kulstoffet i biochar meget stabilt og kun langsomt biologiske nedbrydeligt. Biochar kan udbringes og indarbejdes i dyrket jord i forbindelse ved pløjning og harvning. Der vil også være mulighed for, at en mindre mængde biochar vil kunne udbringes via gylle (efter tilførsel af biochar til gylletanke). Der er begrænset erfaring med praktisk udbringning i større skala; de fleste studier af biochar er af eksperimentel karakter eller er foregået med manuel udbringning på mindre feltarealer. En positiv effekt af biochar på høstudbytte er dokumenteret i meta-analyser (Jeffery et al., 2011; Crane-Droesch et al., 2013), men vil være mest aktuel på jorder med høj udvaskning, lav pH og lavt indhold af plantetilgængeligt vand, næringsstoffer og organisk kulstof. Øgede udbytter vil ikke generelt kunne forventes på danske landsbrugsjorde, måske med undtagelse af meget sandede jorder (Sørensen og Abalos, 2022).

7.5.2 Relevans og potentiale

Halm er en begrænset ressource, der allerede udnyttes i stort omfang, og har en række konkurrerende anvendelser. Elsgaard et al. (2011) vurderede, at der var potentiale for en øget anvendelse af 1 million ton (10^6 Mg) halm til energiformål. Samtidig blev det fremhævet, at virkningen af mindre halm-nedmuldning på jordens frugtbarhed måtte vurderes. Estimatet fra Elsgaard et al. (2011) blev benyttet i DCA rapport nr. 130 om virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget (Olesen et al., 2018). Nyere estimater præsenteret af Jørgensen og Mortensen (2022) angiver, at den pt. udnyttede ressource af halm (korn + raps + græsfrøhalm) udgør ca. 2 millioner tons, idet der stadig tages højde for, at en vis andel af landmændene ønsker at beholde halmen som kilde til organisk stof til gavn for jordens struktur og frugtbarhed (se også Munkholm et al., 2022). Jørgensen og Mortensen (2022) estimerede derudover potentialet, hvis pyrolyse kan konkurrere om den mængde halm, der i øjeblikket bruges til energiformål. Derved øges potentialet for halm til pyrolyse til 3,37 millioner tons (disse tal er med 15% vandindhold). I fremtidige scenarier for 2030, hvor muligheder og begrænsninger indgår, blev de samlede halmressourcer til bioenergi og bioraffinering estimeret til 3,09-3,85 millioner tons (Jørgensen og Mortensen, 2022). Thomsen (2021) udførte en omfattende analyse af klimaaftrykket af halm til pyrolyse og biogas i Danmark og benyttede i dette arbejde et estimat på 1,67 millioner tons halm til pyrolyse. For at udnytte potentialet i pyrolyse af halm til biochar vil det kræve, at der findes de rette anlægstyper (pyrolyse/forgasnings anlæg) med tilstrækkelig kapacitet, hvilket ikke er tilfældet i dag, hvor der kun findes et enkelt eller få anlæg med fokus på pyrolyse af halm med biochar retur (Adamsen & Møller, 2022a,b).

Udbyttet af biochar ved pyrolyse af halm varierer afhængigt af proces-betingelserne ved den termiske behandling dvs primært som funktion af temperatur og opholdstid i pyrolyseanlægget. Danske pyrolyseanlæg har indtil videre kun eksisteret på eksperimentel og pilot skala fx i forbindelse med forgasning af halm ved PURSOC teknologien, som var grundlag for beregninger i DCA rapport nr. 174 (Eriksen et al., 2020). Data er i mellemtiden blevet tilgængelige for et ny-opført 2 MW anlæg og der er på den baggrund opstillet en balance, der viser, at masseudbyttet af biochar svarer til 29% af tørstoffet i den pyrolyserede biomasse (Adamsen og Møller, 2022a,b). Antages det, at 1 millioner tons halm (tørvægt) pyrolyseres med et udbytte på 29% kan der årligt produceres 0.29 millioner tons biochar. Infrastrukturen til dette er dog ikke på plads og konsekvenserne på længere sigt for jordens økosystem er mangelfuldt belyst.

7.5.3 Effekt på drivhusgasudledning

I en datasyntese med udgangspunkt i danske forhold, beskrev Sørensen og Abalos (2022) at fosfor (P) indholdet i biochar ofte vil begrænse den mængde biochar, der kan udbringes på dansk landbrugsjord, hvor der eksisterer et fosforloft på 30 kg P/ha. Det blev beregnet, at der typisk ville kunne udbringes hvad der svarer til 7-9 tons biochar pr. ha pr. år. I balancen opstillet af Adamsen og Møller (2022) regnes med et kulstofindhold i biochar på ca. 64% ved pyrolyse af halm, svarende til at der kan tilføres 4,5-5,8 tons C pr. ha pr. år.

IPCC (2019) har lavet et foreløbigt og simplificeret udkast til at forudsige stabiliteten af biochar i et 100-års perspektiv (Fperm) – hvilket er en værdi, der angiver hvor mange procent af tilført C i biochar, der forventes at være tilbage i jorden efter 100 år. Kun produktionstemperaturen for biochar ligger til grund for disse foreløbige IPCC estimater, der varierer fra gennemsnit på 65 % til 89 % for biochar produceret ved hhv 350-450 °C og >600 °C. Woolf et al. (2021) har kvalificeret estimaterne for Fperm baseret på en sammenhæng mellem biocharens H/Corg ratio (dvs. det molære forhold mellem brint, H, og organisk kulstof, Corg). På denne baggrund har Jensen et al. (2022) opstillet et scenarie (og reference scenarie) for effekten på kulstoflagring af at tilføre mineraljorde 42.000 t C i biochar og samtidig fraføre 240.000 t tørstof i halm til brug for produktionen af biochar i hhv. et 20 og 100 års perspektiv (tabel 7.4). Referencen er valgt til nedmuldning af halm.

Udover effekt på kulstoflagring er der empirisk dokumentation for en sænkning af N₂O emissionen fra dyrket jord i forsøg, hvor der måles i behandlinger med og uden biochar. Dette er sammenfattet i to tidligere meta-analyser (Cayuela et al., 2014; 2015), der fandt en gennemsnitlig reduktion i N₂O-emissionerne på 53% i kontrollerede laboratorieforsøg og en reduktion på 28% i markforsøg. Opsamling af viden fra nyere undersøgelser sandsynliggør, at effekten af biochar på lattergas emissionen ikke er vedvarende, men derimod forventes at formindskes over årene efter tilførsel af biochar (Borchard et al., 2019).

Antages det med udgangspunkt i internationale meta-analyser, at biochar i dyrket jord nedsætter lattergas emissionen med 28 % under markforhold, kan betydningen af denne reduktion vurderes i forhold til den standard emission af lattergas (IPCC, 2019), der som direkte emission knyttes til anvendelse af mineralsk gødnings-N (i.e., 1 % af tilført N mængde). Antages en årlig tilførsel af 167 kg N/ha, beregnes en lattergas emission på 1,67 kg N₂O-N/ha. En reduktion heraf på 28 % omregnes til en sænkning svarende til 0,47 kg N₂O-N/ha eller 0,73 kg N₂O/ha. Med en GWP faktor på 273 for N₂O (jf seneste IPCC assessment report; Forster et al., 2021) svarer dette til 200 kg CO₂-ækv/ha. Det er dog som tidligere nævnt ikke velundersøgt, om denne effekt er vedholdende over en længere årrække, eller om effekten afhænger af fornyet tilførsel af biochar med jævne mellemrum.

Tabel 7.4 Scenarier for effekten på kulstoflagring af at tilføre mineraljorde 42.000 t C i biochar og samtidig fraføre 240.000 t tørstof i halm til brug for produktionen af biochar i hhv. et 20 og 100 års perspektiv (fra Jensen et al., 2022).

	20 års perspektiv	100 års perspektiv
Biochar-tilførsel (t C)	42.000	42.000
Tilbageholdelse af C i Biochar (%) ¹	96	81
Kulstoflagring (t C)	40.320	34.020
Halm-C tilførsel (t C)	100.000	100.000
Tilbageholdelse af C i halm (%) ²	14	3
Kulstoflagring (t C)	14.000	3.000
Netto C lagring ved biochar (t C)	26.320	31.020

¹ Udregnet ud fra Supplerende materiale til Woolf et al. (2021) ved jordtemperatur på 10 °C.

² Baseret på C-TOOL (Taghizadeh-Toosi et al., 2014) modelkørsel ved et lerindhold på 12,5 %, C/N-forhold på 10 og ved en årlig gennemsnits lufttemperatur på 8 °C.

Ud fra de ovenstående afsnit kan der laves et skønsmæssigt estimat af klimaeffekten (opgjort som lagret C) ved at tilføre fx 4 tons halm/ha i form af frisk halm (tørvægt) eller efter omdannelse til biochar.

For 4 tons halm (med et C indhold på 42 %) tilført til 1 ha, vil der efter 20 og 100 år være stabiliseret hhv. 0,24 og 0,05 tons C (i.e., der er tilført ca. 1,7 tons C, hvoraf hhv. 14 % og 3 % er indlejret i jorden efter 20 og 100 år)

For 4 tons halm pyrolyseret med et udbytte på 29 % (vægt) og et C indhold i biochar på 64 %, dannes 0,74 tons biochar-C, hvoraf hhv. 96 % og 81 % er stabilt i jorden efter 20 og 100 år, i.e., svarende til 0,71 og 0,60 tons C.

Netto effekten efter hhv. 20 og 100 år er 0,48 (0,71 minus 0,24) og 0,55 (0,60 minus 0,05) tons C/ha svarende til 1,8 og 2,0 tons CO₂-ækv/ha. Hertil kommer den mulige effekt i det/de første år af mindsket lattergas emission på 0,2 tons CO₂-ækv/ha. Estimerne for C lagring her er 6-9 % højere end i eksemplet i tabel 7.4 grundet antagelserne om biochar udbytte og C indhold, der er taget fra den nyere syntese af Adamsen og Møller (2022).

7.5.4 Samspil til andre virkemidler

Effekten på sænkning af emissionen af lattergas kan påvirkes af andre tiltag, der implementeres for at mindske disse emissioner, så som anvendelse af nitrifikations-inhibitorer.

7.5.5 Usikkerheder

Der er usikkerheder på estimerne for den langsigtede stabilitet af biochar C i jorden. Fx er det usikkert hvordan jordens temperatur påvirker stabiliteten af biochar. Forskellige typer af biochar vil desuden have forskellig stabilitet. For specifikke produkter kan biocharens H/Corg ratio anvendes til at kvalificere estimerne. Det er usikkert hvor stor og hvor holdbar effekt der er af biochar på sænkning af emissionen af lattergas under danske klima- og dyrkningsforhold.

Referencer

- Adamsen, A.P.S., Møller, H.B. (2022a). Production of biochar based on straw, digestate fibers and sewage sludge. In: Elsgaard L (ed): Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture. Advisory report from DCA - Danish Centre for Food and Agriculture. Chapter 2, pp. 9-32
- Adamsen, A.P.S., Møller, H.B. (2022b). Selection of biochar feedstock scenarios and estimation of carbon sequestration and emissions. In: Elsgaard L (ed): Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture. Advisory report from DCA - Danish Centre for Food and Agriculture. Chapter 1, pp. 1-8
- Borchard, N., Schirrmann, M., Cayuela, M.L. et al. (2019). Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: a meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 651, 2354-2364.

- Cayuela, M.L., Jeffery, S., van Zwieten, L. (2015). The molar H:C_{org} ratio of biochar is a key factor in mitigating N₂O emissions from soil. *Agric. Ecosyst. Environ.* 202, 135-138.
- Cayuela, M.L., van Zwieten, L., Singh, B.P. et al. (2014). Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 191, 5-16.
- Crane-Droesch, A., Abiven, S., Jeffery, S., Torn, M.S. (2013). Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta-regression analysis. *Environ. Res. Lett.* 8, 044049.
- Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H. (2020). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA- Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. 452 s.- DCA rapport nr. 174 <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>
- Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K. et al. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A et al., eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 923-1054.
- IPCC, (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P. and Federici, S., eds), Appendix 4 - Method for estimating the change in mineral soil organic carbon stocks from biochar amendments: Basis for future methodological development. Published: IPCC, Switzerland.
- Jeffery, S., Verheijen, F.G.A., van der Velde, M., Bastos, A.C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 144, 175-87.
- Jensen, J.L., Thers, H., Elsgaard, L. (2022). Afklaring om videns- og ressourcebehov ved at integrere biochar i C-TOOL modellen til brug for emissionsopgørelser. 10 sider. Rådgivningsnotat fra DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 17.05.2022.
- Mangler i tekst: Jensen, J.L., Kristensen, T., Thers, H., Olesen, J.E., Elsgaard, L. (2021) C-TOOL og muligheder for beregning af kulstoflagring på bedriftsniveau. 8 sider. Rådgivningsnotat fra DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 15.12.2021. https://pure.au.dk/portal/files/228108178/CTOOL_og_C_lagring_p_bedriftsniveau_1512_2021.pdf
- Jørgensen, U., Mortensen, E.Ø. (2022). Biomass potentials. In: Elsgaard L (ed): *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture*. Advisory report from DCA - Danish Centre for Food and Agriculture. Chapter 3, pp. 33-39

- Klimarådet, (2020). Known paths and new tracks to 70 per cent reduction - Direction and measures for the next 10 years climate action in Denmark. Klimarådet, March 2020.
- Lehmann, J., Joseph, S. (2015). Biochar for environmental management - science, technology and implementation, 2nd edition. Routledge, New York, NY.
- Mangler i tekst: Lehmann, J., Abiven, S., Kleber, M. et al. (2015). Persistence of biochar in soil. In: Biochar for Environmental Management (Eds., Lehmann, J., Joseph, S.), pp. 235-282. Routledge, New York, NY.
- Munkholm, L.J., Jensen, J.L., Jørgensen, U., Elsgaard, L. (2022). Biochar og jordens kulstofpulje. 11 sider. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 05.07.2022
- Olesen, J.E., Petersen, S.O., Lund, P., Jørgensen, U., Kristensen, T., Elsgaard, L., Sørensen, P., Lassen, J. (2018) Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget. Aarhus Universitet. DCA– Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. 130 s.– DCA rapport nr. 130.
- Sørensen, P., Abalos, D. (2022) Nutrient composition of biochar and effects on nutrient availability and yields. In: Elsgaard L (ed): Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture. Advisory report from DCA - Danish Centre for Food and Agriculture. Chapter 7, pp. 86-95
- Taghizadeh-Toosi, A., Olesen, J.E., Kristensen, K., Elsgaard, L., Østergaard, H.S., Lægdsmand, M., Greve, M.H., Christensen, B.T. (2014). Changes in carbon stocks of Danish agricultural mineral soils during 1986 - 2009: effects of management. Europ. J. Soil Sci. 65, 730-740
- Thomsen, T.P. (2021). Climate Footprint Analysis of Straw Pyrolysis & Straw Biogas: Assessment of the Danish climate crisis mitigation potential of two new straw management options. Roskilde Universitet.
- Woolf, D., Lehmann, J., Ogle, S., et al. (2021). Greenhouse gas inventory model for biochar additions to soil. Environ. Sci. Technol. 55, 1479514805. DOI: 10.1021/acs.est.1c02425

7.6 Braklægning i sædskiftet (KVM7.6)

Forfattere: Gitte Blicher-Mathiesen, Institut for Ecoscience og Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Søren O. Petersen, Institut for Agroøkologi

Med kortvarig brak indgår arealet i omdrift. Braklægning af en mark i et sædskifte indebærer, at arealet ikke dyrkes i en periode af mindst en høstperiode. Brak kan nedbringe udledningen af drivhusgasser pga. mindsket gødningstilførsel, N-udvaskning og forbrug af fossil energi.

7.6.1 Anvendelse

Braklægning af landbrugsjorden har i Danmark haft forskellig fokus og omfang (Hansen et al., 2021b). I 1988/89 indført EU en frivillig braklægning, som efter 1992 blev obligatorisk for at begrænse landbrugsproduktionen, men som igen blev ophævet i 2008. I denne periode gik braklægning fra at være et element i at begrænse landbrugsproduktionen til i højre grad at have fokus på effekt på biodiversitet og miljø. Braklægning for nuværende anvendes til at opfylde krav til udbetaling af grøn støtte og grundbetaling og der er derfor løbende indført, at braklægning kan bruges i forskellige obligatoriske regelsæt som fx miljøfokusområder (MFO) og som alternativ til efterafgrøder. I dag skal bedrifter med mere end 15 ha udlægge 4 % af deres dyrkede areal med såkaldte ikke produktive elementer for at kunne få landbrugsstøtte. Brak kan indgå som et af disse elementer.

7.6.2 Relevans og potentiale

Det er i dag et krav, at braklagte arealer holdes i en stand, så de nemt kan bringes ind i driften igen. Derfor skal brakmarken enten slås mindst én gang enten i foråret eller sensommeren, eller der skal foretages jordbearbejdning og efterfølgende isåning af en blomsterblanding senest 30. april, som går under betegnelsen bestøverbrak eller blomsterbrak (Landbrugsstyrelsen, 2018). Der kan i efteråret etableres en vinterafgrøde med tilhørende jordbearbejdning og gødskning eller en støtteberettiget permanent afgrøde med henblik på høst det efterfølgende år.

Reference for nitratudvaskning og dyrkningsforhold: I forbindelse med effektfastsættelse af virkemidler, hvor jorden udtages af almindelig landbrugsmæssig drift, er effekten på nitratudvaskning hovedsageligt fastsat i forhold til et modelberegnet gennemsnit for nitratudvaskning fra jord i omdrift. Det gælder fx for skovrejsning, brak og energiafgrøder. I Virkemiddelkataloget fra 2014 (Eriksen et al., 2014) udgjorde referencen for den årlige gennemsnitlige udvaskning for hele landet ca. 62 kg N/ha. Denne udvaskning var beregnet med NLES4-modellen med landbrugsdata for 2007-2011 (Børgesen et al., 2013). En genberegning baseret på data fra 2017 har vist, at den opgjorte referenceudvaskning svarer til ca. 66 kg N/ha for landbrugsafgrøder i omdrift og ca. 61 kg N/ha for hele det dyrkede areal (Gitte Blicher-Mathiesen, AU, upubliceret). Referenceudvaskningen ligger altså reelt på samme niveau som anvendt i Eriksen et al.

(2014). Ved den her gennemførte opdatering, er der for de virkemidler, der er fastsat på baggrund af referenceudvaskningen, hovedsageligt taget udgangspunkt i den reviderede værdi på 61 kg N/ha.

Anvendes den gennemsnitlige referenceudvaskning til fastsættelse af en effekt af et givent virkemiddel, antages i princippet, at udbredelsen af virkemidlet er jævnt fordelt uden hensyntagen til bonitet og øvrige dyrkningsforhold. Dette vil ofte ikke være tilfældet i praksis, men en mere detaljeret effektfastsættelse ville forudsætte, at udvaskningen før fx etablering af energiforgrøder og brak blev bestemt for den forudgående arealanvendelse.

Potentiale for virkemidlet brak i sædskiftet udgør omdriftsarealet for det dyrkede areal.

7.6.3 Effekt på drivhusgasudledning

Som omtalt under permanent udtagning KVM8.1 i nærværende rapport og i Blicher-Mathiesen et al., (2020) er der kun ganske få målinger af nitratudvaskning ved kortvarig brak, og alle er gennemført under de tidligere brakordninger før 2008 på arealer i Landovervågningen (Blicher-Mathiesen et al., 2019, 2020). Hansen et al., (2021a) vurderede, at den årlige nitratudvaskningen fra kortvarig brak vil være 3-20 kg N/ha under forudsætning af, at brakken ikke efterfølges afgrøder med meget høj frigivelse af kvælstof fra jorden. Ligeledes fremgår af Hansen et al. (2021), at ompløjning og destruktion af brak forventes at medføre en øget udvaskning i forhold til den periode, hvor brakken var på marken. Den øgede udvaskning vil afhænge af bl.a. artssammensætning, herunder andel af bælgeplanter. En analyse af afgrøder efter kortvarig brak fandt at brak historisk set tilsyneladende ikke i stort omfang følger afgrøder med højt mineraliseringspotentiale, hvorved udvaskningen fra brak således forventes at have ligget i intervallet 3-20 kg N/ha som tidligere estimeret (Hansen et al., 2021a). Med en referenceudvaskning på 61 kg N/ha (se kapitlet Koncept for anvendelse og effektfastsættelse af kvælstofvirkemidler, Eriksen et al., 2020) bliver den generelle effekt af brak i sædskiftet en reduktion af udvaskningen med 41-58 kg N/ha.

Effekten vil desuden i betydelig grad afhænge af, om det braklagte areal før braklægning udgjorde et omdriftsareal eller om arealet har været omfattet af miljøordninger, varig græs eller ikke tidligere har været dyrket. For kortvarig brak, der etableres på arealer med græs eller ekstensiv drift, må effekten af braklægning i selve braklægningsåret forventes at være forsvindende lav, og her har braklægningen således ikke nogen funktion som kvælstofvirkemiddel.

På AU igangsattes der i efteråret 2021 nye forsøg med forskellige typer brak på to lokaliteter med bestemmelser af lattergasudledning og kvælstofudvaskning. Disse forsøg vil bidrage med yderligere data, men en egentlig fastsættelse af nitratudvaskning og klimagasudledning vil bl.a. afhænge af, hvilken reference, der anvendes. I en situation, hvor et areal braklægges flere år i træk, vil der ikke være en betydelig klimamæssig effekt, hvis der sammenlignes med arealanvendelsen i det foregående år. Sammenlignes brakken i stedet med den alternative anvendelse af arealet, fx jord i omdrift, vil brakken have en effekt hvert år. Reference og opløsningsniveau, herunder om der sammenlignes på mark- eller

bedriftsniveau, vil således have betydning for, hvilken effekt braklægning tillægges mht. nitratudvaskning og klimagasudledning.

Kvælstofgødningsinputtet til braklagte arealer er 0 kg N/ha mod 171 kg N/ha i referencesædskiftet (tabel 7.5). Med hensyn til C-input antages, at det svarer til C-inputtet i planterester i referencesædskiftet, således at jordens kulstofbalance ikke ændres afgørende. Ganske vist tilbageføres hele planteproduktionen til arealet, men denne er til gengæld stærkt nedsat af den mindre N-tilførsel. Hvor meget mindre afhænger dog af jordens dyrkningsstand og mineraliseringsevne. Sammenlignet med korndyrkning (referencesituationen), kan reduktionen i lattergasemission fra kvælstofgødning, ammoniakfordampning og nitratudvaskning beregnes (se kapitel 4) til at være henholdsvis 712, 29 og 96 kg CO₂-ækv/ha. Hvis braklægningen varer mere end et år vil N-input fra planterester dog sandsynligvis være mindre, da det kun indregnes i året hvor brakken ophører. Endvidere vil besparelsen på fossil energi og kalkning ved undgået dyrkning være 455 kg CO₂-ækv/ha. Her er dog ikke taget hensyn til at der stadig kan ske en vis forsuring af jorden og at der er et vist forbrug af fossil energi til etablering og slåning. Samlet vil klimaeffekten være 1292 kg CO₂-ækv./ha.

Tabel 7.5 Oversigt over dyrkningselementer der påvirker emission af klimagasser for brak i sædskiftet.

Dyrkningsforhold for kortvarig brak	Udtaget areal	Reference
N input i handelsgødning	0	171 kg N/ha
N input i planterester	70 kg N/ha	70 kg N/ha
Nitratudvaskning	3-20 kg N/ha	61 kg N/ha
Ammoniakfordampning	0 kg N/ha	6,8 kg N/ha
Kalkning	0 kg CO ₂ ækv/ha	94 kg CO ₂ ækv/ha
C-lagring	0 kg CO ₂ ækv/ha	0 kg CO ₂ ækv/ha
Jordbearbejdning	0 kg CO ₂ ækv/ha	361 kg CO ₂ ækv/ha

7.6.4 Samspil til andre virkemidler

Effekt af kortvarig brak er vurderet ift. en gennemsnitlig udvaskning på 61 kg N/ha for det dyrkede areal. Sker der ændringer i forbruget af gødning, ændringer i sædskiftet eller andre dyrkningsforhold vil disse påvirke denne referenceudvaskning og dermed også effekt af braklægning på udvaskning samt klimaeffekt.

7.6.5 Usikkerheder

Det er usikkert hvor meget længden af braklægningsperioden påvirker klimaeffekten både med hensyn til C binding i jorden og N udledningerne. Det samme gælder for benyttelsen af brakmarkerne. Længerevarende brak må forventes at have større effekt end en en-årig udtagning. Dette gælder i øvrigt også for biodiversiteten. Der er igangværende forsøg, der skal kvantificere indflydelsen på lattergasudledninger og N-udvaskning.

Referencer

- Blicher-Mathiesen, G., Holm, H., Houlborg, T., Rolighed, J., Andersen, H.E., Carstensen, M.V., Jensen, P.G., Wienke, J., Hansen, B., Thorling, L. (2019). Landovervågningsoplande 2018. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 241 s. - Videnskabelig rapport nr. 352. <http://dce2.au.dk/pub/SR352.pdf>
- Blicher-Mathiesen, G., Olesen, J.E., Strandberg, B., Bruus, M., Rubæk, G.H., Hutchings, N.J., Hasler, B., Martinsen, L. (2020). Permanent udtagning og kortvarig brak i omdrift. I: Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H. (redaktører). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport nr. 174, s. 115-126. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf> DCA rapport nr 174.
- Børgesen, Christen Duus, Poul Nordemann Jensen, Gitte Blicher-Mathiesen og Kirsten Schelde (editors), 2013. Udviklingen i kvælstofudvaskning og næringsstof-overskud fra dansk landbrug for perioden 2007-2011 Evalueret af implementerede virkemidler til reduktion af kvælstofudvaskning samt en fremskrivning af planlagte virkemidlers effekt frem til 2015. DCA rapport nr. 31.
- Eriksen, J., Jensen, P.N., Jacobsen, B.H. (red.) 2014. Virkemidler til realisering af 2. generations vand- planer og målrettet arealregulering. DCA Rapport 052. http://web.agrsci.dk/djfpublikation/djfpdf/Virkemiddelkatalog_web.pdf
- Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H. (2020). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA– Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. 452 s.– DCA rapport nr. 174 <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>
- Hansen, E.M., Blicher-Mathiesen, G., Thomsen, I.K., Olesen, J.E. (2021a). Kvantificering af effekten af brak – del 1. 8 sider. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 23.02.2021. https://pure.au.dk/portal/files/212154697/Levering_Kvantificering_af_effekten_af_brak_del_1.pdf
- Hansen et al., 2021b Hansen, E., Pedersen, B.F., Blicher-Mathiesen, G., Thomsen, I.K. (2021b). Arealhistorikkens betydning for effekt af klima og miljø for braklagte arealer. 27 sider. Rådgivningsnotat fra DCA – Nationale Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet. https://pure.au.dk/portal/files/223479979/Levering_Arealhistorikkens_betydning_for_effekten_af_klima_og_milj_for_braklagte_arealer.pdf
- Landbrugsstyrelsen, 2018. Vejledning om grundbetaling 2018 - og generel vejledning om at søge direkte arealstøtte. Miljø og Fødevareministeriet. 102 sider.

7.7 Ompløjningstidspunkt for fodergræs og efterfølgende afgrødevalg (KVM7.7)

Forfattere: Nicholas John Hutchings, Elly Møller Hansen, Ingrid K. Thomsen, alle fra Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

I dette kapitel tages udgangspunkt i den beskrivelse af virkemidlet Ompløjningstidspunkt for fodergræs og efterfølgende afgrødevalg, der fremgår af Hansen et al. (2020). Virkemidlet påvirker først og fremmest klimaregnskabet ved ændret nitratudvaskning og kvælstofgødningsniveau. Effekt på drivhusgasudledningen er uændret i forhold til Hansen et al. (2020), bortset fra at med GWP fra AR5, er reduktionen i lattergasemission fra N-udvaskning nu 96 kg CO₂ ækv./ha og fra afgrødevalg nu 249 kg CO₂ ækv./ha. Den samlede reduktion er nu 345 kg CO₂ ækv./ha.

7.7.1 Anvendelse

Virkemidlet "Ompløjningstidspunkt for fodergræs og efterfølgende afgrødevalg" er en sammenskrivning af to virkemidler, dvs. et virkemiddel, der har eksisteret i flere år, nemlig "Forbud mod omlægning af fodergræs" (Landbrugsstyrelsen, 2022) og et nyt potentielt virkemiddel ("Afgrødevalg efter ompløjning"), som yderligere kan reducere risikoen for udvaskning efter ompløjning af kløvergræs. Det eksisterende virkemiddel "Forbud mod omlægning af fodergræs" er generelt set et forbud mod at omlægge fodergræs til anden afgrøde ved pløjning om efteråret. De præcist gældende regler for virkemidlet er beskrevet af Landbrugsstyrelsen (2022). Begge virkemidler vurderes særskilt. Hvis de to virkemidler kombineres, vil den udvaskningsreducerende effekt strække sig over to år.

Sædskifter har betydning for risikoen for udvaskning, da afgrødernes placering i sædskiftet påvirker mængden af kvælstof, der enten mineraliseres eller efterlades til den efterfølgende afgrøde. Desuden har afgrøder forskellig kapacitet til at optage kvælstof om efteråret. Efter afgrøder som fodergræs er det muligt at "tætte" sædskiftet ved at sørge for, at jorden om efteråret efter forårsomlægning er bevoset med en afgrøde, der effektivt kan optage kvælstof. Sammensættes det efterfølgende sædskifte på en måde, så der i stedet for vårbyg fx dyrkes grønkorn med udlæg af en kraftigt voksende græs som italiensk rajgræs, har forsøg omtalt i Hansen et al. (2018) vist meget lav udvaskning.

Hvordan en sædskiftemæssige ændring kan indgå som et virkemiddel er beskrevet af Thomsen et al. (2019). Den sædskiftemæssige ændring består af dyrkning af vår-grønkorn med græsudlæg efter forårsomlægning af græs eller kløvergræs i stedet for dyrkning af silomajs eller vårkorn til modenhed. Virkemidlet er p.t. ikke implementeret.

For det potentielle virkemiddel antages følgende forudsætninger (Thomsen et al., 2019):

- Alle græsmarker, der indgår i virkemidlet, må tidligst omlægges eller nedvisnes 1. marts.

- Vår-grønkornet kan gødes med kvælstof efter gældende normer fratrukket gældende forfrugtsværdi.
- Græsudlægget må ikke gødes eller afgræsses, og der skal som minimum tages ét slæt i udlægsåret, dvs. efter vår-grønkornet er høstet.
- Der skal etableres udlæg af græs (uden kløver) i vår-grønkornet senest 1 uge efter såning af vårkorn. Græsudlægget skal være en hurtigtvoksende græs som ital. rajgræs eller tidlig tetraploid alm. rajgræs.
- Vår-grønkornet skal høstes ved begyndende skridning og senest 1. juli.
- Græsudlægget må ikke omlægges før 1. marts i det efterfølgende år.

7.7.2 Relevans og potentiale

Forbud mod omlægning af fodergræs indgår i gældende lovgivning for konventionelle landbrugere (Landbrugsstyrelsen, 2022). For afgrødevalg efter ompløjning med dyrkning af vår-grønkorn med græsudlæg efter græs eller kløvergræs vurderes det på baggrund af Thomsen et al. (2019), at potentialet for at dyrke grønkorn med græsudlæg i stedet for majs eller vårbyg er 50.000 ha. Vurderingen tager udgangspunkt i, at Thomsen et al. (2019) har opgjort arealet af græs i omdrift til ca. 256.000 ha, og at der årligt omlægges omkring 33 % græsareal, dvs. ca. 84.000 ha, samt at der heraf i gennemsnit omlægges 58 % (27,9 % og 30,4 %), dvs. ca. 50.000 ha, til enten majs eller vårsæd.

7.7.3 Effekt på drivhusgasudledning

Ompløjning af fodergræs

I N-virkemiddelkataloget (Hansen et al., 2020) er estimeret, at den udvaskningsreducerende effekt af forbuddet mod omlægning af fodergræs er 50 kg N/ha, hvilket vil reducere lattergasemissionen med 96 kg CO₂-ækv./ha.

Afgrødevalg efter ompløjning af fodergræs

Ved sædskifteændringer fra vårbyg og silomajs (samme andel af hver afgrøde) til vår-grønkorn med græsudlæg dyrket efter omlægning af græs eller kløvergræs er udvaskningen på baggrund af typetal i gennemsnit antaget reduceret fra 140 til 10 kg N/ha (Thomsen et al., 2019). Der regnes således med en udvaskningsreducerende effekt på 130 kg N/ha, hvilket vil reducere lattergasemissionen med 249 kg CO₂-ækv./ha. Afgrødevalget vil påvirke både det tilladte kvælstofgødningsniveau og udbytniveau (og dermed kvælstofinput i planterester), men beregning af disse effekter afhænger af en række forudsætninger, der ligger uden for indholdet i denne rapport (se Thomsen et al., 2019).

7.7.4 Samspil til andre virkemidler

Virkemidlet ompløjningstidspunkt for fodergræs og efterfølgende afgrødevalg kan ikke anvendes sammen med andre fladevirkemidler, der involverer plantedyrkning om efteråret. Men virkemidlet kan anvendes samtidigt med fladevirkemidler, der involverer gødskning. I disse tilfælde forventes effekterne ikke at være additive. Reduceret kvælstofudvaskning ved benyttelse af virkemidlet vil betyde, at der kvantitativt kan fjernes mindre kvælstof ved samtidig anvendelse af dræn- og vandløbsvirkemidler.

7.7.5 Usikkerheder

Det er sikkert, at der kan være stor risiko for udvaskning efter ompløjning af kløvergræsmarker, men da der er meget stor variation mellem år og lokaliteter, er den gennemsnitlige værdi behæftet med en del usikkerhed. Der savnes udvaskningsdata for dels ompløjning af græs i renbestand gødet efter gældende normer dels efter afgræsning. Desuden mangler der data for 2. års udvaskning efter ompløjning af græs eller kløvergræs med forskellig alder.

Referencer

- Hansen, E.M., Thomsen, I.K., Petersen, S.O., Lærke, P.E., Pedersen, B.F., Rasmussen, J., Christensen, B.T., Jørgensen, U., Eriksen, J. (2018). Muligheder for reduktion af næringsstoffab i græsrigt sædskifter. Notat til Landbrugsstyrelsen 15. maj 2018. https://pure.au.dk/portal/files/127151867/Besvarelse_Mulighed_for_reduktion_af_n_ringsstoffab_i_gr_srige_s_dskifter.pdf
- Hansen, E.M., Thomsen, I.K., Eriksen, J., Rasmussen, J., Olesen, J.E., Jørgensen, U., Kudsk, P., Bruus, M., Strandberg, B., Rubæk, G.H., Hutchings, N.J., Jacobsen, B.H. (2020). Ompløjningstidspunkt for fodergræs og efterfølgende afgrødevalg. I: Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C. C., Hasler, B., Jacobsen, B.H. (redaktører). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport nr. 174, side 173-184. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArap-port174.pdf>
- Landbrugsstyrelsen (2022). Vejledning om pligtige og husdyrefterafgrøder og dyrkningsrelaterede tiltag. Planperioden 1. august 2022 til 31. juli 2023, maj 2022. https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Landbrug/Efterafgroeder_og_jordbearbejdning/Vejledning_etterafgroeder_og_dyrkningsrelaterede_tiltag_for_2022_2023_maj2022.pdf
- Thomsen, I.K., Pedersen, B.F., Kristensen, T., Petersen, S.O., Eriksen, J., Hansen, E.M. (2019). Græs som virkemiddel i kvælstofreguleringen (Del 1). Notat til Landbrugsstyrelsen 15. november 2019. https://pure.au.dk/portal/files/172085972/Gr_s_som_virkemiddel_m_bilag1_Nov2019.pdf

7.8 Flerårige energiafgrøder i sædskiftet (KVM7.8)

Forfattere: Uffe Jørgensen, Nicholas J. Hutchings, begge fra Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

Flerårige energiafgrøder har en række effekter på kvælstof- og kulstofbalancen i marken. Det hænger bl.a. sammen med en lang vækstsæson og et permanent, dybt rodnet, hvilket sikrer en lav kvælstofudvaskning samt andre økosystemtjenester herunder kulstoflagring (Pugesgaard et al., 2014; Cacho et al., 2018). Afgrøderne har relativt lave N-behov, og dermed forventes en mindre lattergasemission end fra et traditionelt landbrugssædskifte.

7.8.1 Anvendelse

Flerårige energiafgrøder (fx pil, poppel og elefantgræs) kan bidrage med biomasse til udnyttelse til energi, materialer og biogent CO₂, som kan anvendes til power-to-X eller til negative emissioner (lagring i undergrunden). Flerårige energiafgrøder kan benyttes til plantning i områder, hvor der er behov for reduktion i nitratudvaskningen for at opfylde EU's Vandrammedirektiv (Børgesen et al., 2018). De græsagtige afgrøder høstes årligt, mens de træagtige høstes med et interval på mellem 2 og 10 år (poppel kan dog dyrkes i endnu længere rotation). Afgrødernes levetid forventes at være på 10-30 år.

7.8.2 Relevans og potentiale

I 2022 er der registreret 4.913 ha med pil, 3.217 ha med poppel samt 87 ha med elefantgræs, der modtager hektartilskud (Landbrugsstyrelsen, 2022b). Det meste elefantgræs dyrkes til tækkeformål (supplement til tagrør), hvilket forventes at give samme effekt på klimaet som elefantgræs til energi.

Over de seneste år har interessen for at plante biomasseafgrøder med fokus alene på energiudnyttelse været for nedadgående, og arealerne har været svagt faldende. Det hænger sammen med, at der indtil 2022 var rigeligt med andre biomassekilder til rådighed, og priserne derfor har været lave. Samtidigt har den store anvendelse af biomasse i kraftvarmesektoren primært været drevet af træpillefyring, hvilket de små kvantiteter af energiafgrøder i Danmark ikke har egnet sig til at bidrage til. Inden for det seneste år har prisforholdene ændret sig drastisk på både biomasse, fødevarer og inputfaktorer, specielt gødning. Det er derfor p.t. ganske svært at vurdere, hvilken vej udviklingen vil gå fremover.

Potentialet for udnyttelse af træbiomasse til energi er stort i fjernvarme- og kraftvarmeværker. Der er dog visse kvalitetsmæssige udfordringer, som skal håndteres ved omstilling fra enten skovflis eller træpiller til pile- eller poppeflis, hvilket oftest afspejles i en lidt lavere afregningspris. Klimarådet (2020) har inkluderet et scenarie med 25.000 ha energipil. At opnå en sådan større arealændring vil dog kræve en række tiltag implementeret parallelt (se forslag i Larsen et al., 2015), hvis landmændene skal føle et incitament for at plante en kultur med en lang afbetalingshorisont.

Elefantgræs kan være relevant til biogasudnyttelse, men ellers er det mere sandsynligt, at der vil blive dyrket elefantgræs til tækning (se www.miscanthus.dk), hvilket har en langt højere markedsværdi. Forsyning af det nordeuropæiske marked med elefantgræs til tækning vurderes at kunne ske fra ca. 8.000 ha. Tækning i byggesektoren er én måde at øge anvendelsen af biogene materialer i byggeriet, hvorved der kan lagres CO₂ over en lang periode, og materialer med højt CO₂-aftryk kan erstattes (Rasmussen et al., 2022).

7.8.3 Effekt på drivhusgasudledning

I det følgende er regnet på effekter af pileydrkning, som er den arealmæssigt største afgrøde i dag. Andre flerårige energiafgrøder (fx poppel og elefantgræs) kan afvige en smule herfra, men det vurderes at være indenfor usikkerheden på estimatet. Der regnes med en gødningsnorm på 120 kg N/ha til pil på alle jordtyper (Landbrugsstyrelsen, 2022c). De afgrøder, som pilen vil afløse, antages at være et standard kornsædskifte, der i gennemsnit har en norm på 171 kg N/ha i 2022 (Mikkelsen et al., 2022), hvorved der fås en gødningsbesparelse på 51 kg N/ha. Antages en ammoniakfordampning på 4% af udbragt N i handelsgødning fås en reduktion på 2 kg N/ha. Der er beregnet et lavere input i planterester (minus 21 kg N/ha) i forhold til en almindelig kornafgrøde, se afsnit 4.2.5. Der regnes med en gennemsnitlig reduktion i N-udvaskning på 51 kg N/ha for sandjord og 35 kg N/ha for lerjord baseret på Eriksen et al. (2020). Dette giver reduktioner i lattergasemissioner svarende til 212, 8, 87 og 86 kg CO₂-ækv/ha/år for henholdsvis reduceret gødsking og ammoniakfordampning, færre planterester og reduceret nitratudvaskning.

Energiforbruget ved almindelig korndyrkning antages at svare til 361 kg CO₂/ha/år (afsnit 4.2.5), og dette kan reduceres til 160-180 kg CO₂/ha/år ved pileydrkning (Sørensen et al., 2014; Sopegno et al., 2016). Ved anvendelse af 170 kg CO₂/ha/år opnås en årlig besparelse på 191 kg CO₂/ha ved omlægning fra korndyrkning til flerårige energiafgrøder.

Flerårige energiafgrøder er tidligere beregnet at øge jordens kulstofindhold sammenlignet med almindelig korndyrkning uden efterafgrøder svarende til en binding på 1,57 ton CO₂/ha/år (Olesen et al., 2013). Der er dog betydelig usikkerhed omkring denne størrelse, da der kan findes meget forskellige resultater i litteraturen. Pugesgaard et al. (2014) var i god overensstemmelse med ovenstående, idet CO₂ lagring på 0,77-2,24 ton CO₂/ha/år blev beregnet for henholdsvis ældre og yngre pilebeplantninger, mens der ved hvededyrkning blev beregnet et fald i jordens kulstoflagring svarende til 0,59 ton CO₂/ha/år. På den anden side finder Georgiadis et al. (2017) stigninger på i gennemsnit 0,66 ton CO₂/ha/år efter omlægning af pil og poppel fra enårige afgrøder, mens Morrison et al. (2019) finder en stigning på ca. 0,73 ton CO₂/ha/år. Georgiadis et al. (2017) gennemførte en grundig analyse af 26 marker med pil og poppel, hvor der blev taget højde for den ændring i jordens densitet, som opstår over tid ved fravær af jordbearbejdning. Resultaterne viste et højere kulstofindhold (i forhold til nabomarker med enårige landbrugsafgrøder) i de øverste 10 cm efter op til omkring 30 år efter omlægningen, mens der var meget lille effekt, når hele jordprofilen blev inddraget. Der tages her udgangspunkt i undersøgelsen af Georgiadis et al. (2017), og der

regnes med en forøgelse af jordens kulstofindhold ved omlægning til flerårige energiafgrøder svarende til 0,66 ton CO₂/ha/år.

Den samlede effekt af omlægning til energiafgrøder er årlige reduktioner på ca. 1,25 ton CO₂-ækv/ha. Der er dog pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord (LULUCF) skal beregnes med henblik på at indregne det i landbrugets udledninger og i hvilken udstrækning det vil blive muligt. Der tages derfor forbehold mht. at LULUCF bidraget kan adderes direkte til de øvrige poster.

7.8.4 Samspil til andre virkemidler

Flerårige energiafgrøder kan erstatte kravet om efterafgrøder, hvis de er anlagt efter planperioden 2008/09 (Landbrugsstyrelsen, 2022a). Omregningsfaktoren for etablering af energiafgrøder, som alternativ til etablering af pligtige efterafgrøder, er 0,8:1, hvilket betyder, at man skal udlægge 0,8 ha energiafgrøder for at erstatte 1 ha efterafgrøder.

7.8.5 Usikkerheder

Flerårige energiafgrøder forventes at opbygge organisk stof i jorden, men de seneste målinger har vist mindre opbygning end tidligere antaget. Beregninger af ændringer over tid er dog meget påvirket af evt. samtidige ændringer i jordens densitet, som påvirker massen af jord analyseret ved fast prøvetagningsdybde (Georgiadis et al., 2017), og dette bør undersøges nærmere. Stigning i jordens indhold af organisk stof ved overgang til ændret dyrkningsform vil fortsætte i en årrække, hvorefter en ny ligevægt forventes at indtræffe. Længden af denne overgangsperiode kan variere fra 20-100 år alt efter hvor store ændringer i C-input til jorden, der er ved overgangen samt jordtype, klima m.m. (Jensen et al., 2022).

Pil har en N-kvote på 120 kg N/ha. Der er dog tegn på, at det er i overkanten – i hvert tilfælde på bedre jorder (egne observationer). En reduktion til fx 75 kg N/ha, svarende til normen for elefantgræs og elletræer (Landbrugsstyrelsen, 2022c), vil reducere det beregnede lattergasbidrag med yderligere 211 kg CO₂-ækv/ha/år.

Referencer

- Børgesen, C.D., Dalgaard, T., Pedersen, B.F., Kristensen, T., Jacobsen, B.H., Jensen, J.D., Gylling, M., Jørgensen, U. (2018). Kan reduktionsmålsætninger for nitratudvaskning til Limfjorden opfyldes ved øget dyrkning af biomasse. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport Nr. 131.
- Cacho, J.F., Negri, M.C., Zumpf, C.R., Campbell, P. (2018). Introducing perennial biomass crops into agricultural landscapes to address water quality challenges and provide other environmental services. WIREs Energy Environ 2018, 7:e275.

- Georgiadis, P., Vesterdal, L., Stupak, I., Raulund-Rasmussen, K. (2017). Accumulation of soil organic carbon after cropland conversion to short-rotation willow and poplar. *Global Change Biology Bioenergy* 9, 1390-1401.
- Jensen, J.L., Eriksen, J., Thomsen, I.K., Munkholm, L.J., Christensen, B.T. (2022). Cereal straw incorporation and ryegrass cover crops: the path to equilibrium in soil carbon storage is short. *European Journal of Soil Science*, 73(1), [e13173]. <https://doi.org/10.1111/ejss.13173>
- Klimarådet (2020). Kendte veje og nye spor til 70 procents reduktion - Retning og tiltag for de næste ti års klimaindsats i Danmark. Klimarådet, 154 s.
- Landbrugsstyrelsen (2022a). Alternativer til efterafgrøder 2022. Notat af maj 2022, [https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Landbrug/Efterafgroeder_og_jordbearbejdning/Faktaark - alternativer til efterafgroeder 2022.pdf](https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Landbrug/Efterafgroeder_og_jordbearbejdning/Faktaark_-_alternativer_til_efterafgroeder_2022.pdf)
- Landbrugsstyrelsen (2022b). Opgørelse af afgrødefordeling 2022. Notat af 15. juli, https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Tilskud/Arealtilskud/Direkte_stoette_-_grundbetaling_mm/2022/Opgoerelse_af_afgroedefordelingen_2022.pdf
- Landbrugsstyrelsen (2022c). Vejledning om gødsknings- og harmoniregler Planperioden 1. august 2022 til 31. juli 2023. 162 pp, https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Landbrug/Goedningsregnskab/Vejledning_om_goedskning_og_harmoniregler_2022_2023.pdf
- Larsen S.U., Pedersen J., Hinge J., Rasmussen H.K., Damgaard C., Jørgensen U., Lærke P.E., Knudsen M.T., De Rosa M., Hermansen J.E., Jørgensen K., Holbeck H.B., Løbner R., Eide T., Birkmose T.S. (2015). Kortlægning af potentiale og barrierer ved energipil. Energistyrelsen. 161 s.
- Mikkelsen, M.H., Albrechtsen, R., Gyldenkerne, S. (2022). Sammenligning af klimaeffekter - Emissionsopgørelse, emissionsfremskrivning og Klimaeffekttabel. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 166 s. - Videnskabelig rapport nr. 501 <http://dce2.au.dk/pub/SR501.pdf>
- Morrison, R., Rowe, R.L., Cooper, H.M., McNamara, N.P. (2019). Multi-year carbon budget of a mature commercial short rotation coppice willow plantation. *GCB Bioenergy* 11, 895-909.
- Olesen, J.E., Jørgensen, U., Hermansen, J.E., Petersen, S.O., Eriksen, J., Søgaard, K., Vinther, F.P., Elsgaard, L., Lund, P., Nørgaard, J.V., Møller, H.B. (2013). Effekter af tiltag til reduktion af landbrugets udledninger af drivhusgasser. Aarhus Universitet, DCA Rapport nr. 27.
- Pugesgaard, S., Schelde, K., Larsen, S.U., Lærke, P.E., Jørgensen U. (2014). Comparing annual and perennial crops for bioenergy production - influence on nitrate leaching and energy balance. *Global Change Biology Bioenergy* 7, 1136-1149.

- Rasmussen, T.V., Thybring, E.E., Munch-Andersen, J., Nord-Larsen, T., Jørgensen, U., Gottlieb, S.C., Bruhn, A., Rasmussen, B., Beim, A., Thomsen, M.R., Munch-Petersen, P., Primdahl, M.B., Bentsen, N.S., Frederiksen, N., Koch, M., Beck, S.A., Bretner, M.-L., Wittchen, A. (2022). Biogene materialers anvendelse i byggeriet. BUILD Rapport 2022:09 Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet, 209 pp.
- Sopegno, A., Rodias, E., Bochtis, D., Busato, P., Berruto, R., Boero, V., Sørensen, C. (2016). Model for Energy Analysis of Miscanthus Production and Transportation. *Energies* 2016, 9, 392; doi:10.3390/en9060392
- Sørensen, C.G., Halberg, N., Oudshoorn, F.W., Petersen, B.M., Dalgaard R. (2014). Energy Inputs and GHG Emissions of Tillage Systems. *Biosystems Engineering*, Volume 120, April 2014, Pages 2–14

7.9 Pløjefri dyrkning og forbud mod jordbearbejdning i visse perioder (KVM7.9)

Forfattere: Lars J. Munkholm og Elly Møller Hansen, begge fra Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

Pløjefri dyrkning og forbud mod jordbearbejdning i visse perioder indbefatter en reduceret intensitet af jordbearbejdningen eller ingen jordbearbejdning i hele sædskiftet eller i givne perioder af året. Det antages, at omsætningen af organisk stof i jorden – og dermed frigørelsen af kulstof og kvælstof – mindskes ved pløjefri dyrkning og forbud mod jordbearbejdning i visse perioder i forhold til et traditionelt system med stubbearbejdning og pløjning (Myrbeck, 2014). Det fremhæves af Myrbeck (2014), at jordbearbejdningens effekt på mineraliseringen er kompleks, og at effekten afhænger af både tid og sted. Pløjefri dyrkning og forbud mod jordbearbejdning i visse perioder forventes at påvirke emissionerne relateret til energiforbrug til jordbearbejdning, kulstoflagring og lattergasemission fra marken.

7.9.1 Anvendelse

Pløjefri dyrkning

Traditionel jordbearbejdning under danske forhold består af pløjning (vendende jordbearbejdning) til 20-25 cm dybde, såbedstilberedning i 5-10 cm dybde og afsluttes med såning. Pløjefri dyrkning betegner et dyrkningssystem, hvor afgrøderne etableres uden anvendelse af pløjning. Det praktiseres normalt ved at foretage én eller flere harvninger forud for såning. Dette system betegnes ofte "reduceret jordbearbejdning". I den internationale litteratur benyttes betegnelsen "reduceret jordbearbejdning" også i tilfælde, hvor stubbearbejdning undlades efter høst, mens pløjning foretages om vinteren eller om foråret (her kaldet "pløjning uden stubbearbejdning"). Direkte såning ("No-tillage", "direct drilling") betegner den mindst intensive form for pløjefri dyrkning – her etableres afgrøden uden forudgående jordbearbejdning før såning og ved minimal jordforstyrrelse ved såningen. I den internationale litteratur anvendes ofte begreberne "Conservation tillage" og "Conservation agriculture". Conservation tillage beskriver et system, som mindsker følsomheden over for vind- og vanderosion og indbefatter generelt, at der er minimum 30% dække af afgrøderester på jordoverfladen efter høst (Carter, 2005). Dette kan opnås ved enten direkte såning eller reduceret jordbearbejdning med lav intensitet. Conservation agriculture beskriver et dyrkningssystem der omfatter: 1. minimal jordbearbejdning (dvs. direkte såning), 2. permanent jorddække med planterester eller levende planter og 3. alsidige sædskifter og samdyrkning af afgrøder (<http://www.fao.org/conservation-agriculture/overview/principles-of-ca/en/>).

Forbud mod jordbearbejdning i visse perioder

Virkemidlet "Forbud mod jordbearbejdning i visse perioder" er implementeret i gældende lovgivning som et kvælstofvirkemiddel under overskriften "Forbud mod jordbearbejdning forud for vårsåede afgrøder" (Landbrugsstyrelsen, 2022). Der gælder en række undtagelser for forbuddet mod jordbearbejdning i

forbindelse med dyrkning af visse afgrøder. Økologisk jordbrugsproduktion er generet undtaget (Landbrugsstyrelsen, 2022).

7.9.2 Relevans og potentiale

Ifølge Danmarks statistik blev der i 2021 dyrket 575.053 ha med pløjefri dyrkning, hvoraf de 499.957 ha var med reduceret jordbearbejdning og de 75.097 ha uden bearbejdning af hele jordoverfladen (direkte såning) ud af et samlet dyrket areal på 2.618.399 ha (Danmarks Statistik, landbrugs- og gartneritællingen). Hvis arealet med afgrøder udenfor omdrift, græs indenfor omdriften og braklægning fratrækkes det samlede, dyrkede areal er der 2.026.984 ha, hvor der årligt etableres en afgrøde (potentielt pløjet areal). Arealet med reduceret jordbearbejdning og direkte såning udgør således henholdsvis ca. 25 og 4 % af det årligt bearbejdede/tilsåede areal. Resten (1.451.930 ha) antages at være pløjet i 2021.

Forbud mod jordbearbejdning forud for vårsåede afgrøder er implementeret som et virkemiddel for hele landet. Ved etablering af forårssået afgrøde bliver der i mange tilfælde etableret en efterafgrøde som indarbejdes sent efterår/tidlig vinter (tidligst 20. oktober, Landbrugsstyrelsen, 2022) eller tidligt forår. Hvis der ikke dyrkes en efterafgrøde, må der i følge Landbrugsstyrelsen (2022) først jordbearbejdes efter 1. oktober (JB7-9), 1. november (JB 5-6 og JB 10-11) eller 1. februar (JB 1-4).

7.9.3 Effekt på drivhusgasudledning

Pløjefri dyrkning forårsager normalt en omfordeling af kulstoffet imellem jordlagene (Gómez-Muñoz et al., 2021). Den samlede effekt på kulstoflagringen i jordprofilen er imidlertid variabel og afhængig af de specifikke forhold (Ogle et al., 2019). Sun et al. (2020) viser, at effekten af pløjefri dyrkning aftager med øget nedbør/koldere klima og den er meget lille under kolde og nedbørsrige forhold som de danske. Det bekræftes af danske studier (Gómez-Muñoz et al., 2021; Hansen et al., 2015; Schjøning og Thomsen, 2013). Munkholm et al. (2020) vurderede, at den direkte effekt af reduceret jordbearbejdning eller direkte såning på kulstoflagring er begrænset sammenlignet med pløjet. Dog viser Gómez-Muñoz et al. (2021), at der en tendens til øget kulstoflagring for direkte sået i forhold til pløjet efter 17 års forsøg.

Lattergasemission under omsætningen af planterester (halm, efterafgrøder) vil muligvis påvirkes af forskellen i nedbrydningsforholdene mellem pløjet og reduceret jordbearbejdning/direkte såning. I den internationale litteratur er der mht. lattergasemission fundet færre positive og flere negative resultater (øget emission) ved pløjefri dyrkning sammenlignet med pløjning (Mei et al., 2018). Under danske forhold – veldrænede jorde med relativt lavt lerindhold – er der derimod fundet lavere lattergasemission ved pløjefri dyrkning end for pløjet i en række kortvarige studier målt i et langvarigt sædskifte- og jordbearbejdningforsøg (CENTS) i Foulum (Chatskikh & Olesen, 2007; Chatskikh et al., 2008; Mutegi et al., 2010; Petersen et al., 2011; Taghizadeh-Toosi et al., 2022). Bedre iltforsyning ved omsætning af planterester placeret på eller nær overfladen i pløjefri dyrkning er formentlig årsagen til dette. Der er behov for undersøgelser på flere jordtyper i og flere perioder for at kvantificere om ovennævnte målinger i Foulum

forsøget er generelt gældende under danske forhold. Da den nuværende metode til at beregne lattergasemission kun er baseret på N-input i planterester, vil emissionen i den nationale emissionsopgørelse være upåvirket af jordbearbejdningsmetode.

Der vil være en reduktion i det fossile energiforbrug til jordbearbejdning. De sparsomme udenlandske data er svære at fortolke i en dansk sammenhæng, da deres produktionssystemer afviger fra de danske. En tidligere dansk undersøgelse skønnede reduktionen i det fossile energiforbrug til jordbearbejdning til at være 22-60 % for reduceret jordbearbejdning og 70 % for direkte såning sammenlignet med pløjning (Olesen et al., 2005). Senere har Sørensen et al. (2014) beregnet en gennemsnitlige reduktion i dieselforbrug der var 21 og 43 % for henholdsvis reduceret jordbearbejdning og direkte såning sammenlignet med pløjning. Dieselforbruget til markarbejde udgør cirka 70 % af det totale fossile energiforbrug. Dermed er reduktionen i emission fra energiforbruget estimeret til 51 og 102 kg CO₂ ækv/ha for henholdsvis reduceret jordbearbejdning og for direkte såning.

Da det ikke forventes, at reduceret jordbearbejdning og direkte såning har effekt på input af kvælstof i handels- og husdyrgødning eller på udvaskningen, vil virkemidlet ikke påvirke de direkte og indirekte lattergasemissioner herfra.

Forbud mod jordbearbejdning forud for etablering af forårssåede afgrøder betyder at der enten etableres en efterafgrøde eller at der vokser ukrudt og spildkorn på jorden. For efterafgrøder henvises til særskilt afsnit om dette. Klimaeffekterne af ukrudt og spildkorn forventes at ligge imellem effekter af efterafgrøder og af bar (pløjet) jord.

7.9.4 Samspil til andre virkemidler

Hvor direkte såning kombineres med alsidige sædskifter, efterafgrøder og efterladelse af halm (Conservation Agriculture) er der overlap i forhold til virkemidlerne efterafgrøder, mellemafgrøder og nedmuldning af halm. Det vurderes, at den primære drivhusgaseffekt af Conservation Agriculture kan tillægges effekt af sædskifte, efterladelse af halm og efterafgrøder.

7.9.5 Usikkerheder

Den vurderede effekt af reduceret jordbearbejdning og direkte såning baserer sig på afsluttede og igangværende danske forsøg samt på øvrige erfaringer fra Nordeuropa. Samlet set vurderes den direkte effekt af reduceret jordbearbejdning og direkte såning at give en sikker mindre CO₂ udledning som følge af mindsket energiforbrug. Der er også god sikkerhed i forhold til vurdering af en beskeden direkte effekt af jordbearbejdning på kulstoflagringen i jorden. Derimod er der betydelig usikkerhed i forhold til vurderingen af nedsat risiko for lattergasemission ved reduceret jordbearbejdning og direkte såning, som beskrevet ovenfor.

Den samlede effekt af reduceret jordbearbejdning/direkte såning i kombination med alsidige sædskifter, efterafgrøder og efterladelse af halm (Conservation Agriculture) er mindre godt belyst, idet kun enkelte kombinationer af sædskifte, jordbearbejdning og jorddække er blevet undersøgt.

Referencer

- Carter, M.R. (2005). Conservation tillage. In: Hillel, D. (Ed.), Encyclopedia of Soils in the Environment. Elsevier, Oxford, pp. 306-311.
- Chatskikh, D., Olesen, J.E. (2007). Soil tillage enhanced CO₂ and N₂O emissions from loamy sand soil under spring barley. Soil and Tillage Research, 97(1), 5-18.
- Chatskikh, D., Olesen, J.E., Hansen, E.M., Elsgaard, L., Petersen, B.M. (2008). Effects of reduced tillage on net greenhouse gas fluxes from loamy sand soil under winter crops in Denmark. Agriculture, Ecosystems & Environment, 128(1-2), 117-126.
- Gómez-Muñoz, B., Jensen, L.S., Munkholm, L., Olesen, J.E., Hansen, E.M., Bruun, S. (2021). Long-term effect of tillage and straw retention in conservation agriculture systems on soil carbon storage. Soil Science Society of America Journal, n/a(n/a). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/saj2.20312>
- Hansen, E.M., Munkholm, L.J., Olesen, J.E., Melander, B. (2015). Nitrate leaching, yields and carbon sequestration after noninversion tillage, catch crops, and straw retention. Journal of Environmental Quality 44, 868-881.
- Landbrugsstyrelsen (2022). Vejledning om pligtige og husdyrefterafgrøder og dyrkningsrelaterede tiltag. Planperioden 1. august 2022 til 31. juli 2023. https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Landbrug/Efterafgroeder_og_jordbearbejdning/Vejledning_efterafgroeder_og_dyrkningsrelaterede_tiltag_for_2022_2023_maj2022.pdf
- Mei, K., Wang, Z., Huang, H., Zhang, C., Shang, X., Dahlgren, R.A., Zhang, M., Xia, F. (2018). Stimulation of N₂O emission by conservation tillage management in agricultural lands: A meta-analysis. Soil and Tillage Research, 182, 86-93. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.still.2018.05.006>
- Munkholm, L.J., Hansen, E.M., Melander, B., Kudsk, P., Jørgensen, L.N., Heckrath, G.J., Ravnkov, S., Axelsen, J.A. (2020). Vidensyntese om Conservation Agriculture. DCA rapport, nr. 177, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, <https://dcapub.au.dk/djfpublikation/index.asp?action=show&id=1455>
- Mutegi, J.K., Munkholm, L.J., Petersen, B.M., Hansen, E.M., Petersen, S.O. (2010). Nitrous oxide emissions and controls as influenced by tillage and crop residue management strategy. Soil Biology & Biochemistry, 42(10), 1701-1711.

- Myrbeck, Å. (2014). Soil tillage influences on soil mineral nitrogen and nitrate leaching in Swedish arable soils. Ph.d.-afhandling nr. 2014:71 ved Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Soil and Environment, Uppsala.
- Ogle, S.M., Alsaker, C., Baldock, J., Bernoux, M., Breidt, F.J., McConkey, B., Regina, K., Vazquez-Amabile, G.G. (2019). Climate and Soil Characteristics Determine Where No-Till Management Can Store Carbon in Soils and Mitigate Greenhouse Gas Emissions. *Scientific Reports* 9.
- Olesen, J.E., Hansen, E.M., Elsgaard, L. (2005). Udlledning af drivhusgasser ved pløjefri dyrkningssystemer, I: Olesen, J.E. (Ed.), *Drivhusgasser fra jordbruget - reduktionsmuligheder*: Foulum. DJF rapport, Markbrug nr. 113.
- Petersen, S.O., Mutegi, J.K., Hansen, E.M., Munkholm, L.J. (2011). Tillage effects on N₂O emissions as influenced by a winter cover crop. *Soil Biology & Biochemistry*, 43(7), 1509-1517.
- Schjønning, P., Thomsen, I.K. (2013). Shallow tillage effects on soil properties for temperate-region hard-setting soils. *Soil and Tillage Research* 132 (0):12-20.
- Sorensen, C.G., Halberg, N., Oudshoorn, F.W., Petersen, B.M., Dalgaard, R. (2014). Energy inputs and GHG emissions of tillage systems. *Biosystems Engineering* 120 2-14.
- Sun, W., Canadell, J.G., Yu, L., Yu, L., Zhang, W., Smith, P., Fischer, T., Huang, Y. (2020). Climate drives global soil carbon sequestration and crop yield changes under conservation agriculture. *Global Change Biology* n/a (n/a). doi:10.1111/gcb.15001
- Taghizadeh-Toosi, A., Hansen, E.M., Olesen, J.E., Baral, K.R., Petersen, S.O. (2022). Interactive effects of straw management, tillage, and a cover crop on nitrous oxide emissions and nitrate leaching from a sandy loam soil. *Science of the Total Environment*, 828, 154316. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154316>

7.10 Præcisionsjordbrug (KVM7.10)

Forfatter: Michael Nørremark, Institut for Elektro- og Computerteknologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

Præcisionslandbrug gør det muligt at tilpasse beslutninger om landbrugsdrift i forhold til geografiske og tidsmæssige variable for fx jordbundsforhold, maskiner, plantevækst, samt forekomst af ukrudt, sygdomme og skadedyr. Stedspecifikke registreringer, satellitter, sensorer, prøveudtagninger og styring af maskiner gør det muligt at behandle en vilkårlig mark som en heterogen enhed. Gennem målrettet brug af input, reducerer præcisionslandbrug derved både variable driftsomkostninger og miljøomkostninger. Præcisionsjordbrug fremstilles ofte som en metode til at øge effektiviteten i jordbruget, altså at producere den samme mængde med mindre indsats, eller en større mængde med samme indsats. I forhold til udledninger af lattergas er det især interessant, om der vil ske en reduktion i den samlede kvælstofanvendelse eller i kvælstoftabet.

7.10.1 Anvendelse

Præcisionsjordbrug dækker over flere teknologier og principper, som benævnes delvirkemidler i det følgende. Præcisionsgødskning defineres som to teknologier (som også gjort i ICF International, 2016) og energioptimeret markarbejde defineres også som to teknologier:

- Præcis spredning, hvor gødningsudstyret for uorganisk såvel som for organiske gødninger sikrer, at gødningen ved hjælp af auto- og sektionsstyring minimerer overlap ved gødskning. Omfatter også spredning med kantspredningsudstyr, hvorved granuleret kunstgødning ikke spredes til andre biotoper uden for markskel.
- Behovs- og positionsbestemt gødningstildeling er behovsbestemt gødskning kombineret med positionsbestemt tildeling baseret på bestemmelse af afgrødens næringsmæssige tilstand. Dette indebærer en gradueret tildeling af gødning inden for marken med henblik på at tilpasse tildelingen til det lokale kvælstofbehov, så kvælstofudnyttelsen på markniveau optimeres. Tildeling på baggrund af enten markvariationsdata i forhold til jordbund og/eller via sensorer, hvor det aktuelle gødningsbehov bestemmes. Uanset bedriftstype vil det være nødvendigt med mere præcis fastsættelse af udbyttepotentiale på markniveau. Fastsættelse af forventet udbytte niveau kombineret med forståelse for variationen i kvælstofbehov på markniveau vil imidlertid kunne optimere udnyttelsen af det tilførte kvælstof i variable mængder og dermed reducere kvælstoftabet (Nørremark et al., 2020).
- Maskin- og flådestyring omfatter overvågning af landbrugsmaskiner og udstyr i realtid, herunder position, rute forslag og effektivitet.

- Beslutningsstøttesystemer til brændstofoptimering for indstillinger af maskiners funktioner, jordbearbejdningsdybde, dæktryk m.v. i realtid. Omfatter målinger som foretages af maskiners elektronik under markarbejdet og som via software omsættes til beslutningsstøtte vist direkte på skærme/terminaler på maskinerne.

Behovs- og positionsbestemt tildeling anvendes i praksis ved udbringning af handelsgødning. Tildelingsprincipperne er også relevante i forhold til husdyrgødning. Sektionsafblænding på udstyr til udbringning af flydende såvel som fast husdyrgødning er teknisk set forskellige, alt afhængig af om sektionsstyringen sker manuelt eller positionsbestemt og automatisk. De markedsførende producenter af udstyr til udbringning af husdyrgødning er inden for de senere år begyndt at tilbyde positionsbestemt og automatisk sektionsstyring/sektionsafblænding. Ved gradueret tilførsel af handelsgødning vil der være tale om spredning af et ensartet produkt med fuld plantetilgængelighed, mens der ved gradueret tilførsel af husdyrgødning vil være betydelig større inhomogenitet i de anvendte gødninger samt varierende indhold af plantetilgængeligt kvælstof. Opnåelse af samme effekt ved gradueret tilførsel af husdyrgødning som med handelsgødning forudsætter stor omhu i prøvetagning og analysering af husdyrgødningen, samt at der tages hensyn til analyseresultaterne, dvs. indholdet af $\text{NH}_4\text{-N}$, ved den graduerede tilførsel (Nørremark et al., 2020).

7.10.2 Relevans og potentiale

Flere internationale undersøgelser har vurderet, at præcisionsjordbrug kan være et effektivt virkemiddel til emissionsreduktioner (fx Glenn et al., 2021; Finger et al., 2019; Rees et al., 2020; Sehy et al., 2003; Balafoutis et al., 2017). National bekendtgørelse om næringsstofreducerende tiltag og dyrkningsrelaterede tiltag i jordbruget for planperioden 2022/2023 har optaget behovs- og positionsbestemt gødskning, samt sektions- og autostyring som alternative tiltag til efterafgrøder i forholdet 11 ha for reduktion af 1 ha i efterafgrødekravet (retsinformation (Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri, 2022)). Præcisionsjordbrug forstås i den følgende sammenhæng som teknologier, der tillader en mere behovsbestemt variation af tildelingen af input (fx gødning, pesticider og vanding) udbragt til marker, samt præcise styre- og beslutningssystemer for at minimere eksempelvis tildelingsoverlap og brændstofforbrug. I forhold til udledninger af klimagasser, er det især den variable tildeling af kvælstofgødninger, der er interessant, da denne er kilde til både direkte og indirekte lattergasemissioner. Hvis præcisionsjordbrug kan øge kvælstofudnyttelsen af kvælstofgødninger og/eller reducere kvælstofudvaskningen, vil det kunne reducere de relaterede lattergasudledninger tilsvarende. I forhold til udledning af CO_2 er det forbruget af fossile brændstoffer for dyrkning af afgrøder som er interessant i forhold til nyere teknologier og beslutningsstøttesystemer som kan reducere brændstofforbruget. Det direkte brændstofforbrug for at dyrke 1 ha korn er sidst opgjort i 2005 (Dalgaard et al., 2002), og udgør ca. 70 l diesel for jordbearbejdning, plantepleje, høst og halmbjergning, og transport til/fra mark, eksklusive udbringning af husdyrgødning (0,3 (flydende) – 0,6 (fast) l diesel/tons (Dalgaard et al. (2002), dvs. ved 30 tons/ha udgør udbringning af

husdyrgødning ca. 9-18 l diesel/ha). Det vurderes ikke at strukturudviklingen mht. mekanisering og dyrkningsteknikker i landbruget har ændret væsentligt ved det direkte brændstofforbrug per ha i kornafgrøder siden opgørelsen i 2002. Maskin- og flådestyring omfatter overvågning af landbrugsmaskiner og udstyr i realtid, herunder position, ruteforslag og effektivitet. Denne teknologi sørger for at øge ressourceudnyttelsen og reducere mængden af brændstof i forbindelse med mark- og transportarbejde med landbrugsmaskiner, lastbiler m.v. Tilpasset og visualiseret køreteknik, hastighed og korrekt indstilling på maskiners skærme/terminaler reducerer brændstofforbruget og dermed CO₂-udledningen. Lavere motoromdrejninger, korrekt jordbearbejdningsdybde, og korrekt dæktryk er nogle få eksempler på åbenlyse fokusområder der kan sænke brændstofforbruget. Førere af maskiner bliver undervejs i markarbejdet anvist nye og optimerende indstillinger på baggrund af maskinernes målinger og beslutningsstøttemodeller foreslår ændringer under kørslen for at spare brændstof og/eller øge kapaciteten. Systemet måler kontinuerligt om ændringerne har effekt på brændstof og kapacitet, og erfaringen er at små optimeringer betyder større brændstofbesparelser (DLG, 2021).

7.10.3 Effekt på drivhusgasudledning

Forudsætninger:

Ved vurdering af effekter af præcisionsjordbrug på udledninger af lattergas tages her udgangspunkt i en økonomisk optimal kvælstofnorm på 183,3 kg N/ha i 2021 estimeret på baggrund af aktuel afgrødefordeling (Danmarks Statistik, 2022) og lineær udvikling af økonomisk optimal kvælstofnorm over årene 2006-2019 (Blicher-Mathiesen et al., 2020). Med indførsel af målrettet regulering vurderer Olesen et al. (2018) at det økonomisk optimale N-mængde reduceres med 7% for at tage hensyn til effekterne af denne regulering i de oplande som vil blive påvirket af reguleringen. Dette giver en gennemsnitlig kvælstofanvendelse på 170 kg N/ha. Ifølge Danmarks statistik blev der dyrket afgrøder uden pløjning på 499.957 ha i 2021 (Danmarks Statistik), hvor det samlede dyrkede areal med landbrugsafgrøder udgjorde 2.258.674 ha i 2021. For omregning af diesel til CO₂ ækvivalenter er faktor 2,66 kg CO₂ ækv./l diesel anvendt (se kapitel 4 for beregningsgrundlag).

Reduceret overlap ved N gødskning (direkte N₂O emission):

En reduktion af dette som følge af reduceret overlap ved brug af autostyring og sektionsstyring, dvs. 3,5 % plus 6,5 %, stemmer totalen nogenlunde overens med et finsk studie, hvor det blev fundet, at dyrkningsfladen arealmæssigt blev 'overbehandlet' med gns. 14,7 % for en arbejdsbredde på 16 m på 17 marker (gns. størrelse på 5,4 ha) (Kaivosoja & Linkolehto, 2016). Principperne for centrifugalspredere til spredning af kunstgødning er baseret på et vist overlap, således at kiler og lignende med overlap ikke nødvendigvis får 100 % men teoretisk set nærmere 50 % overgødskning i de tilfælde, hvor sprederen åbnes for tidligt, eller hvor plejesporene i kiler ligger tættere, end hvad der passer til spredebredden. For overlap med gylle er der derimod tale om dobbeltdosering. Der foreligger ikke konkrete studier for tildelt mængde

N før og efter indførsel af autostyring og sektionstyring på centrifugalspredere og udstyr til udbringning af husdyrgødning. Vurderingen er at udbragt N mængde reduceres med 5-7% efter indførsel af autostyring og sektionstyring. Denne reduktion vil ifølge IPCC AR5 og økonomisk optimal kvælstofnorm på tværs af afgrøder reducere lattergasudledningerne med 35-50 kg CO₂ ækv./ha/år. (jf. 4,16 kg CO₂ ækv./kg N i tildelt gødning).

Behovs- og positionsbestemt gødskning (direkte N₂O emission):

Lattergasemission fra kvælstofgødskning foregår i måneder efter gødskning og emissionsniveauet er afhængig af flere faktorer. Et tysk studie af lattergasemission med målinger fra dyrkning af majs på lerjord omkring München viste, at emissionen blev reduceret med 34 % i områder med lavt udbyttepotentiale, når den supplerende N tildeling (1 måned efter såning af majs og startgødning (40 kg N/ha)) blev reduceret fra 150 kg N/ha til 125 kg N/ha og uden at påvirke afgrødeudbyttet (Sehy et al., 2003). I områderne med højt udbyttepotentiale var lattergasemissionen ikke påvirket af øget N tilførsel fra 150 kg N/ha til 175 kg N/ha, hvor gns. udbyttet var lidt højere ved den høje N-tildeling, men ingen signifikante forskelle. Den generelle effekt af behovsbestemt kvælstofgødskning på markniveau i forsøgene var en reduktion i lattergasemission på 14 %. Emissionsfaktorerne for lattergas var generelt høje (mellem 1 % og 4 %). Et forsøgsmæssigt tilsvarende canadisk studie har ved pløjefri dyrkning af raps på lerjord, over to vækstsæsoner, målt lattergasemissioner med store variationer mellem vækstsæsoner. De signifikante faktorer der øgede den kumulative lattergasemission var NO₃-N i jorden og jordfugtighed (Glenn et al., 2021). Områderne med højt udbyttepotentiale havde de laveste emissionsfaktorer trods tildeling af 50% mere kvælstofgødning end det økonomiske optimale gødningsniveau, hvilket tydede på en mere effektiv næringsstofoptagelse i afgrøden. Lattergasemissionsfaktorer var lavere for områder med højt udbyttepotentiale (≈0,1 %, for begge vækstsæsoner) sammenlignet med områderne med lavt udbyttepotentiale (henholdsvis 0,9 % og 0,2 % for de to vækstsæsoner), hvilket indikerer at behovs- og positionsbestemt kvælstofgødskning kan reducere lattergasemission fra raps i dette tilfælde. Resultaterne viste endvidere, at den generelle effekt af behovs- og positionsbestemte kvælstofgødskning var en reduktion i lattergasemission på henholdsvis 20 % og 9 % for de to vækstsæsoner, hvor sidste vækstsæson vejrmæssigt var et mere normalt år. Aktuelt anvender DK IPCC Tier 1 i opgørelsen af lattergasemissioner fra landbrugsjord. Tier 1, lattergasemission i kg N₂O-N/ha er 1% af udbragt kg N/ha. Ved en gns. kvælstofnorm på 170 kg N/ha er lattergasemissionen 1,7 kg N₂O-N/ha. En reduktion ved omfordeling og variable tildeling af N ud fra økonomisk optimale gødningsniveauer på delmarker vurderes på baggrund af de nævnte studier at andrage 9-14 %, hvilket svarer til 63-99 kg CO₂ ækv./ha/år. Dog er denne vurdering forudsat at effekten gælder for andre landbrugsafgrøder, hvor lignende undersøgelser ikke forefindes. Det vurderes dog på baggrund af de faktorer, som har betydning for lattergasemission, at afgrødernes evne til at optage N har en betydning, men at jordens fugtighed, NO₃-N indhold, temperatur og struktur har signifikant betydning for lattergasemission, som vist i ovenstående tyske og canadiske forsøg.

Behovs- og positionsbestemt gødskning (indirekte N₂O emission):

Behovs- og positionsbestemt plantedyrkning sigter på at graduere tildeling af gødning inden for marken, så kvælstofudnyttelsen på markniveau optimeres. Den miljømæssige gevinst i form af reduceret udvaskning opnås især, hvis gradueringen hindrer overgødskning af arealer, hvor kvælstofoptaget er begrænset af forskellige årsager, idet marginaludvaskningen må forventes høj på sådanne arealer. I Future Cropping projektet er der estimeret væsentligt højere udvaskning hvor plantetætheden er lav (M. Styczen, personlig kommunikation, 7. juni, 2019). Schelde et al. (2014) har beskrevet kvælstofeffekten i rodzonen ved anvendelse af positionsbestemt tilførsel af gødning. Konklusionen omkring kvælstofudvaskning er baseret på studier udført af Berntsen et al. (2006), som estimerede kvælstofudvaskning ud fra en forbedret kvælstofudnyttelse. Effekten vil være afhængig af krumning af marginaludvaskningskurven, og idet mange forsøg er gødet til et niveau, hvor marginaludvaskningskurven er lineær, betyder det, at der ikke umiddelbart er en stor effekt på kvælstofudvaskningen ved at flytte rundt på gødningen. I en dansk kontekst er vurderingen altså, at behovs- og positionsbestemt gødskning kun i mindre grad vil reducere den samlede anvendte kvælstofmængde men i stedet føre til en omfordeling af gødningen på landbrugsarealet, hvilket medfører en mindre reduktion i kvælstofudvaskningen, der er vanskelig at kvantificere.

Ifølge en svensk analyse opgjort med VERA-modelberegninger (Aronsson & Torstensson, 2004) er der reduktion i kvælstofudvaskning ifm. stedspecifik kvælstoftildeling i korn på baggrund af 135 markregistreringer med sensor (Söderström et al., 2004). Modelberegningerne viste en reduktion i kvælstofudvaskningen på 1,7 kg N/ha for en sandjord (mindre end 5 % ler) og 0,7 kg N/ha for en jord med højt lerindhold (mere end 40 % ler) afhængigt af graden af variation i udbyttepotentiale inden for de analyserede marker (Delin et al., 2015). I modelberegningerne indgik normalfordeling af kvælstofdoser omkring økonomisk optimum med ned til 30 kg N/ha under og op til 50 kg N/ha over optimum. Stedsspecifik kvælstoftildeling blev sammenlignet med modelberegninger for ensartet tildeling ved forskellige jordtyper (jf. lerindhold) og variationer inden for marker (Delin et al., 2015). Fortolkningen af den svenske analyse forudsætter, at der nøje vurderes et gennemsnitligt udbyttepotentiale ifm. gødningsplanlægning for de enkelte marker. Omfordeling af kvotekvælstof for den enkelte mark fordeles inden for marken efter behov ud fra udbytteregistreringer/-erfaring og/eller sensor data. Det forudsættes også, at kvotekvælstof flyttes mellem marker alene ud fra behov. I de tilfælde, hvor der forventes et lavere udbytte, vil kvælstoftilførslen kunne reduceres, hvilket vil reducere udvaskningen. Modsat kan en mere præcis fastsættelse også bevirke, at udbytteniveauet sættes højere i nogle marker, og såfremt der er ikke-udnyttet kvælstofkvote på ejendommen, kan dette betyde en øget tilførsel, der alt andet lige forventes at øge udvaskningen marginalt. Gødskning efter sensor forventes at have et potentiale, hvor sensorer anvendes til at estimere gødningsvirkning af tildelt kunst- eller husdyrgødning, så der gødskes i forhold til målt (reduceret) kvælstofbehov i stedet for efter kvotekvælstof. Samlet set kan en detaljeret fastsættelse af kvælstofbehovet på markniveau således resultere i uændret, lavere eller øget kvælstofforbrug på bedriftsniveau. Berntsen et al. (2004) skønnede, at forbedret kvælstofudnyttelse som følge af positions- og

behovsbestemt gødskning kan reducere udvaskningen med op til 3 kg N/ha. Schelde et al. (2014) vurderede, at effekten generelt kan ventes at være 1-2 kg N/ha. Der er ikke nyere danske eller internationale forskningsresultater og pilotprojekter, der giver anledning til at ændre dette skøn. Større reduktion i kvælstofudvaskning kan muligvis opnås, hvis overgødskning af grovsandede partier og områder med lav plantetæthed i marken undgås. Ligeledes forbedres teknologierne og strategierne løbende under danske forhold for bestemmelse af det optimale og stedspecifikke niveau for næringsstofftilførsel (fx Peng et al. 2021; Revenga et al., 2022). En reduktion af N-udvaskningen med 1-2 kg N/ha vil reducere lattergasudledningerne fra grundvand, dræn, søer og vandløb i størrelsesordenen 2-4 kg CO₂ ækv./ha/år.

Brændstofbesparelser (direkte CO₂, CH₄ og N₂O emission):

Måling af brændstofforbrug for traktorer ved vejtransport har vist at brændstofforbruget falder lineært med stigende dæktryk ved forskellige belastningsniveauer (Udompetaikul et al., 2011). I forsøgene af Udompetaikul et al. (2011) blev der målt op til 11% reduktion i brændstofforbrug ved at ændre traktorens dæktryk fra 9 psi til 23 psi ved kørsel på asfalteret vej. Under danske markforhold er automatisk dæktryksregulering afprøvet (Lyngvig og Højholdt, 2017). Forsøgene blev udført på forskellige jordtyper ved stubharvning i 20 cm dybde. Den gennemsnitlige brændstofbesparelse ved at sænke dæktrykket fra 1,6 bar til 0,8 bar var 7 %. Miljøeffekter af automatisk dæktryksregulering er beregnet ud fra standardopgørelser for brændstofforbrug i Grøn Viden nr. 260 (Dalgaard et al., 2002) for henholdsvis vejtransport (5 l/ha) og markkørsel, for konventionelle bedrifter (65 l/ha). Ovennævnte procentiske brændstofbesparelser udgør samlet set ca. 5 l diesel/ha om året. Tilpasset dæktryksregulering er indenfor de seneste par år blevet integreret med beslutningsstøttesystemer (DSS) på traktorer og høstmaskiner. DSS software på maskinernes terminaler/skærme assisterer førere for indstilling af alle funktioner i relation til optimering af brændstofforbrug, effektivitet m.v. før og under kørsel ved et givent mark- eller transportarbejde. Effekten af et markedsført DSS er undersøgt af det tyske DLG i 2020, hvor der for 10 traktorførere fra hele Europa blev registreret en gns. brændstofbesparelse på 6% for jordbearbejdning når DSS blev anvendt i sammenligning med uden DSS. DSS kan umiddelbart optimere alt mark- og transportarbejde, hvorved brændstofbesparelsen på baggrund af ovenstående danske og tyske undersøgelser vurderes at antage ca. 4-5 l/ha pr. år, hvilket svarer til ca. 11-13 kg CO₂ ækv./ha/år. Autostyring har som nævnt ovenfor en reduktion i overlap med 3,5%. En sammenligning af manuel og autostyring for såning i pløjet jord har vist, at autostyring kan reducere brændstofforbruget med 6% ved 4 m arbejdsbredde og en 5 ha stor mark (Scarfone et al., 2021). Autostyring har derved også en mindre effekt på brændstofforbruget med 2-3 l/ha/år, når teknologien anvendes ifbm. markkørsel hvor overlap mellem spor og behandlinger kan reduceres, som svarer til 5 – 8 kg CO₂ ækv./ha/år.

En prototype for optimering af kørselsmønstre og ruter for markarbejde har vist sig at reducere brændstofforbruget med 7-8% som følge af reduceret total kørselslængde (gns. af 12 marker i DK, 120 ha i alt, 6,6 m arbejdsbredde) (Edwards et al. 2017). Nørremark et al. (2022) har sammenholdt almindelig

praksis for høstarbejde i DK med en prototype af et flådestyringssystem og derved opnået 7 % reduktion i brændstofforbruget for frakørselsvogne ifbm. høstarbejde i korn, frø og raps, inklusive indførsel af kontrolleret trafik. Herved blev risikoen for skadelig jordpakning reduceret med 25 % og antallet af kørsler med frakørselsvogne fra mark til lager blev reduceret med 14 %. Potentialet for reduktion i brændstofforbrug ved hjælp af optimering af kørselsmønstre, ruter og flådestyring vokser med kompleksiteten af markernes form, afstand fra mark til lager og antallet af maskiner og maskinførere som indgår i at udføre markarbejdet. De oplyste prototyper har derved en mindre effekt på brændstofforbruget med 4-6 l/ha når de anvendes i forbindelse markarbejde og transport, som svarer til 11 – 16 kg CO₂ ækv./ha/år.

Der er således store besparelsesmuligheder på brændstof alene, men det er vanskeligt at forudsige i hvilken udstrækning at værktøjerne vil blive udnyttet i landbruget, når systemer for optimering af kørselsmønstre og ruteplanlægning (markedsført) samt flådestyring er fuldt integeret med landbrugsmaskiner. Interessen for brændstofbesparelse har været stærkt stigende i de senere år med henblik på at reducere produktionsomkostningerne.

Den samlede effekt ved fuld brug af ovennævnte teknologiske muligheder for mere præcis styring af næringsstoffer og maskiner, ligger derfor skønsmæssigt på 127-190 kg CO₂-ækv/ha/år, hvilket, hvis opskaleret til hele det danske landbrugsareal, vil give årlige reduktioner i danske udledninger på 286-429 kt CO₂-ækv pr. år.

7.10.4 Samspil til andre virkemidler

Præcisionsgødskning defineret som ovenstående er antaget ikke at ændre kvælstofforbruget på bedriftsniveau. Virkemidlerne vil imidlertid have indflydelse på, hvor stor en del af det tilførte kvælstof, der er plantetilgængeligt. Dette kan opfattes som en ændring i kvælstoftilførslen, som via udbyttefunktioner kan omsættes til effekt på udbytte og bortførsel af kvælstof samt efterfølgende udvaskning. Det antages derfor, at bedriftenes kvælstofkvote anvendes, så mængden af kvælstof blot omfordeles inden for marken eller på bedriften. I princippet kunne delvirkemidlerne for præcisionsgødskning tilsammen medføre et reduceret kvælstofforbrug, hvilket i så fald ville svare til effekten af reduceret norm. Der kan dog også være tilfælde, hvor delvirkemidlerne vil indebære en forøgelse i forhold til normen på markniveau, hvilket i givet fald kun vil kunne lade sig gøre ved omfordeling mellem bedriftens marker.

Reduceret kvælstoftilførsel kan vekselvirke med andre virkemidler på markfladen. Eksempelvis kan effekten af efterafgrøder mindskes ved brug af reduceret kvælstoftilførsel, ved at kvælstof mineraliseringen fra afgrøderester i efteråret bliver mindre, hvorved kvælstoftilgængeligheden mindskes. Drænvirkemidler påvirkes på samme måde ved, at der udvaskes mindre nitrat med drænvandet.

Den potentielle udvaskningsreduktion fra dyrkningsfladen samlet set for de delvirkemidler under præcisionsgødskning vil mindske behovet for fjernelse af nitrat uden for dyrkningssæsonen.

7.10.5 Usikkerheder

Reducerende afledte effekter af behovs- og positionsbestemt gødskning direkte, såvel som indirekte på lattergasemissioner er ikke veldokumenterede under danske forhold. Vurderinger er bl.a. baseret på internationale studier, hvor dyrknings- og gødningspraksis ikke nødvendigvis er direkte sammenlignelige med de danske. De afledte effekter af præcis spredning af gødning på både direkte og indirekte (dvs. fra kvælstofudvaskning) lattergasemissioner er baserede på få studier og modelberegninger.

Dog er den primære fokus på næringsstofudnyttelsen i afgrøderne, hvorimod direkte effekter på udvaskning bliver undersøgt i mindre grad. Det skyldes primært, at effekterne på kvælstofudvaskning forventes relativt små, og derfor ikke vil kunne detekteres ved traditionelle målinger af kvælstofudvaskning. Studier i præcisionsjordbrug kræver desuden fuldskala-forsøg for at validere modelberegninger for kvælstofudnyttelse og/eller lattergasemissioner under varierende faktorer for udbyttepotentiale. Tidshorisonten for at skaffe data er mindst 3-5 år, idet der skal gennemføres modellering af effekten kombineret med markforsøg over flere år. Modelberegninger for kvælstof-udnyttelse og -udvaskning, herunder usikkerheder har været undersøgt under pilotprojektordningen (Nørremark et al., 2020).

Referencer

- Aronsson, H., Torstensson, G. (2004). Beräkning av olika odlingsåtgärders inverkan på kväveutlakningen: Beskrivning av ett pedagogiskt verktyg för beräkning av kväveutlakning från enskilda fält och gårdar. Ekohydrologi 78. Swedish University of Agricultural Sciences, Division of Water Quality Management, SLU, Uppsala.
- Balafoutis A., Beck B., Fountas S., Vangeyte J., Wal TVd., Soto I., Gómez-Barbero M., Barnes A., Eory V. (2017). Precision Agriculture Technologies Positively Contributing to GHG Emissions Mitigation, Farm Productivity and Economics. Sustainability, 9(8), 1339. <https://doi.org/10.3390/su9081339>
- Berntsen, J., Thomsen, A., Schelde, K., Hansen, O.M., Knudsen, L., Broge, N., Hougaard, H., Hørfarter, R., 2006. Algorithms for sensor-based redistribution of nitrogen fertilizer in winter wheat. Precision Agriculture 7, 65-83.
- Blicher-Mathiesen, G., Olesen, J.E. & Jung-Madsen, S. (red). (2020). Opdatering af baseline 2021. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 140 s. - Teknisk rapport nr. 162 <http://dce2.au.dk/pub/TR162.pdf>
- Dalgaard, T., Dalgaard, R., & Nielsen, A. H. (2002). Energiforbrug og økologiske og konventionelle landbrug. Grøn Viden - Markbrug, (260).
- Danmarks Statistik (2022). Danmarks Statistik – AFG5: Det dyrkede areal efter område, enhed og afgrøde. <https://www.dst.dk/da/Statistik/emner/erhvervsliv/landbrug-gartneri-og-skovbrug/det-dyrkede-areal>

- Delin, S., Gruvaeus, I., Wetterlind, J., Stenberg, M., Frostgård, G., Börling, K., Olsson, C.M., Krijger, A.-K. (2015). Fertilisation for Optimised Yield Can Minimise Nitrate Leaching in Grain Production. Artikel 774 i compendium fra International Fertiliser Society konference i Cambridge, England, 11. december 2015, 24 sider.
- DLG (2021). CEMOS TRAKTOR - Softwareversion: 6.12.6 Cebis. DLG-APPROVED: Driver assistance systems – fuel consumption and ha/hr performance in cultivation. DLG Test Report no. 7096. CEMOS tractor. https://pruefberichte.dlg.org/filestorage/7096_e.pdf
- Edwards, G. T. C., Hinge, J., Skou-Nielsen, N., Villa-Henriksen, A., Sørensen, C. A. G., & Green, O. (2017). Route planning evaluation of a prototype optimised infield route planner for neutral material flow agricultural operations. *Biosystems Engineering*, 153, 149-157. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.10.007>
- Finger, R., Swinton, S., El Benni, N., Walter, A. (2019) Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. *Annual Review of Resource Economics*, Vol. 11, Issue 1, pp. 313-335. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3468083> or <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-resource-100518-093929>
- Glenn, A.J., Alan P. Moulin, Amal K. Roy, Henry F. Wilson (2021). Soil nitrous oxide emissions from no-till canola production under variable rate nitrogen fertilizer management, *Geoderma*, Volume 385, 114857. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114857>
- ICF International (2016). Charting a Path to Carbon Neutral Agriculture: Mitigation Potential for Crop Based Strategies, ICF International, 1725 I Street, NW ,Washington, DC 20006, USA, 145 pp.
- Kaivosoja, J., Linkolehto, R. (2016). Spatial overlapping in crop farming works. *Agronomy Research*, 14, 41-53.
- Lyngvig, H.S., Højholdt, M. (2017). Brændstofforbrug ved harvning – forskellig harvedybde og dæktryk, med og uden pløjning. *Farmtest Maskiner og Planteavl* 147, SEGES, 19 pp.
- Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri (2022). Bekendtgørelse om næringsstofreducerende tiltag og dyrkningsrelaterede tiltag i jordbruget for planperioden 2022/2023. Retsinformation. <https://www.retsinformation.dk/eli/lt/2022/742>
- Nørremark, M., Hansen, E.M., Thomsen, I.K. (2022). Vurderingen af miljøeffekten ved variabel tildeling af husdyrgødning under præcisionslandbrug, Nr. 2021-0310376, 12 s., apr. 21, 2022. Rådgivningsnotat fra DCA – National Center for Fødevarer og Jordbrug

- Nørremark, M., Nilsson, R., Grøn Sørensen, C. (2022). In-Field Route Planning Optimisation and Performance Indicators of Grain Harvest Operations. *Agronomy*, 12(5), [1151]. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051151>
- Nørremark, M., Sørensen, P., Gislum, R., Rasmussen, J., Kudsk, P., Bruus, M., Strandberg, B., Rubæk, G.H., Hutchings, N.J., Pedersen, M.F. (2020). Præcisionsgødskning. I: Eriksen, J., Thomsen, I. K., Hoffmann, C. C., Hasler, B., Jacobsen, B. H. (redaktører), Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport nr. 174, s. 199-220. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>
- Olesen, J.E., Petersen, S.O., Lund, P., Jørgensen, U., Kristensen, T., Elsgaard, L., Sørensen, P., Lassen, J. (2018). Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug,. DCA rapport Nr. 130 <http://web.agrsci.dk/djfpublikation/index.asp?action=show&id=1273>.
- Peng, J., Manevski, K., Kørup, K., Larsen, R., Andersen, M.N. (2021). Random forest regression results in accurate assessment of potato nitrogen status based on multispectral data from different platforms and the critical concentration approach. *Field Crops Research*, vol. 268, pp. 108158. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108158>
- Rees, R.M., Maire, J.M., Florence, A., Cowan, N., Skiba, U.M., van der Weerden, T., Ju, X. (2020). Mitigating nitrous oxide emissions from agricultural soils by precision management. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 7(1), 75-80. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2019294>
- Revenga, J.C., Trepekli, K., Oehmcke, S., Jensen, R., Li, L., Igel, C., Gieseke, F.C., Friborg, T. (2022). Above-Ground Biomass Prediction for Croplands at a Sub-Meter Resolution Using UAV-LiDAR and Machine Learning Methods. *Remote Sens.* 2022, 14, 3912. <https://doi.org/10.3390/rs14163912>
- Scarfone, A., Picchio, R., del Giudice, A., Latterini, F., Mattei, P., Santangelo, E., Assirelli, A. (2021). Semi-Automatic Guidance vs. Manual Guidance in Agriculture: A Comparison of Work Performance in Wheat Sowing. *Electronics*, 10, 825. <https://doi.org/10.3390/electronics10070825>
- Schelde, K., Rubæk, G.H., Kudsk, P., Jørgensen, L.N., Olesen, J.E. (2014). Positionsbestemt tilførsel af gødning. I: Eriksen, J., Jensen, P.J., Jacobsen, B.H. (Redaktører) 2014. Virkemidler til realisering af 2. generations vandplaner og målrettet arealregulering. DCA Rapport nr. 052, Aarhus Universitet, pp. 149-154.
- Sehy, U., Ruser, R., Munch, J.C. (2003). Nitrous oxide fluxes from maize fields: relationship to yield, site-specific fertilization, and soil conditions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Volume 99, Issues 1–3, 97–111. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00139-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00139-7)
- Söderström, M., Nissen, K., Gustafsson K., Börjesson, T., Jonsson A., Wijkmark, L. (2004). Swedish Farmers' Experiences of the Yara N-Sensor 1998-2003. In: the Proc. of the 7th International Conf. on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management, Minneapolis, USA

Udompetaikul, V., Upadhyaya, S., Vannucci, B. (2011). The Effect of Tire Inflation Pressure on Fuel Consumption of an Agricultural Tractor Operating on Paved Roads. Transactions of the ASABE, 54(1), 25-30. <https://doi.org/10.13031/2013.36249>.

7.11 Reduceret kvælstofnorm (KVM7.11)

Forfattere: Christen Duus Børgesen, Institut for Agroøkologi; Gitte Blicher-Mathiesen, Institut for Ecoscience og Peter Sørensen, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

7.11.1 Anvendelse

Klimavirkemidlet reduceret kvælstofnorm antages som udgangspunkt alene at slå igennem på den mineralske kvælstoftilførsel til landbrugsafgrøder ved mindre mængder købt handelsgødningens kvælstof (N). Tilførslen fra husdyrgødning antages at være uændret ved dette virkemiddel. Der antages desuden, at en reduceret kvælstofnorm ikke fører til ændret afgrødevalg i konsekvensberegningerne.

Reduceret kvælstofgødskning kan medføre mindre afgrødeudbytte og lavere indhold af kvælstof i de høstede afgrøder, men kan også betyde mindre mineralsk kvælstofindhold i jorden efter høst, hvilket kan mindske risikoen for nitratudvaskning og denitrifikation. Under danske klimaforhold forekommer nitratudvaskning i begrænset omfang i vækstperioden (april til september), hvor fordampning overstiger nedbøren, mens vandoverskud forekommer efterår og vinter og udgør transportfaktoren for nitratudvaskningen fra rodzonen. Konsekvenser af lavere kvælstoftildeling på udbyttet på kort og langt sigt indgår i vurderingen af den mindre planteproduktion og dennes afledte effekt af færre afgrøderester tilbageført til jorden, hvilket giver mindre kulstoflagring i jorden.

7.11.2 Relevans og potentiale

Produktion af handelsgødningens N er en energitung produktion, som resulterer i dannelse af CO₂ og lattergas afhængigt af produktionsmetoden. Udbragt N i handelsgødning har både direkte og indirekte effekter på emissionen af drivhusgasser. De direkte effekter omhandler en mindre emission ved mindre produktion og tilførsel til marken. De indirekte effekter er mindre ammoniakemission, nitratudvaskning og denitrifikation. Den indirekte lattergasemission fra nitratudvaskning vil være variabel afhængig af, hvordan virkemidlet implementeres og bidrager til dannelse af drivhusgasser. Ligeså vil ammoniakfordampningen bidrage til drivhusgasemissionen, hvilket også er afhængigt af udbringningsmetoden af handelsgødningen.

7.11.2.1 Forbrug af handelsgødning

Ved det nuværende forbrug af N gødninger i Danmark bliver der anvendt mindre mineralsk kvælstof i landbruget end de samlede kvælstof (N) normer tillader jf. tabel 3.4 Blicher-Mathiesen et al. (2021). I figur 7.1 er vist udviklingen i handelsgødningens forbrug, den økonomisk optimale N tildeling, den lovbestemte aktuelle N norm og summen af udnyttet N fra alle gødninger baseret på data fra gødningsregnskaber fra danske landmænd jf. tabel 3.4 i Blicher-Mathiesen et al. (2021).

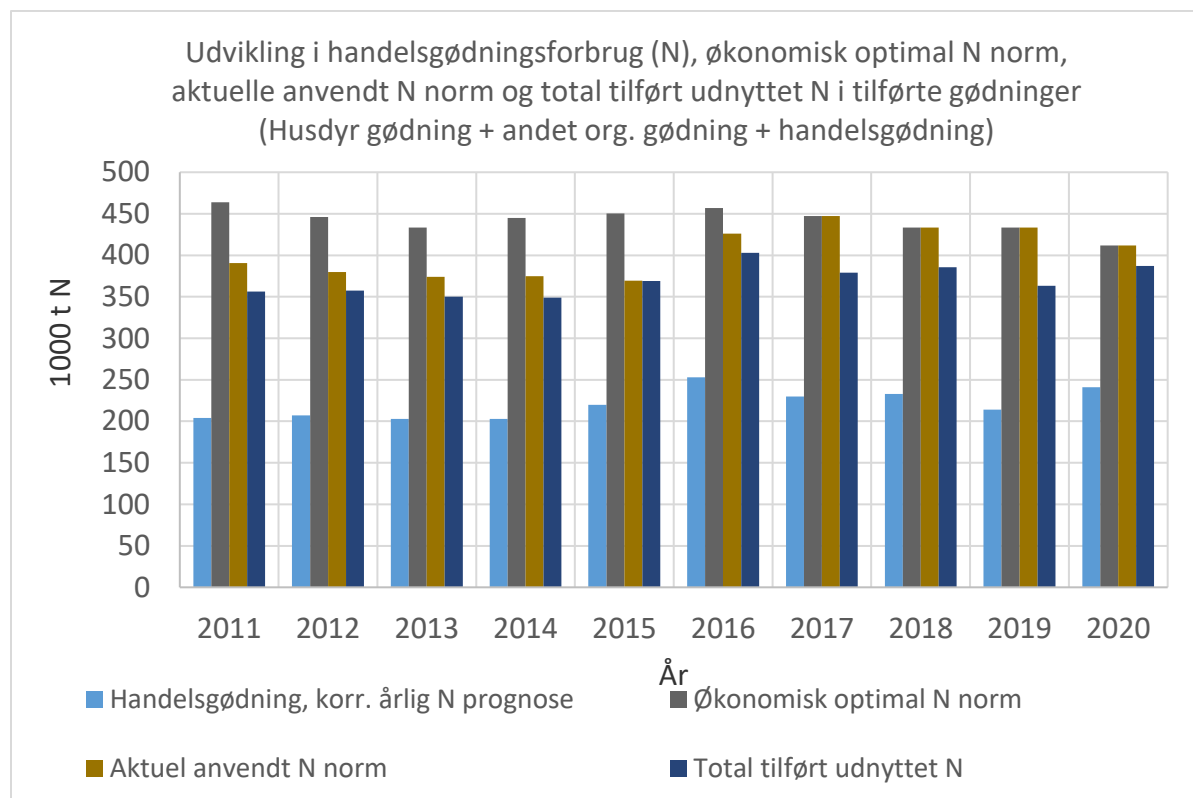
Anvendelse af reducerede N normer er opgjort som den gennemsnitlige udvikling i forbruget af N gødninger samt de summerede N gødningsnormer fra før (årene 2012-2015) og efter (årene 2017-2020) Fødevare- og LandbrugsPakken (FLP) fra 2015 (Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Miljø, 2015). Sammenholdes det samlede forbrug af handelsgødning efter FLP med forbruget i perioden før FLP ses en stigning i udbragt handelsgødnings N på i gennemsnit 26.000 tons N svarende til 10 kg N/ha. Korrigeres dette tal med øget N i husdyrgødning kan der opgøres en samlet gennemsnitlig stigning på 28.000 ton N i udnyttet N. Disse tal er påvirket af en række andre forhold der har betydning for opgørelse af effekten af øget N norm med FLP.

For at beregne en stigning i forbruget af handelsgødning efter FLP, der er rensat for andre ændringer i det økonomiske optimale N forbrug er der nederst i tabel 7.6 opgjort den gennemsnitlig "luft" for de to perioder (Kode K). Luften beregnes ved at beregne forskellen mellem den økonomisk optimale N tildeling (før og efter FLP), i forhold til hvor meget handelsgødnings-N der er tilført (korrigeret for årlig N prognose) plus summen af udnyttet N fra husdyrgødning og fra andre organiske gødninger. Den gennemsnitlige difference i luften mellem de to perioder (45.000 ton N) er et estimat for, hvor stor en stigning der er i anvendelsen af N gødninger efter at N normen blev sat lig med den økonomisk optimale N norm med FLP.

Denne stigning i N forbruget er noget lavere end tidligere prognoser for effekten af højere N normer med Fødevare og LandbrugsPakken fra 2016, opgjort i Børgesen et al., 2015 og senest i Blicher-Mathiesen et al. 2020. Dette kan til dels tilskrives et fald i den økonomisk optimale N mængde på 12.000 tons N der både skyldes: nedgang i dyrket areal, ændring i økonomisk optimale N normer samt ændret afgrødesammensætning. Desuden er der i perioden 2011 til 2020 set en stigning i det økologiske landbrugsareal i Danmark fra 6 % til ca. 12 % i 2020 (Landbrugsstyrelsen, 2022). På økologiske marker er det ikke muligt at udnytte en øget N norm i handelsgødning. Desuden kan økologiske marker efter 2015 ikke modtage mere end 100 kg udnyttet-N per hektar, hvilket også kan have haft betydning for den samlede udnyttelse af den forøgede N norm med FLP. Der bemærkes at denne maksimale udnyttet-N per hektar i perioden efter 2020 er steget fra 100 kg udnyttet-N per hektar til henholdsvis 107 og 65 udnyttet-N per hektar afhængig af arealtilskuds sats. Dette har dog ingen betydning for ændringer i N gødskningen i perioden 2017-2020 og forventes at indvirke minimalt på effekten af en fremtidig evt. N norm reduktion.

I tabel 7.6 er opgjort udviklingen i udnyttet N af den økonomisk optimale N norm for de to perioder. Denne stigning i udnyttet N (Kode H) ses overvejende som en stigning i handelsgødnings N (Kode A) men også en nedgang i dyrket areal, udviklingen i det økologiske areal og udviklingen i de aktuelle anvendte N normer for perioden (samlet i kode J). Der er en række faktorer involveret i udviklingen i N forbruget imellem de to perioder vist i tabel 7.6. Tilgængeligt data på landsplan gør det ikke muligt at adskille faktorerne individuelle betydning for udviklingen, hvilket medfører at der er usikkerhed på at ændringen i N forbruget. Det økologiske areal er steget i perioden hvilket medfører at en N norm stigning på disse arealer ikke kan udnyttes pga. restriktionerne på N-tilførselsloftet på økologiske arealer. Denne usikkerhed sammen med

andre forhold overføres til prognose for fremtiden i tabel 7.7. De anvendte N normer imellem de to perioder er steget med 57.000 ton N (Kode I), der ud over stigningen i afgrøde N normen efter FLP også er påvirket af de samme faktorer som beskrevet ovenfor.



Figur 7.1 Udbragt handelsgødning korrigeret for N prognose, årlige økonomiske N norm, den aktuelt gældende anvendte N norm samt udnyttet N for landbrugsarealet i Danmark i perioden 2011-2020. Efter Blicher-Mathiesen et al. 2021.

Tabel 7.6 Gennemsnit af landsdækkende forbrug af kvælstofgødning opgjort ud fra landmands indberettede GødningsRegnskaber (GR) som gennemsnit [1.000 ton N] for perioden 2012-2015 (Fødevarer og Landbrugspakken 2016. Før FLP) og perioden efter FLP (2017-2020). (Efter Blicher-Mathiesen et al., 2021, tabel 3.4).

		Genn. N 2012-2015	Genn. N 2017-2020	Ændring (Genn. 2017-2020) minus (Genn. 2012-2015)
Kode	Forbrug af kvælstofgødning	1000 ton N	1000 ton N	1000 ton N
A	Handelsgødning GR	203	229	26
B	N-prognosen	6	1	-5
C=A-B	Handelsgødning GR kor. N-prognosen	197	228	31
D	Husdyrgødning GR	216	219	3

E	Anden organisk gødning GR	7	8	1
F=A+D+E	Total forbrug af kvælstofgødning GR	426	456	30
G	Udnyttet husdyr og anden org. gødning GR	148	149	1
H=A+G	Total_aktuel udnyttet N I gødninger	351	378	28
	Kvælstofnormer uden udlæg og forfrugt			
I	Aktuel anvendt N normer	375*	432	57
J	Økonomisk optimal N norm.	444	432	-12
K=J-C-G	Ikke udnyttet Økonomisk N norm* "Luften"	99	55	-45

* Effekt af reducerede N normer i perioden 2012-2015.

7.11.2.2 Scenarie for effekt af en ny reduktion af N norm

Baseret på den observerede stigning i forbruget af primært handelsgødning N med FLP, forventes der med fremtidige reducerede afgrøde N normer, at reduktion i den samlede N kvote ikke slår fuldt igennem på forbruget af N gødning.

Konventionelle landbrug, hvor de reducerede N normer alene anses at slå igennem, har til en vis grad luft i N gødningstildelingen. Samlet er der "luft" (forskell mellem tilladt forbrug og aktuelt forbrug) i N gødningsregnskaberne for mange landmænd (jf. Fig 3.10 i Blicher-Mathiesen et al., 2021). En reduktion i kvælstofnormen vil derfor ikke nødvendigvis betyder mindre forbrug af handelsgødning N, da luften kan udnyttes til at opfylde kravet til en fremtidig N norm reduktion. For planteavlsbrug og svinebrug er der en generel tendens til at N normen udnyttes mere end for kvægbrug, hobbybrug og blandet husdyrbrug (jf. Fig 3.10 i Blicher-Mathiesen et al., 2021).

Således vil en N normreduktion også forventes at slå mere igennem på handelsgødningsforbruget hos svinebrug, planteavlsbrug end for kvægbrug og blandede brug, der har mere luft i deres gødningsregnskaber. Fritidsbrug og hobbylandbrug forventes kun i minimal grad at reducere handelsgødningsforbruget ved en reduktion i N norm, da disse brug oftest har mere luft i deres N gødningsregnskab.

I tabel 7.6 er vist det gennemsnitlige årlige total N norm efter FLP svarende til 432.000 ton N (gennemsnit af årene 2017-2020). Den totale N norm der udnyttes med gødningerne udgør 378.000 ton N. Disse tal indgår som grundlag for to scenarier for udviklingen af en N norm reduktion: Scenarie A, der anvender beregningsprincippet baseret på udviklingen i "Luften" imellem de to perioder før og efter FLP. Scenarie B, hvor der tages udgangspunkt i den udnyttede N norm efter FLP (378.000 ton N).

Det aktuelle registrerede udbragte udnyttede kvælstof er vist i Fig. 11.1 samt opgjort i tabel 7.6. Udnyttelsen af den tilladte mergødning korrigeret for både arealanvendelse og ændrede N normer og ændringer der følger ændringer i det økologisk dyrkede areal kan beregnes til forskellen i luften (45.000) mod ændringen i de anvendte N normer (57.000), $(44/57) * 100 \% = 78 \%$. Således blev den forøgede N norm (gennemsnitlig med N norm reduktion på 16 % (gennemsnittet for 2012-2015)) udnyttet med samlet 78 %. Denne reduktion inkluderer effekten af det forøgede økologiske areal, som selvstændigt reducerer udnyttelsen af den forøgede N norm.

Til at estimere en forventet udvikling i effekten af en reduceret N norm, er der opgjort et reduktionsscenarie (Kaldet scenarie A), baseret på den udvikling, der var mellem før og efter FLP korrigeret for N prognosen. N prognosen er antaget at slå fuldt igennem. Der antages forskellige forventede effekter af den aktuelle N norm reduktion afhængig af N norm reduktions-procenten, da luften kan udnyttes mere ved lave norm reduktioner sammenlignet med høje N norm reduktioner. Beregningerne af den aktuelle ændring i N normen er vist i tabel 7.7. Her opgøres norm N reduktionen at slå igennem forskelligt fra 60 % ved 5 % N norm reduktion til 80 % ved 15 % N norm reduktion. Ved 15 % antages der, at 80 % udnyttes, hvilket er lidt mere end den realiserede 78 % ændring ved FLP (16 %). De 78 % indeholdt som tidligere omtalt en effekt af øget økologisk areal, som ikke forventes på samme niveau med en 80 % ændring. Reduktionen i handelsgødningforbruget opgøres til en reduktion på henholdsvis 13.000 ton N, 30.000 ton N og 52.000 ton N ved henholdsvis 5 %, 10 % og 15 % N norm reduktion.

For scenarie B, hvor det er den økonomiske N norm der er korrigeret for "Luft", antages at N normen der reduceres i, er den aktuelt udnyttede N norm på 378.000 ton N (gennemsnit 2017-2020). De beregnede tilsvarende estimer ved en norm reduktion på 5 %, 10 % og 15 % under scenarie B, udgør henholdsvis 19.000 ton N, 38.000 ton N og 57.000 ton N jf. tabel 7.7.

7.11.3 Effekt på drivhusgasudledning

En reduktion i kvælstofgødskning på 1 kg N/ha vil reducere den direkte lattergasemission fra selve gødningen med 4,2 kg CO₂-ækv./ha og 1,71 kg CO₂-ækv./ha fra planterester (antaget at kvælstofinputtet i planterester svarer til 41 % af kvælstofinputtet) – se principperne for beregningen i kapitel 4. Den indirekte lattergasemission fra nitratudvaskning vil være variabel afhængig af, hvordan virkemidlet implementeres, men med en marginaludvaskning på 18 % anvendt som anvendt i Eriksen et al., 2020, vil reduktionen være 0,34 kg CO₂-ækv./kg N. Med udgangspunkt i den gennemsnitlige ammoniakemission fra handelsgødning (4 % af N input - se kapitel 4), vil reduktionen i den indirekte lattergasemission være 0,17 kg CO₂-ækv./kg N. Sammenlagt, vil reduktionen i lattergasemission være 6,42 kg CO₂-ækv./kg N mindre tilført. Der vil være en mindre kulstoflagring i jorden på grund af det lavere kulstofinput fra planterester. Det har ikke været muligt at lave en detaljeret analyse af effekten, men hvis man antager en C:N forhold i planteresterne på 40 og en gennemsnitlig langtidslagring af kulstofinput på 12% (kapitel 4), vil der være en reduktion i

kulstoflagringen på cirka 2.0 kg CO₂-ækv./kg N reduceret i tilførslen. Sammenlagt vil det give en reduktion i emission på 4.42 kg CO₂-ækv. per kg N mindre tilførsel.

I tabel 7.7 er vist den forventede effekt af de to beskrevne scenarier for mindre handelsgødningsforbrug ved en 5 %, 10 % og 15 % mindre N norm for det samlede landbrugsareal i Danmark. Resultaterne er vist som intervaller, der repræsenterer de to scenarier A og B. Effekten er beregnet med standardeffekten på 4.42 kg CO₂-ækv. per kg N reduceret, hvor der inddrages effekten på mindre kulstoflagring i jorden på cirka 2.0 kg CO₂-ækv./kg N.

Det skal dog her tages højde for usikkerheden på hvor meget kvælstofnormreduktionen potentielt kan slå igennem på det aktuelle forbrug opdelt på driftsgrene. I Blicher-Mathiesen et al., 2021 er der i figur 3.10 vist hvorledes forskellige driftsgrene gøder deres marker med N i forhold til deres N kvote.

Tabel 7.7 Beregnet reduktion i drivhusgas emission CO₂-ækv 1000 t i forbindelse med reduceret handelsgødningsforbrug som følge af to scenarier (A: Baseret på udviklingen med FLP) og (B: Baseret på udnyttelsen af N normen) for udviklingen i den udbragte kvælstofmængde med tre niveauer af reduktion i N gødningsnormer.

Scenarie	Reduktion i N norm [%] (Gen. aktuel N norm på 427.000 ton N)	5%	10%	15%
A	Reduktion i N norm (Total N norm) [1000. t N]	21	43	64
A	Forventet effekt (%) på aktuelt N forbrug med handelsgødning ved reduktion i N norm.	60 %	70 %	80 %
A	Reduktion i handelsgødningsforbruget [1000. t N]	13	30	52
B	Reduktion i N norm (Anvendt N norm) [1000. t N]	19	38	57
A og B*	Reduktion i drivhusgasemission [kt CO ₂ -ækv]	56 -84	132-168	230-252
A og B*	Heraf effekt fra mindre kulstoflagring i jord [kt CO ₂ -ækv]	-26 - -38	-60 - -76	-104 - -114

* Der er pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord (LULUCF) skal beregnes med henblik på at indregne det i landbrugets udledninger og i hvilken udstækning det vil blive muligt. Der tages derfor forbehold mht. at LULUCF bidraget kan adderes direkte til de øvrige poster – som det er gjort her – for at beregne netto klimaeffekten af virkemidlerne.

7.11.4 Samspil til andre virkemidler

Reduceret kvælstofnorm antages alene at slå igennem på forbruget af mineralsk handelsgødning. Andre virkemidler – såsom udtagning af landbrugsareal af produktion (KVM 7.6), øget areal med efterafgrøder (KVM 7.1), skærpede krav til udnyttelse af udvalgte typer husdyrgødning (KVM 7.16) kan alle påvirke forbruget af handelsgødning og derved ændre på handelsgødningsforbruget. Ændringer i arealanvendelse til afgrøder med højere N normer kan også forøge forbruget af handelsgødning og derved modvirke effekten af generelt lavere kvælstof normer. Ændringer i mængden af husdyrgødning vil enten fortrænge eller øge forbruget af handelsgødning.

7.11.5 Usikkerheder

Det er stor usikkerhed om hvorvidt de reducerede N normer slår igennem på det aktuelle N forbrug i handelsgødning, i og med at der for mange landbrug er "luft" i deres aktuelle forbrug af N gødninger sammenholdt med hvad deres samlede N norm tillader. Det er uklart om fremtidige N gødningspriser og produkt priser (korn raps, ærter, grovfoder, kartofler, roer) vil ændre på de optimale N normer. Dette kan påvirke kvælstofnormerne, men også udnyttelsen af den samlede N norm.

De årlige stigning i det økologiske areal i perioden før og efter FLP kan være med til at ovenstående estimater for scenarie A er underestimeret. Desuden kan fremtidige højere økonomisk optimale N normer eller ændringer i arealanvendelsen til afgrøder med højere N normer også medføre at estimaterne for nedgangen i handelsgødningsforbruget er for høje.

Der er i beregningerne i scenarie A antaget at N prognosen slår fuldt igennem i forbruget af handelsgødning før og efter FLP. Det er usikkert hvorvidt alle landmænd korrigerede den aktuelle N gødskning før og specielt efter FLP, da der som nævnt for mange landmænd er luft i deres N gødningsregnskaber. Dette kan i opgørelsen medføre en overestimering i stigningen i det beregnede/korrigerede forbrug af handelsgødnings N med FLP. For scenarierne med reducerede N normer (5 %, 10 % og 15 %) kan dette således også føre til overestimering af faldet med reducerede N normer.

Desuden kan ændrede udnyttelsesgrader af husdyrgødning, og/eller ændret animalsk produktion medfører ændret adfærd omkring udnyttelsen af kvælstofnormen. Anvendelse af standarder for drivhusgas emissioner har en iboende usikkerhed som ikke indgår i beregningerne af CO₂ ækvivalenter. Det er desuden vanskeligt at lave prognose omkring hvordan landmænd vil tilpasse sædskiftet til reducerede N normer. I de gennemførte beregninger antages at arealanvendelsen og tilknyttet N norm vil være som gennemsnittet af perioden 2017-2020.

Referencer

- Blicher-Mathiesen, G., Olesen, J.E. & Jung-Madsen, S. (red). (2020). Opdatering af baseline 2021. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 140 s. - Teknisk rapport nr. 162 <http://dce2.au.dk/pub/TR162.pdf>
- Blicher-Mathiesen, G., Houlborg, T., Petersen, R.J., Rolighed, J., Andersen, H.E., Jensen, P.G., Wienke, J., Hansen, B. & Thorling, L. (2021). Landovervågningsoplande 2020. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 260 s. - Videnskabelig rapport nr. 472 <http://dce2.au.dk/pub/SR472.pdf>
- Børgesen, C.D., Thomsen, I.K., Hansen, E.M., Kristensen, I.T., Blicher-Mathiesen, G., Rolighed, J., Jensen, P.N., Olesen, J.E., Eriksen, J. (2015). Notat om tilbagerulning af tre generelle krav, Normreduktion, obligatoriske efterafgrøder og forbud mod jordbearbejdning i efteråret. DCA Notat.

https://pure.au.dk/ws/files/95991713/Notat_om_tilbagerulning_af_tre_generelle_krav_Normreduktion_Obligatoriske_efterafgrader_og_Forbud_mod_jordbearbejdning_i_efter_ret_111115.pdf

Landbrugsstyrelsen (2022) Statistik over økologiske jordbrugsbedrifter 2021.
https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Tvaergaende/Oekologi/Statistik/Statistik_over_oekologisk_jordbrugsbedrifter_2021_v2.pdf

Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Miljø (2015). Aftale om Fødevare- og landbrugspakke.
https://mfvm.dk/fileadmin/user_upload/FVM.dk/Dokumenter/Landbrug/Indsatser/Foedevare-_og_landbrugspakke/Aftale_om_foedevare-_og_landbrugspakken.pdf

7.12 Større opbevaringskapacitet af husdyrgødning og ændringer i forbud mod udbringning af husdyrgødning om efteråret (KVM7.12)

Forfattere: Peter Sørensen og Nicholas J. Hutchings, begge fra Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

En betydelig del af dette afsnit er kopieret fra Virkemidler til reduktion af kvælstofudvaskningen (Eriksen et al., 2020) suppleret med nye informationer. Ændret udbringningspraksis påvirker nitratudvaskning og ammoniaktab, og har dermed indirekte effekter på udledningen af drivhusgasser.

7.12.1 Anvendelse

I dag er reglerne, at der normalt skal være 9 måneders opbevaringskapacitet, men at det reelle minimumskrav juridisk kun er 6 måneder (Husdyrgødningsbekendtgørelsen, 2021; paragraf 10). Det betyder, at mange husdyrbrug i dag har mellem 6 og 9 måneders opbevaringskapacitet. Disse kan normalt nemt overholde "lukkeperioden" hvor der ikke må udbringes flydende husdyrgødning fra 1. oktober til 1. februar, som reelt kun er fire måneder. Konsekvensen er blot, at hvis der kun reelt er 6 måneders opbevaringskapacitet, er det nødvendigt næsten at tømme gyllebeholdere i september, hvor gylle kun lovligt kan udbringes på græs og vinterraps. Dette indebærer en risiko for, at disse arealer får tilført mere gylle end de har behov for om efteråret, med forøget risiko for udvaskning af kvælstof til følge. Ved opbevaring i åbne gyllebeholdere er det usikkert, hvor meget nedbør der tilføres i vinterens løb, hvilket giver incitament til at tømme tanken før vinteren for en sikkerheds skyld. Hvis det blev et juridisk krav at have 9 måneders opbevaringskapacitet, ville dette problem i høj grad blive løst. Det er dog stadig også nødvendigt med specifikke krav til udbringningsperiode. Med dette virkemiddel indføres et fast juridisk krav på 9 måneders opbevaringskapacitet (fraregnet gødning fra udegående dyr).

Fast husdyrgødning kan i 2020 anvendes om efteråret (Husdyrgødningsbekendtgørelsen, 2021), hvor jorden er dækket af afgrøde i den følgende vinter, men på arealer uden afgrøde den følgende vinter må husdyrgødning kun udbringes på lerjord og kun i perioden 1. november til 15. november af hensyn til kravet om indarbejdning af fast husdyrgødning. Dog kan fast gødning udbringes fra 20. oktober til 15. november på alle arealer, hvor der har været lovpligtige, husdyr- og MFO-efterafgrøder på både sandjord og lerjord (tabel 7.8).

Dette virkemiddel indebærer, at fast husdyrgødning ikke må udbringes mellem høst og 1. december på lerjord og mellem høst og 1. februar på sandjord, dog således at fast husdyrgødning kan udbringes til vinterraps og på græs indtil 1. september (tabel 7.8).

De samme regler, som for udbringning af fast husdyrgødning, bør indføres for udbringning af slam. Effekten heraf er dog ikke medtaget i denne beskrivelse af virkemidlet.

Tabel 7.8 Oversigt over regler for udbringning af fast husdyrgødning på forskellige jordtyper i 2020 og forslag til nyt virkemiddel.

Jordtype	Udbringningsperioder fast husdyrgødning inden etablering af vårsæd		
	På arealer, hvor der har været lovpligtige, husdyr- og MFO-efterafgrøder ¹⁾	På arealer, hvor der ikke har været efterafgrøder	Virkemiddel/nye udbringningsperioder (alle arealer)
JB1-4	20. okt.- 15. nov. og fra 1. feb.	Fra 1. feb.	Fra 1. feb.
JB5-6 og 10-11		1. - 15. nov. og fra 1. feb.	Fra 1. dec.
JB7-9		20. okt. - 15. nov. og fra 1. feb.	Fra 1. dec.

Gælder ikke for græsudlæg med destruktionsfrist 1. marts

Flydende husdyrgødning må i dag udbringes på græsafgrøder (Husdyrgødningsbekendtgørelsen, 2021), samt før og efter såning af vinterraps frem til 1. oktober. Endvidere må flydende gødning anvendes på frøgræsmarker frem til 15. oktober, hvor der er indgået kontrakt med et frøavlsfirma om levering af frø i den kommende sæson.

Det foreslås med dette virkemiddel, at udbringning af flydende gødning til fodergræs og vinterraps forbydes efter 1. september. Anvendelse af flydende gødning til frøgræs er fortsat tilladt indtil 15. oktober. Forudsætningerne for virkemidlet er nærmere beskrevet i Eriksen et al. (2020).

7.12.2 Relevans og potentiale

Der findes ikke samlede opgørelser af mængden af udbragt kvælstof i husdyrgødning fordelt på afgrøder tidspunkt og gødningstype. I Eriksen et al. (2020) er der lavet en vurdering af omfanget af husdyrgødning udbragt om efteråret og en vurdering af effekten på nitratudvaskning ved at undgå udbringning i efteråret, og potentiale og effekter er vist i tabel 7.9. Baggrunden for de vurderede effekter er også nærmere beskrevet i Eriksen et al. (2020).

Tabel 7.9 Effekter på samlet nitratudvaskning ved forbud mod udbringning af flydende husdyrgødning i september (undtaget på frøgræs) og ved forbud mod udbringning af fast husdyrgødning/dybstrøelse fra høst til 1. december på lerjord og 1. februar på sandjord (undtaget til frøgræs og til vinterraps i august), beregnet for hele landet. De samlede mængder af kvælstof i husdyrgødningstyper er fra gødningsregnskaber 2016-17. Effekterne af ændret udbringningstid er vurderede (data fra Eriksen et al. 2020).

Gødningstype	Mængde af gødningstype i alt	Andel udbragt i september-oktober	Tons N udbragt september-oktober	Ekstra andel udvasket ved udbringning i september-oktober	Reduktion i N-udvaskning med virkemiddel
	(tons N/år)	(% af årlig mængde)	(tons N/år)	(% af total N)	(tons N/år)
Gylle og qjle til fodergræs	174.774	0,66	1154	10	115

Gylle og gyle til vinterraps	174.774	0,42	734	10	73
Fjerkrædybstrøelse til vinterkorn og forårssået afgrøde	7.800	15,6	1217	40	487
Fast gødning (inklusive "anden husdyrgødning og øvrig organisk gødning")	19.319	15,6	3014	25	753
Dybstrøelse (eksklusiv fjerkræ)	17.761	15,6	2771	15	416
Total					1845

Den samlede effekt på udvaskningen af forbud mod udbringning af flydende gødning i september er opgjort til 188 t N/år (tabel 7.9), mens forbud mod udbringning af fast gødning og dybstrøelse i efteråret før 1. december på lerjord og før 1. februar på sandjord er beregnet til at reducere nitratudvaskningen 1.656 t N/år.

Ved opgørelsen af fjerkrædybstrøelse, er der taget udgangspunkt i den samlede mængde af kvælstof fra fjerkrægødning fratrukket fjerkrægylle. Det betyder, at både fjerkrægødning der registreres som fast gødning og som dybstrøelse i gødningsregnskaber, er regnet ind i kategorien fjerkrædybstrøelse i tabel 7.9.

7.12.3 Effekt på drivhusgasudledning

Reduktionen af nitratudvaskning og ændret ammoniaktab har en indirekte effekt på emissionen af N₂O. Eriksen et al. (2020) vurderede, at et øget behov for lagring af dybstrøelse vil øge ammoniak emissionen med 100 tons N/år og øget udbringning på voksende afgrøder om foråret vil øge ammoniak emissionen med 280 t N/år, og dermed fås en samlet øget ammoniak emission på 380 tons N/år.

Det antages at den indirekte emission af N₂O fra nitratudvaskning er på 0,0046 kg N₂O-N/kg N. Endvidere regnes med 265 kg CO₂-ækv/kg N₂O, baseret på IPCC standardemissioner (Eriksen et al. 2020). Der antages en indirekte N₂O emission fra den fordampede ammoniak på 0,01 kg N₂O-N/kg N.

Et krav om 9 måneders opbevaringskapacitet kombineret med ændrede udbringningsperioder, som resulterer i en reduktion i kvælstofudvaskningen på 1.845 tons/år, medfører en reduktion i drivhusgasser på 3.534 tons CO₂-ækv./år. Den øgede ammoniakemission på 380 tons N medfører en øget emission på 1.582 tons CO₂-ækv./år. Den samlede reduktion af drivhusgasemission er dermed 1.952 tons CO₂-ækv./år.

7.12.4 Samspil til andre virkemidler

Dette virkemiddel kan have samspil med tiltaget 'Afbrænding af husdyrgødning' og tiltaget 'Vådområder på mineraljord'.

7.12.5 Usikkerheder

Usikkerheden på estimat for drivhusgasudledning vurderes til at være ca. 50 %.

Referencer

Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H., Baattrup-Pedersen, A., Strandberg, B., Christensen, B.T., Boelt, B., Iversen, B.V., Kronvang, B., Børgesen, C.D., Abalos Rodriguez, D., Zak, D.H., Hansen, E.M., Blicher-Mathiesen, G., Rubæk, G.H., Ørum, J.E., Rasmussen, J., ... Jørgensen, U. (2020). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet - DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport Nr. 174
<https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>

Husdyrgødningsbekendtgørelsen (2021). BEK nr 2243 af 29/11/2021
<https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2021/2243>

7.13 Afgrøder med stort kvælstofoptag (KVM7.13)

Forfattere: Nicholas John Hutchings, Elly Møller Hansen, Ingrid K. Thomsen, alle fra Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

I dette kapitel tages udgangspunkt i den beskrivelse af virkemidlet Afgrøder med stort kvælstofoptag, der fremgår af Hansen et al. (2020).

7.13.1 Anvendelse

Virkemidlet Afgrøder med stort N-kvælstofoptag omfatter dyrkning af roer, fodergræs og frøgræs, dvs. afgrøder, der har en lang vækstsæson og dermed mulighed for at optage betydelige mængder kvælstof om efteråret. Det betyder, at disse afgrøder kan reducere udvaskningen i forhold til afgrøder, der enten høstes tidligere eller ophører med at optage kvælstof på et tidligere tidspunkt. Flerårige afgrøder som græs, dvs. både fodergræs og frøgræs, kan desuden befinde sig på marken flere år i træk inden de ompløjes eller på anden måde destrueres. Derved kan den samme græsafrøde reducere udvaskningen flere år i træk.

For afgrøder, der er karakteriseret ved at have et stort kvælstofoptag om efteråret, gælder, at effekten fastsættes i forhold til en referenceafgrøde, der ikke har denne karakteristik. Referencen antages således at være en hovedafgrøde uden lang vækstsæson, hvorfor effekten fastsættes i forhold til samme reference som efterafgrøder, dvs. jord efter vårkorn uden efterafgrøder.

7.13.2 Relevans og potentiale

Dyrkning af sukkerroer og frøgræs sker generelt på kontrakt, og potentialet for dyrkning af disse afgrøder vil derfor afhænge af de gældende markedsforhold. For kvægbrug gælder, at der vil kunne ske et skifte fra majshelsæd til slætgræs. Herudover vil arealet med græs kunne øges, hvis der udvikles et marked for bioraffinering (Børgesen et al., 2018).

7.13.3 Effekt på drivhusgasudledning

Udvaskning og effekt angivet for roer antages at være gældende for det efterår, hvor roerne er på marken og bliver høstet samt for efterfølgende vinter og forår. For græs er effekten antaget at være gældende, mens græsset fortsat dyrkes, mens effekt på udvaskning ved ompløjning af græs er behandlet under virkemidlet 7.7 Ompløjningstidspunkt for fodergræs og efterfølgende afgrødevalg.

Fabriksroer

Ved dyrkning af fabriksroer og fjernelse af roetop vil der kunne forventes samme udvaskningsreducerende effekt som ved dyrkning af korn med efterafgrøder. Det bemærkes, at det er en forudsætning, at fabriksroer dyrkes under de samme dyrkningsbetingelser, som fabriksroer hidtil er blevet dyrket (Hansen et al., 2014), dvs. på lerjord i et forholdsvis nedbørsfattigt klima som i den østlige del af Danmark. Under disse betingelser

er udvaskningsreduktionen estimeret til at svare til effekt af en efterafgrøde på lerjord, dvs. 12-24 kg N/ha (se kapitel 7.1 Efterafgrøder). Som beskrevet i Hansen et al. (2014) er der fundet modstridende resultater for effekt på udvaskningen af at efterlade roetop ved høst. Det vurderes, at vidensgrundlaget er for ringe til, at efterladelse af roetop kan indgå i effektberegningen mht. udvaskning.

Kvælstofgødning til fabriksroer antages til at være 134 kg/ha (Landbrugsstyrelsen, 2022). Fjernelsen af roetoppen vil reducere lattergasemissionen fra planterester men reducere kulstoflagring. Hvis tørstofudbyttet i roetoppen antages at være 4,7 tons/ha (Hansen et al., 2019) og kvælstofkoncentrationen i roetoppen antages at være 2,6 % (Landsudvalg for kvæg, 1990), vil kvælstoffet i roetoppen være 122 kg N/ha. Disse planterester svarer til en lattergasemission på 509 kg CO₂-ækv. Der er dog usikkerhed om, hvorvidt især kvælstofkoncentrationen i fabriksroer kan sidestilles med koncentrationen i foderroer. Med den samme antagelse vedr. tørstofudbytte og et kulstofindhold på 45%, vil fjernelsen af roetoppen fra marken reducere kulstofinputtet med 2,1 t C/ha, svarende til en reduktion i kulstoflagringen på 250 kg C/ha. Sammenlignet med korndyrkning (referencesituationen), vil reduktionen i lattergasemission fra kvælstofgødning, planterester, ammoniakfordampning, nitratudvaskning samt mindsket CO₂ udledning fra kulstoflagring være henholdsvis 154, 291, 6, 34, og -917 kg CO₂-ækv/ha med fjernelsen af toppen fra marken og 154, -217, 6, 34, og 0 kg CO₂-ækv./ha uden fjernelsen af toppen. Samlet vil klimaeffekten være -432 eller -23 kg CO₂-ækv./ha hhv. med og uden fjernelse af toppen fra marken, men især beregningen af planterester er usikker. Der er pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord (LULUCF) skal beregnes med henblik på at indregne det i landbrugets udledninger og i hvilken udstrækning det vil blive muligt. Der tages derfor forbehold mht. at LULUCF bidraget kan adderes direkte til de øvrige poster

Fodersukkerroer

Dyrkes fodersukkerroer og fabriksroer under samme betingelse (mht. jordtype, klima, bedriftstype, gødskning, osv.) antages begge typer roer at være lige effektive til at reducere udvaskningen. Dyrkes fodersukkerroer på sandet jord i et nedbørsrigt klima og i sædskifter med kløvergræs og tilførsel af husdyrgødning og højere kvælstofnorm kan risikoen for udvaskning være større end for fabriksroer dyrket i deres typiske dyrkningsområde. Der savnes dog forsøg med fodersukkerroer, som gødes efter de nuværende økonomisk optimale gødningsniveauer, hvorfor der ikke er grundlag for en mere præcis vurdering af deres udvaskningsreducerende effekt.

Fodergræs (græs i renbestand og kløvergræs)

Risikoen for udvaskning fra græs og kløvergræs i udlægs- og produktionsårene (dvs. før ompløjning eller anden destruktion) afhænger af flere forhold, bl.a. forudgående dyrkningshistorie, gødningstilførsel, udbyttelniveau, benyttelse og antal år siden græsset blev udlagt. Det vurderes, at udvaskningsreduktionen i forhold til en hovedafgrøde uden lang vækstsæson er mindst på niveau med udvaskningsreduktionen ved dyrkning af efterafgrøde (dvs. mindst 12-45 kg N/ha) med et gennemsnit på 29 kg N/ha.

Klimaeffekten af fodergræsdyrkning beregnes i forhold til korndyrkning (referencesituationen). For fodergræs i renbestand, er N inputtet i handelsgødning antaget til at være 390 kg/ha/år (Landbrugsstyrelsen, 2022). Reduktionen i nitratudvaskning i dyrkningsåret er antaget at være 29 kg N/ha. Reduktionen i lattergasemission fra kvælstofgødning, planterester, ammoniakfordampning og nitratudvaskning vil være henholdsvis -899, -368, -11 og 54 kg CO₂-ækv./ha. Fossilenergiforbruget til markoperationer er estimeret til at være lidt højere for fodergræs end for korndyrkning (446 kg CO₂-ækv./ha). Mikkelsen et al. (2022) estimerer C-lagringen ved at skifte fra korndyrkning til græs til at være 540 kg C/ha/år, eller 1.980 kg CO₂-ækv./ha. Dette er for et permanent skifte til græs, hvor lagringen estimeres til 12% af C-input. Tilsammen er reduktionen i emissionen estimeret til 310 kg CO₂-ækv./ha. For fodergræs med bælgeplanter (under 50 %), er N inputtet i handelsgødning antaget at være 285 kg/ha/år (Landbrugsstyrelsen, 2022). Reduktionen i lattergasemission fra kvælstofgødning, planterester, ammoniakfordampning og nitratudvaskning vil være henholdsvis -462, -189, 7 og 54 kg CO₂-ækv./ha. Fossilenergiforbruget og C-lagring antages at være som for fodergræs i renbestand. Tilsammen er reduktionen i emissionen estimeret til 944 kg CO₂-ækv./ha.

Frøgræs

Den udvaskningsreducerende effekt af frøgræs i perioden indtil ompløjning er vurderet til mindst på niveau med udvaskningsreduktionen ved dyrkning af en efterafgrøde (dvs. mindst 12-45 kg N/ha) med et gennemsnit på 29 kg N/ha. Klimaeffekten af frøgræsdyrkning i forhold til korndyrkning (referencesituationen) er afhængig af hvilken art og sort, der dyrkes, da den tilladte kvælstofgødning varierer. Hvis man antager en kvælstofgødning på 170 kg N/ha (Landbrugsstyrelsen, 2022), som er tæt på de 171 kg N/ha for korndyrkning, og at reduktionen i nitratudvaskning i dyrkningsåret er 29 kg N/ha i gennemsnit, vil reduktionen i lattergasemission fra kvælstofgødning, planterester, ammoniakfordampning og nitratudvaskning være henholdsvis 4, 2, 0 og 55 kg CO₂-ækv./ha. Frøgræsdyrkning er antaget at være sammenlignelig med korndyrkning, hvorfor der ikke er ændringer i det fossile energiforbrug. I Hansen et al. (2014) var kulstoflagring i frøgræsmarker skønnet til 2,9 tons CO₂-ækv./ha, men der var og er ingen empiriske data til at understøtte denne værdi, som bl.a. vil afhænge af håndtering af frøgræshalmen. Dette er for et permanent skifte til frøgræs, hvor lagringen estimeres til 12% af C-input. Den samlede reduktion med og uden den skønnede kulstoflagring er dermed henholdsvis 2961 og 61 kg CO₂-ækv./ha.

7.13.4 Samspil til andre virkemidler

Afgrøder med stort kvælstofoptag kan ikke anvendes sammen med andre fladevirkemidler, der involverer plantedyrkning om efteråret. Men afgrøder med stort kvælstofoptag kan anvendes samtidigt med fladevirkemidler, der involverer gødskning. I disse tilfælde forventes effekterne ikke at være additive. Reduceret kvælstofudvaskning ved dyrkning af afgrøder med stort kvælstofoptag vil betyde, at der kvantitativt kan fjernes mindre kvælstof ved samtidig anvendelse af dræn- og vandløbsvirkemidler.

7.13.5 Usikkerheder

Effekten ved dyrkning af fabrikssukkerroer, som de hidtil er blevet dyrket (dvs. i nedbørsfattige områder ved forholdsvis lavt handelsgødning-niveau i sædskifte med andre salgsafgrøder), er baseret på forholdsvis mange forsøg. Effekten af fodersukkerroer, som hidtil er dyrket med større gødningsnorm end fabriksroer og i områder med mere sandet jord i et mere nedbørsrigt klima og i grovfodersædskifter tilført husdyrgødning, er mere usikker. Der savnes undersøgelser over, hvor stor betydning efterladelse af roetop har for roers udvaskningsreducerende effekt ved forskellige gødningsniveauer. Effekten af græs i udlægs- og produktionsårene er forholdsvis sikkert bestemt, men der er usikkerhed om betydningen af mere langvarig dyrkning af græsmarker ved højt gødningsniveau.

Generelt for afgrøder med stort kvælstofoptag er tallene store og særdeles usikre, hvilket gør det samlede estimat meget usikkert. Det gælder især for fodergræs og fabriksroer.

Referencer

- Børgesen, C.D., Dalgaard, T., Pedersen, B.F., Kristensen, T., Jacobsen, B.H., Jensen, J.D., Gylling, M., Jørgensen, U. (2018). Kan reduktionsmålsætninger for nitratudvaskning til Limfjorden opfyldes ved øget dyrkning af biomasse? DCA Rapport nr. 131, november 2018. https://pure.au.dk/portal/files/136780099/Levering_Biomasseproduktion_i_Limfjordsopland.pdf
- Hansen, E.M., Søgaard, K., Børgesen, C.D., Boelt, B., Gislum, R., Rubæk, G.H., Schelde, K., Olesen, J.E., Jacobsen, B.H., Eberhardt, J.M. (2014). Afgrøder med høj kvælstofoptag. I: Eriksen, J., Jensen, P.N. og Jacobsen, B.H. (redaktører), Virkemidler til realisering af 2. generations vandplaner og målrettet arealregulering, side 43-50. https://pure.au.dk/ws/files/84646400/Virkemiddelkatalog_web.pdf
- Hansen, E.M., Christensen, B.T., Jørgensen, L.N., Kudsk, P., Nørremark, M., Jørgensen, M., Thomsen, I.K. (2019). Notat om status for eksisterende viden om roedyrknings effekter for miljø, natur og klima. Notat til Landbrugsstyrelsen 11. juli 2019. https://pure.au.dk/portal/files/155985798/Status_for_eksisterende_viden_om_roedyrknings_effekter_Juni_2019.pdf
- Hansen, E.M., Thomsen, I.K., Lærke, P.E., Jørgensen, U., Boelt, B., Gislum, R., Rasmussen, J., Rubæk, G.H., Kudsk, P., Strandberg, B., Bruus, M., Hutchings, N.J., Pedersen, M.F. (2020). Afgrøder med stort kvælstofoptag. I: Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H. (redaktører). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport nr. 174, side 127-137. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArap-port174.pdf>
- Landbrugsstyrelsen (2022). Vejledning om gødsknings- og harmoniregler. Planperioden 1. august 2022 til 31. juli 2023.

https://lbst.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Landbrug/Goedningsregnskab/Vejledning_om_goedskning_og_harmoniregler_2022_2023.pdf

Landsudvalg for kvæg (1990). Fodertabellen.

Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Gyldenkærne, S. (2022). Sammenligning af klimaeffekter - Emissionsopgørelse, emissionsfremskrivning og Klimaeffekttabel. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 166 s. – Videnskabelig rapport nr. 501. <http://dce2.au.dk/pub/SR501.pdf>

7.14 Skærpet udnyttelseskrav for N i udvalgte typer husdyrgødning (KVM7.14)

Forfattere: Peter Sørensen og Nicholas J. Hutchings, begge fra Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

En betydelig del af dette afsnit er kopieret fra "Virkemidler til reduktion af kvælstofudvaskningen" (Eriksen et al., 2020), suppleret med nye informationer.

7.14.1 Anvendelse

Udnyttelseskravet for husdyrgødning angiver, hvor stor en andel af kvælstof i husdyrgødning, der skal indregnes i gødningsregnskaber, og dermed hvor meget supplerende kvælstofgødning landbrugsbedrifter kan anvende. Med dette virkemiddel øges udnyttelseskravet for udvalgte typer husdyrgødning. Der er taget udgangspunkt i udnyttelseskravene frem til 2019-20, der er vist i tabel 7.10 (udvalgte gødninger) og tabel 7.11 (kvæg- og svinøgylle) og regnet på effekten af nye udnyttelseskrav indført fra gødningsåret 2020-21.

Ændringer i udnyttelseskrav forventes ikke at ændre på mængden af udbragt husdyrgødning, men vil udelukkende have betydning for, hvor meget handelsgødning der kan udbringes, og effekten heraf kan beregnes ud fra marginaludvaskningen fra tilført handelsgødning.

Tabel 7.10. Udnyttelseskrav frem til 2019-20 (Anonym, 2019) og nye udnyttelseskrav fra 2020-21, samlet kvælstofmængde i udvalgte typer husdyrgødning og mængde til økologiske bedrifter (AU udtræk af data fra gødningsregnskaber 2016-17), samt betydning af ændret krav på kvælstofnorm (husdyrgødning til økologiske bedrifter er fraregnet). Marginaludvaskningen fra den sparede handelsgødning er beregnet med en udvaskningsfaktor på 20 % (Børgesen et al., 2015).

Gødningstype	Udnyttelseskrav 2019-20	Udnyttelseskrav fra 2020-21	Differens	Mængde total	Mængde økologi	Handelsgødning ækvivalent ¹⁾	Marginal udvaskning handelsgødning
	[%]	[%]	[%-point]	(tons N/år)	tons N/år	tons N/år	tons N/år
Minkgylle	70	75	5	1.288	266	51	10
Fjerkrædybstrøelse	45	70	25	7.800	1.170 ²⁾	1.657	331
Fjerkrægylle	70	80	10	22	12	1	0,2
Fjerkræ fast gødning	65	70	5	-			
Ajle	65	85	20	567	21	109	22
Fast gødning	65	55	-10	495	73	-42	-8
Dybstrøelse	45	50	5	17.761	2.664	755	151
Total				27.932	4.206	2.531	506

1) Beregnet som: (tons N total – tons N til økologi) x ændret udnyttelseskrav.

2) Der findes ikke opgørelse af fjerkrædybstrøelse til økologi, men det er antaget, at 15 % af fjerkrædybstrøelse anvendes på økologiske bedrifter svarende til andelen for indberettet dybstrøelse til økologiske bedrifter (2016-17).

De angivne mængder kvælstof i forskellige typer husdyrgødning i tabel 7.10 er hentet fra indberetninger i gødningsregnskaberne fra 2016-17, og er nærmere beskrevet i Eriksen et al (2020).

I tabel 7.10 er angivet mængden af husdyrgødning anvendt på økologiske bedrifter i 2016-17. Ved beregning af effekten er denne del trukket ud, idet ændringer i udnyttelseskravet ikke vil have effekt for gødning anvendt på økologiske bedrifter. Det betyder også, at ændringer i det økologiske areal vil have betydning for effekten af dette virkemiddel. Der har efter 2017 været et stigende økologisk areal, og effekten heraf er ikke indregnet.

Da de økologiske regler om gødningsanvendelse tager udgangspunkt i "virksomt kvælstof", svarende til udnyttelseskravet, kan en ændring af udnyttelseskrav potentielt også påvirke anvendelsen af gødning på økologiske bedrifter. I forbindelse med de indførte øgede udnyttelseskrav har man dog samtidigt også øget anbefalingerne for "virksomt kvælstof" tilsvarende på økologiske bedrifter. Det betyder at der forventes uændret anvendelse af husdyrgødning på økologiske bedrifter.

Fra gødningsåret 2020-21 er gennemført en stramning af udnyttelseskravet for svine- og kvæggylle samt afgasset gylle. Effekten heraf på nitratudvaskningen er vist i tabel 7.11. Det vurderes, at der potentielt kan opnås en gødningsvirkning, svarende til det nye udnyttelseskrav, hvis al gylle enten nedfældes eller forsures, og ammoniaktabet derved reduceres. En reduktion i ammoniaktabet medfører imidlertid også, at der bliver mere kvælstof tilbage i jorden, der kan udvaskes. Hvis en stramning af udnyttelseskravet på 5 %-point opvejes fuldstændigt af en reduktion i ammoniakfordampningen svarende til 5 % af total N i gyllen, vil der ikke være nogen nettoeffekt på den direkte udvaskning fra arealet. I det følgende er det antaget at håndtering af gylle og ammoniakfordampningen er uændret efter stramningen af udnyttelseskravet.

Tabel 7.11 Effekter af højere udnyttelseskrav for svine- og kvæggylle samt afgasset gylle gennemført fra 2020-21 (+ 5 %-point) på reduktion i forbrug af handelsgødning og reduktion af udvaskning, samt beregnet nettoeffekt på kvælstofudvaskningen, hvis der samtidigt sker en af reduktion af ammoniaktab svarende til 5 % af total N i gyllen. Der er regnet med en marginaludvaskning fra handelsgødning på 20 % (Børgesen et al., 2015). Gylle tilført økologiske bedrifter (2016-17) er fratrasket.

Gødningstype	Udnyttelseskrav før 2020	Udnyttelseskrav fra 2020-21	Øget krav	Mængde total	Mængde økologi	Handelsgødning ækvivalent ¹⁾	Marginal udvaskning handelsgødning
	(%)	(%)	(%-point)	(tons N/år)	(tons N/år)	(tons N/år)	(tons N/år)
Svinegylle	75	80	5	38.459	2.705	1.788	358
Kvæggylle	70	75	5	39.449	8.084	1.568	314
Blandet gylle	72,5	77,5	5	81.899	6.870	3.751	750
Afgasset gylle	Variabel	Variabel	5	13.091	213	644	129
Total				172.898	17.873	7.751	1.550

1. Beregnet som: (tons N total – tons N til økologi) x ændret udnyttelseskrav.

7.14.2 Relevans og potentiale

Forudsætninger og potentiale for reduktion i tilført handelsgødning og reduktion af nitratudvaskningen er sammenstillet i tabel 7.10 og tabel 7.11. Det samlede potentiale for reduktion i handelsgødning er på 2531 + 7.751 tons N/ha = 10.282 tons N/år, hvis ændringen i udnyttelseskrav fuldt ud afspejles i forbruget af handelsgødning. Det samlede potentiale for reduktion i nitratudvaskning, svarende til marginaludvaskningen fra den sparede handelsgødning, er opgjort til 506 + 1.550 tons N/år = 2.056 tons N/år.

7.14.3 Effekt på drivhusgasudledning

En skærpelse af udnyttelseskravet for kvælstof vil reducere handelsgødningsforbruget og dermed den direkte lattergasemission fra udbragt handelsgødning, og den indirekte lattergasemission fra både ammoniakemission og kvælstofudvaskning. En oversigt over effekterne er vist i tabel 7.12. Det er antaget, at husdyrgødningen håndteres på samme vis efter en stramning af udnyttelseskravet.

Effekten beregnes som reduktion i tilført handelsgødning ganget med marginaludvaskningen fra tilført handelsgødning (Børgesen et al., 2015). Den kortsigtede gennemsnitlige marginaludvaskning fra handelsgødning er sat til 20 % under hensyn til, at 80 % af husdyrgødningen udbringes på sandjord og i områder med relativ høj nedbør.

Der antages en direkte N₂O emission fra handelsgødning på 0,01 kg N₂O-N/kg N og indirekte emission af N₂O fra nitratudvaskning på 0,0046 kg N₂O-N/kg N. Der antages ammoniaktab fra handelsgødning på 0,04 kg NH₃-N/kg N (Mikkelsen et al., 2022) og indirekte N₂O emission fra den fordampede ammoniak på 0,01 kg N₂O-N/kg N (Eriksen et al. 2020). Endvidere regnes med 265 kg CO₂-ækv/kg N₂O.

Tabel 7.12 Direkte og indirekte effekter af ændret anvendelse af handelsgødning på lattergasemissionen ved en stramning af udnyttelseskrav i scenarie 1 og scenarie 2.

Gødningstype	Reduktion af handelsgødning	Reduktion i direkte N ₂ O fra handelsgødning	Reduktion i indirekte N ₂ O fra udvaskning	Reduktion i indirekte N ₂ O fra NH ₃ emission	alt
	(tons N/år)	(kt CO ₂ -ækv)			
Gødninger i Tabel 7.10:					
Udvalgte typer	2.531	10,5	1,0	0,42	11,9
Gødninger i Tabel 7.11:					
Svinegylle	1.788	7,45	0,69	0,30	8,43
Kvæggylle	1.568	6,53	0,60	0,26	7,39
Blandet gylle	3.751	15,62	1,44	0,62	17,68
Afgasset gylle	644	2,68	0,25	0,11	3,04
Total (gylle)	7.751	32,3	2,97	1,29	36,5

Den samlede reduktion i klimagasemissioner er cirka 13 kt CO₂-ækv/år for gødninger i tabel 7.10. og cirka 41 kt CO₂-ækv./år for kvæg- og svinegylle i tabel 7.11. Dette svarer til cirka 4,7 kg CO₂-ækv./reduceret kg N input.

7.14.4 Samspil til andre virkemidler

Der vil være samspil med fx minivådområder og efterafgrøder.

7.14.5 Usikkerheder

Der vil være samme usikkerhed som for Reduceret tilførsel af mineralsk kvælstofgødning.

Referencer

- Børgesen, C.D., Thomsen, I.K., Hansen, E.M., Kristensen, I.T., Blicher-Mathiesen, G., Rolighed, J., Jensen, P.N., Olesen J.E., Eriksen, J. (2015). Notat om tilbagerulning af tre generelle krav, normreduktion, obligatoriske efterafgrøder og forbud mod jordbearbejdning i efteråret. Aarhus Universitet. http://pure.au.dk/portal/files/95991713/Notat_om_tilbagerulning_af_tre_generelle_krav_Normreduktion_Obligatoriske_efterafgr_der_og_Forbud_mod_jordbearbejdning_i_efter_ret_111115.pdf.
- Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H., Baattrup-Pedersen, A., Strandberg, B., Christensen, B.T., Boelt, B., Iversen, B.V., Kronvang, B., Børgesen, C.D., Abalos Rodriguez, D., Zak, D.H., Hansen, E.M., Blicher-Mathiesen, G., Rubæk, G.H., Ørum, J.E., Rasmussen, J., ... Jørgensen, U. (2020). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet - DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport Nr. 174 <https://dca.pub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>
- Mikkelsen, M.H., Albrechtsen, R., Gyldenkerne, S. (2022). Sammenligning af klimaeffekter - Emissionsopgørelse, emissionsfremskrivning og Klimaeffekttabel. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 166 s. - Videnskabelig rapport nr. 501 <http://dce2.au.dk/pub/SR501.pdf>

7.15 Nitrifikationsinhibitorer (KVM7.15)

Forfattere: Søren O. Petersen, Institut for Agroøkologi; Marianne Bruus, Paul Henning Krogh, begge fra Institut for Ecoscience, og Anne Winding, Institut for Miljøvidenskab

Fagfællebedømmere: Nicholas J. Hutchings, Institut for Agroøkologi og John Jensen, Institut for Ecoscience

Nitrifikation er en mikrobiel omdannelse i to trin af ammonium (egt. ammoniak) til nitrat. Nitrifikationshæmmere er en divers gruppe additiver til kvælstofholdig gødning, herunder gylle, som er udviklet til at hæmme processens første trin. Nitrifikationshæmmere mindsker risikoen for kvælstoftab og udbyttereduktion i år med høj forårsnedbør, mens der sjældent ses signifikante merudbytter med den aktuelle anvendelse.

7.15.1 Anvendelse

Nitrifikationshæmmere er udviklet til brug sammen med handelsgødning såvel som husdyrgødning (gylle), med formuleringer som er tilpasset anvendelsen. Formålet med anvendelsen er at forsinke dannelsen af nitrat i jorden. Nitrat er mobilt, og der er på sandjord risiko for udvaskning fra rodzonen ved overskudsnedbør. Nitrat indgår desuden i denitrifikation, der sammen med nitrifikation er vigtigste kilde til lattergas, som er en kraftig drivhusgas. Nitrifikationshæmmere kan således være et virkemiddel i forhold til både kvælstof-udnyttelse og klima (Olesen et al., 2018). Der er i landsforsøgene gennemført en række forsøg med nitrifikationshæmmere i typiske kombinationer af afgrøde og jordtype; kun ved dyrkning af majs på grovsandet jord (JB1) er der målt et merudbytte (Oversigt over Landsforsøgene, 2016; 2020; 2021). Derfor må nitrifikationshæmmere primært betragtes som et klimavirkemiddel.

Indarbejdelse af effekter i den nationale opgørelse af landbrugets drivhusgasemissioner kan ske ved at anvende en Tier 2-metode, hvor en korrigeret national emissionsfaktor fastsættes for ammoniumholdig gødning anvendt med, hhv. uden en nitrifikationshæmmer. Nationale emissionsfaktorer skal dokumenteres igennem et relevant måleprogram, hvor også lattergasemission fra gødningen uden nitrifikationshæmmer skal dokumenteres og implementeres som en Tier 2-metode.

7.15.2 Relevans og potentiale

Effekten af nitrifikationshæmmere på udvaskning forventes at være størst på sandjord med dyrkning af majs, roer og kartofler, som på grund af sen kvælstofoptagelse har en forhøjet risiko for tab ved kraftig nedbør i forårsperioden. Majs dyrkes primært på kvægbedrifter, der tilføres kvælstof i form af gylle (Olesen et al., 2018). Olesen et al. (2018) præsenterede en beregning af udvaskningsreduktion for kvælstof i gylle udbragt på JB1-4, og den tilhørende klimateffekt. Ved dyrkning af majs på sandjord med høj udvaskningsrisiko kan nitrifikationshæmmere være et udgiftsneutralt virkemiddel mod kvælstoftab om foråret (Oversigt over Landsforsøgene 2020), og dermed et "gratis" klimavirkemiddel. For andre

anvendelser vil omkostningseffektiviteten af nitrifikationshæmmere som klimavirkemiddel afhænge af potentialet for at reducere den direkte emission af lattergas fra marken (se afsnit 7.15.3).

Al flydende husdyrgødning, dvs. gylle og ajele, fra konventionelle brug kan behandles med nitrifikationshæmmere. Produktionen af flydende husdyrgødning var i 2015 38,3 mio. tons, heraf 14,7 mio tons fra malkekvæg (kilde: DCE, pers. medd. M.H. Mikkelsen). Omkring 9% heraf, primært fra malkekvæg, produceres på økologiske bedrifter, hvor der ikke er mulighed for at anvende nitrifikationshæmmere.

Ved anvendelse af handelsgødning har kvælstofformen betydning. Omkring 60 % er ammonium-N (estimeret på basis af NaturErhvervstyrelsen, 2015; 2016), hvis omsætning kan forsinkes ved brug af en nitrifikationshæmmer. Plantevæksten kan have fordel af en mindre startpulje af nitrat, men der kunne sættes en grænse på maksimalt 10% af total N i gødningen.

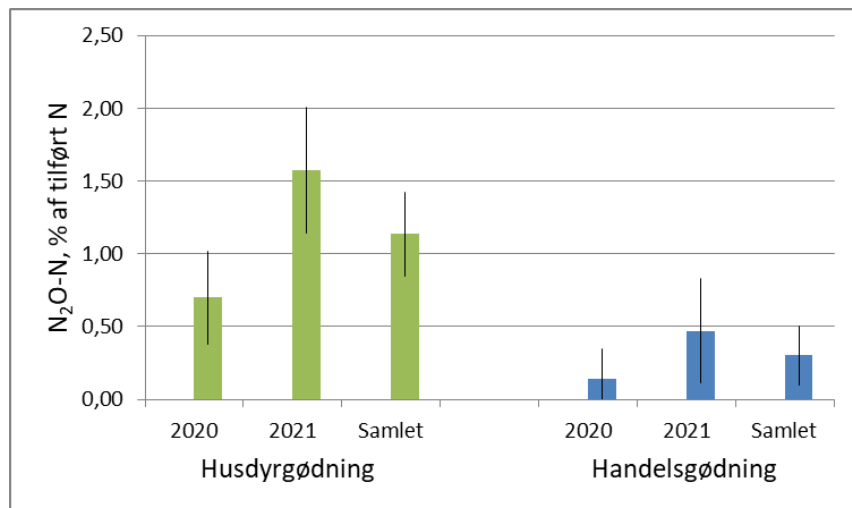
7.15.3 Effekt på drivhusgasudledning

Meta-studier af udenlandske undersøgelser har vist en gennemsnitlig reduktion af lattergasemissionen på 38 % (Akiyama et al., 2010) og 44 % (Qiao et al., 2015). Tilsvarende er der fundet en gennemsnitlig reduktion af nitratudvaskning, som er en indirekte kilde til lattergas, på 48%, men også en øget risiko for ammoniaktab (Qiao et al., 2015). Der er de senere år igangsat flere undersøgelser af lattergasemission og effekt af nitrifikationshæmmere under danske forhold. Et lysimeterforsøg 2017-2018 med tilførsel af kvæggylle til majs på grovsandet jord (Nair et al., 2020) fandt en reduktion på 46-67 % ved naturlig nedbør, og 44-48 % ved forhøjet forårsnedbør. Et opfølgende måleprogram 2018-2019 fandt tilsvarende en reduktion på 82 % i lysimeterforsøget. I et parcellforsøg med handelsgødning til vårbyg og vårraps i Østdanmark (Tariq et al., 2022) fandt man gennemsnitlige reduktioner på 16 og 58 %, men lattergasemissioner var generelt lave, og de nævnte effekter var ikke statistisk signifikante.

Der blev i 2020 og 2021 gennemført forsøg på to lokaliteter med tre nitrifikationshæmmere, som blev tilført sammen med henholdsvis handelsgødning og svinegylle. De i alt 10 forsøgsbehandlinger indgik i parcellforsøg med vårbyg det første år, og vinterhvede i det følgende år. Resultaterne viste på begge lokaliteter det højeste niveau for lattergasemission og den største absolutte reduktion af lattergasemissionen med svinegylle til vårbyg. For vinterhvede var emissionsniveau og behandlingseffekter mindre klare, ligesom der var forskelle mellem de tre nitrifikationshæmmere mht. effekt på lattergasemission, som der er behov for at undersøge nærmere. Undersøgelserne af nitrifikationshæmmere fortsætter i 2022 med udvalgte behandlinger på fire lokaliteter; resultater herfra indikerer, at både jordtype og nedbør påvirker såvel niveauet for lattergasemission som effekten af nitrifikationshæmmere på lattergasemission.

Klimaeffekten af at anvende nitrifikationshæmmere vil afhænge af reference-situationen, det vil sige emissionen af lattergas med den aktuelle praksis. Her fandt kampagner med en række gødningsmaterialer (kvæggylle, svinegylle, afgasset gylle, NS27-4, NPK og urea) på fire lokaliteter i Danmark i 2020 og 2021,

at der var et højere niveau for lattergasemission med de organiske gødninger sammenlignet med handelsgødning (figur 7.2). Selvom der ikke er tale om årlige emissionsfaktorer, så dækker disse målinger nitrifikationshæmmeres forventede opholdstid i jorden. Disse resultater antyder, at effekten af at anvende nitrifikationshæmmere vil være størst, hvis den målrettes husdyrgødning.



Figur 7.2 Sammenfatning af lattergastab, i procent af tilført N, på fire lokaliteter i en periode på 2-3 måneder efter tilførsel af en række kvælstofholdige gødninger til vårbyg i 2020 og 2021. Den viste usikkerhed repræsenterer 95% konfidensintervaller.

7.15.4 Samspil til andre virkemidler

Ved at mindske risikoen for miljømæssige tab i perioden før planteoptagelse, er der principielt grundlag for bedre kvælstofudnyttelse ved brug af nitrifikationshæmmere, særligt i afgrøder med sen vækststart. Alligevel er den overordnede konklusion af danske markforsøg med nitrifikationshæmmere i handels- eller husdyrgødning til vårbyg, vinterhvede, vinterraps, majs og kartofler, at man generelt ikke ser signifikante merudbytter (Kjellerup, 1991; Oversigt over Landsforsøgene 2018). Dette var også konklusionen af en meta-analyse af markforsøg udført i Tyskland (Hu et al., 2014), som analyserede alle tyske markforsøg med vinterhvede, vinterbyg, vinterraps, kartofler og majs uden at finde signifikant merudbytte for nogen af afgrøderne. Samlet set tyder de tilgængelige forsøgsresultater på, at en effekt på nitratudvaskning under danske forhold kun kan forventes ved væsentlig nettoafstrømning i forårsperioden. Der er desuden et samspil med omsætningen af andre kvælstofpuljer, som ikke er tilstrækkeligt belyst.

7.15.5 Usikkerheder

De mange nye måleresultater fra klimaforskningsprojekter har konsekvenser for vurderingen af nitrifikationshæmmeres effekt. I en tidligere beskrivelse af nitrifikationshæmmere (Olesen et al., 2018) blev den direkte effekt af nitrifikationshæmmere vurderet til 1,87 kg CO₂ ækv pr. kg N (for handelsgødning NH₄⁺-N) under forudsætning af *global warming potential* (GWP) for lattergas på 298; i den aktuelle rapport anvendes værdien 265 (Myhre et al., 2013), som vil blive anvendt fremadrettet. Forudsætninger for denne

beregning var en lattergasemission svarende til 0,01 kg N₂O-N pr. kg tilført N, og en 40 % reduktion med brug af nitrifikationshæmmere. Foreløbige opgørelser af resultater fra igangværende forsøg ser ud til at bekræfte disse forudsætninger, hvis effekter opgøres på tværs af alle gødningstyper og udbringningssituationer (ikke publicerede resultater). Der er dog markante forskelle mellem gødningstyper, og formentlig effekter af jordtype og klima, som kan påvirke effekten af at anvende nitrifikationshæmmere. For eksempel fremgår det af figur 7.2, at lattergasemissionen fra husdyrgødning er lige så stor som, eller større, end forudsat, mens det modsatte er tilfældet for handelsgødning. Dubgaard og Ståhl (2018) opgjorde en potentiel klimaeffekt for brug af nitrifikationshæmmere til handelsgødning på 496.238 t CO₂ ækv i 2030, men med de nye undersøgelser er denne effekt for handelsgødning usikker. Derimod er potentialet for reduktion af lattergasemission ved anvendelse sammen med husdyrgødning som gennemsnit for landet blevet bekræftet af de igangværende forsøg.

7.15.6 Sideeffekter

Som tidligere beskrevet (Eriksen et al., 2020) er nitrifikationshæmmere en meget divers stofgruppe, og konklusioner om et stof kan ikke overføres til andre. Tabel 7.13 viser egenskaber for udvalgte produkter, der anvendes i Danmark eller omkringliggende lande.

Tabel 7.13 Udvalgte egenskaber for nitrifikationshæmmere som markedsføres i Danmark eller omkringliggende lande (modificeret fra Eriksen et al. 2020).

Handelsnavn	Aktiv-stof	Dosering	Kommentarer	Leverandør
Piadin	1H-1,2,4-triazol + 3-metylpyrazol	3-7 liter/ ha ¹⁾	1,2,4-triazol er også et nedbrydnings-produkt af svampemidler som fx epoxiconazol	SKWP, Tyskland
N-Lock (fra 2022 erstattet af Instinct)	2-chlor-6-trichlor-metyl pyridin (nitrapiyrin)	2,5 liter/ha ^{2),3)}	høj flygtighed, kun til anvendelse sammen med gylle eller flydende handelsgødning; nedbrydes til 6-chlorpicolinsyre (herbicide)	Corteva Agriscience (Dow Agrosciences)
Vizura	3,4-dimetylpyrazol fosfat (DMPP)	2-3 liter/ha ⁴⁾	begrænset mobilitet i jorden, kun til anvendelse sammen med gylle eller flydende handelsgødning	BASF
Didin	dicyandiamid (DCD) + urease inhibitor	10-15 liter/ha (handelsgødning, afgasset gylle); 20-25 liter/ha (frisk gylle) ⁵⁾	meget vandopløselig; høj dosering; DCD med høj kvælstofandel, som kan give planteskader	Omex Agriculture Ltd, Storbritannien

¹⁾ <https://www.piadin.de/en/#yield>

²⁾ <https://www.corteva.dk/produkter/plantevaern/n-lock.html>

³⁾ <https://www.corteva.dk/produkter/plantevaern/instinct.html>

⁴⁾ <https://www.agro.basf.dk/da/Produkter/Produktsogning/Nitrogen/Vizura.html>

⁵⁾ <https://www.omex.com/products/uk-agriculture-products/crops/potatoes/didin/>

7.15.6.1 Udvaskningsrisiko

En kort sammenfatning af litteratur om udvaskningsrisiko for nitrifikationshæmmere og nedbrydningsprodukter blev præsenteret i Eriksen et al. (2020). Der er ikke fundet nyere viden om de nitrifikationshæmmere, som nævnes i tabel 7.13. Piadin indeholder 1,2,4-triazol, som også er et nedbrydningsprodukt fra fungicider som fx difenoconazol eller tebuconazol, og det er herigennem reguleret. 1,2,4-triazol er fundet i grundvandet (Rosenbom et al., 2017). Der kan også være en naturlig baggrund af 1,2,4-triazol. Et notat fra Miljøstyrelsen (<https://mst.dk/service/nyheder/nyhedsarkiv/2019/nov/notat-om-kilder-til-1-2-4-triazol-i-miljoet/>)

citerer tyske undersøgelser, der har fundet 1,2,4-triazol i skovjord i koncentrationer, der svarer til en årlig produktion i samme størrelsesorden som den aktuelle tilførsel via pesticider, men fordelt over året. 1,2,4-triazol reguleres som en pesticidmetabolit og er derfor underlagt en kravværdi på 0,1 mikrogram pr. liter i grundvand.

Nitrapyrin blev i en engelsk undersøgelse fundet i vandløb tæt på dyrkede arealer i forårsperioden efter tilførsel sammen med flydende ammoniak (Woodward et al., 2016). Der var en sammenhæng mellem forekomst og kraftig regn, og det blev konkluderet, at der var tale om overfladeafstrømning.

DMPP i afstrømning fra grovsandet jord blev undersøgt i et lysimeterforsøg med simuleret høj forårsnedbør (Nair et al., 2020). DMPP blev ikke detekteret i nogen af de i alt 28 prøver fra udvalgte behandlinger og perioder med forventet risiko for hurtig vandtransport, som blev analyseret.

I lyset af deres meget forskellige fysisk-kemiske egenskaber er der behov for at definere et regelsæt for risikovurdering af mobilitet og toxicitet af de enkelte produkter. Det kan forhindre brug af aktiv- eller hjælpestoffer med forhøjet risiko, men også bane vejen for mere udbredt anvendelse af stoffer, hvor der ikke forventes effekter eller miljømæssige tab ved forårsudbringning.

7.15.6.2 Toksicitet

Nitrifikationshæmmere og andre tilsætningsstoffer til gødning er omfattet af EU Regulation 2019/1009². CE-mærkede produkter er godkendt til brug i alle EU-lande, og indholdsstofferne skal registreres i den fælles europæiske kemikaliedatabase REACH³. Der er ikke formelle krav til en kvantitativ risikovurdering inden markedsføring (John Jensen, pers. comm.), og som beskrevet i Eriksen et al. (2020) findes derfor kun få studier af økotoksikologiske effekter. Følgelig er der behov for en vurdering af de enkelte nitrifikationshæmmers spredningsveje og effekter i det miljø, hvor stofferne anvendes, dvs. dyrkningsjord. Nitrifikationshæmmere forventes at have en umiddelbar negativ effekt på ammoniumoxiderende

² Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003 (Text with EEA relevance)Text with EEA relevance" <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02019R1009-20220716>

³ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DA/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006R1907&qid=1662622311358&from=EN>

mikroorganismer, som er målgruppe for stofferne. Nitrifikation er en nøglefunktion og anvendes som indikatorer for jordkvalitet (ISO Standard 14238; Griffiths et al., 2016). Varigheden af denne påvirkning er ikke undersøgt under danske markforhold. Forudsat at der ikke er toksiske effekter af de enkelte nitrifikationshæmmere, forventes ingen effekt på natur og biodiversitet (se afsnit 7.15.7).

Både tidligere (se Eriksen et al., 2020) og nyere undersøgelser, bl.a. Bachtsevani et al. (2021) og Schmidt et al. (2022), har vist, at de forskellige aktivstoffer og formuleringer har meget forskellige egenskaber og potentielle effekter i naturen. Nitrifikationshæmmere tilføres sammen med en kvælstofkilde, og deres fordeling og interaktion med jordlevende organismer i dyrkningsjorden er således knyttet til omsætningen i næringsrige miljøer. Dette komplicerer risikovurderingen, og der er behov for praksisnær information om de forskellige nitrifikationshæmmers påvirkning af jordlevende organismer og vandkvalitet.

I projektet "Klima- og Miljøeffekter af Nitrifikationshæmmere (KLIMINI)"⁴ undersøges effekten af tre nitrifikationshæmmende produkter (Piadin, N-Lock/Instinct og Vizura) på jordbundens fauna og mikroorganismer både i standardlaboratorietests og under feltforhold på landbrugsjord.

De fire aktivstoffer 1H-1,2,4-triazol og 3-metylpyrazol (Piadin), 2-chlor-6-trichlor-metylpyridin (N-Lock/Instinct, nitrapyrin) og 3,4-dimetylpyrazol fosfat (Vizura, DMPP) er blevet testet for effekter på springhaler, enkytræer og regnorme under laboratoriebetingselser (M. Bruus, upubliceret) efter guidelines, som også anvendes ved risikovurdering af pesticider (OECD 2016a,b,c), dvs. aktivstofferne blev homogent opblandet i jord, hvorefter testdyrene blev tilsat. Eksponeringen i laboratoriet kan således ikke direkte sammenlignes med anvendelsen af nitrifikationshæmmere i marken, hvor stofferne udbringes efter opblanding med enten gylle eller handelsgødning. De observerede effekter på jordbundsdyrenes reproduktion efter 28-56 dage blev sammenlignet med de forventede eksponeringsdoser, enten via gylle (30 t/ha) med maksimale NI-doser (tabel 7.13) eller ved opblanding af nitrifikationshæmmerne i de øverste 5 cm af dyrkningsjorden.

Toksicitets-eksponeringsratioen, TER, er forholdet mellem NOEC (den højeste dosis, som ikke giver effekter på reproduktion) og den forventede eksponering. TER blev beregnet for en enkelt tilførsel af nitrifikationshæmmer. TER for DMPP varierede i forsøgene med jordbundsdyr mellem 22 og 269 i jord, og mellem 1 og 11 i gylle. De tilsvarende risikokvotienter for nitrapyrin var 3-328 i jord og 0-13 i gylle, for 1H-1,2,4-triazol 20-832 i jord og 1-47 i gylle, og for 3-methylpyrazol 172-480 i jord og 10-43 i gylle. Ved risikovurdering af pesticider giver TER for effekter på reproduktion mindre end 5 anledning til yderligere undersøgelser eller risikomindskende tiltag (European Commission, 2002) og er altså udtryk for potentielt negative effekter. Hvis samme tærskelværdi blev anvendt for nitrifikationshæmmere, hvilket der ikke er krav om, ville eksponeringen i gylle overskride værdien for DMPP, nitrapyrin og 1H-1,2,4-triazol, mens kun nitrapyrin ser ud til at kunne være problematisk for jordbunddyr ved eksponering i de øverste 5 cm af

⁴ <https://projects.au.dk/klimini>

dyrkningsjorden. Hvis nitrifikationshæmmere tilføres flere gange i vækstsæsonen, kan risikoen for negative effekter på jordbundsdyrene øges, afhængigt af om stofferne nedbrydes inden næste tilførsel. Jordbundsdyr forventes at undgå direkte kontakt med det anaerobe og ammoniakholdige miljø i nytilført gylle (fx Curry, 1976), hvorimod gylle efter nogle uger virker tiltrækkende på jordbundsdyr og stimulerer populationsvækst (fx Curry, 1976, Silva et al., 2016). Derfor forventes det største potentiale for eksponering at være ved tilførsel direkte på jorden sammen med handelsgødning eller via gylle, der har ligget nogle uger på jorden/i jorden, hvor koncentrationen af nitrifikationshæmmere forventes at være delvist nedbrudt (Byrne et al., 2020).

I KLIMINI-projektet blev effekten af de nævnte fire aktivstoffer i tre udvalgte nitrifikationshæmmere også undersøgt for effekter på jordens mikrobielle stofomsætning. De fire stoffer blev opblandet i jord i koncentrationer svarende til normal dosis i de øverste 5 cm af jorden samt i stigende koncentrationer (2, 5 og 10 x normal eksponering). De mikrobielle samfunds metaboliske kapacitet blev målt efter 0, 7, 14 og 28 dage med et assay kaldet MicroResp, som måler substratinduceret respiration (SIR) med 6 forskellige kulstofkilder (L-Malic Acid, Gamma amino butyric acid, n-acetyl glucosamine, D(+) glucose, Alpha ketoglutarate, Citric acid) samt uden tilsætning af kulstof (Creamer et al., 2009). Denne test af toksiske effekter af de fire NI aktivstoffer følger standardforskrifter (Standard Operation Procedure) modificeret til økotoxikologi i jord (Creamer et al., 2009 ; Wakelin et al., 2013) med test set-up som for C mineralisering i jord ifølge OECD guideline 217 (OECD, 2000). Substrat induceret respiration ($\text{mg CO}_2 \text{ g}^{-1} \text{ jord time}^{-1}$) viste for alle 4 kemikalier generelt forøget SIR efter 14 dages inkubering i forhold til samme behandlinger uden NI, men ingen ændring efter 7 og 28 dages inkubering. Dette kunne antyde, at nedbrydning af NI aktivstofferne foranlediger øget respiration, som efterfølgende falder tilbage til baggrundsniveau. Dokumentation af dette vil dog kræve målinger af koncentrationen af nitrifikationsinhibitor (NI) i løbet af inkuberingstiden, hvilket ikke er inkluderet i undersøgelserne.

I markforsøg på to lokaliteter med vårbyg i 2020, og vinterhvede i 2020-2021, blev anbefalet dosis af tre forskellige nitrifikationshæmmere tilført sammen med såvel handelsgødning som svinegylle (jfr. afsnit 7.15.3). Jordtypen var en lerblandet sandjord (JB4) i Vestdanmark og en sandblandet lerjord (JB6) i Østdanmark. Her blev jordprøver analyseret for effekter på bakterie- og svampesamfundenes størrelse og biodiversitet 3 uger efter gødskning i marts-april, og igen umiddelbart efter høst i august-september. Samlet set var variationen i sammensætning af de mikrobielle samfund, som kunne forklares med jordtype, gødningstype og forskelle mellem år mere betydende end effekten af nitrifikationshæmmerne. Der blev i 2020 og 2021 fundet få effekter af nitrifikationshæmmerne på mikroledyr og regnorme i markforsøgene. Disse var som regel væk i efterårssæsonen.

Da foråret i 2020 var varmt og tørt, og i 2021 koldt og vådt, er det vanskeligt at drage generelle konklusioner om miljøeffekter af nitrifikationshæmmerne. Undersøgelserne fortsætter i 2022 og 2023 på JB6-jorden, hvor der således vil foreligge resultater for påvirkningen efter 4 års eksponering for nitrifikationshæmme. For dels

at kunne estimere effektniveauer under feltbetingelser, og dels at simulere effekter af højere doser, som vil forekomme efter gødskning af græs, som kan forekomme op til 4 gange gennem en sæson, er KLIMINI-forsøget i 2022-2023 udført med stigende doser tilført umiddelbart efter såning af vårbyg. De første resultater herfra viser, at jordbundens mikroledyr først hæmmes af DMPP tilført i 10 × normal dosis med svinegylle, men omkring høst var nogle populationer signifikant fordoblede ved denne dosis. Ved 3 × normaldosering sås ingen effekter af DMPP. For nitrapyrin (Instinct®) sås ikke effekter. På trods af korttidseffekterne, der halverede antallet af jordmider, vendte disse sig til øgede populationer som udtryk for, at høje DMPP doser kan ændre jordbundens økosystem. Sådanne ændringer kan skyldes, at økosystemet er usundt på andre parametre, selvom vi ser stimulationer.

7.15.7 Sammenfatning

På baggrund af de foreløbige observationer må klimaeffekten af nitrifikationshæmmere til handelsgødning vurderes at være mere usikker end effekten af nitrifikationshæmmere til husdyrgødning. Dette skyldes ikke en forventet forskel i den specifikke effektivitet med hhv. handels- og husdyrgødning i situationer med lattergasemission. Det skyldes i højere grad, at der under danske forhold med hensyn til jordtype og klima er en større risiko for lattergasemission, og dermed et større reduktionspotentiale, for husdyrgødning. Derfor fastholdes vurderingen af et reduktionspotentiale for husdyrgødning på 1,7 kg CO₂-ækv/kg N (= 1,87 kg CO₂-ækv/kg N × 265/298; jfr. afsnit 7.15.5), mens det for handelsgødning sættes til 1,0 kg CO₂-ækv/kg N; begge tal kan blive justeret i de kommende år i takt med, at flere danske undersøgelser bliver offentliggjort.

Med hensyn til sideeffekter tyder de foreløbige resultater på, at gentagne udbringninger af nitrifikationshæmmere påvirker jordbundsfaunaen ved at forskyde sammensætningen og størrelsen af de forskellige populationer, men der er formentlig ikke tale om egentlige giftvirkninger. Resultaterne fra undersøgelser af effekter på mikroorganismer foreligger ikke endnu, ligesom vækstsæsonen 2023 med vinterbyg ikke er gennemført. Det er således for tidligt at konkludere om miljøeffekter på jordens mikroorganismer.

I lyset af deres meget forskellige fysisk-kemiske egenskaber er der behov for at definere et regelsæt for risikovurdering af mobilitet og toxicitet af de enkelte produkter. Det kan forhindre brug af aktiv- eller hjælpestoffer med forhøjet risiko, men også bane vejen for mere udbredt anvendelse af stoffer, hvor der ikke forventes effekter eller miljømæssige tab ved forårsudbringning. I de tilfælde hvor en nitrifikationshæmmer indeholder samme aktivstof som et godkendt pesticid, kunne regelsættet med fordel tage udgangspunkt i den foreliggende viden og godkendelse.

Referencer

Akiyama, H., Yan, X.Y., Yagi, K. (2010). Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. *Global Change Biol.* 16, 1837–1846.

- Bachtsevani, E., Papazlatani, C.V., Rousidou, C., Lampronikou, E., Menkissoglu-Spiroudi, U., Nicol, G.W., Karpouzas, D.G., Papadopoulou, E.S. (2021). Effects of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on the activity and diversity of the soil microbial community under contrasting soil pH. *Biology and Fertility of Soils* 57:1117–1135.
- Byrne, M.P., Tobin, J.T., Forrestal, P.J., Danaher, M., Nkwonta, C.G., Richards, K., Cummins, E., Hogan, S.A., O'Callaghan, T.F. (2020) Urease and nitrification inhibitors—As mitigation tools for greenhouse gas emissions in sustainable dairy systems: a review. *Sustainability* 12: 6018.
- Creamer, R.E., Bellamy, P., Black, H.I.J. et al. (2009). An inter-laboratory comparison of multi-enzyme and multiple substrate-induced respiration assays to assess method consistency in soil monitoring. *Biol Fertil Soils* 45, 623–633 (2009). <https://doi.org/10.1007/s00374-009-0374-y>
- Curry, J.P. (1976). Some effects of animal manures on earthworms in grassland. *Pedobiologia* 16(6): 425-438.
- Dubgaard, A., Ståhl, L. (2018). Omkostninger ved virkemidler til reduktion af landbrugets drivhusgasemissioner: Opgjort i relation til EU's 2030-målsætning for det ikke-kvotebelagte område. IFRO Rapport, no. 271, Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi, Københavns Universitet.
- Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H., Baattrup-Pedersen, A., Strandberg, B., Christensen, B.T., Boelt, B., Iversen, B.V., et al. (2020). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus: Aarhus Universitet – DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. 454 s. (DCA rapport; Nr. 174).
- European Commission (2002). Guidance Document on Terrestrial Ecotoxicology Under Council Directive 91/414/EEC. SANCO/10329/2002 rev 2 final, 17 October 2002 Tilgængeligt 22.9. 2022.
- Griffiths, B.S., Römbke, J., Schmelz, R.M. (2016) Selecting cost effective and policy-relevant biological indicators for European monitoring of soil biodiversity and ecosystem function. *Ecological indicators* 69: 213-223
- Hu, Y., Schraml, M., von Tucher, S., Li, F., Schmidhalter, U. (2014). Influence of nitrification inhibitors on yields of arable crops: A meta-analysis of recent studies in Germany. *Int. J. Plant Prod.* 8, 33–50.
- Kjellerup, V. (1991). Tørstofudbytte, kvælstofoptagelse og -udvaskning ved anvendelse af gylle iblandet nitrifikationshæmmere. Beretning nr. S2139. Tidsskrift for Planteavl's Specialserie, 77 pp.
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., et al. (2013). "Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing" (PDF). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pp. 659–740.

- Nair, D., Baral, K.R., Abalos, D., Strobel, B.W., Petersen, S.O. (2020). Nitrate leaching and nitrous oxide emissions from maize after grass-clover on a coarse sandy soil: Mitigation potentials of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP). *J. Environ. Manage.* 260, 110165.
- NaturErhvervstyrelsen (2015). Salg af Handelsgødning i Danmark, 2015. https://naturerhverv.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Virksomheder/Handelsgoedning/Statistik_salg_af_handelsgoedning/Statistik_salg_af_handelsgoedning_i_DK_2013-14.pdf
- NaturErhvervstyrelsen (2016). Gødningsfortegnelse. https://naturerhverv.dk/fileadmin/user_upload/NaturErhverv/Filer/Landbrug/Handelsgoedning/Gødningsfortegnelse16-02-11_1_.pdf
- OECD (2016a). Test No. 232: Collembolan Reproduction Test in Soil, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264264601-en>.
- OECD (2016b). Test No. 220: Enchytraeid Reproduction Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264264472-en>.
- OECD (2016c). Test No. 222: Earthworm Reproduction Test (*Eisenia fetida*/*Eisenia andrei*), OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264264496-en>.
- OECD (2000). Test No. 217: Guideline for the testing of chemicals. Soil Microorganisms: Carbon Transformation Test.
- Olesen, J.E., Petersen, S.O., Lund, P., Jørgensen, U., Kristensen, T., Elsgaard, L., Sørensen, P., Lassen, J. (2018). Katalog over virkemidler til reduktion af landbrugets klimagasser. DCA Rapport nr. 130, 119 pp.
- Oversigt over Landsforsøgene (2016) Forsøg og undersøgelser i Dansk Landbrugsrådgivning. SEGES Planter og Miljø.
- Oversigt over Landsforsøgene (2018) Forsøg og undersøgelser i Dansk Landbrugsrådgivning. SEGES Landbrug & Fødevarer PlantelInnovation.
- Oversigt over Landsforsøgene (2020) Forsøg og undersøgelser i Dansk Landbrugsrådgivning. SEGES Plante- og MiljøInnovation.
- Oversigt over Landsforsøgene (2020) Forsøg og undersøgelser i Dansk Landbrugsrådgivning. SEGES Plante- og MiljøInnovation.
- Qiao, C., Liu, L., Hu, S., Compton, J.E., Greaver, T.L., Li, Q. (2015). How inhibiting nitrification affects nitrogen cycle and reduces environmental impacts of anthropogenic nitrogen input. *Glob. Chang. Biol.* 21, 1249–1257.

- Rosenbom, A.E. (red.), 2017. Varslingssystemet for udvaskning af pesticider til grundvand (VAP) Sammenlægning af monitoringsresultater med fokus på juli 2014 - juni 2016. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland. 18 pp.
- Schmidt, R. et al. (2022). The nitrification inhibitor nitrapyrin has non-target effects on the soil microbial community structure, composition, and functions. *Applied Soil Ecology* 171, 104350.
- Silva, D. M., Jacques, R.J.S., Silva, D.A.A., Santana, N.A., Vogelmann, E., Eckhardt, D.P., Antonioli, Z.I. (2016). Effects of pig slurry application on the diversity and activity of soil biota in pasture areas. *Ciência Rural* [online]. 2016, v. 46, n. 10 [Accessed 14 September 2022] , pp. 1756-1763. Available from: <<https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20141869>>. Epub Oct 2016. ISSN 1678-4596.
- Tariq, A., Larsen, K.S., Hansen, L.V., Jensen, L.S., Bruun, S. (2022). Effect of nitrification inhibitor (DMPP) on nitrous oxide emissions from agricultural fields: Automated and manual measurements. *Sci Total Environ.* (i trykken; doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157650.)
- Wakelin S., Lombi E., Donner E., MacDonald L., Black A., O'Callaghan M. (2013). Application of MicroResp™ for soil ecotoxicology. *Environmental Pollution* 179 (2013) 177e184
- Woodward, E.E., Hladik, M.L., Kolpin, D.W., 2016. Nitrapyrin in streams: The first study documenting off-field transport of a nitrogen stabilizer compound. *Environmental Science & Technology Letters* 2016, 387-392. DOI: 10.1021/acs.estlett.6b00348

8 Arealanvendelse

8.1. Udtag af omdriftsareal til permanent ugødet brak (KVM8.1)

Forfattere: Gitte Blicher-Mathiesen, Institut for Ecoscience og Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Søren O. Petersen, Institut for Agroøkologi

Landbrugsarealer, der permanent udtages af landbrugsdrift, vil overgå til en anden arealanvendelse. Udtagning kan både være til veje, byudvikling, etablering af natur som fx overdrev eller skov.

8.12.1 Anvendelse

I nærværende afsnit vurderes udtagning af omdriftsjord til tør natur med et plantedække af græs. Udtagning til skov eller til energiafgrøder vil have en lidt anden effekt, idet der her vil være en større kulstofopbygning i den over- og underjordiske vedbiomasse.

En vigtig forudsætning for at opnå en reduktion i nitratudvaskning er, at der på arealet er et ophør af jordbearbejdning, stop for tilførsel af handels- og husdyrgødning, og at der er et veletableret plantedække.

Udvaskningen vil fortsat være lav på udtagne arealer, der afgræsses ekstensivt. Med ekstensiv afgræsning skal husdyrtrykket afpasses til produktionen af biomasse. Et husdyrtryk på mellem 0,5 og 1,0 DE/ha vil ofte være et niveau, hvor afgræsningen kan holde trit med biomasseproduktionen (Gundersen og Buttenschön, 2005) samt under forudsætning af at dyrene ikke fodres med udefra kommende fodertilskud.

8.12.2 Relevans og potentiale

I forbindelse med effektfastsættelse af virkemidler, hvor jorden udtages af almindelig landbrugsmæssig drift, er effekten på nitratudvaskning hovedsageligt fastsat i forhold til et modelberegnet gennemsnit for nitratudvaskning fra jord i omdrift. Det gælder fx for skovrejsning, brak og energiafgrøder. I Virkemiddelkataloget fra 2014 (Eriksen et al., 2014) udgjorde referencen for den årlige gennemsnitlige udvaskning for hele landet ca. 62 kg N/ha. Denne udvaskning var beregnet med NLES4-modellen med landbrugsdata for 2007-2011 (Børgesen et al., 2013). En genberegning baseret på data fra 2017 har vist, at den opgjorte referenceudvaskning svarer til ca. 66 kg N/ha for landbrugsafgrøder i omdrift og ca. 61 kg N/ha for hele det dyrkede areal (Gitte Blicher-Mathiesen, AU, upubliceret). Referenceudvaskningen ligger altså reelt på samme niveau som anvendt i Eriksen et al. (2014). Ved den her gennemførte opdatering, er der for de virkemidler, der er fastsat på baggrund af referenceudvaskningen, hovedsageligt taget udgangspunkt i den reviderede værdi på 61 kg N/ha.

Anvendes den gennemsnitlige referenceudvaskning til fastsættelse af en effekt af et givent virkemiddel, antages i princippet, at udbredelsen af virkemidlet er jævnt fordelt uden hensyntagen til bonitet og øvrige

dyrkningsforhold. Dette vil ofte ikke være tilfældet i praksis, men en mere detaljeret effektfastsættelse forudsætter, at udvaskningen før fx etablering af energiafgrøder og brak blev bestemt for den forudgående arealanvendelse.

Potentiale for virkemidlet permanent udtagning er hele det dyrkede areal.

8.12.3 Effekt på drivhusgasudledning

Kvælstofeffekt: For landbrugsarealer, der udtages permanent til ekstensivt udnyttede græsarealer, vil den årlige udvaskning af nitrat efter en årrække være lavere end for arealer i omdrift. Udvasningsniveauet for de udtagne arealer vil især være påvirket af, hvor meget husdyrgødning arealet har fået tilført i årene forud for udtagningen. Men størrelsen af perkolation og jordtype har også en væsentlig betydning. For landbrugsarealer på mineraljorde, som har fået tilført moderate mængde af husdyrgødning og hvor arealet udtages til vedvarende græs med et lavt græsniveau 8.1.3gstryk eller med høslæt, viser målinger, at den årlige udvaskning falder til mellem 1 og 10 kg N/ha det første år efter udtagning (Blicher-Mathiesen et al. 2020). Udvasningen vil yderligere falde til mellem 0 og 6 kg N/ha efter 2-5 års udtagning og til mellem under 1 og 3 kg N/ha efter 6-14 år med udtagning. Modelberegninger gennemført med rodzonemodellen DAISY for 3 arealer udtaget til brak omkring en drikkevandsboring på Tunø viser, at den årlige udvaskning over tid igen vil kunne stige lidt på grund af ændringer i jordens organiske puljer til mellem 2 og 5 kg N/ha inden for et 100 årigt tidsperspektiv, idet intervallet afspejler jordens variation i humusindhold på 1,4-2,8 % (Jensen og Thirup, 2006).

For landbrugsarealer, der udnyttes intensivt, og som har fået tilført store mængder af husdyrgødning i mange år, viser målinger fra to jordvandsstationer i Landovervågningen, at udvaskningen stadig kan være høj indtil tre år efter udtagning og herefter falde til et niveau omkring 6-26 kg N/ha (Blicher-Mathiesen et al., 2020).

Idet der kun eksisterer et begrænset antal målinger af udvaskning ved udtagning af arealer fra landbrugsproduktion, og disse ikke tilstrækkeligt dækker den variation, der eksisterer for effekten af virkemidlet bl.a. relateret til tilførsel af husdyrgødning i årene før udtagning og størrelsen af perkolationen, er det ikke muligt på baggrund af målinger at opskalere måleresultaterne til et landsgennemsnit.

Hidtil er der som gennemsnit for hele landet anvendt en årlig udvaskning på 12 kg N/ha for arealer, der er udtaget af landbrugsproduktion (Børgesen et al., 2013; Eriksen et al., 2014). Dette niveau ligger nogenlunde midt mellem de to estimater for arealer med henholdsvis begrænset og intensiv tilførsel af husdyrgødning før udtagning. Det anbefales at bibeholde dette gennemsnitsestimat for effekten af permanent udtagning af arealer, idet der som førnævnt ikke eksisterer tilstrækkelige måledata til at ændre eller verificere dette niveau. Der er tilknyttet en stor usikkerhed på det gennemsnitlige estimat, idet målinger af udvaskningen som førnævnt viser, at effekten afhænger af, hvor meget husdyrgødning landbrugsarealet har fået før udtagning, samt af jordtype og størrelsen af perkolationen. Med en referenceudvaskning på 61 kg N/ha

(se kapitlet Koncept for anvendelse og effektfastsættelse af kvælstofvirkemidler, denne rapport) bliver den generelle effekt af permanent udtagning 49 kg N/ha.

Udvaskning fra naturarealer, der har været natur i mange år, er lav på 0,5-5 kg N/ha (Blicher-Mathiesen et al., 2020). Grunden til at udvaskningen er højere på naturarealer etableret på tidligere landbrugsjord er, at dyrkede jorde har et højere indhold af kvælstof bundet i labilt organisk stof end arealer, der har været natur i mange år. For naturarealer, der udnyttes med ekstensiv afgræsning, vil udvaskningen fortsat være lav.

Kvælstofgødningsinputtet til braklagte arealer er 0 kg N/ha mod 171 kg N/ha i referencesædskiftet (tabel 7.5). Med hensyn til C-input antages, at det er højere end C-inputtet i planterester i referencesædskiftet, således at jordens kulstofbalance ændres til positiv. Da hele planteproduktionen tilbageføres til arealet, vil der med tiden udvikles et robust plantedække med dybtgående rødder, der er i stand til at optage både vand og mineraliseret N meget effektivt. Hvor stor effekten er afhænger dog af jordens bonitet og mineraliseringsevne. Sammenlignet med korndyrkning (referencesituationen), kan reduktionen i lattergasemission fra kvælstofgødning, ammoniakfordampning og nitratudvaskning beregnes (se kapitel 4) til at være henholdsvis 712, 28 og 92 kg CO₂-ækv/ha. Det antages, at der årligt lagres omkring 150 kg C/ha mere end i standardsædskiftet svarende til en reduktion i udledning på 500 kg CO₂-ækv./ha. Endvidere vil besparelsen på kalkning være 94 kg CO₂ ækv/ha og fossil energi ved undgået dyrkning 361 kg CO₂-ækv/ha. Samlet vil klimaeffekten være ca. 1787 kg CO₂-ækv./ha.

Kulstofeffekt: Udenlandske undersøgelser under klimaforhold, der nærmer sig danske indikerer, at selvom emnet stadig er omdiskuteret bidrager braklægning til C-binding i jorden og at denne binding er større, jo mere langvarig braklægningen er (Kozak and Pudelko, 2021, Yang et al. 2022). Yang et al. (2019) fandt således at den årlige kulstofbinding var større i anden del af den undersøgte periode (13-22 år efter braklægning) end i perioden forud. Der er behov for tilsvarende danske undersøgelser for at kvantificere effekten under danske klima- og jordbundsforhold. Resultaterne fra Kozak and Pudelko (2021) viser, at der kan være store variationer afhængig af jordtype og vegetation.

Tabel 8.1 Effekter på kvælstofbalance og øvrige klimarelaterede forhold ved omlægning af landbrugsareal (reference) til permanent brak

Dyrkningsforhold for permanent udtagning	Udtaget areal	Reference
N input i handelsgødning	0 kg N/ha	171 kg N/ha
N input i planterester	70 kg N/ha	70 kg N/ha
Nitratudvaskning	12 kg N/ha	61 kg N/ha
Ammoniakfordampning	0 kg N/ha	6,8 kg N/ha
Kalkning	0 kg CO ₂ ækv/ha	94 kg CO ₂ ækv/ha
C-input*	183 kg CO ₂ ækv/ha	0 kg CO ₂ ækv/ha
Jordbearbejdning	0 kg CO ₂ ækv/ha	361 kg CO ₂ ækv/ha

* Der er pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord (LULUCF) skal beregnes med henblik på at indregne det i landbrugets ud-ledninger og i hvilken udstækning det vil blive muligt. Der tages derfor forbehold mht. at LULUCF bidraget kan adderes direkte til de øvrige poster – som det er gjort her – for at beregne netto klimaeffekten af virkemidlerne.

8.12.4 Samspil til andre virkemidler

Virkemidlet omlægning til permanent ugødet brak kan ikke anvendes sammen med andre fladevirkemidler, der involverer ændrede gødningstilførsler og -strategier eller plantedyrkning. Reduceret kvælstofudvaskning ved benyttelse af virkemidlet vil betyde, at der kvantitativt kan fjernes mindre kvælstof ved samtidig anvendelse af dræn- og vandløbsvirkemidler.

8.12.5 Usikkerheder

Det er usikkert hvor meget længden af braklægningsperioden påvirker klimaeffekten både med hensyn til C binding i jorden og N udledningerne. Det samme gælder for benyttelsen af brakmarkerne. Længerevarende brak må forventes at have større effekt end en et-årig udtagning. Dette gælder i øvrigt også for biodiversiteten.

Referencer

Blicher-Mathiesen, G., Olesen, J.E., Jung-Madsen, S. (red). (2020). Opdatering af baseline 2021. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 140 s. -Teknisk rapport nr. 162. <http://dce2.au.dk/pub/TR162.pdf>

Blicher-Mathiesen et al. 2020. Permanent udtagning og kortvarig brak i omdrift. I: Eriksen, J., et al., (red.). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastning til vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationale Center for Fødevarer og Jordbrug. DCA rapport nr. 174. s 115-126. <https://dcapub.au.dk/djfpdf/DCArapport174.pdf>

Børgesen, C.D., Nordemann Jensen, P., Blicher-Mathiesen, G., Schelde, K. (editors) (2013). Udviklingen i kvælstofudvaskning og næringsstof-overskud fra dansk landbrug for perioden 2007-2011 Evaluering af implementerede virkemidler til reduktion af kvælstofudvaskning samt en fremskrivning af planlagte virkemidlers effekt frem til 2015. DCA rapport nr. 31.

Eriksen, J., Jensen, P.N., Jacobsen, B.H. (red.) (2014). Virkemidler til realisering af 2. generations vand-planer og målrettet arealregulering. DCA Rapport 052. http://web.agrsci.dk/djfpublikation/djfpdf/Virkemiddelkatalog_web.pdf

Gundersen, P., Buttenschøn, R.M. (2005). Vegetationsudvikling og nitratudvaskning ved ændret arealanvendelse – eng, overdrev og skovrejsning i Drastrup projektet 1998-2005. Aalborg Kommune og Forskningscenter for Skov og Landskab, 50 sider.

Jensen, J.C.S., Thirup, C. (2006). Nitratudvaskning i indsatsområde Tunø. Rapport udgivet af Århus Amt. 42 sider.

8.13 Udyrkede bræmmer langs vandløb og søer på mineraljord (KVM8.2)

Forfatter: Brian Kronvang, Institut for Ecoscience og Mathias Neumann Andersen, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Søren O. Petersen, Institut for Agroøkologi

Bræmmer, som de tidligere randzoner, er smalle striber af udyrket land langs vandløb og omkring søer, som hverken gødes eller sprøjtes. Der findes to typer af bræmmer, den tørre som etableres uden ændring af hydrologien i bræmmen og den våde bræmme hvor hydrologien ændres, typisk i forbindelse med afskæring af dræn og/eller ændret vandføringsevne i vandløb. Denne rapport behandler kun de tørre udlagte og udyrkede bræmmer på mineraljord langs vandløb og søer.

8.2.1 Anvendelse

Udyrkede bræmmer med permanent vegetation etableres for at beskytte vandløb og søer mod tilførsel af sediment, kvælstof, fosfor og bekæmpelsesmiddel rester fra overfladisk afstrømning på tilstødende marker (Kronvang et al., 2014 & 2020). Randzonen fremstår derfor i landskabet som en braklagt stribe land. I 1992 blev det med en opdatering af Vandløbsloven lovpligtigt at udlægge en 2 m udyrket bræmme langs alle offentlige og højt målsatte vandløb (Skov- og Naturstyrelsen, 2002). I 2011 blev randzoner lovpligtige med vedtagelsen af Randzonenloven hvor udyrkede randzoner inkl. en evt. 2 m bræmme skulle etableres med en bredde på 10 m langs alle vandløb og søer større end i 100 m². I 2014 blev randzonenloven revideret og der skulle nu etableres 9 m randzoner omkring alle offentlige og vandplan-vandløb. Randzonenloven blev ophævet i 2016.

Ved etableringen af de 'tørre' bræmmer på mineraljord ændres der kun på dyrkningen (forbud mod dyrkning, gødkning og sprøjtning) og ikke på hydrologien i bræmmen. I bræmmen kan der efter braklægning vokse græs og urter, men der kan også på sigt etableres træer i en bræmme langs vandløb og søer. Dog var det i den gamle randzonenlov pligtigt at slå vegetationen i randzonen mindst hvert andet år for at undgå fremvækst af træer.

I dag er der også udviklet andre typer af bræmmer, som intelligente bufferzoner og mættede bufferzoner, hvor man ændrer på hydrologien i bræmmen for at fremme kvælstoffjernelsen i det drænvand, som ellers løber frit under den udyrkede bræmme (Eriksen et al., 2020; Andersen et al., 2020).

8.2.2 Relevans og potentiale

Man kan anvende 2 m-bræmmer og markbræmmer som miljøfokusområder (MFO). Markbræmmer er bræmmer, der kan ligge andre steder op ad omdriftsarealer, hvor 2 m-bræmmer er bræmmer udlagt efter vandløbsloven. Etablering af de tidligere randzoner er derfor stadigvæk en mulighed for landmænd i forbindelse med Miljøfokusområder (MFO)-ordningen (Landbrugsstyrelsen, 2021). Udyrkede brede bræmmer er relevante at etablere på udpegede risikoarealer for jorderosion og overfladisk afstrømning

(Heckrath et al., 2010; Kronvang et al., 2014 & 2020). Bræmmer skal i givet fald etableres med en bredde som er tilpasset forholdene langs den enkelte mark og vil ofte skulle være bredere end de 2 m, der anvendes efter vandløbsloven fra 1992. Efter den gamle randzonestandard med 10 m randzone var der etableret ca. 50.000 ha randzoner, men en stor del af disse er siden blevet opdyrket igen. Ved en eventuel målrettet etablering af brede bræmmer langs vandløb og søer må der forventes at blive udlagt væsentligt færre end 50.000 hektar randzoner, måske i størrelsesordenen 10.000 ha, hvor der er størst risiko for tab af jord og fosfor med overfladisk afstrømning (Onnen et al., 2019).

I 2023 bliver det med den nye landbrugsreform pligtigt for landmænd, der søger landbrugsstøtte, at udlægge 3 m udyrkede, ugødede og usprøjtede bræmmer langs alle de vandløb, hvor der er i dag er lovpligtig 2 m bræmme. Det vil øge arealet med udyrkede bræmmer langs vandløb med i størrelsesordenen 5.000-6.000 ha – alt afhængig af hvor meget udyrket bræmme, der i forvejen er udlagt langs vandløbene.

De normale bræmmer, hvor vegetationen slås, må sidestilles med braklagte arealer (se afsnit 7.6 og 8.1), da ændringen i forhold til virkemiddel-effekt mod klimagasser er, at der sker en reduktion af udvaskningen af nitrat-N fra arealerne, hvilket vil reducere lattergas-emissionen fra den udyrkede bræmme.

Desuden forventes at braklægningen med tiden øger puljen af kulstof i jorden i bræmmerne pga. stoppet for jordbearbejdning og et permanent vegetationsdække. Desuden kan en eventuel tilvækst af træer i bræmmerne binde kulstof over tid. Effekter for kvælstof og fosfor er beskrevet i de to seneste virkemiddelrapporter (Eriksen et al., 2020; Andersen et al., 2020).

8.2.3 Effekt på drivhusgasudledning

Reduktionen af udledningerne beregnes på samme måde, som for permanent braklægning (afsnit 8.1 ovenfor) med den undtagelse at de udyrkede bræmmer langs vandløb forventes hovedsageligt at befinde sig på arealer med god forsyning af vand og næringsstoffer. Der forventes derfor en større planteproduktion og kulstofbinding i jorden. Kvælstofgødningsinputtet til bræmmer er 0 kg N/ha mod 171 kg N/ha i referencesædskiftet (tabel 7.5). Med hensyn til C-input antages, at det er højere end C-inputtet i planterester i referencesædskiftet, således, at jordens kulstofbalance ændres til positiv. Da hele planteproduktionen tilbageføres til arealet, vil der med tiden udvikles et robust plantedække med dybtgående rødder, der er i stand til at optage både vand og mineraliseret N meget effektivt. Sammenlignet med korndyrkning (referencesituationen), kan reduktionen i lattergasemission fra kvælstofgødning, ammoniakfordampning og nitratudvaskning beregnes til at være henholdsvis 712, 28 og 94 kg CO₂-ækv/ha. Det antages at der lagres 400 kg C/ha svarende til en reduktion i udledning på 1500 kg CO₂-ækv/ha. Endvidere vil besparelsen på kalkning være 94 kg CO₂-ækv/ha og fossil energi ved undgået dyrkning 361 kg CO₂-ækv/ha. Samlet vil klimaeffekten være 2787 kg CO₂-ækv/ha. Der er pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord (LULUCF) skal beregnes med henblik på at

indregne det i landbrugets udledninger og i hvilken udstrækning det vil blive muligt. Der tages derfor forbehold mht. at LULUCF bidraget kan adderes direkte til de øvrige poster.

8.2.4 Samspil til andre virkemidler

De tørre bræmmer, som er behandlet her, har samspil til braklægning af landbrugsjord på mineraljord. Udover at de formindsker det dyrkede areal, har udyrkede bræmmer langs vandløb og søer ikke indflydelse på andre fladevirkemidler eller virkemidler, der involverer gødskning.

8.2.5 Usikkerheder

De største usikkerheder er formentlig forbundet med forventninger til potentialet om hvor mange hektar udyrkede bræmmer der vil blive etableret langs vandløb og søer i landet. Herudover er der usikkerhed og betydelig naturlig variation i effekterne afhængig af beliggenhed, jordtype, og bevoksning mm.

Referencer

- Andersen, H.E. (red.), Rubæk, G.H. (red.), Hasler, B. (red.), Jacobsen, B.H. (red.), Martinsen, L., Heckrath, G.J., Olsen, P., Munkholm, L.J., Hoffmann, C.C., Zak, D.H., Kronvang, B., van't Veen, S.G.M., Strandberg, B., Bruus, M., Lærke, P.E., Gundersen, P., Kudsk, P., Jørgensen, L.N., Hutchings, N., Egemose, S., Reitze, K., Jensen, H.S., Søndergaard, M., Pedersen M.F. Martinsen, L. (2020). Virkemidler til reduktion af fosforbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. 284 s. (Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi; Nr. 379, Bind 2020).
- Eriksen, J., Thomsen, I.K., Hoffmann, C.C., Hasler, B., Jacobsen, B.H., Baattrup-Pedersen, A., Strandberg, B., Christensen, B.T., Boelt, B., Iversen, B.V., Kronvang, B., Børgesen, C.D., Abalos Rodriguez, D., Zak, D.H., Hansen, E.M., Blicher-Mathiesen, G., Rubæk, G.H., Ørum, J.E., Rasmussen, J., Audet, J., & 20 flere, (2020). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus: Aarhus Universitet - DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. 454 s. (DCA rapport; Nr. 174).
- Heckrath, G. J., Børgesen, C. D., Kjærgaard, C., & Vinther, F. P., (2010). Vedrørende udpegning af randzoner med risiko for overfladeafstrømning af fosfor, Nr. 749634, 5 s., nov. 08, 2010.
- Kronvang, B., Blicher-Mathiesen, G., Andersen, H.E., Kjeldgaard, A., Larsen, S.E. (2014). Effekt af "intelligent" udlagte randzoner 46 s.. 2014. (Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi).
- Kronvang, B., Ovesen, NB, Zak, DH & Heckrath, GJ 2020, 'Overfladisk afstrømning fra marker', Vand & Jord, bind 27, nr. 1, s. 32-35. <<http://www.vand-og-jord.dk/>>
- Landbrugsstyrelsen (2021). Faktaark om krav om 5 % Miljøfokusområder. Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri. 2 sider.

Onnen, N., Heckrath, G., Stevens, A., Olsen, P., Greve, M.B., Pullens, J.W.M., Kronvang, B., Van Oost, K., (2019). Distributed water erosion modelling at fine spatial resolution across Denmark.I: Geomorphology. 342, s. 150-162 13 s.

Skov- og Naturstyrelsen (2002). Vejledning om bræmmer langs vandløb og søer. Miljøministeriet ISBN: 77-7279-423-2.

8.14 Paludikultur (KVM8.3)

Forfatter: Poul Erik Lærke, Institut for Agroøkologi

Fagfællebedømmer: Nicholas J. Hutchings, Institut for Agroøkologi

8.14.1 Anvendelse

Viden om paludikultur findes primært fra forsøg på lavbundsarealer med højt indhold af organisk stof (tørvejorde, >12 % C), da hovedformålet med paludikultur er at undgå nedbrydning af tørv, der forekommer på drænede tørvejorde, men i princippet kan der også etableres paludikultur på lavbundsarealer, der indeholder mindre end 12 % organisk kulstof, hvor eksempelvis noget af tørv allerede er forsvundet som følge af mange års dræning. Dette omfatter også jorde med 6-12 % organisk kulstof som i Danmark normalt inkluderes under betegnelsen kulstofrige lavbundsjorde.

Det er nødvendigt at hæve vandstanden på de kulstofrige (>6 % organisk stof) landbrugsarealer for at reducere udledningen af drivhusgasser og bevare tørvejorden som vigtigt økosystem. Når dræning med rør og grøfter afbrydes, kan disse landbrugsarealer ikke længere benyttes til produktion af traditionelle enårige afgrøder i omdrift, men paludikultur er måske en mulighed. Paludikultur er produktion af biomasse fra planter, der trives på marker med høj vandstand (Wichtmann et al., 2016). Tanken er at høste den del af afgrøden, der kun i ringe grad bidrager til tørvedannelse.

Afgrøder velegnet til paludikultur er flerårige, der ofte ikke kan anvendes direkte som foder og fødevarer. Derimod er der mulighed for at anvende biomassen til bioraffinering og bioenergi eller direkte til bæredygtigt byggeri. På nuværende tidspunkt er det muligt at afsætte græs til biogasproduktion og tagrør til stråetækning. Derudover vil græs kunne anvendes til proteinekstraktion hvis afgrøden har en høj kvælstofforsyning og dermed højt proteinindhold.

Nogle planter, der egner sig til paludikultur, er særdeles produktive under de rette betingelser (Geurts and Fritz, 2018; Karki et al., 2019), men der er et behov for bedre at definere forskellige former for paludikultur for at kunne vurdere udbytte, miljø og klimaeffekter. Den brede definition af paludikultur omfatter både ekstensiv paludikultur, hvor naturlig vegetation høstes uden ekstra tildeling af næringsstoffer og intensiv paludikultur, hvor der etableres højproduktive arter, som eksempelvis tagrør og dunhammer på de vådeste arealer, eller røgræs og strandsvingel på arealer med lidt lavere vandstand. Intensiv paludikultur vil typisk omfatte tildeling af næringsstoffer, enten via drænvand eller som mineralsk gødning, mens der normalt ikke er behov for pesticider.

Der er et stort behov for mere viden om egnede afgrøder, etableringsmetoder, produktionspotentiale, høstomkostninger og anvendelsesmuligheder. Nogle potentielle afgrøder betragtes som vilde sumpplanter, og er derfor ikke støtteberettiget som traditionelle landbrugsafgrøder. Ændret lovgivning på dette område forudsætter dokumentation af det landbrugsmæssige produktionspotentiale.

8.14.2 Relevans og potentiale

Drænede kulstofrige landbrugsjorde udgør blot 7 % af landbrugsarealet men bidrager til ca. 40 % af landbrugets udledning af drivhusgasser med de gældende emissionsfaktorer. Potentialet for at reducere udledningen af drivhusgasser ved at hæve vandstanden på disse jorde er derfor stort. Mulighederne efter vådlægning kan opdeles i tre kategorier:

- Intensiv paludikultur: etablering af bestemte vådområdeplanter under intensivt management med henblik på at producere det højeste udbytte af biomasse med den højeste kvalitet
- Ekstensiv paludikultur: Høst og fjernelse af den spontant fremkomne vegetation uden yderligere management
- Vådområder: Ingen høst af biomasse men afgræsning når vandstanden tillader. Fokus på at maksimere naturværdi og biodiversitet.

Det bør undersøges nærmere om kategorierne skal have forskellige emissionsfaktorer. Dybt drænede tørvejorde har det højeste reduktionspotentiale for udledning af CO₂, hvis vandstanden kan hæves til tæt på jordoverfladen. Med de nuværende tilskudsordninger og priser vurderes det at stort biomasseudbytte af god kvalitet pr. arealenhed er afgørende for at opnå en acceptabel forretningsplan, og derved kan konceptet måske bidrage til at dække omkostningerne ved vådlægning af lavbundsjorden.

Høst og fjernelse af biomasse på vådlagte lavbundsjorde har imidlertid særlige udfordringer pga. jordens nedsatte bæreevne, og omkostningerne ved høste og transportere græsset til eks. et biogasanlæg vil være væsentligt større sammenlignet med produktion på mineralske jorde. I Holland findes flere firmaer med maskiner der kan løse opgaven, og i Danmark bliver der udviklet en tilsvarende maskine som en del af GUDP projektet HØSTTEK, der kan færdes på bløde lavbundsarealer. Implementering af paludikultur er betinget af, at høstomkostninger reduceres med de nuværende priser på biomasse. Dette kan ændre sig, hvis der i fremtiden bliver større mangel på kulstofbaserede råvarer.

I 2020-21 blev i forbindelse med Canapé projektet etableret nogle større demonstrationsparceller med strandsvingel, røgræs og dunhammer på et udrænet areal i St. Vildmose der tidligere havde været anvendt til kartoffeldyrkning. Parcellerne var enten ugødet eller fik tilført i alt 200 kg N/ha fordelt til 3 slæt. Det var muligt at høste et årligt udbytte på op til 18 t tørstof pr. ha etableret med røgræs foregående år ved tildeling af blot 200 kg N/ha (upubliseret). Proteinindholdet var for lavt til at græsset kunne anvendes til proteinekstraktion, men anvendelse til biogasproduktion var en afsætningsmulighed (Kandel et al. 2017). Tørvejorde i ådale er typisk mere næringsrige og her har parcellforsøg vist tilstrækkelig højt proteinindhold i røgræs til proteinekstraktion ved tildeling af 200 kg N/ha til 2 eller 3 slæt (Nielsen et al., 2021). Resultaterne fra St. Vildmose viste også at produktionen af de valgte paludikultur-afgrøder uden tilførsel af gødning var meget lav (3-4 t tørstof pr. ha af græs og ca. 8 t tørstof pr. ha af dunhammer tilført drænvand med lavt

indhold af næringsstoffer). I mindre parcelforsøg med rørgræs, dyrket ved vandstand tæt på jordoverfladen og tildelt 160 kg N pr. ha til 2 slæt, kunne der årligt høstes 12-14 t tørstof pr. ha over to år (Karki et al. 2019).

Demonstrationsprojektet i St. Vildmose viste endvidere at det kan være vanskeligt at opnå den ønskede høje vandstand i sommerperioden ved blot at stoppe dræningen. Vandstanden faldt til under 50 cm i sommerperioden og var i gennemsnit 44 cm under jordoverfladen i vækstperioden. Højere vandstands niveauer kræver sandsynligvis genetablering af spagnum, som var den naturlige vegetation inden arealerne blev drænet med henblik på landbrugsproduktion. Der er udført forsøg med spagnum som paludikultur i andre europæiske lande (Wichmann et al. 2020). Idéen med "Spagnum farming" er at høste blot de øverste få cm til anvendelse som vækstmedie således at planterne kan fortsætte væksten efter høst. Der er kun få studier på større arealer med paludikultur, som kan vise et mere realistisk potentiale, for den type produktion, i praksis. Holland er et af de få steder, hvor der er etableret nogle større demonstrationsarealer med paludikultur (Geurts og Fritz, 2018). Her rapporteres om årlige udbytter i dunhammer (*Typha latifolia*) på ca. 10 t tørstof pr. ha, når der blev høstet én gang i juli (Pijlman et al., 2019). Ved høst flere gange om året (hver 6. uge) faldt det årlige udbytte til 6 t tørstof pr. ha.

8.14.3 Effekt på drivhusgasudledning

Udledning af CO₂ reduceres som følge af, at oxidation af tørvten reduceres markant når vandstanden hæves, men omvendt vil vandmættede forhold øge udledningen af metan. Forøgelsen af metan vil i de fleste tilfælde være mindre end CO₂ reduktionen og dertil kommer at udledning af lattergas også vil reduceres når vandstanden hæves (Greve et al., 2021).

Paludikultur er godkendt af FAO og IPCC som en driftsform, der bevarer tørvejords (Biancalani og Avagyan, 2014; Hiraishi et al., 2014). Derfor forventes som udgangspunkt samme effekt af vådlægning på klimaet som beskrevet for kulstofrige lavbundslande i Greve et al. (2021) i overensstemmelse med Danmarks nationale emissionsopgørelse. Vådlægning af jorde i omdrift og vedvarende græs reducerer dermed udledningen af drivhusgas med henholdsvis 40 og 26 t CO₂-ækv. ha⁻¹ år⁻¹. Her antages jorde inden vådlægning at være dybt drænet, og at de bliver CO₂-C neutrale når dræning afbrydes og de ikke længere betragtes som landbrugsarealer. Hvert af to tal omfatter således et fald i CO₂ og N₂O, samt en stigning i CH₄ og forskellen på de to tal skyldes alene, at udledningen fra de to dyrkningssystemer er forskellig i drænet tilstand. Reduktionspotentialet afhænger som udgangspunkt ikke af anvendelsen af arealet efter vådlægning, dvs. om det er kategori a, b eller c angivet under afsnit 2.

Når der høstes biomasse, skal drivhusgasreduktions-potentialet dog reduceres med den mængde kulstof der fjernes med den høstede biomasse omregnet til CO₂-ækv. Anvendes biomassen til fortrængning af fossile ressourcer vil udledningen fra den høstede biomasse blive reduceret tilsvarende. Der vil dog fortsat være et fossilenergiforbrug til markoperationer, transport og evt. forarbejdning af den høstede biomasse, hvilket skal indregnes i den samlede drivhusgasbalance, men for at kvantificere dette kræves en egentlig

LCA beregning for den specifikke produktion. Hvis der tilføres gødning i forbindelse med intensiv paludikultur antages det at 1 % af den tilførte mængde N udledes som lattergas.

8.14.4 Samspil til andre virkemidler

Kvælstof

Når dræning af lavbundslande afbrydes og vandstanden hæves forventes i lighed med etablering af vådområder at N fjernes ved denitrifikation. Derudover vil der kunne fjernes N med den høstede afgrøde og den fjernede N vil potentielt kunne mobiliseres via eksempelvis et biogasanlæg til anvendelse som gødning på marker i oplandet, men det er usikkert i hvor høj grad fjernelse af N med den høstede biomasse fra lavbundslandene yderligere vil kunne reducere tabet af N til vandmiljøet.

Fosfor

Fjernelse af fosfor fra lavbundsarealet kan ikke som N fjernes med luften, så derfor har fjernelse af fosfor ved høst af biomasse stor betydning for arealets fosforniveau. Danske forsøg har vist at der årligt kan fjernes 6-37 kg P/ha hvor niveauet primært afhænger af biomasseudbyttet.

Skadegørere og pesticider

Der normalt ikke behov for pesticidbehandling i en veletableret paludikulturafrøde. Der kan dog være behov for ukrudtsbekæmpelse ved etablering af afgrøden mens der ikke på noget tidspunkt vurderes at være behov for hverken fungicider eller insekticider.

Natur og biodiversitet

Biodiversiteten vurderes til at være højere i paludikultur sammenlignet traditionel landbrugsdrift der omfatter en-årige afgrøder i omdrift. Derimod forventes mindre biodiversitet sammenlignet med et naturvådområde, da paludikultur primært omfatter produktive flerårige i monokultur. Naturlige arter for det pågældende økosystem vil sandsynligvis langsomt invadere paludikulturen efter etablering, og genetablering af paludikulturen efter en årrække kan være en forudsætning for at opretholde høje biomasseudbytter, men det vil afhænge af arealets hydrologi og den valgte paludikultur-afgrøde.

8.14.5 Usikkerheder

De nuværende danske emissionsfaktorer for udledning af drivhusgasser fra drænede tørvejorde stammer fra danske forsøg udført i 2008-09. Siden disse første målinger har resultater fra senere danske forsøg vist at IPCC emissionsfaktorerne angivet i Wilson et al. (2016) kan være mere retvisende. Wilson et al. (2016) angiver at udledning af drivhusgas i gennemsnit reduceres med henholdsvis 26, 17 og 5 CO₂-ækv. ha⁻¹ år⁻¹ efter vådlægning af arealer i omdrift, dybt drænet permanent græs på næringsrige arealer og dårligt

drænet permanent græs. Disse gennemsnitsværdier dækker over meget stor variation især for metanudledning. Der arbejdes p.t. på en revision af emissionsfaktorer for danske kulstofrige lavbundsjord.

Reduktionspotentialet afhænger primært af grundvandstandstanden før og efter dræning ophører. Lavbundjorde i ådale er ofte ikke fuldt drænet inden udtagning mens afbrydning af dræn i højmoser, som eks. St. Vildmose, sandsynligvis ikke fører til en vandstand der høj nok til at opfylde klassifikationskravene for et vådområde, hvor årsmiddelvandstanden ikke må blive dybere end 30 cm under jordoverfladen. Endelig indikerer et nyt litteraturstudie at spagnum som paludikultur har en væsentlig lavere emissionsfaktor end de øvrige nævnte paludikultur-afgrøder (Bianchi et al., 2021).

Referencer

- Biancalani, R., Avagyan, A. (2014). Towards climate-responsible peatlands management. Mitigation of Climate Change in Agriculture Series (MICCA).
- Bianchi, A., Larmola, T., Kekkonen, H., Saarnio, S., Lång, K. (2021). Review of greenhouse gas emissions from rewetted agricultural soils. *Wetlands* 41, 1-7.
- CANAPÉ projektet. Creating a new approach to peatland ecosystems. <https://naturstyrelsen.dk/naturbeskyttelse/naturprojekter/interreg-canape/>
- Geurts, J., Fritz, C. (2018). Paludiculture pilots and experiments with focus on cattail and reed in the Netherlands-Technical report-CINDERELLA project FACCE-JPI ERA-NET Plus on Climate Smart Agriculture.
- Greve, M.H., Greve, M.B., Peng, Y., Pedersen, B.F., Møller, A., Lærke, P.E. et al. (2021). Vidensyntese om kulstofrig lavbundsjord. Rådgivningsrapport fra DCA – National Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, Tjele, Denmark. Journalnummer: 2020-0047924.
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., Troxler, T. (2014). 2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands. IPCC, Switzerland.
- HØSTTEK projektet. Ny høstteknologi til klimavenlig dyrkning af lavbundsjord. <https://gudp.lbst.dk/nyheder/nyhed/nyhed/ny-hoestteknologi-til-klimavenlig-dyrkning-af-lavbundsjord/>
- Kandel, T.P., Ward, A.J., Elsgaard, L., Møller, H.B., Lærke, P.E. (2017). Methane yield from anaerobic digestion of festulolium and tall fescue cultivated on a fen peatland under different harvest managements. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science* 67, 670-677.
- Karki, S., Kandel, T.P., Elsgaard, L., Labouriau, R., Lærke, P.E. (2019). Annual CO₂ fluxes from a cultivated fen with perennial grasses during two initial years of rewetting. *Mires and Peat* 25, (01), 1-22.

- Nielsen, C.K., Stodkilde, L., Jorgensen, U., Laerke, P.E. (2021). Effects of Harvest and Fertilization Frequency on Protein Yield and Extractability From Flood-Tolerant Perennial Grasses Cultivated on a fen Peatland. *Frontiers in Environmental Science* 9:619258.
- Pijlman, J., Geurts, J., Vroom, R., Bestman, M., Fritz, C., van Eekeren, N. (2019). The effects of harvest date and frequency on the yield, nutritional value and mineral content of the paludiculture crop cattail (*Typha latifolia* L.) in the first year after planting. *Mires & Peat* 25, (04), 1–19.
- Wichmann, S., Krebs, M., Kumar, S., Gaudig, G. (2020). Paludiculture on former bog grassland: Profitability of *Sphagnum* farming in North West Germany. *Mires and Peat* 26, 1-18.
- Wichtmann, W., Schröder, C., Joosten, H. (2016). "Paludiculture-productive use of wet peatlands," Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany.
- Wilson, D., Blain, D., Couwenberg, J., Evans, C., Murdiyarso, D., Page, S., Renou-Wilson, F., Rieley, J., Sirin, A., Strack, M. (2016). Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat* 17, 1-28.

8.15 Vådområder på mineral jord (KVM8.4)

Forfatter: Joachim Audet, Institut for Ecoscience

Fagfællebedømmere: Brian Kronvang, Institut for Ecoscience og Steen Gyldenkærne, Institut for Miljøvidenskab

Vådområder på mineraljord defineres som udyrket land med et kulstofindhold $< 6\%$ organisk kulstof i de øverste 30 cm af jorden, der oversvømmes af vand på en sæsonmæssig eller hyppigere basis og hvor vådområdeplanter kan etablere sig. Vådområder på mineraljord i Danmark findes primært i de vandløbsnære arealer, hvor grundvandsspejlet periodisk kan svinge omkring jordfladen og enten ligge tæt ved jordoverfladen, eller over denne (fx under tidvise oversvømmelser fra vandløbet). For at et vådområde skal fungere, skal der være udveksling af vand og stof mellem området og de omkringliggende arealer og/eller det nærliggende vandløb. Det er de naturlige, hydrologiske forhold, der er afgørende for, hvor og hvordan processerne foregår, og det er således en forudsætning, at vådområdet er ført tilbage til en naturnær tilstand uden dræning og grøftning, samt – hvis området oversvømmes – at vandløbet har en vandføringsevne som betinger, at det tidvist kan gå over sine bredder. Kystnære vådområder er ikke inkluderet i dette kapitel.

8.15.1 Anvendelse

Virkemidlet er målrettet tilbageholdelse af næringsstoffer og i nogle tilfælde øget biodiversitet.

8.15.2 Relevans og potentiale

De fleste vandløb i Danmark er kanaliserede, og mange nærliggende vandløbsarealer er påvirkede af dræning og grøftning. Dyrket areal med et kulstofindhold $< 6\%$ på lavbund udgør i alt ca. 3.692 km² med 70% af arealet i omdrift og 21% anvendt som græsarealer. Det er derfor et stort potentiale for etablering eller genetablering af vådområder på mineraljord.

8.15.3 Effekt på drivhusgasemission

Genetablering af vådområder har stor betydning for indholdet af kulstof i jorden da mineralisering formindskes og kulstof kan muligvis akkumuleres pga. tilførsel af plantebiomasse (Andersen et al., 2020). Når grundvandsspejlet er tæt på jordoverfladen eller når der er tidvise oversvømmelser af ådalen kan dette fremme metan(CH₄)-emissionen, særligt på næringsrige jorder med en stor pulje af letomsætteligt organisk stof (Zak et al., 2015). Under tidvise oversvømmelser om vinteren i vådområdet forventes CH₄-emissionen ikke at være af større omfang, da CH₄-produktionen bliver begrænset af lave temperaturer. Et vandspejl tæt på jordoverfladen vil medvirke til at begrænse emissionen af CO₂ og potentielt også af lattergas (N₂O), pga. mindre mineralisering af organisk stof i jorden. Et vandspejl tæt på jordoverfladen kan endog fremme CO₂-binding, hvis en ny tørvedannende vegetation kan etablere sig. Oversvømmede arealer kan også

opsamle kulstofrigt sediment fra vandløbet og dermed bidrage til tilbageholdelse af organisk kulstof (Kronvang et al., 2009). Den potentielle reduktion i husdyr- og handelsgødningstilførslen til området og mindre mineralisering af organisk stof i jorden under vådlagte forhold, vil sandsynligvis også medvirke til at mindske N_2O emissionen. Der er dog en risiko for, at der kan forekomme en relativ stor N_2O emission ved den nitratomsætning, der vil finde sted i vådområdet efter afskæring af dræn og grøfter. Omvendt vil den potentielt øgede N_2O emission i vådområdet pga kvælstoffjernelse betyde, at der sker mindre N_2O emission fra vandløb, fjorde og havet pga af reduceret kvælstoffudledning. Således vil vådlægning af dyrkede mineraljorde med stor sandsynlighed begrænse emissionen af CO_2 og N_2O , mens der omvendt kan være en risiko for en betydelig øget emission af CH_4 .

Der findes kun få studier af drivhusgasemission fra vådområder på mineraljord, idet de fleste undersøgelser fokuserer på organisk jord. Et par studier har undersøgt CH_4 -emission efter genetablering af vådområder på mineraljord under danske forhold (Herbst et al., 2011 og Audet et al., 2013). Herbst et al. målte drivhusgasemissionen (CO_2 , CH_4 og N_2O) et år i en restaureret våd eng ved Skjern å (7 år efter vådlægning). Konklusionen var, at selv om CH_4 -emissionen var betydelig ($110 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), var der på ingen en netto binding af kulstof på i alt $7030 (\pm 1050) \text{ kg CO}_2 \text{ ækvivalents ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$ (Herbst et al., 2011). Audet et al. undersøgte ændringer i drivhusgasemissionen året før og året efter genetableringen af et vådområde langs Odder bæk nord for Give (Audet et al., 2013). I sidstnævnte undersøgelse var CH_4 -emissionen markant højere fra et permanent vanddækket område efter genetableringen af vådområdet ($316 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$), mens andre områder med grundvandsspejl dybere end 20 cm under jordoverfladen havde tæt på nul CH_4 -emission. Området med den høje CH_4 -emission havde et kulstof indhold på ca. 7 %, hvilket ligger lige over grænsen for mineral jord.

Ud fra de undersøgelser af lokaliteter med etablering af vådområder på mineraljord, der blev præsenteret i Herbst et al, 2011 og Audet et al., 2013, kan der også findes områder med nedbrudt tørv dvs. med kulstof indhold $>6\%$. Generelt set kan kulstofindholdet i vandløbsnære områder variere meget, hvilket kan gøre det udfordrende at skelne mellem organisk jord og mineraljord.

På grund af meget få danske studier er beregninger af CH_4 -effekten baseret på 21 internationale studier (et enkelt fra Danmark i.e. Herbst et al, 2011) samlet i IPCC-metoden for "Inland wetland on mineral soil" (Wickland et al., 2013). Metanestimatet er en emission på $235 \pm 108 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (gennemsnit $\pm 95\%$ konfidensinterval) for den tempererede klimaregion (tabel 5.4 i Wickland et al., 2013). Dette estimat varierer afhængigt af oversvømmelsesperioden. I permanent vanddækkede områder er emissionen $572 \pm 75 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, mens den i periodisk oversvømmede områder er $126 \pm 46 \text{ kg CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ (Wickland et al., 2013).

IPCC anvender dog en anden grænseværdi (kulstofindhold $>12\%$) til at definere forskellen mellem organisk jord og mineraljord, set i forhold til de 6% som anvendes i Danmark. Det betyder, at studier, der blev brugt til at definere IPCC-emissionsfaktoren for vådområder på mineraljord, også inkluderede vådområder med

kulstofindhold mellem 6-12%. Der er dog ingen klar sammenhæng mellem jordens kulstofindhold og CH₄-emissioner. Faktisk er IPCC-faktoren for CH₄ fra vådlagte organiske jorde (dvs. >12% organisk kulstof) og for vådlagte mineraljorde (dvs. <12% organisk kulstof) i de tempererede klimaregioner relativt ens (tabel 8.1).

Tabel 8.1. IPCC CH₄ emissionfaktor for vådlagte organiske jorde og vådlagte mineraljorde (Data fra tabel 3.3 og 5.4 i Wickland et al., 2013).

Klimaregion	Næringsstof status	EF _{CH₄} (vådlagte organiske jorde) kg CH ₄ ha ⁻¹ yr ⁻¹	EF _{CH₄} (vådlagte mineral jorde) kg CH ₄ ha ⁻¹ yr ⁻¹
Boreal	Fattig	55	76
	Rig	183	
Tempereret	Fattig	123	235
	Rig	288	
Tropisk	-	55	900

Kuldioxid-emissionen som følge af ændring i kulstofindholdet i jord sættes til 0 ifølge sektion 6.5.14 i Nielsen et al., 2022. Lattergas-emissionen anses for at være for usikker (Wickland et al., 2013) til at kunne bruges til beregning af et estimat og sættes derfor til 0.

Etablering af vådområder vil normalt ske ved en omlægning af landbrugsjorden, og dermed vil der ske en reduktion i husdyr- og handelsgødningstilførslen til området. Hvis området bliver lagt om fra en mark i omdrift, kan man forvente en øget akkumulering af organisk kulstof pga. tilførsel af plantebiomasse i jorden. Forøgelsen vil være mindre, hvis marken allerede har vedvarende plantedække. Her antages jorde inden vådlægning (referencesituation) at være kornsædskift. Der vil også være et mindre fossilt energiforbrug til markdriften.

Samlet set, vil de totale drivhusgas emissioner blive ca 4.978 kg CO₂-ækv ha⁻¹ år⁻¹ (235 kg CH₄ ha⁻¹ yr⁻¹ x 28 (GWP) = 6.580 kg CO₂-ækv ha⁻¹ år⁻¹ (total emission fra mineraljord efter vådlægning) minus 1602 kg CO₂-ækv ha⁻¹ år⁻¹ (total emission fra kornsædskift før vådlægning; tabel 4.3)).

Det vil sige at netto klimaeffekten bliver ca -4978 kg CO₂-ækv ha⁻¹ år⁻¹.

Baseret på disse resultater tyder det ikke på, at etablering af vådområder på mineraljord vil reducere drivhusgasemissioner. Disse emissioner bliver i øjeblikket overset i nationale emissionsopgørelser, og derfor bør deres inklusion overvejes. Dog forhindrer de store usikkerheder og mangel på data i en dansk sammenhæng udarbejdelsen af mere sikre og robuste skøn.

8.15.4 Samspil til andre virkemidler

Der kan være overlap med reetablering af organiske lavbundsjorde og N-og P-vådområder.

8.15.5 Usikkerheder

Det skal understreges at der er stor usikkerhed i forhold til CH₄-emission da vådområder på mineral jord ofte har en meget dynamisk hydrologi med stor variation mellem sæsonerne. Om et vådområde er permanent eller periodisk oversvømmet kommer til at bestemme CH₄-emissioner især i sommermånederne, når den højere temperatur fremmer CH₄-produktionen.

Kuldioxid-emissionen i de etablerede områder vil sandsynligvis være negativ dvs. at en lagring af kulstof vil ske pga. akkumulering af planterester og deponering af organisk kulstof under oversvømmelse. **Der er stor usikkerhed om, hvorvidt CO₂-lagringen i de etablerede områder kan kompensere for CH₄-emissionerne.**

Lattergas-udledningen er også usikker, da svingende vandstand og deraf følgende ændringer i iltforholdet i jorden kan fremme N₂O-emissionen (Jørgensen et al., 2012). Efter vådlægning burde disse emissioner være af begrænset omfang p.g.a. mindsket mineralisering og stop af gødskning af arealerne. Dog kan afskæring af dræn og grøfter der fører vand fra bagvedliggende dyrkede arealer, samt tidvise oversvømmelser med vandløbsvand trække i retning af højere emissioner af lattergas.

Referencer

- Andersen, H.E., Rubæk, G.H., Hasler, B., Jacobsen, B.H. (redaktører) (2020). Virkemidler til reduktion af fosforbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 284 s. - Videnskabelig rapport nr. 379 <http://dce2.au.dk/pub/SR379.pdf>
- Audet, J., Elsgaard, L., Kjaergaard, C., Larsen, S.E., Hoffmann, C.C. (2013). Greenhouse gas emissions from a Danish riparian wetland before and after restoration. *Ecological Engineering*, 57, 170-182.
- Herbst, M., Friborg, T., Ringgaard, R., Soegaard, H. (2011). Catchment-wide atmospheric greenhouse gas exchange as influenced by land use diversity. *Vadose Zone Journal*, 10(1), 67-77.
- Jørgensen, C.J., Struwe, S., Elberling, B. (2012). Temporal trends in N₂O flux dynamics in a Danish wetland-effects of plant-mediated gas transport of N₂O and O₂ following changes in water level and soil mineral-N availability. *Global Change Biology*, 18(1), 210-222.
- Kronvang, B., Hoffmann, C.C., Dröge, R. (2009). Sediment deposition and net phosphorus retention in a hydraulically restored lowland river floodplain in Denmark: combining field and laboratory experiments. *Marine and Freshwater Research*, 60(7), 638-646.
- Nielsen, O.-K., Plejdrup, M.S., Winther, M., Nielsen, M., Gyldenkerne, S., Mikkelsen, M.H., Albrektsen, R., Thomsen, M., Hjelgaard, K., Fauser, P., Bruun, H.G., Johannsen, V.K., Nord-Larsen, T., Vesterdal, L., Stupak, I., Scott-Bentsen, N., Rasmussen, E., Petersen, S.B., Baunbæk, L., Hansen, M.G. (2022). Denmark's National Inventory Report 2022. Emission Inventories 1990-2020 - Submitted under the United Nations

Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 969 pp. Scientific Report No. 494. <http://dce2.au.dk/pub/SR494.pdf>

- Wickland, K.P., Krusche, A.V., Kolka, R.K., Kishimoto-Mo, A.W., Chimner, R.A., Ogle, S., Srivastava, N. (2013). Inland wetland mineral soils. In: 2013 Supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: wetlands. Intergovernmental Panel on Climate Change: 5.1-5.34. Chapter 5, 5-1.
- Zak, D., Reuter, H., Augustin, J., Shatwell, T., Barth, M., Gelbrecht, J., McInnes, R. J. (2015). Changes of the CO₂ and CH₄ production potential of rewetted fens in the perspective of temporal vegetation shifts. *Biogeosciences*, 12(8), 2455-2468.

9 Konklusioner, igangværende projekter og vidensbehov

Forfatter: Mathias Neumann Andersen

Fagfællebedømmer: Anders Peter Adamsen

De foregående kapitler 5-8 giver en gennemgang af en række virkemidler til reduktion af udledning af drivhusgasser fra landbruget. De mulige reduktioner kan opdeles i tre kategorier:

- Reduktion af udledninger af metan og lattergas fra landbrugsmæssige aktiviteter
- Lagring af kulstof i jord og vegetation
- Reduktion af brændstofforbrug i landbrug og transport, herunder substitution af fossil energi gennem produktion af biogas til transportsektoren.

Som det ses i beskrivelserne af de enkelte virkemidler, er der betydelig variation i deres effekt, potentiale og mulighederne for at kombinere tiltag. Der vil desuden være en betydelig variation i deres omkostningseffektivitet, som fx beregnet af Dubgaard og Ståhl (2018). Til at udpege relevante virkemidler, kan følgende kriterier opstilles (Olesen et al., 2018):

- Virkemidlet skal have en betydende og reel effekt på de samlede udledninger
- Virkemidlet skal være dokumenteret i internationalt gransket litteratur, så det kan godkendes af det internationale review-panel under Klimakonventionen
- Virkemidlet skal være økonomisk konkurrencedygtigt med andre mulige tiltag, altså det må ikke samfundsøkonomisk eller budgetøkonomisk være for dyrt
- Virkemidlet skal kunne implementeres i praksis, og det skal gennem økonomiske eller reguleringsmæssige tiltag være muligt at sikre denne implementering
- Omfanget af gennemførelse af virkemidlet skal kunne opgøres, således at reduktionen kommer til at indgå i den nationale emissionsopgørelse
- Virkemidlet må ikke have væsentlige negative sideeffekter på fx miljø eller sundhed.

I tabel 9.1 har vi givet en oversigt over de virkemidler der er omtalt i kataloget med hensyn til potentiale for reduktion af udledning af drivhusgasser i landbruget. I tabel 9.1 er reduktionen ved fuld implementering af virkemidlerne beregnet ud fra tilgængelige aktivitetsdata fra basisfremskrivningen 2020 (Energistyrelsen, 2020 og Line Maj Stranges, LBST, personlig kommunikation, 04.01.2023), samt den maksimalt mulige udbredelse beskrevet under de enkelte virkemidler. Alle de beregnede effekter af virkemidlerne kan ses i bilag 1 med værdier udover AR5 også beregnet i henhold til AR4 og AR6.

Tabel 9.1 Reduktionspotentialiet for drivhusgasser ved brug af de beskrevne virkemidler opgjort i kt CO₂-ækv/år ud fra tilgængelige aktivitetsdata i 2020 set i relation til den maksimalt mulige implementering beskrevet under de enkelte virkemidler (antal husdyr, gødningsmængde eller hektar). Nogle af virkemidlerne er opgjort for forskellige grupper af dyr eller typer af husdyrgødning. Reduktion i udledningerne er beregnet som den samlede effekt af reduktion i lattergas og metan, øget kulstoflagring og reduktion af fossil energi i landbrug og transport (AR5-værdier anvendt). Der er pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord skal beregnes med henblik på at indregne det i landbrugets udledninger og i hvilken udstrækning det vil blive muligt. I effekten af virkemidlerne (Bilag 1), som danner grundlag for beregning af reduktionspotentialerne er LULUCF bidraget adderet til de øvrige poster. Der er desuden anført om virkemidlet umiddelbart kan indgå i den nationale emissionsopgørelse, samt om der er væsentlige tekniske, miljømæssige og sundhedsmæssige barrierer for implementeringen.

Virkemiddel	Udbredelse 2020	Potentiel udbredelse	Reduktion i alt	Emissions-opgørelse	Væsentlige barrierer
Husdyrproduktion					
Anvendelse af metanreducerende tilsætningsstoffer i foder til kvæg	0	425.000 køer	572	Ja	Nej
Generelle ændringer i foderrationen	?	567.000 køer	236 ³	Ja	Nej
Øget fodring med fedt til kvæg	0	567.000 køer	202	Ja	Nej
Genetisk selektion af malkekøer	?	?	?	Ja	Nej
Husdyrgødning					
Forsuring af gylle i stalden	5%	100%	1.679	Nej	Ja
Køling af gylle i grisestalde	5%	100%	80	Nej	Ja
Hyppig udslusning fra stalde	2%	100%	589	Nej	Nej
Lavdosis forsuring i gyllelagre	0%	100%	1.017	Nej	Nej
Bioforgasning af gylle	23%	100%	1.804 ²	Ja	Nej
Opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding	0%	100%	945	Nej	Nej
Overdækning af gylletanke med ventileret flydelag	0%	100%	591	Nej	Nej
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og bioforgasning	1%	100%	2.667 ²	Nej	Nej
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og overdækning af gylletanke med ventileret flydelag	0%	100%	1.164	Nej	Nej
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding	0%	100%	1.508	Nej	Nej
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og lavdosis forsuring i gyllelagre	0%	100%	1.602	Nej	Nej
Køling af gylle i grisestalde og bioforgasning	0%	100%	1.702	Nej	Ja
Afgrødeproduktion					
Efterafgrøder	689.000 ha.	1.000.000 ha	278	Ja	Nej
Mellemafgrøder	13.400 ha.	600.000 ha	255	Ja	Nej
Tidlig såning af vintersæd	180.312	850.000	22	Nej	Nej
Nedmuldning af halm	? ha.	625.000 ha	0	Nej	Nej
Halm til forgasning (pyrolyse) med biochar retur	0 ha.	1.000.000 ha	1.760	Ja	Nej
Braklægning i sædskiftet	36.000 ha.	200.000 ha ⁴	212	Ja	Nej
Ompløjningstidspunkt for fodergræs og efterfølgende afgrødevalg	0 ha.	50.000 ha ⁴	17	Ja	Nej
Flerårige energiafgrøder i sædskiftet	8.600 ha.	100.000 ha	114	Ja	Nej
Reduceret jordbearbejdning og forbud i visse perioder	575.000 ha.	2.000.000 ha	204	Ja	Ja

Præcisionsjordbrug	110.000 ha.	2.250.000 ha	370	Ja	Ja
Reduceret kvælstofnorm	0 ha.	2.250.000 ha	241 ⁵	Ja	Nej
Større opbevaringskapacitet af husdyrgødning og ændring er forbud mod udbringning af husdyrgødning om efteråret	0	8.9 kt N	2,2	Ja	Nej
Afgrøder med høj N-optagelse	360.000 ha.	751.000 ha	231	Ja	Ja
Skærpet udnyttelseskrav for N i udvalgte typer husdyrgødning	0	AI husdyrgødning	41	Ja	Nej
Nitrifikationshæmmere til husdyrgødning+handelsgødning	0	385 kt N ⁶	416	Ja	Nej ¹
Arealanvendelse					
Udtag af omdriftsareal til permanent ugødet brak (100.000 ha)	70.000	170.000	179	Ja	Nej
Bræmmer på mineraljord	1.570	10.000	23	Ja	Nej
Paludikultur – tidligere drænet omdrift + vedvarende græs	0	10.000	330	Ja	Ja
Vådområder på mineral jord	0	1.000	-6	Ja	Nej

¹Der kan i forbindelse med anvendelse af nitrifikationshæmmere være effekter på økotoksikologi og udvaskning af tilsætnings- og nedbrydningsprodukter til grundvand, som bør afklares inden udbredt anvendelse. Kvælstofindhold i husdyrgødning estimeret fra Børsting et al. (2021). ²I beregningen af potentialerne antages at alt gylle kan afgasses, hvorimod ikke alt gylle kan udsleses hyppigt før det afgasses – kun i nye stalde. ³Reduktionen er beregnet ud fra den potentielle reduktion i dyrenes emission af enterisk metan UDEN hensyn til, at ændret foderration kan give større drivhusgasemission. ⁴Den fremtidige potentielle udbredelse er ukendt; tallet er udelukkende brugt som eksempel. ⁵Ved en 15% normreduktion. ⁶Der er regnet med 25% af N-mængden i husdyrgylle er økologisk og 10% af handelsgødning er nitrat-N og at begge dele ikke tilsættes inhibitorer.

Det fremgår af tabellen at selvom tiltagene ikke nødvendigvis kan kombineres, er der et potentiale for reducerede udledninger på 6-7 mill. ton CO₂-ækv.

De fleste af virkemidlerne vil umiddelbart kunne indgå i den nationale emissionsopgørelse. Der er dog for en del af virkemidlerne behov for yderligere dokumentation af tiltagets effekt på emissionerne. Dette gælder bl.a. for brugen af nitrifikationshæmmere til gødning, nitrat i foderet og forsuring/køling af gyllen. Der vil desuden være behov for bedre indsamling af aktivitetsdata til opgørelse af effekterne i den nationale opgørelse og sidst men ikke mindst i forbindelse med bedriftsregnskaber. Dette gælder for en række tiltag fx brug af hyppig udslusning gylle, forsuring af gylle og overdækning af gyllebeholder, hvor der er brug for oplysninger om hvilke kombinationer af tiltag landbrugene anvender, fx hvorvidt flydelag kombineres med overdækning. Såfremt mere præcise og differentierede emissionsfaktorer kan estimeres, vil kravene til og omfanget af indsamling af aktivitetsdata ofte øges. Dette kunne fx være staldtemperatur, gylletemperatur eller satellitdata og klimaforhold i forbindelse med afgrødevækst og markoperationer. Generelt er der således behov for bedre opgørelse af omfanget samt bedre specifikation af anvendelsen af de forskellige teknologier, hvis en række tiltag retvisende skal kunne indgå i den nationale opgørelse samt i eventuelt kommende bedriftsregnskaber.

Det fremgår, at store emissionsreduktioner kan opnås gennem teknologiske løsninger til reduktion af landbrugets udledninger og kombinationer af disse. Disse teknologier skal dog tænkes sammen med de mange andre målsætninger for landbrugets produktion og miljøpåvirkninger. Der er gode eksempler på

synergier. Generelt vil virkemidler til reduktion af N-udvaskningen have en positiv effekt via mindsket indirekte udledning af lattergas og ofte mindre behov for N-tilførsel i gødning, og dermed nedsat direkte udledning. Nitrifikationshæmmere kan være med til at reducere nitratudvaskning i forårsperioden og forsuring af gyllen reducerer ammoniakfordampning. Også på disse områder er der dog brug for mere viden og bedre kortlægning.

Analysen understreger at der også fremover være et stort behov for yderligere forskning i reduktion af landbrugets klimagasser. Dette gælder både med hensyn til nye driftsformer og teknologier med lavere udslip, men også i høj grad med hensyn til bedre kvantificering af de aktuelle udslip og dokumentation af effekter af allerede tilgængelige virkemidler. For en række af de virkemidler, der indgår i dette katalog, vil der være brug for yderligere forskning og dokumentation, før de kan indgå som en del af den danske nationale emissionsopgørelse. Det gælder fx for anvendelse af metanreducerende tilsætningsstoffer i foder til kvæg, forsuring af gylle i stalden til reduktion af metanudledning og anvendelse af nitrifikationshæmmere til reduktion af lattergasudledning. Teknologier som præcisionsjordbrug og anvendelse af biochar er langt fra færdigudviklede og forventes at kunne bidrage væsentlig mere til at nedbringe udledningerne end det er tilfældet i dag. I kapitel 9 i rapporten er igangværende projekter til at kvantificere effekten af såvel nye som kendte virkemidler kort beskrevet og en række nye forskningsbehov identificeret.

Referencer

Energistyrelsen, 2020. Basisfremskrivning 2020 – Danmarks Klima- og Energifremskrivning.

Feilberg, A., Adamsen, A. P. S., & Petersen, S. O., (2022). Afrapportering fra opstart seminar vedr. udviklings-tiltag til gylle- og gødningshåndtering, No. 2022-0334060, 28 p., Feb 08, 2022. Rådgivningsnotat fra DCA – National Center for Fødevarer og Jordbrug

9.1 Forskningsbehov samt oversigt over igangværende projekter, der bidrager til at beregne effekter af virkemidler på drivhusgasudledning

9.1.1 Forskningsbehov vedrørende husdyrproduktion

I de nuværende projekter, hvor der måles metan i private besætninger på baggrund af sniffermetoden, er det kun muligt at måle metan i de besætninger hvor køerne malkes i malkerobotter (ca. 25 % af malkekøerne). For at kunne måle metan i flere typer af besætninger, og dermed kunne forbedre de genomiske modeller til avlsværdivurdering og opnå en bedre estimering af forskellige typer af besætningers samlede emission af metan, er der et forskningsmæssigt behov for at udvikle af en sniffer som kan anvendes for køer i besætninger uden malkerobotter.

Sammensætningen af køernes vom-mikrobiom har stor indflydelse på dannelsen af metan hos den enkelte ko. Vom-mikrobiomet påvirkes bl.a. af koens genetik og fodring, herunder foderadditiver. Der er et forskningsmæssigt behov for at få identificeret gener og mikrobearter og samspillet mellem disse, som har en væsentlig indflydelse på metan-emissionen hos malkekøer. Dette kan være med til at belyse årsager til variationen mellem dyr og forstå de underliggende biologiske mekanismer med betydning for udskillelsen af metan, så oplysningerne bl.a. kan indgå i avlsarbejdet med malkekøer, som sigter mod at reducere klimabelastningen fra kvægbruget.

Der er behov for et større forskningsmæssig fokus på, hvorledes strukturelle ændringer af kvægavlen påvirker klimabelastningen. Dette gælder fx produktion af en større mængde oksekød på baggrund af malkekvæg og tilsvarende reduktion på baggrund af kødkvæg, hvilket kan ske som følge af en ændring i avlsmålet hos malkekvæg til en "toformålsrace" med en større vægtning af kødproduktion. Dette gælder ligeledes systematisk anvendelse af kønssorteret sæd til at producere kvier, og anvendelse af kødkvægssæd på resterende køer til at producere slagtedyr af høj kvalitet. Der er også et behov for en afklaring af den klimamæssige gevinst ved systematisk krydsning af racer med henblik på at opnå krydsningsfrodighed på egenskaber såsom sundhed og holdbarhed.

9.1.2 Forskningsbehov vedrørende husdyrgødning

Der er behov for bedre viden omkring netto-energiproduktion ved afbrænding af forskellige typer husdyrgødning under praktiske forhold. Energiproduktionen har betydelig indflydelse på den beregnede drivhusgaseffekt ved afbrænding af husdyrgødning.

9.1.3 Forskningsbehov vedrørende afgrødeproduktion

På området præcisionsgødsning er der et løbende udviklingsbehov, som omfatter mere præcis bestemmelse af afgrøders N-behov og mere præcis tildeling af gødning inklusiv husdyrgødning. Dette omfatter også nye tildelingsmetoder som fx bladgødsning.

Da der kan være stor risiko for udvaskning efter ompløjning af græs- og kløvergræsmarker og stor variation mellem år og lokaliteter, er der forskningsbehov på området 'ompløjningstidspunkt for fodergræs og efterfølgende afgrødevalg' (KVM7.7) mht. at bestemme udvaskning efter ompløjning af kløvergræs, græs i renbestand gødet efter gældende normer samt efter afgræsning. Desuden mangler der data for 2. års udvaskning efter ompløjning af græs eller kløvergræs med forskellig alder.

Forbedrede og mere præcise N_2O emissionsfaktorer for tilført kvælstofgødning vil kunne forbedre den beregnede effekt af ændrede udnyttelseskrav, ligesom de har betydning for den beregnede effekt af ændrede N normer.

Der er behov for øget viden omkring nitratudvaskning ved efterårstilførsel af husdyrgødning og betydning for udledningen af lattergas. Dette har betydning for at vurdere effekten af ændret opbevaringskapacitet og ændrede udbringningsperioder.

Der er betydelig usikkerhed om effekten af flerårige energiafgrøder på jordens kulstofindhold. Det gælder dels den årlige effekt under en rotation på 10-30 år, dels hvad ompløjning af en ældre kultur og nyetablering betyder. Endelig mangler viden om, hvor mange år en stigning i jordens kulstofindhold kan fortsætte før et nyt ligevægtsniveau indtræder. Der er derfor behov for meget velplanlagte forsøg over lang tid, hvis denne parameter skal bestemmes mere nøjagtigt. Der er desuden tegn på, at den nuværende N-kvote for pil er for høj. En norm-sænkelse ville have en betydelig klimaeffekt og bør derfor undersøges.

Kvælstofkrævende afgrødetyper med lav kvælstofeffektivitet og høj andel af kvælstofrige afgrøderester har hidtil ikke været nævneværdigt inddraget i vurdering af klimavirkemidler. Dette gælder i høj grad afgrøder der anvendes direkte som fødevarer så som grøntsager (overvejende til frisk konsum) og bælgrugter der dyrkes til modenhed (fx forarbejdning til proteinprodukter til fødevarerindustrien). Grøntsager (fx salater, kåltyper, rodfrugter, løg) kræver generelt høj kvælstofgødskning og efterlader meget nitrat og kvælstofrige afgrøderester i jorden ved høst. Det giver høj risiko for udvaskning og lattergasemission (Tei et al. 2020). Flere tilsvarende problemstillinger gælder for bælgrugter (bortset fra højt gødskningsbehov). Da disse højværdiafgrøder ofte indgår i sædskifter med korn opnås ikke nær den maksimale effekt af virkemiddelkrav, fordi avlerens fokus for optimal dyrkning er på højværdiafgrøderne (stort økonomisk afkast), mens N-normer, efterafgrødekrav etc. sættes ind på kornmarkerne. Her er reduktionspotentiallet meget mindre. Et igangværende projekt 'Sædskiftemodel med grøntsagsforsøg' (LBST Bedriftsnære indsatser I 2021-2025) tager hul på nogle af disse problemstillinger for økologiske og konventionelle grøntsagssædskifter (nitratudvaskning og planterester), men der er behov for målinger og viden om virkemidlers effekt i disse særligt kvælstofrige produktionssystemer, herunder især effekter på klimagasudledning og nitratudvaskning af målrettede virkemidler (fx efterafgrøder, præcisions-/eftergødskning, nitrifikationshæmmere, skovlandbrug) på de største afgrøder på flere jordtyper. Jordtypen er vigtig da foreliggende viden især stammer fra sandblandet lerjord (fx Hefner et al, 2022; Shanmugam et

al, 2022 og igangværende projekter afsnit 9.5), mens strukturudviklingen de senere år har rykket grøntsagsproduktionen i Danmark over på sandjord.

Referencer

Hefner, M, Sorensen, JN, De Visser, R, Kristensen, HL (2022) Sustainable intensification through double-cropping and plant-based fertilization: production and plant-soil nitrogen interactions in a 5-year crop rotation of organic vegetables. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 2022, 46(8): 1118–1144 doi.org/10.1080/21683565.2022.2104419

Shanmugam, S, M. Hefner, R. Labouriau, A. Trinchera, K. Willekens, H. L. Kristensen (2022). Intercropping and fertilization strategies to progress sustainability of organic cabbage and beetroot production *European Journal of Agronomy* 140 (2022) 126590 (preview) <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126590>

Tei, F, De Neve, S, de Haan, J, Kristensen, HL (2020) Nitrogen management of vegetable crops. *Agricultural Water Management* 240, 1 October 2020, 106316 <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106316>

9.2 Igangværende projekter

9.2.1 Igangværende projekter vedrørende husdyrproduktion

Projektitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
Fodring og fænotype af den klimaeffektive malkeko	Projektets overordnede formål er at udvikle nye foderadditiver samt undersøge allerede kendte foderadditiver mht. effekt på enterisk metan, foderoptagelse og produktion og at undersøge om dyr med forskellig fænotype responderer forskelligt til en given strategi. I projektet indgår der dyreforsøg og in vitro forsøg. Dyreforsøgene har fokus på tildeling af fedt, nitrat og 3-NOP samt at undersøge om dyr med forskellig fænotype responderer forskelligt til en given strategi. Der indgår endvidere in vitro forsøg med det formål at udvikle nye foderadditiver og for at vurdere om rangering af dyr in vivo afspejles in vitro.	Peter Lund, ANIVET	2019-2023	Landbrugsstyrelsen
Reduceret klimaaftryk på ko- og bedriftsniveau	At bidrage til en mere bæredygtig mælkeproduktion ved en betydelig forskningsindsats baseret på: 1) Respons til ekstreme foderrationer og tilsætningsstoffer og undersøgelse af om respons til en given fodringsstrategi til reduktion af metan produktion er afhængig af ydelsesniveau, 2) Validering af sammenhæng mellem metanproduktion og fodereffektivitet, 3) Videreudvikling af laboratoriemetoder til screening for metan nedsættende effekt af foderingredienser og af bioinformatiske metoder til karakterisering af det mikrobielle samfund i vommen og 4) Effektvurdering i forhold til mælkeproduktionen i 2030.	Peter Lund, ANIVET	2019-2023	Mælkeafgiftsfonden
Reduceret metanproduktion med optimeret mælkeproduktion: Udnyttelse af samspillet mellem	Projektets overordnede formål er at anviser strategier til reduktion af metanemissionen, således at vi kan fastholde en betydelig mælkeproduktion i Danmark og samtidigt bane vejen for en samlet reduktion på 50% i enterisk	Martin Riis Weisbjerg, ANIVET	2022-2026	Mælkeafgiftsfonden

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
foderadditiver, den enkelte kos genetik og vommens mikrober	metan. Projektet vil opnå dette ved at undersøge samspillet mellem det enkelte dyr (genotype og fænotype), foderrationen og brug af foderadditiver, samt vommikrobiomet. Projektet vil være afgørende for at brug af additiver accepteres, at additiver anvendes optimalt under hensyntagen til dyrets genetiske anlæg, samt for at avlsarbejdet kan tilpasses derefter.			
Klima, dyrevelfærd og økonomi i sunde køer (KlimaKS)	En stor del af klimabelastningen fra malkekøer skyldes sygdomme som reducerer effektiviteten og holdbarheden. De mest betydende sygdomskomplekser er mastitis, stofskifte- og klovlidelser. De kan forebygges med mange forskellige tiltag, men forskning viser, at det sker for sjældent. Det er projektets formål at løse det ved at udvikle to værktøjer: 1) et nyt system til besætnings-specifik sygdomsovervågning og tidlig forebyggelse (Surveil) og 2) et nyt beslutningsstøttesystem til prioritering af forebyggelsestiltag under hensyntagen til klima og økonomi (KlimaKS-dashboard).	Søren Østergaard, ANIVET	2022-2025	GUDP
Model for kvægbesætnings udledning af enterisk metan under forskellige management strategier	Projektets formål er at analysere og dokumentere, hvad valget af management-strategi betyder for den individuelle kvægbesætnings klimaafttryk. Målet er, at udvikle en model for besætnings udledning af enterisk metan under forskellige management strategier, samt en model der kan beregne cost-benefit på eksisterende og nye forslag om tiltag til at reducere klimaafttryk fra kvægbesætninger.	Søren Østergaard, ANIVET	2021-2024	Landbrugsstyrelsen
Beet silage for future sustainable dairy production (UNBEETABLE)	Ensilerede roer er et nyt fodermiddel, som har potentiale til at reducere klima- og miljø-påvirkningen af mælkeproduktionen betragteligt. Dette sker ved at fastholde de gode dyrkningsegenskaber ved roer (højt udbytte, lav N-udvaskning, højere biodiversitet), mens de negative egenskaber ved traditionel fodring	Mogens Larsen, ANIVET	1/9 2021 – 31/3 2025	GUDP

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	med friske roer (arbejdskrævende og kort holdbarhed) undgås. Nye roesorter gør det nu muligt at konservere roer ved ensilering. Fodring med ensilerede roer vil reducere udledningen af enterisk metan, så mælkeproduktionen samlet set bliver mere bæredygtig. Dyrkning af roer vil også bidrage til at opfylde EU's krav om tre afgrøder i sædskiftet og øge biodiversiteten i det åbne land.			
Måling af metanudledning af 5-10.000 individuelle køer mhp. forbedrede bedriftsregnskaber og avl for mindre metanudledning	Projektet har til formål at bestemme variationen i metan på individniveau, indenfor og mellem bedrifter og anvende denne information til at analysere de komplekse relationer mellem den bedriftsspecifikke fodring og management, således at der kan dokumenteres nogle generelle effekter, som kan danne grundlag for en bedre estimering af besætningens samlede emission af metan. Dette kan anvendes i klimaregnskabet af den enkelte bedrift men også i nationale regnskaber. De mange målinger på individuelle køer vil desuden give en unik fremtidssikret dataplatform til at udvikle og implementere et avlsindeks som gør det muligt at nedbringe metanudledningen fra malkekvæg gennem systematisk avl for mindre metanbelastning	Trine Villumsen, QGG	2021-2024	LBST
ONIMIT	Projektets formål er at opnå viden om de avlsmæssige sammenhænge mellem metanudledning, fodereffektivitet og produktions-sygdomme med henblik på at reducere metanudskillelsen samtidig med at den velfungerende ko bibeholdes. Variation mellem bedrifter og individuelle køer indenfor bedrift anvendes til analyse af de komplekse relationer mellem den bedriftsspecifikke fodring og management.	Mogens Sandø Lund, QGG	2022-2025	GUDP
C-FIT	Projektets formål er at anvende 3-D billedanalyse til at estimere fodereffektivitet,	Jan Lassen, QGG	2021-2024	Innovationsfonden

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	negativ energibalance og tidlig advarsel om sygdom for individuelle dyr baseret på automatiske storskalamålinger i private besætninger. Der skal ligeledes udvikles genomiske modeller til avlsværdiurdering for egenskaberne.			
Bæredygtig slagtekalvefodring nu	Projektets formål er at give grundlag for en bæredygtig slagtekalveproduktion, så slagtekalveproducenterne kan fodre på en måde, der giver sund vom, god velfærd, billig fodring, lavt klimaaftryk, høj tilvækst og god økonomi	Mogens Vestergaard, ANIVET	2021-2023	Kvægafgiftsfonden
GrOBEat – High Quality Grass-fed Organic Beef for Sustainable Eating behavior	GrOBEat ønsker at udvikle en bæredygtig strategi for den økologiske oksekødsproduktion til fremtidens forbruger, hvor kvalitet erstatter kvantitet, hvilket i følge de nyeste hypoteser i forbrugervidenskab bidrager til sundere spisevaner og øget tilfredsstillelse.	Margrethe Therkildsen, FOOD	2021-2024	GUDP Organic-RDD6
Sustainable protein ingredient for animal feed (SUPIAF)	Formålet med projektet er at videreudvikle bakterielt proteins potentiale i foder til smågrise og opdrætsfisk. Produktet vil blive optimeret i forhold til næringsstofbehovet hos ovennævnte opdrætsarter, så det fremadrettet kan indgå i foderfirmaers foderblandinger som en bæredygtig proteiningrediens eller et funktionelt additiv.	Michael Jensen, Unibio A/S, DK. AU ansvarlig: Mette Olaf Nielsen, ANIVET	2019-2023	GUDP
Algae Based Climate Feed Additive for Methane Reduction in Dairy Cows (ClimateFeed)	The project will develop a novel climate friendly algae-based feed additive with a significant methane reduction (30%) in dairy cows with improved overall feed efficiency and productivity. The feed additive will replace synthetic additives. Algae farmers, Danish producers of feed and minerals, dairy companies and farmers will share the value of (estimated) 1.4 billion DKK/year in DK alone. The investment will be used at Danish universities, GTS institutes and Danish companies to develop and document (by in vitro and in vivo test) the novel zoo-technical algae-based feed additive.	Anne Christine Hastrup, DTI, DK. ANIVET ansvarlig: Mette Olaf Nielsen	2019-2023	IFD

Projekttitle	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
Reducing ruminant methane emission by inactivating methanogenic archaea with viruses	Rumen archaea are the only known microorganisms responsible for the synthesis of methane in the forestomachs of ruminants. The project will address the production and manipulation of archaeal viruses that will reduce methane emission through repression of methanogenic archaea in the rumen.	Dennis Sandris Nielsen, University of Copenhagen, DK. ANIVET responsible: Mette Olaf Nielsen	2021-2023	FTP
Novel triple action feed additive approach to reduce enteric methane emission from cattle by blocking the enzymatic process, draining the hydrogen substrate and suppressing methanogenic archaea (No-Methane)	The project will develop and document (in vitro and in vivo tests) a novel, safe triple action feed additive (TAFE) for cattle, which reduces enteric methane emission by up to 50% without negative impacts on productivity. The novelty of TAFE is that different compounds/probiotics are combined to target in a synergistic way 3 separate rate-limiting factors in the synthesis of methane from CO ₂ and H ₂ .	Mette Olaf Nielsen, ANIVET, AU	2021-2025	IFD
Identification and elucidation of bioactivity of new compounds excreted into milk as the result of introduction of novel feeds and/or anti-methanogenic feed additives in diets for cattle (BIO-MILK)	Methane reduction efficiency and safety assessed of 3 new anti-methanogenic feed additives are presently being researched at AU as part of IFD projects. In this PhD: 1) Validated targeted methods will be refined to accurately quantify compound X and possible break-down products in biological samples (e.g. blood, milk and meat). 2) Untargeted metabolomics and cell culture study approaches will be used to identify compounds excreted into milk and their safety.	Mette Olaf Nielsen, ANIVET, AU	2021-2024	AU-Arla Fellowship
Algae and Climate	The aim of the study is to provide the European Commission's Directorate General for Maritime Affairs and Fisheries (DG MARE) with sound and up-to-date knowledge on the potential impacts of scaling up the production of marine algae through aquaculture in the EU. This includes evaluation of the share of (today and future) animal's feed requirements that could be met by algae production.	Pierre Strosser, Acteon Environment, Fr. ANIVET responsible: Mette Olaf Nielsen	2021-2022	European Commission

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
Macroalgae bioactives to reduce methane emission from cows (MABICOW)	The project aim is to develop a novel feed additive based on safe bioactive component(s) isolated from Northern hemisphere macroalgae to reduce methane formation by >45%, when the additive is included in rations for dairy cows. This involves identification and isolation of bioactive components from target species, and proof-of concept will be provided that best-bid bioactives, when added to cow diets, can reduce methane formation by >45% without compromising cow productivity, health or milk quality/safety traits.	Mette Olaf Nielsen, ANIVET, AU	2022-2025	AgroFoodTure/IFD
Bæredygtigt dansk rapsprotein til grise (RAPS)	At optimere danske rapskager og -skrå på en omkostningslet måde med probiotika og enzymer, for at forbedre næringsværdien og tilgængeligheden af proteinet og P, når raps bruges som proteinfodermiddel til slagtesvin. Klimaeffekten vil reduceres med 113 CO ₂ -ækv./slagtesvin ved udfasning af soja samt mindre lattergasemission grundet øget udnyttelse af N i raps.	Danish Agro	2022-2025	GUDP
Reducing methane emissions and improving growth performance and health with a novel enzyme applied to swine - MethEnzwine	Formålet er at forbedre grisenes sundhed, reducere udledningen af klimagasser. Der udvikles et enzym, som gør, at der frigives præbiotiske substrater i mavetarmkanalen hos grisene, der påvirker tarmens mikrobiota med færre metanogene arkæer, som producerer klimagassen metan.	IFF	2022-2025	Innovationsfonden

9.2.2 Igangværende projekter vedrørende husdyrgødning

Projekttitle	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
Nationale emissionsfaktorer for lattergas fra kvælstofgødning og sædskifter (NATEF)	Projektet er bygget op om et forsøgsdesign, hvor relevante sædskifter er etableret på fire lokaliteter med forskellige jordtype-klima kombinationer, som er relevante for dansk landbrug. Hver parcel omfatter en høstparcel, hvor også langtids-monitoringen af lattergas sker, og et værkstedsareal med miniplots på 1 m ² , hvor forårskampagner gennemføres. Der er gennemført to års målinger af lattergasemission i hele sædskifter, og forårskampagner med forskellige gødningsmaterialer, på fire lokaliteter. Begge år viste nogen afvigelse fra gennemsnitlige vejrforhold i forårsperioden, og en potentielt vigtig forskel mellem handels- og husdyrgødning. Der er bevilget en fortsættelse af måleprogrammerne for at opnå mere robuste estimater for lattergasemissionen.	Søren O. Petersen, AGRO	2019-2024	Landbrugsstyrelsen
Metanfjernelse i flydelag på gyllelagre med dynamisk ventilationskontrol (CH ₄ VENT)	Dette projekt skal validere en ny strategi til begrænsning af metanemissioner fra gyllelagre under praktiske opbevaringsforhold. Teknologien er baseret på stimulering af mikrobiel metanoxidation i naturlige flydelag ved hjælp af aktivt kontrolleret ventilation. Et igangværende forskningsprojekt har leveret bevis for konceptet i pilotskala, og det nye projekt har følgende specifikke mål: i) udvikling af en teknisk løsning i fuld skala, der skal installeres på gylletank med teltoverdækning; ii) udvikling af metode til stabilisering af flydelag under omrøring og eksport af gylle; iii) karakterisering af methanotrofer i flydelag; og iv) kvantificering af metanreduktion over et helt år.	Søren O. Petersen, AGRO	2022-2024	Innovationsfonden
Lavdosis-forsuring af gylle i lagertanken	Udvikling og dokumentation af et praktisk anvendeligt koncept til forsuring af gylle i lagertanken med henblik på reduktion af metan under opbevaringen, samt dokumentation af effekten på emissioner af metan og andre gasser. Konkrete opgaver: i) Undersøgelse af strategier til	Søren O. Petersen, AGRO	2022-2024	Miljøministeriet

Projekttitle	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	omrøring i lagertanken på basis af gylleegenskaber; ii) Dokumentation af metanreduktion og samlet klimaeffekt af lavdosis-forsuring; og iii) Analyse af driftsomkostninger, og omkostningseffektivitet for drivhusgasreduktion ved de undersøgte forsuringstrategier.			
SOWEMIS	Formålet med nærværende projekt er at udvikle stalde og gyllesystemer til løse diegivende søer, hvor der både kan opnås en høj dyrevelfærd for so og pattegrise samt en lav emission af ammoniak, lugt og drivhusgasser sammenlignet med stalde med et normalt gyllesystem. Det forventede resultat af projektet er, at der udvikles et gyllesystem baseret på tragtformede gyllekummer med en lav fordampningsoverflade og dermed en lav emission. I det tragtformede gyllesystem vil der være implementeret punktudsugning, således at der opnås den mindst mulige emission fra både punktudsugning og den resterende ventilation i stalden. I projektet vil der endvidere blive udviklet et fluxkammer, hvor der kan genereres afgørende ny viden om den emissionsmæssige dynamik i forhold til vedhæftning af gødning på overflader, gyllekumme og spaltegulv, betydningen af gødningsafsætning på det faste gulv i samspil med andelen af fast i staldsystemet og effekten af punktudsugning på opsamling af emissioner. Projektet vil endvidere generere ny viden i forhold til staldklima, management og stidesign og hvordan der kan opnås minimal gødningsafsætning på det faste gulv i stier med delvist fast gulv og dermed opnå det fulde emissionsmæssige potentiale for de tragtformede gyllekummer. Den overordnede effekt af projektet vil være at incitamentet til at implementere stier til løse diegivende søer øges, da der både opnås en funktionsdygtig sti med høj dyrevelfærd og lav emission af ammoniak, lugt og drivhusgasser.	Michael Jørgen Hansen, BCE	2020-2023	GUDP

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
INTEgreret Reduktion af METHan-emission fra husdyrgødning (INTERMET)	Lagring af husdyrgødning i stald og udendørs lager repræsenterer ca. 1/3 af de samlede metan-emissioner fra dansk landbrug. Projektet vil give forbedret mulighed for at opnå markant reduktion af landbrugets klimapåvirkning ved at udvikle og dokumentere integrerede strategier til reduktion af metan-emissioner fra husdyrgødning (gylle) lagret på kvæg- og svinebedrifter. Projektet adresserer metan-emission i hele kæden fra udskillelse til endt lagring og retter sig mod eksisterende såvel som nye stalde. Strategierne vil kombinere optimeret hyppig udslusning, nye staldindretninger og udslusnings-systemer, efterbehandling af gyllekanaler for at hæmme vækst af metan-producerende mikroorganismer, optimeret strategi for produktion af biogas fra hyppigt udsluset gylle og en ny teknologi til kontrolleret oxidation af metan i gyllelagre. Projektet omfatter eksperimentelle undersøgelser og anvendelse af state-of-the-art metoder og måleudstyr. Parallelt udvikles modelværktøjer, som kan give en dynamisk beskrivelse af metan-produktionen i hele kæden samt simulere effekterne af at implementere nye virkemidler. Samlet set vil projektet tilvejebringe nye omkostningseffektive virkemidler, der er veldokumenterede og kan fungere i praksis. Projektet vil desuden give myndigheder bedre muligheder for at iværksætte implementering af klimateknologi i landbruget. Endvidere vil de nationale emissionsopgørelser på baggrund af projektet løbende kunne opdateres i takt med indførelse af nye virkemidler.	Anders Feilberg, BCE	2019-2023	Landbrugsstyrelsen
A Novel Greenhouse Gas Mitigation Technology for Livestock Manure Slurry (NoGas)	Ny teknologi til reduktion af drivhusgasser fra gylle (NoGas): Den danske produktion af svin og kvæg medfører årligt ca. 35 millioner tons gylle. Gyllen indeholder bakterier, som danner drivhusgasser (primært metan), og dermed bidrager gyllen til Danmarks samlede udledning af klimagasser. Formålet med NoGas-projektet er at udvikle og	Anders Feilberg, BCE	2019-2023	Landbrugsstyrelsen

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	optimere en helt ny teknologi til reduktion af drivhusgasser fra gyllen. Desuden ønsker forskerne at få en forståelse af de biokemiske mekanismer i gyllen som påvirkes af den nye teknologi. Efterfølgende vil den nyudviklede teknologi blive testet i en svinestald med tilhørende gylletank med henblik på at demonstrere teknologiens potentiale. Den nye teknologi udspringer af nogle spændende resultater, som forskerne bag projektet har fra et tidligere projekt, hvor de har opfundet en ny teknologi til reduktion af ammoniakdannelse fra gylle. I udviklingen af den nye teknologi til reduktion af drivhusgasser vil der være fokus på at gøre teknologien så effektiv, billig, og miljøvenlig/bæredygtig som muligt. Forskerne bag projektet forventer at den nye teknologi kan halvere mængden af drivhusgasser (primært metan) fra gylle til en så lav omkostning at dansk landbrug kan forblive konkurrencedygtigt på det internationale marked. Hvis den nye teknologi implementeres og fremadrettet bruges til behandling af 50% af gyllen i Danmark, vurderes det at landbruget årligt kan reducere mængden af dannede drivhusgasser med 0.4 - 1 million tons CO₂-ækvivalenter.			
Greenslurry	Projektets mål er at udvikle en vaskerobotteknologi som reducerer metanemissionen fra svinestalde ved at minimere overførsel af restgylle med metanproducerende mikroorganismer mellem produktionshold. Der evalueres nye gylleadditiver, der udvikles vaskerobot til slagtesvinestalde, som kan vaske gyllekummen ren for inokulum, og der gennemføres forsøg med grise i metankamre for udvikling af en model for enterisk metan fra slagtesvin.	Michael Jørgen Hansen, BCE	2020-2023	GUDP

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
Reduktion af drivhusgasudledninger og øget kulstoflagring i jord via stabilisering af gødningsfibre som biochar (STABIL)	Udledning af drivhusgas fra landbruget sker primært som metan fra drøvtyggere, lagring af gylle, og som lattergas fra jorden foranlediget af brug af kvælstofgødning. Derudover udledes store mængder kuldioxid fra nedbrydning af jordens kulstofpulje. Det er en stor udfordring at reducere disse udledninger til et niveau der er i tråd med regeringens klimamål. I STABIL undersøges hvordan svinegylle og afgasset biomasse kan stabiliseres ved separation, damptørring og pyrolyse. Herved produceres biochar der kan indarbejdes i landbrugsjord og dermed reduceres drivhusgasudledning fra opbevaring og anvendelse af husdyrgødning, samtidig med at der bindes og akkumuleres atmosfærisk kulstof i jorden. Projektet gennemføres via følgende program: 1. Optimering af et system til separation, damptørring og pyrolyse af gylle og afgasset biomasse med fokus på næringsstoffordeling, oprensning af tungmetaller, energieffektivitet, kulstofstabilitet samt gødningsværdi 2. Produktion og drift af et 100 kW anlæg til demonstration og test, emissionsmålinger og afklaring af energibalancer 3. Bestemmelse af reduktionspotentialer for teknologien i forhold til drivhusgas- og ammoniakudledning fra lagring og i marken og effekten på jordens fertilitet 4. Demonstrationsaktiviteter med fremvisning af procesanlæg og anvendelse af biochar i grønsagsdyrkning 5. Vurdering af miljø- og klimapåvirkninger 6. Incitament- og aktøranalyse til afklaring af potentialer og barrierer for udrulning i Danmark	Anders Feilberg, BCE	2021-2024	GUDP
Nutrient recycling for soil fertility and improved organic livelihood (FertiHood)	Økologisk planteproduktion har utilstrækkelig adgang til næringsstoffer, er afhængig af konventionel gødning og har lige så stor klimapåvirkning pr. produceret enhed, som konventionelt. Vi vil øge udbytte og reducere	Henrik Møller, BCE	2021-2024	GUDP

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	klimaaftryk igennem forbedring af jordens frugtbarhed og evne til at frigive næringsstoffer ved recirkulering af restprodukter fra landbrug og samfund. Målet er at skabe økologiske gødninger og bestemme effekten på jordens frugtbarhed og biodiversitet, samt at udvikle næringsstofrådgivning til øget udbytte, optimeret økonomi og bæredygtighed. Specifikt vil vi: 1) identificere affaldsstrømme og screene for implimenterbarhed, 2) undersøge potentialet for restprodukters forbedring af jordens frugtbarhed, 3) teste indikatorer for jordfrugtbarhed inklusiv Albrecht-Kinsey-systemet, 4) optimere input til biogasanlæg med henblik på balanceret gødning, 5) optimere biogasprocesser mht. tilgængelighed af kvælstof og kulstoflagring i jord, 6) optimere svovlgødningsværdi af afgasset materiale, 7) udvikle økologiske gødningsnormer og gennemføre økonomisk optimering af næringsstofforsyningen på tværs af bedriftstyper og industrier til forbedring af økologien som levevej, og 8) vurdere klima- og miljømæssige konsekvenser som motivation for økologiske landmænd.			
Automatisk dataflow ved håndtering af husdyrgødning, eGylle	Fra 2020 øges kravene til udnyttelse af kvælstof i gylle med 5 procentenheder, og alle landmænd er nødt til at optimere gyllehåndteringen yderligere for at undgå undergødskning af afgrøderne. Alle led i håndteringskæden skal derfor ses efter i sømmene, og de svageste led skal styrkes. Erfaringer fra bl.a. Landbrugsstyrelsens Pilotprojekt for præcisionslandbrug viser, at styring af gyllehåndteringen er et svagt led, og at der på grund af store variationer i gyllens sammensætning sjældent tilføres præcis den tilstræbte mængde kvælstof pr. ha. Manglende automatisering af data mellem planlægningsystemer og udbringningsudstyr anses for at være en af de afgørende årsager til, at leddet er svagt. Det er	Anders Peter Adamsen, BCE	2021-2023	GUDP

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	projektets formål at forbedre landmandens økonomi og reducere miljøpåvirkningerne fra gylle ved at sikre, at kvælstoftildelingen i den enkelte mark sker ved korrekt indregning af mængde og effekten af tildelt gylle. I eGylle udvikles et sammenhængende system, hvor hele datakæden om planlægning og udbringning af gylle og handelsgødning håndteres dynamisk og automatisk. Beregninger viser, at eGylle har et potentiale for at øge landmandens høstudbytte med 2,2 hkg korn pr. hektar og samtidig reducere kvælstofudvaskningen med mindst 1.400 ton pr. år. De deltagende virksomheder kan forvente et provenu på salg af produkter og ydelser på i alt 2,7 mio. kr. i år tre efter projektets afslutning.			
Forøget energiudbytte og nye grønne produkter fra biogasanlæg	Biogasanlæg er ude af stand til at omsætte store dele af biomassen de behandler til energi: Lignin-delen kan ikke konverteres under anaerobiske forhold og hemicellulose og cellulose "fanget" i ligninen er svær at tilgå. Det betyder, at op til 40% af energien i biomassen ikke kan udnyttes. Endvidere er næringsstofferne (N, P, K, S) fra biomassen ofte problematiske og betragtes som oftest som affald og ikke som værdifulde produkter som fx gødning og brændsel. Det overordnede formål med EUDP-projektet er at demonstrere levedygtigheden af et multi-partner cirkulært system med grøn energiproduktion, samtidig med at det transformerer tidligere problematiske biomasserestprodukter til grønne produkter med høj værdi. Med en succesfuld demonstration af det cirkulære system og efterfølgende markedsudbredelse af teknologien vil biogasanlæg i fremtiden opnå bedre kapacitetsudnyttelse og bedre effektivitet i biogasproduktionen, samt bedre udnyttelse af grøn energi generelt og samtidig sikre energibesparelser	Henrik Møller, BCE	2021-2023	EUDP

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	og erstatte fossile brændstoffer i produktions-, opvarmnings- og transportsektoren.			
Udvidet Normtal	Det danske Normtalsystem for Husdyrgødning blev etableret for mere end 20 år siden, med det formål at beskrive husdyrgødningens indhold af N, P og K for kombinationer af husdyr, staldd typer og lagerforhold, der anvendes i dansk landbrug, mens tab af kvælstof i stalde og lagre er mindre præcist beskrevet. Der er et stigende behov for at kvantificere udledning af drivhusgasser, især metan fra dyr, stalde og lagre. Formålet er at udvide det nuværende Normtalsystem til også at omfatte normtal for kulstof og gøre systemet transparent ved at offentliggøre både algoritmer og database. Udvidelsen vil inkludere omsætningen af kulstof til CO₂ og enterisk metan fra dyrene, samt indarbejde management faktorer som fodring, effekt af gyllens opholdstid i stald og lager samt temperatur, mængde af restgylle etc. på emission af metan. Der regnes på kvælstof-flowet, fordi det nuværende Normtalssystem for husdyrgødning alene beskriver indholdet af N, P og K samt emissionen af ammoniak. Der er behov for bedre at kunne estimere dannelse og emission af lattergas, hvilket også vil blive forsøgt, fordi lattergas har en ekstrem kraftig drivhuseffekt. Projektet vil føre til ét sammenhængende Normtalssystem, hvor den nyeste viden på området integreres, og hvor der er overensstemmelse mellem husdyrgødningens indhold af kvælstof og kulstof og hele processen gennem dyr, stald og lager. Målet er, at resultaterne kan indgå som input i den nationale opgørelse for landbrugets drivhusgasemissioner	Christian Børsting, ANIVET	2022-2024	NIFA
Metoder til reduktion af Ammoniaktab og øget meta-nudbytte fra biogasGylle (MAG)	Afgasning af gylle sammen med organiske restprodukter i biogasanlæg, ændrer de fysiske og kemiske egenskaber af gyllen. Tørstofindhold og viskositet ændres, indholdet af ammonium-kvælstof (TAN), pH forøges, hvilket øger potentialet for	Henrik Møller, BCE	2021-2025	GUDP

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	ammoniakudledning under lagring og udbringning. Hidtil har det være antaget at bioforgasning ikke medførte højere ammoniakudledning. Nye studier 1 viser imidlertid en højere ammoniakudledning fra den afgassede gylle og det reducerer gyllens værdi for landmændene og deres fordele ved at modtage biogasgylle. Dette projekt vil udvikle teknologier til at øge omsætning af det organisk materiale i biogasreaktor og som konsekvens reduceres ammoniaktabspotentialt. Altså en forhåbentlig omkostningsneutral NH ₃ -reduktion. Det vil blive undersøgt hvordan råvaresammensætning kan medvirke til at reducere pH i den afgassede gylle, samt hvorledes såkaldt "in-line" behandling af tungtomsættelige organiske forbindelser kan øge gasudbyttet og være med til at reducere viskositet og dermed infiltrationshastighed af gylle i jord, hvorved ammoniaktabspotentialt reduceres.			
Metoder til måling af emissioner af klimagasser og ammoniak fra gylletanke og lagring af fast gødning (konceptnote)	Alle strategier til reduktion af metan fra husdyrgødningskæden efterlader en udfordring med at håndtere emissionen fra udendørs lagring i tanke. Tiltag på staldniveau og fx bioforgasning skal kombineres med en indsats for at reducere emissionerne fra lagret for at opnå en høj reduktion fra hele kæden. I et fremtidigt teknologiscenarie vil lageremissionen af metan være den klart dominerende kilde, hvis ikke der udvikles og dokumenteres løsninger hertil. Måling af emissioner fra lagertanke er imidlertid en udfordring, og der findes i øjeblikket ikke en alment accepteret og valideret metode til formålet. AU har i 2020 indført og afprøvet en ny mikro-meteorologisk metode til både metan og ammoniak i fuld skala, men metoden stiller store krav til placering af tanke og omgivelser (andre kilder, bygninger, bevoksninger mv). Der er derfor behov for at udvikle og validere mere fleksible alternativer og udføre parallelle kampagner. Endelig er der behov for generelt	Anders Feilberg, BCE		

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	accepterede metoder og protokoller, hvilket kan styrkes via internationalt samarbejde.			
Udvikling og validering af metoder til måling af klima-gasser og ammoniak fra naturlig ventilerede stalde (NatVent) (konceptnote)	Måling af udledning af gasser fra naturligt ventilerede (åbne) stalde er en udfordring og forbundet med større usikkerhed end ved mekanisk ventilerede stalde. I forskningsprojekter kan man tilsætte en kunstig sporgas i en kendt dosis i stalden, og efterfølgende måle forholdet mellem sporgas og den ønskede gas i forskellige punkter i stalden. Metoden forudsætter dog en god fordeling af traceren i stalddrummet. Et alternativ, der ofte bruges i produktionsstalde er baseret på anvendelse af dyrenes egen CO ₂ -produktion som sporgas (tracer-ratio-metoden), idet denne kan modelberegnes ud fra vægt, foderforbrug, mælkeproduktion, aktivitet og tilvækst. Der er imidlertid et akut behov for en kritisk evaluering af de modellerede CO ₂ -udledninger og anvendelsen til emissionsmålinger. Der er derudover behov for at få udviklet og afklaret metoder der er tilpasset danske forhold, hvor der ofte er opdelinger i stalden, fx afsnit for goldkøer og kvier, evt. med dybstrøelse samt lakterende dyr. Der skal desuden tages hensyn til forskelle i fx hydrauliske opholdstider, udformning af gyllesystem og gulvtyper m.v.	Anders Feilberg, BCE	2021-2023	Miljøministeriet
Case studie: Sammenligning af empirisk og modelleret metanemission fra slagte-svinestalde (METEMIS)	I forbindelse med Danmarks klimapolitiske målsætning om at reducere drivhusgasemissionerne har brancheorganisationen Landbrug & Fødevarer fastsat et mål om at det danske landbrugs- og fødevarerehverv skal være klimaneutralt i 2050. Reduktioner i udledninger af drivhusgasser fra dansk landbrug kan opnås gennem innovative miljøteknologier, der kan reducere emissionen af drivhusgasser. Metanemissionen fra svineproduktionen antages at udgøre ca. 2 mio. CO ₂ ækv [1], hvoraf det forventes at ca. 70% kommer fra gødningen, men den resterende del kommer fra dyrenes enteriske produktion [2]. En væsentlig	Michael Jørgen Hansen, BCE	2021-2023	Landbrugsstyrelsen

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	forudsætning for at udvikle innovative miljøteknologiske løsninger er at der foreligger empiriske data eller modeller for emissionen for en given produktionsgren, således at reduktionspotentialet kan estimeres. Det vil være en omfattende og omkostningsfuld opgave at fastlægge emissionen alene baseret på empiriske data og det vil derfor være nødvendigt at kombinere dette med modellering. Der er beskrevet en række mere eller mindre avancerede modeller for metanemission fra stald og lager [3-5]. Fælles for modellerne er at de kræver inputdata som eksempelvis omsætteligt kulstof, temperatur eller metan emissionsfaktor. Det er derfor af stor relevans at der gennemføres en test af modellernes estimat for metanemissionen og at det undersøges om modellerne kan optimeres ved at anvende specifikke input data for en staldtype. De input data som genereres i det nærværende projekt vil kunne implementeres i datagrundlaget for modellering af metanemission fra svinestalde.			
LESS	Projektets formål er at udvikle og teste teknologier, som kan anvendes til at reducere metanemissionen fra gyllelagre. Projektets output vil være én eller flere teknologier, som vil kunne anvendes til at reducere metanemissionen fra gyllelagre. Målet med at inddrage flere mulige strategier for metanreduktion i gyllelagre er at udpege den mest optimale strategi både i forhold til metanreduktion, implementerbarhed og omkostningseffektivitet. I projektet udvikles et fuldskala gyllelager som kan opblandes til en homogen sammensætning i procesforløbet, renholdes ved omrøring og tømmes effektivt og dermed minimere overførsel af restgylle med metanproducerende mikroorganismer (inokulum) til næste lagringsperiode. I projektet opbygges pilotskala gyllelagre, hvor det er muligt at undersøge effekten af effektiv tømning i	Lise Bonne Guldberg, BCE	2022-2024	GUDP

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	kombination med behandling af restgylle med additiver, løbende behandling med additiver i løbet af lagringsperioden og kontrolleret oxidation med beluftning. I projektet undersøges endvidere effekten af at lave en tættere overdækning af gyllelagre i kombination med en gasfakkel til afbrænding af metangas. Den overordnede effekt af projektet er at der opnås én eller flere implementerbare og omkostningseffektive teknologier til gyllelagret der i kombination med hyppig udsugning af gylle fra stalde kan reducere metanemissionen i kæden fra stald og lager med 40-80%.			
MethEnzwine	Formålet er at forbedre grisenes sundhed, reducere udledningen af klimagasser. Der udvikles et enzym, som gør, at der frigives præbiotiske substrater i mavetarmkanalen hos grisene, der påvirker tarmens mikrobiota med færre metanogene arkæer, som producerer klimagassen metan.	Michael Jørgen Hansen, BCE	2022-2025	Innovationsfonden
Forbedret grundlag for opgørelse af landbrugets emissioner af drivhusgasser og ammoniak på bedrifts- og nationalt niveau	DCE – Det Nationale Center for Miljø og Energi og DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug har gennem mange år etableret et tæt samarbejde omkring håndtering af de landbrugsdata, som er nødvendige for at udarbejde opgørelse for emissioner af drivhusgasser og ammoniak fra det danske landbrug. Klimaudfordringen og målet om en yderligere reduktion af drivhusgasser og ammoniak skaber behov for at kunne detaljere og forbedre emissionsopgørelsen, således at der opnås en bedre refleksion af de faktiske forhold og muligheden for at reflektere fremtidige emissionsreducerende tiltag, herunder tiltag rettet mod den enkelte bedrift. Dette vil stille store krav til opbygning af vidensgrundlaget og videreudvikling af beregningsmetoder.	Mette Hjorth Mikkelsen, ENVIS	2022-2024	
Metoder til måling af emissioner af klimagasser og ammoniak fra gylletanke og	Alle strategier til reduktion af metan fra husdyrgødningskæden efterlader en udfordring med at håndtere emissionen fra udendørs lagring i tanke.	Anders Feilberg, BCE	2021-2023	Miljøministeriet

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
lagring af fast gødning (LagerMet) (konceptnote)	Tiltag på staldniveau og f.eks. bioforgasning skal kombineres med en indsats for at reducere emissionerne fra lagret for at opnå en høj reduktion fra hele kæden. I et fremtidigt teknologiscenarie vil lageremissionen af metan være den klart dominerende kilde, hvis ikke der udvikles og dokumenteres løsninger hertil. Måling af emissioner fra lagertanke er imidlertid en udfordring, og der findes i øjeblikket ikke en alment accepteret og valideret metode til formålet. AU har i 2020 indført og afprøvet en ny mikro-meteorologisk metode til både metan og ammoniak i fuld skala, men metoden stiller store krav til placering af tanke og omgivelser (andre kilder, bygninger, bevoksninger mv). Der er derfor behov for at udvikle og validere mere fleksible alternativer og udføre parallelle kampagner. Endelig er der behov for generelt accepterede metoder og protokoller, hvilket kan styrkes via internationalt samarbejde.			

9.2.3 Igangværende projekter vedrørende afgrødeproduktion

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
Kvantificering og dokumentation af effekten af præcisionsgødskning på nitratudvaskning og lattergasemission	Præcisionsgødskning, især nye teknologier såsom robotter til registrering og styring af kvælstof (N), er ikke tilstrækkeligt evalueret med hensyn til deres potentiale for at reducere N-tab via udvaskning og dannelse af lattergas. Brugen af disse nye systemer kan derfor ikke pt. integreres og kvantificeres tilstrækkeligt i modeller og regulering af arealbaserede N-tab. Der er et presserende behov for at undersøge potentialet i disse nye teknologier, herunder brugen af satellit- og dronebaserede målinger. Dette inkluderer, hvordan den bedriftsdokumentation, de leverer, kan integreres i udledningsbaserede reguleringssystemer.	Davide Cammarano, AGRO	2022-2025	Landbrugsstyrelsen

Projekttitle	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
Såtidforsøg med efterafgrøder	Efterafgrøder er et vigtigt virkemiddel til reduktion af nitratudvaskning. I praksis kan det være vanskeligt for landbrugere at opfylde kravet om såning før 20. august, hvorfor der er indført mulighed for senere såning mod samtidigt kvotetræk. Formålet med projektet er at opnå et mere solidt datagrundlag end det nuværende for beregning af kvotereduktion og evt. bonus ved såning af efterafgrøder henholdsvis senere eller tidligere end 20. august. Formålet er således at opnå forsøgsdata, der repræsenterer et større geografisk område med forskellige jordbunds- og klimaforhold og forskellige tidspunkter for destruktion af efterafgrøderne.	Elly Møller Hansen, AGRO	2022-2024	Landbrugsstyrelsen
Effekter af brak på kvælstofudvaskning, lattergas og kulstoflagring (BRAK)	Braklagte arealer forventes at spille en stor rolle i den kommende landbrugsreform, hvor braklægning vil blive en nødvendighed for mange bedrifter i forbindelse med opfyldelsen af konditionalitetskrav. Projektet BRAK belyser den miljø- og klimamæssige effekt ved braklægning efter det nugældende regelsæt. Der gennemføres målinger af udvaskning samt emission af lattergas foruden biomassebestemmelse og karakterisering af plantebiomasse efterår. På baggrund af biomassebestemmelsen estimeres mængden af kulstof, der afsættes i jorden.	Ingrid K. Thomsen, AGRO	2021-2024	Landbrugsstyrelsen
Tools for improving grass-land biomass production and delivering multiple ecosystem services (GrassTools)	GrassTools will provide knowledge to farmers to ensure that reductions of GHG emission and nitrate leaching from grassland production will be in the upper-third of the variation space. The science behind the tools for optimizing novel perennial grass systems will be 1) determining above-and below-ground biomass production in grasses, legumes and grass-legume-forb mixtures 2) quantifying C and nitrogen (N) flows to assess and enhance soil C storage and reduce N losses 3) assessing overall climate and environmental effects at local & national level. Tools for implementation: 1) grass and legume varieties with documented C allocation to	Uffe Jørgensen, AGRO	2021-2026	Innovationsfonden

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	roots 2) improved algorithms for use of the Yara N-sensor in grassland 3) improved & more user-friendly model to evaluate on-farm effects on soil C and N losses 4) implementation of soil C in farm-tools for Climate Check.			
ClimateVeg – Improving climate and environmental profile of Danish organic vegetables	Den danske efterspørgsel efter økologiske grøntsager vokser markant og er nu den største økologiske varegruppe, højere end mælk, ost og æg til sammen. Grøntsager vil i en fremtidig klimaoptimeret kost delvis erstatte animalske produkter, jvf. de nationale kostanbefalinger. Den nuværende klima- og miljøprofil for økologiske grøntsager udfordres af en høj risiko for N-udvaskning og tab af kulstof fra jorden i frilandsgrøntsager og et højt energiforbrug til drivhusgrøntsager. Formålet med ClimateVeg er at dokumentere klima- og miljøprofilen for danske økologiske grøntsager og identificere forbedringer i tæt samarbejde med store økologiske producenter, herunder at teste muligheder for erstatning af husdyrgødning med plantebaserede organiske gødninger kombineret med helårs plantedække til reduktion af N-udvaskning.	Hanne Lakkenborg Kristensen, FOOD	2019-2023	RDD4/GUDP
ComCrop – New compost technology for C-N recycling for on-farm nutrient and carbon recycling to organic soils and high-value crops	Efterspørgslen efter økologiske plantebaserede fødevarer stiger hurtigt, men tilliden hertil svækkes pga. konventionelle gødningskilder. Tilgængeligheden af økologiske plantebaserede kilder må øges. De største barrierer for at rette op på dette er: a) Mangel på gårdskala-teknologi til bæredygtig og effektiv recirkulering af biomasse til hygiejniseret gødning og jordforbedringsmidler. b) Viden om brug og langsigtede effekter af plantebaserede gødninger. Målet for ComCrop er at øge recirkulering af lokale biomasser så udnyttelse, jordfrugtbarhed og kulstoflagring øges, gennem udvikling af en ny gårdskala komposterings-	Hanne Lakkenborg Kristensen, FOOD	2019-2024	RDD5/GUDP

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	teknologi, kompost og gødning. Testes i intensiv grønsagsproduktion på nitratudvaskning.			
SoilCom - Sustainable soils by quality compost with defined properties	The North Sea region is an area of intensive farming characterised by rapid soil degradation. The shared territorial challenges will be tackled in this project by i) designing tailor-made composts based on biological wastes, both at on-farm (local) and compost-company (regional) scale; ii) testing and defining quality standards for composts; iii) increasing the awareness, production and use of compost; and iv) developing guidelines to align and improve certification and regulation for quality compost in the North Sea Region. SOILCOM will transform 'waste' to 'resource', supporting EU policy on circular economy and increasing carbon storage, water and nutrient use efficiency, productivity of horticultural and compost enterprises.	Hanne Lakkenborg Kristensen, FOOD	2019-2023	EU Interreg Northsea
KlimÆPro - Klimavenlig produktion af plantebaserede fødevarer fra danske ærter	Fødevarereproducenter og forbrugere efterspørger i stigende grad danske ærter til plantebaserede fødevarer. Formålet med KlimÆPro er, at igangsætte og styrke en ny fødevareværdikæde, målrettet en klimavenlig produktion af forarbejdede plantebaserede fødevarer fra danskproducerede modne ærter, og reducere import af soja og andre proteinafgrøder. I projektet forædles og testes ærtesorter for dyrkningsegnethed og højt proteinindhold i konventionelle og økologiske prøvedyrkninger. Der testes for kvalitet af proteinfraktioner og ekstraktionsmetoder optimeres til fødevaringredienser. Der beregnes klimavenlig produktion vha. livscyklusanalyse.	Mette Damberg, SEGES	2021-2025	GUDP
Sædskiftemodel udvidet med grøntsagsforsøg med effekter på N-udvaskning, ammoniak, lattergas og kulstoflagring	Grønsagsforbruget ventes at stige kraftigt de kommende år. Da grønsagsproduktion er intensiv og kvælstofkrævende kan N-udvaskningen være betydelig. NLES5-modellen er en empirisk model til estimering af N-udvaskning fra rodzonen, men NLES5 er svagt repræsenteret i datagrundlaget for	Christen Duus Børgesen, AGRO	2021-2025	Landbrugsstyrelsen

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projektleder	Projektperiode	Bevillingsgiver
	grøntsagssædskifter. Kalibreringsgrundlaget til NLES5 udvides og modellen justeres med nye afgrødeklasser og jordtyper. Landbrugsdata (sædskifte og N-gødsning), målinger af udvaskning og kvælstofrige afgrøderester samt jordbundsdata fra grønssagssædskifter vil danne grundlag for at estimere udvaskning, NH ₃ -fordampning fra udbragt husdyrgødning, denitrifikation, N ₂ O-emmission og jordens kulstofbinding vha. modellering. Resultater præsenteres på brugerflade via et ESRI DASHBORD.			

10 Bilag 1 Klimavirkemiddeltabellen

Forfattere og fagfællebedømmere er angivet ved virkemidlernes beskrivelse i rapporten.

Reduktion af drivhusgasudledninger pr. produktionsenhed for virkemidler indenfor husdyrproduktion, husdyrgødning, afgrødeproduktion (per ha/år) og arealanvendelse (per ha/år) beregnet i henhold til IPCC AR5 (Tabel 1), AR4 (Tabel 2), og AR6 (Tabel 3) Global warming potentials (GWP-100) for CO₂, CH₄ og N₂O. Der er pt. ikke klarhed over hvordan bidraget fra kulstoflagring i jord (LULUCF) skal beregnes med henblik på at indregne det i landbrugets udledninger og i hvilken udstrækning det vil blive muligt. Der tages derfor forbehold mht. at LULUCF bidraget kan adderes direkte til de øvrige poster – som det er gjort her – for at beregne netto klimaeffekten af virkemidlerne.

Tabel 1

Tabel 1 - AR5	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger	Ændringer siden 2020-opdateringen af klimatabellen, ift. nettoklimaeffekt m.m.
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energi forbrug	Netto klimaeffekt (med Link til tekst)	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning	*			
Husdyrproduktion										
Holstein: Øgning af kraftfoderandel med 10%-enheder (KVM5.1)	0	460	0	0	460	Kg CO ₂ -ækv/årsko	7	Ja	Gælder for malkekøer. Ugunstig klimapåvirkning ved dyrkning af mere kraftfoder. Kan ikke anvendes af økologer.	Ny i 2022
Jersey: Øgning af kraftfoderandel med 10%-enheder (KVM5.1)	0	230	0	0	230	Kg CO ₂ -ækv/årsko	7	Ja		Ny i 2022
Konventionel: Effekt af ekstra 20 g fedtsyrer/kg tørstof i foderet (KVM5.2)	0	370	0	0	370	Kg CO ₂ -ækv/årsko	9	Ja	Gælder for malkekøer. Effekten til øvrige kategorier af kvæg er usikker	I 2020: ikke opdelt i øko og konventionel
Øko: Effekt af ekstra 20 g fedtsyrer/kg tørstof i foderet (KVM5.2)	0	280	0	0	280	Kg CO ₂ -ækv/årsko	9	Ja		I 2020: ikke opdelt i øko og konventionel

Tabel 1 - AR5	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger	Ændringer siden 2020-opdateringen af klimatabellen, ift. nettoklimaeffekt m.m.
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energi forbrug	Netto klimaeffekt (med Link til tekst)	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning	*			
Anvendelse af metanreducerende tilsætningsstoffer i foder til kvæg (KVM5.3)	0	1.386	0	0	1.386	Kg CO ₂ -ækv/årsko	9	Ja	1.200	I 2020 blev effekten beregnet efter AR4, dvs. metanfaktor 25, men i 2022 efter AR5 med faktor 28. Kun 3NOP, da det er det eneste, der er EFSA godkendt
Genetisk selektion af malkekuvæg (KVM5.4)		?			?	Kg CO ₂ -ækv/årsko	6	Sandsynligvis	Ikke kvantificeret	
Husdyrgødning										
Hyppig udslusning af gylle fra stalde (svin) (KVM6.1)	0	17	0	0	17	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja		I 2020: 10,2 ^a
Hyppig udslusning af gylle fra stalde (kvæg) (KVM6.1)	0	37	0	0	37	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	9	Ja	For kvæggylle er det en stald med lang opholdstid gylle sammenlignet med en stald med kort opholdstid	I 2020: 6 Forudsætter at stalde med spaltermgulve og ringkanal ombygges til stalde med hyppig udslusning
Forsuring af gylle i stalden (svin) (KVM6.2)	0	83	0	0	83	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja		I 2020: 42,8 ^a
Forsuring af gylle i stalden (kvæg) (KVM6.2)	0	50	0	0	50	Kg CO ₂ -ækv/t kvæg	9	Ja		I 2020: 26,6 ^a

Tabel 1 - AR5	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger	Ændringer siden 2020-opdateringen af klimatabellen, ift. nettoklimaeffekt m.m.
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energi forbrug	Netto klimaeffekt (med Link til tekst)	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning	*			
Køling af gylle i grisestalde (KVM6.3)	0	7	0	-1	6	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja		I 2020: 6,17 ^a
Lav-dosis forsuring i gyllelagre (svin) (KVM6.4)	0	48	0	0	48	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	6	Ja		Ny i 2022
Lav-dosis forsuring i gyllelagre (kvæg) (KVM6.4)	0	17	0	0	17	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	6	Ja		Ny i 2022
Gylle og bioforgasning (svin) (KVM6.5)	0	60	0	34	94	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja		I 2020: 32,9 ^a
Gylle og bioforgasning (kvæg) (KVM6.5)	0	13	0	37	50	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	9	Ja		I 2020: 39,1 ^a
Opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (svin) (KVM6.6)	0	44	0	0	44	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	5	Ja		I 2020: 13,3 ^a
Opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (kvæg) (KVM6.6)	0	15	0	0	15	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	5	Ja		Ny i 2022
Overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (svin) (KVM6.7)	0	27	0	0	27	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	7	Ja		I 2020: 8,3 ^a
Overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (kvæg) (KVM6.7)	0	10	0	0	10	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	7	Ja		I 2020: 7,8 ^a

Tabel 1 - AR5	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger	Ændringer siden 2020-opdateringen af klimatabellen, ift. nettoklimaeffekt m.m.
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energi forbrug	Netto klimaeffekt (med Link til tekst)	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning	*			
Afbrænding af fiberfraktion efter separering af afgasset svinegylle (KVM6.8)	0	-	-	-	8	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	Emission fra produktion af ekstra handelsgødning ved afbrænding/pyrolyse er ikke inkluderet	I 2020: -0.4 ^a , Bemærk at "Afbrænding af husdyrgødning" (2020) i 2022 er opsplittet på kategorier
Pyrolyse af fiberfraktion efter separering af afgasset svinegylle (KVM6.8)	0	-	-	-	14	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	Emission fra produktion af ekstra handelsgødning ved afbrænding/pyrolyse er ikke inkluderet	Ny i 2022
Afbrænding af fiberfraktion efter separering afgasset kvæggylle (KVM6.8)	0	-	-	-	15	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	Emission fra produktion af ekstra handelsgødning ved afbrænding/pyrolyse er ikke inkluderet	Ny i 2022
Pyrolyse af fiberfraktion efter separering af afgasset kvæggylle (KVM6.8)	0	-	-	-	20	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja		Ny i 2022

Tabel 1 - AR5	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger	Ændringer siden 2020-opdateringen af klimatabellen, ift. nettoklimaeffekt m.m.
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energi forbrug	Netto klimaeffekt (med Link til tekst)	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning	*			
Afbrænding fast fjerkrægødning (KVM6.8)	0	-	-	-	26	Kg CO ₂ -ækv/t gødning	9	Nej		Ny i 2022
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og bioforgasning (svin) (KVM6.9)	0	87	0	39	126	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja		I 2020: 24,5 ^a
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og bioforgasning (kvæg) (KVM6.9)	0	55	0	40	95	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	9	Ja		I 2020: 24,5 ^a
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (svin) (KVM6.10)	0	50	0	0	50	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	7	Ja		Ny i 2022
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (kvæg) (KVM6.10)	0	51	0	0	51	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	7	Ja		Ny i 2022
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (svin) (KVM6.11)	0	69	0	0	69	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	5	Ja		Ny i 2022

Tabel 1 - AR5	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger	Ændringer siden 2020-opdateringen af klimatabellen, ift. nettoklimaeffekt m.m.
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energi forbrug	Netto klimaeffekt (med Link til tekst)	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning	*			
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (kvæg) (KVM6.11)	0	57	0	0	57	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	5	Ja		Ny i 2022
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og lav-dosis forsuring i gyllelager (svin) (KVM6.12)	0	74	0	0	74	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	6	Ja		I 2020: 18,9 ^a I 2020: Hyppig udslusning af svinegylle m. lagerforsuring
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og lav-dosis forsuring i gyllelager (kvæg) (KVM6.12)	0	59	0	0	59	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	6	Ja		Ny i 2022
Køling af svinegylle og bioforgasning (KVM6.13)	0	69	0	35	104	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja		I 2020: 59.9 ^a
Afgrødeproduktion										
Efterafgrøder, uden N fiksering (KVM7.1)	990	0	-25	-5	960	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Relativt sikkert, men effekt varierer mellem år og vil set over mange år aftage da LULUCF er dominerende effekt	I 2020: 960. Bemærk at "Efterafgrøder" i 2022 er opsplittet i +/- N-fiksering

Tabel 1 - AR5	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger	Ændringer siden 2020-opdateringen af klimatabellen, ift. nettoklimaeffekt m.m.
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energi forbrug	Netto klimaeffekt (med Link til tekst)	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning	*			
Efterafgrøder, med N fiksering (KVM7.1)	990	0	-154	-5	831	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja		I 2022 opsplittet i +/- N-fiksering
Mellemafgrøder (KVM7.2)	132	0	-56	-5	434	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Effekten antages at udgøre ca. halvdelen af en efterafgrøde	I 2020: 430
Tidlig såning af vintersæd (KVM7.3)	0	0	33	0	33	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Forholdsvis sikker meroptagelse af N	Ny i 2022 (Fra N-virkemiddelkatalog)
Nedmuldning af halm (KVM7.4)	0	0	0	0	0	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Nej	Vurderet i forhold til at halm alternativt tilbagesendes via husdyrgødning	Ny i 2022 (Fra N-virkemiddelkatalog)
Halm til forgasning med biochar retur (KVM7.5)	1760	0			1.760	Kg CO ₂ -ækv/ha	7	Ja	Effekt set over en 20 årig periode i forhold til at halm nedmuldes. Sandsynlig effekt på lattergas ikke medregnet	I 2020: 25.300 Ændrede forudsætninger. I 2022 baseret på halm fra 1 ha (4000 kg)
Braklægning i sædskiftet (KVM7.6)	0	0	837	455	1292	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Det er usikkert hvor meget længden af braklægningsperioden påvirker klimaeffekten	I 2020: 2450 ændrede forudsætninger

Tabel 1 - AR5	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger	Ændringer siden 2020-opdateringen af klimatabellen, ift. nettoklimaeffekt m.m.
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energi forbrug	Netto klimaeffekt (med Link til tekst)	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning	*			
Ompløjningstidspunkt for fodergræs og efterfølgende afgrødevalg (KVM7.7)	0	0	345	0	345	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Fra reduktion i udvaskning. Øvrige sædskifteeffekter ikke indregnet	Ny i 2022 (Fra N-virkemiddelkatalog)
Flerårige energiafgrøder i sædskiftet (KVM7.8)	660	0	395	191	1.246	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Kan variere lidt mellem arter af energiafgrøder samt deres management	I 2020: 1.380 Små ændringer i forudsætninger
Pløjefri dyrkning og forbud mod jordbearbejdning i visse perioder (KVM7.9)	0	0	0	102	102	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Effekter på C lagring og lattergasemission er usikre. Spænd fra 51-102 kg CO ₂ ækv/ha/år for hhv. jordbearbejdning og direkte såning	I 2020: 50 I 2020 Reduceret jordbearbejdning
Præcisionsjordbrug (KVM7.10)	0	0	136	37	173	Kg CO ₂ -ækv/ha	7	Ja	Effekt mellem 127 og 190 kg CO ₂ ækv/ha/år	I 2020: 10 I 2020 var der indregnet færre tiltag
Reduceret kvælstofnorm (KVM7.11): Min. (5% reduktion i norm)	-32	0	102	0	70	Mio. kg CO ₂ -ækv (hele DK)	9	Ja	Spændet i tallene dækker en reduceret norm reduktion fra 5 - 15%	I 2020: 4,46 kg CO ₂ /kg N. 38 kt N (10% reduktion) og dermed 171 mio. kg CO ₂ for hele DK. I 2022

Tabel 1 - AR5	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger	Ændringer siden 2020-opdateringen af klimatabellen, ift. nettoklimaeffekt m.m.
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energi forbrug	Netto klimaeffekt (med Link til tekst)	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning	*			
										opsplittet i 5 og 15% reduktion.
Reduceret kvælstofnorm (KVM7.11): Max. (15% reduktion i norm)	-109	0	350	0	241	Mio. kg CO ₂ -ækv (hele DK)	9	Ja		I 2022 opsplittet i 5 og 15% reduktion
Større opbevaringskapacitet af husdyrgødning og ændring er forbud mod udbringning af husdyrgødning om efteråret (KVM7.12)	0	0	1,95	0	1.95	Mio. kg CO ₂ -ækv (hele DK)	9	Ja	Tallet er anslået på baggrund af husdyrgødnings mængder for hele landet samlet	Ny i 2022 (Fra N-virkemiddelkatalog)
Afgrøder med høj N-optagelse (KVM7.13):						Kg CO ₂ -ækv/ha	9			
- Roer – top fjernes fra mark	-917	0	485	0	-432	Kg CO ₂ -ækv/ha		Nej		I 2022 opsplittet i top +-fjernes
- Roer – top fjernes ikke fra mark	0	0	-23	0	-23			Nej		I 2020: -164 Bemærk at "Roer" (2020) i 2022 er opsplittet i top +/- fjernes
- Fodergræs – renbestand	1.980	0	-1.224	-446	310			Ja		I 2020: 1580 I 2020: Græs i sædskiftet
- Fodergræs – med bælgeplanter	1980	0	-590	-446	944			Ja		I 2022 opsplittet i uden og med bælgeplanter

Tabel 1 - AR5	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger	Ændringer siden 2020-opdateringen af klimatabellen, ift. nettoklimaeffekt m.m.
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energi forbrug	Netto klimaeffekt (med Link til tekst)	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning	*			
- Frøgræs	2900	0	61	0	2961			Ja	Tal for kulstoflagring i frøgræs er ikke underbygget	I 2020: 3110 Små ændringer i forudsætninger
Skærpet udnyttelseskrav for N i udvalgte typer husdyrgødning (KVM7.14)	0	0	4,7	0	4,7	Kg CO ₂ -ækv /reduceret kg N input	9	Ja	Reduceret emission fra reduceret produktion af handelsgødning er ikke inkluderet. Skærpede udnyttelseskrav er indført fra 2020-21	I 2020: 4,63
Nitrifikationshæm mere til husdyrgødning (KVM7.15.1)	0	0	1,7	0	1,7	Kg CO ₂ -ækv/kg N	9	Ja		I 2020: 1,66 ^b
Nitrifikationshæm mere på handelsgødning (KVM7.15.2)	0	0	1,0	0	1,0	Kg CO ₂ -ækv/kg N	9	Ja		I 2020: 1,66 ^b
Arealanvendelse										
Udtag af omdriftsareal til permanent ugødet brak (KVM8.1)	594	0	832	361	1.787	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Afhængig af hvornår brak er etableret og jordbonitet	I 2020: 2090 Små ændringer i forudsætninger
Udyrkede bræmmer langs vandløb og søer	1.594	0	832	361	2.787	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	LULUCF bidrag er afhængig af hvornår	I 2020: 1830 Randzoner på mineral jord med

Tabel 1 - AR5	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL *	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger	Ændringer siden 2020-opdateringen af klimatabellen, ift. nettoklimaeffekt m.m.
	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiforbrug	Netto klimaeffekt (med Link til tekst)	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning				
på mineraljord (KVM8.2)									randzone er etableret	andre forudsætninger
Paludikultur – tidligere drænet omdrift (8.3)	42.200	-8.064	5.424	0	39.560	Kg CO ₂ -ækv/ha	6-7	Ja	Ingen tal for energiforbrug	I 2020: 36.800 Opsplittet i 2022
Paludikultur – tidligere drænet vedvarende græs (8.3)	30.800	-8.064	3.379	0	26.115	Kg CO ₂ -ækv/ha	6-7	Ja		I 2020: 36.800 Opsplittet i 2022
Vådområder på mineraljord (KVM8.4)	94	-6.580	1.147	361	-4.978	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Nej	Usikkerhed om LULUCF, metan og lattergasestimater	I 2020: ikke estimeret

* Technology readiness level (https://innovationsfonden.dk/sites/default/files/2019-03/technology_readiness_levels_-_trl.pdf).

^a Ny mere detaljeret beregningsmetode. Gylle er beregnet af dyr i modsætning til tidligere beregninger. Der er i flere tilfælde højere metanproduktion, især fra lagre, end anvendt i den nationale opgørelse.

^b Baseret på nye forsøgsresultater/ny viden.

Tabel 2

Tabel 2 - AR4	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiformbrug	Netto klimaeffekt	ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
Husdyrproduktion									
Holstein: Øgning af kraftfoderandel med 10%-enheder (KVM5.1)	0	400	0	0	400	Kg CO ₂ -ækv/årsko	7	Ja	Gælder for malkekøer. Ugunstig klimapåvirkning ved dyrkning af mere kraftfoder. Kan ikke anvendes af økologer.
Jersey: Øgning af kraftfoderandel med 10%-enheder (KVM5.1)	0	200	0	0	200	Kg CO ₂ -ækv/årsko	7	Ja	
Konventionel: Effekt af ekstra 20 g fedtsyrer/kg tørstof i foderet (KVM5.2)	0	330	0	0	330	Kg CO ₂ -ækv/årsko	9	Ja	Gælder for malkekøer. Effekten til øvrige kategorier af kvæg er usikker
Øko: Effekt af ekstra 20 g fedtsyrer/kg tørstof i foderet (KVM5.2)	0	250	0	0	250	Kg CO ₂ -ækv/årsko	9	Ja	
Anvendelse af metanreducerende tilsætningsstoffer i foder til kvæg (KVM5.3)	0	1200	0	0	1200	Kg CO ₂ -ækv/årsko	9	Ja	
Genetisk selektion af malkekvvæg (KVM5.4)		?			?	Kg CO ₂ -ækv/årsko	6	Sandsynligvis	Ikke kvantificeret
Husdyrgødning									
Hyppig udslusning af gylle fra stalde (svin) (KVM6.1)	0	17	0	0	17	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde (kvæg) (KVM6.1)	0	37	0	0	37	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	9	Ja	For kvæggylle er det en stald med lang opholdstid gylle sammenlignet med en

Tabel 2 - AR4	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ / LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energifor- brug	Netto klimaeffekt	ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ - ækv/ton husdyrgødning			
									stald med kort opholdstid
Forsuring af gylle i stalden (svin) (KVM6.2)	0	74	0	0	74	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja	
Forsuring af gylle i stalden (kvæg) (KVM6.2)	0	44	0	0	44	Kg CO ₂ -ækv/t kvæg	9	Ja	
Køling af gylle i grisestalde(KVM6.3)	0	5,6	0,33	-1,3	4,6	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	
Lav-dosis forsuring i gyllelagre (svin) (KVM6.4)	0	43	0	0	43	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	6	Ja	
Lav-dosis forsuring i gyllelagre (kvæg) (KVM6.4)	0	15	0	0	15	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	6	Ja	
Gylle og bioforgasning (svin) (KVM6.5)	0	54	0	34	88	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja	
Gylle og bioforgasning (kvæg) (KVM6.5)	0	11	0	38	49	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	9	Ja	
Opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (svin) (KVM6.6)	0	39	0	0	39	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	5	Ja	
Opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (kvæg) (KVM6.6)	0	14	0	0	14	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	5	Ja	
Overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (svin) (KVM6.7)	0	25	0	0	25	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	7	Ja	
Overdækning af gylletanke med	0	9	0	0	9	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	7	Ja	

Tabel 2 - AR4	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ / LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energifor- brug	Netto klimaeffekt	ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ - ækv/ton husdyrgødning			
ventileret flydelag (kvæg) (KVM6.7)									
Afbrænding af fiberfraktion efter separering af afgasset svinegylle (KVM6.8)	0	-	-	-	8	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	Emission fra produktion af ekstra handelsgødning ved afbrænding er ikke inkluderet
Pyrolyse af fiberfraktion efter separering af afgasset svinegylle (KVM6.8)	0	-	-	-	14	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	Emission fra produktion af ekstra handelsgødning ved afbrænding/pyrolyse er ikke inkluderet
Afbrænding af fiberfraktion efter separering af afgasset kvæggylle (KVM6.8)	0	-	-	-	15	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	Emission fra produktion af ekstra handelsgødning ved afbrænding/pyrolyse er ikke inkluderet
Pyrolyse af fiberfraktion efter separering af afgasset kvæggylle (KVM6.8)	0	-	-	-	20	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	
Afbrænding af fast fjerkrægødning (KVM6.8)	0	-	-	-	26	Kg CO ₂ -ækv/t gødning	9	Nej	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og bioforgasning (svin) (KVM6.9)	0	78	0	38	116	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og bioforgasning (kvæg) (KVM6.9)	0	49	0	40	89	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	9	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og overdækning af	0	45	0	0	45	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	7	Ja	

Tabel 2 - AR4	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiforbrug	Netto klimaeffekt	ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
gylletanke med ventileret flydelag (svin) (KVM6.10)									
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (kvæg) (KVM6.10)	0	46	0	0	46	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	7	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (svin) (KVM6.11)	0	61	0	0	61	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	5	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (kvæg) (KVM6.11)	0	51	0	0	51	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	5	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og lavdosis forsuring i gyllelager (svin) (KVM6.12)	0	66	0	0	66	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	6	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og lavdosis forsuring i gyllelager (kvæg) (KVM6.12)	0	53	0	0	53	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	6	Ja	
Køling af svinegylle og bioforgasning (KVM6.13)	0	62	0	35	97	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja	

Tabel 2 - AR4	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiforbrug	Netto klimaeffekt	ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
Afgørdeproduktion									
Efterafgrøder, uden N fiksering (KVM7.1)	990	0	-28	-5	957	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Relativt sikkert, men effekt varierer mellem år og vil set over mange år aftage da LULUCF er dominerende effekt
Efterafgrøder, med N fiksering (KVM7.1)	990	0	-173	-5	812	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	
Mellemafgrøder (KVM7.2)	495	0	-63	-5	427	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Effekten antages at udgøre ca. halvdelen af en efterafgrøde
Tidlig såning af vintersæd (KVM7.3)	0	0	37	0	37	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Forholdsvis sikker meroptagelse af N
Nedmuldning af halm (KVM7.4)	0	0	0	0	0	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Nej	Vurderet i forhold til at halm alternativt tilbageføres via husdyrgødning
Halm til forgasning med biochar retur (KVM7.5)	1.760	0	0	0	1.760	Kg CO ₂ -ækv/ha	7	Ja	Effekt set i forhold til at halm nedmuldes. Sandsynlig effekt på lattergas ikke medregnet
Braklægning i sædskiftet (KVM7.6)	0	0	941	455	1.396	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Det er usikkert hvor meget længden af braklægningsperioden påvirker klimaeffekten
Ompløjningstidspunkt for fodergræs og efterfølgende afgrødevalg (KVM7.7)	0	0	388	0	388	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Fra reduktion i udvaskning. Øvrige sædskifteeffekter ikke indregnet
Flerårige energiafgrøder i sædskiftet (KVM7.8)	660	0	444	191	1.295	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Kan variere lidt mellem arter af energiafgrøder samt deres management

Tabel 2 - AR4	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiforbrug	Netto klimaeffekt	ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
Pløjefri dyrkning og forbud mod jordbearbejdning i visse perioder (KVM7.9)	0	0	0	102	102	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Effekter på C lagring og lattergasemission er usikre. Spænd fra 51-102 kg CO ₂ ækv/ha/år for hhv. jordbearbejdning og direkte såning
Præcisionsjordbrug (KVM7.10)	0	0	153	37	190	Kg CO ₂ -ækv/ha	7	Ja	Effekt mellem 127 og 190 kg CO ₂ ækv/ha/år
Reduceret kvælstofnorm (KVM7.11): Min. (5% reduktion i norm)	-32	0	115	0	83	Mio. kg CO ₂ -ækv/år (hele DK)	9	Ja	Spændet i tallene dækker en reduceret norm reduktion fra 5 – 15%
Reduceret kvælstofnorm (KVM7.11): Max. (15% reduktion i norm)	-109	0	394	0	285	Mio. kg CO ₂ -ækv/år (hele DK)	9	Ja	
Større opbevaringskapacitet af husdyrgødning og ændring er forbud mod udbringning af husdyrgødning om efteråret (KVM7.12)	0	0	2,2	0	2,2	Mio kg CO ₂ -ækv/år (hele DK)	9	Ja	Tallet er anslået på baggrund af husdyrgødningsmængde for hele landet samlet
Afgrøder med høj N-optagelse (KVM7.13):						Kg CO ₂ -ækv/ha	9		
- Roer – top fjernes	-917	0	545	0	-372			Nej	
- Roer – top fjernes ikke	0	0	-26	0	-26			Nej	
- Fodergræs – renbestand	1.980	0	-1.376	-446	158			Nej	

Tabel 2 - AR4	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiforbrug	Netto klimaeffekt	ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
- Fodergræs – med bælglplanter	1980	0	-663	-446	871			Nej	
- Frøgræs	2900	0	69	0	2.969			Ja	Tal for kulstoflagring i frøgræs er ikke underbygget
Skærpet udnyttelseskrav for N i udvalgte typer husdyrgødning (KVM7.14)	0	0	5,3	0	5,3	Kg CO ₂ -ækv /reduceret kg N input/år	9	Ja	Reduceret emission fra reduceret produktion af handelsgødning er ikke inkluderet. Skærpede udnyttelseskrav er indført fra 2020-21
Nitrifikationshæmmere til husdyrgødning (KVM7.15.1)	0	0	1,9	0	1,9	Kg CO ₂ -ækv/kg N	9	Ja	
Nitrifikationshæmmere på handelsgødning (KVM7.15.2)	0	0	1,1	0	1,1	Kg CO ₂ -ækv/kg N	9	Ja	
Arealanvendelse									
Udtag af omdriftsareal til permanent ugødet brak (KVM8.1)	594	0	936	361	1.891	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Afhængig af hvornår brak er etableret og jordbonitet
Udyrkede bræmmer langs vandløb og søer på mineraljord (KVM8.2)	1.594	0	936	361	2.891	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	LULUCF bidrag er afhængig af hvornår randzone er etableret
Paludikultur – tidligere drænet omdrift (KVM8.3.1)	42.200	-7.200	6.000	0	41.000	kg CO ₂ -ækv/ha	6-7	Ja	Ingen tal for energiforbrug
Paludikultur – tidligere drænet vedvarende græs (KVM8.3.2)	30.800	-7.200	4.000	0	27.000	kg CO ₂ -ækv/ha	6-7	Ja	

Tabel 2 - AR4	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiforbrug	Netto klimaeffekt	ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
Vådområder på mineraljord (KVM8.4)	94	-5.875	1.290	361	-4.130	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Nej	Usikkerhed om LULUCF, metan og lattergasestimer

* Technology readiness level (https://innovationsfonden.dk/sites/default/files/2019-03/technology_readiness_levels_-_trl.pdf).

Tabel 3

Tabel 3 – AR6	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiformbrug	Netto klimaeffekt	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
Husdyrproduktion									
Holstein: Øgning af kraftfoderandel med 10%-enheder (KVM5.1)	0	435,2	0	0	435,2	Kg CO ₂ -ækv/årsko	7	Ja	Gælder for malkekøer. Ugunstig klimapåvirkning ved dyrkning af mere kraftfoder. Kan ikke anvendes af økologer.
Jersey: Øgning af kraftfoderandel med 10%-enheder (KVM5.1)	0	217,6	0	0	217,6	Kg CO ₂ -ækv/årsko	7	Ja	
Konventionel: Effekt af ekstra 20 g fedtsyrer/kg tørstof i foderet (KVM5.2)	0	359	0	0	359	Kg CO ₂ -ækv/årsko	9	Ja	Gælder for malkekøer. Effekten til øvrige kategorier af kvæg er usikker
Øko: Effekt af ekstra 20 g fedtsyrer/kg tørstof i foderet (KVM5.2)	0	272	0	0	272	Kg CO ₂ -ækv/årsko	9	Ja	
Anvendelse af metanreducerende tilsætningsstoffer i foder til kvæg (KVM5.3)	0	1.306	0	0	1.306	Kg CO ₂ -ækv/årsko	9	Ja	
Genetisk selektion af malkekvæg (KVM5.4)		?			?	Kg CO ₂ -ækv/årsko	6	Sandsynligvis	Ikke kvantificeret
Husdyrgødning									
Hyppig udslusning af gylle fra stalde (svin)(KVM6.1)	0	18	0	0	18	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde (kvæg) (KVM6.1)	0	40	0	0	40	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	9	Ja	For kvæggylle er det en stald med lang opholdstid gylle sammenlignet med en

Tabel 3 – AR6 Virkemiddel	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
	CO ₂ / LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energifor- brug	Netto klimaeffekt	Ton CO ₂ - ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
									stald med kort opholdstid
Forsuring af gylle i stalden (svin) (KVM6.2)	0	81	0	0	81	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja	
Forsuring af gylle i stalden (kvæg) (KVM6.2)	0	48	0	0	48	Kg CO ₂ -ækv/t kvæg	9	Ja	
Køling af gylle i grisestalde (KVM6.3)	0	6	0	-1	5	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	
Lav-dosis forsuring i gyllelagre (svin) (KVM6.4)	0	47	0	0	47	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	6	Ja	
Lav-dosis forsuring i gyllelagre (kvæg) (KVM6.4)	0	16	0	0	16	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	6	Ja	
Gylle og bioforgasning (svin) (KVM6.5)	0	59	0	34	93	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja	
Gylle og bioforgasning (kvæg) (KVM6.5)	0	12	0	38	50	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	9	Ja	
Opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (svin) (KVM6.6)	0	42	0	0	42	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	5	Nej	
Opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (kvæg) (KVM6.6)	0	15	0	0	15	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	5	Nej	
Overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (svin) (KVM6.7)	0	27	0	0	27	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	7	Nej	
Overdækning af gylletanke med	0	10	0	0	10	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	7	Nej	

Tabel 3 – AR6	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiforbrug	Netto klimaeffekt	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
ventileret flydelag (kvæg) (KVM6.7)									
Afbrænding af fiberfraktion efter separering af afgasset svinegylle (KVM6.8)	0	-	-	-	8	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	Emission fra produktion af ekstra handelsgødning ved afbrænding/pyrolyse er ikke inkluderet
Pyrolyse af fiberfraktion efter separering af afgasset svinegylle (KVM6.8)	0	-	-	-	14	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	Emission fra produktion af ekstra handelsgødning ved afbrænding/pyrolyse er ikke inkluderet
Afbrænding af fiberfraktion efter separering afgasset kvæggylle (KVM6.8)	0	-	-	-	15	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	Emission fra produktion af ekstra handelsgødning ved afbrænding/pyrolyse er ikke inkluderet
Pyrolyse af fiberfraktion efter separering af afgasset kvæggylle (KVM6.8)	0	-	-	-	20	Kg CO ₂ -ækv/t gylle	9	Ja	
Afbrænding fast fjerkrægødning (KVM6.8)	0	-	-	-	26	Kg CO ₂ -ækv/t gødning	9	Nej	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og bioforgasning (svin) (KVM6.9)	0	85	0	38	123	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og bioforgasning (kvæg) (KVM6.9)	0	53	0	40	93	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	9	Ja	

Tabel 3 – AR6	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiforbrug	Netto klimaeffekt	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (svin) (KVM6.10)	0	49	0	0	49	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	7	ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og overdækning af gylletanke med ventileret flydelag (kvæg) (KVM6.10)	0	50	0	0	50	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	7	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (svin) (KVM6.11)	0	66	0	0	66	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	5	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og opsamling af gas i gyllelagre og afbrænding (kvæg) (KVM6.11)	0	55	0	0	55	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	5	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og lav-dosis forsuring i gyllelager (svin) (KVM6.12)	0	72	0	0	72	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	6	Ja	
Hyppig udslusning af gylle fra stalde og lav-dosis forsuring i gyllelager (kvæg) (KVM6.12)	0	58	0	0	58	Kg CO ₂ -ækv/t kvæggylle	6	Ja	

Tabel 3 – AR6	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiforbrug	Netto klimaeffekt	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
Køling af svinegylle og bioforgasning (KVM6.13)	0	67	0	35	102	Kg CO ₂ -ækv/t svinegylle	9	Ja	
Afgrødeproduktion									
Efterafgrøder, uden N fiksering (KVM7.1)	990	0	-26	-5	959	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Relativt sikkert, men effekt varierer mellem år og vil set over mange år aftage da LULUCF er dominerende effekt
Efterafgrøder, med N fiksering (KVM7.1)	990	0	-159	-5	826	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	
Mellemafgrøder (KVM7.2)	495	0	-58	-5	432	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Effekten antages at udgøre ca. halvdelen af en efterafgrøde
Tidlig såning af vintersæd (KVM7.3)	0	0	34	0	34	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Forholdsvis sikker meroptagelse af N
Nedmuldning af halm (KVM7.4)	0	0	0	0	0	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Nej	Vurderet i forhold til at halm alternativt tilbageføres via husdyrgødning
Halm til forgasning med biochar retur (KVM7.5)	1.760	0			1.760	Kg CO ₂ -ækv/ha	7	Ja	Effekt set i forhold til at halm nedmuldes. Sandsynlig effekt på lattergas ikke medregnet
Braklægning i sædskiftet (KVM7.6)	0	0	862	455	1.317	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Det er usikkert hvor meget længden af braklægningsperioden påvirker klimaeffekten
Ompløjningstidspunkt for fodergræs og efterfølgende afgrødevalg (KVM7.7)	0	0	355	0	355	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Fra reduktion i udvaskning. Øvrige sædskifteeffekter ikke indregnet

Tabel 3 – AR6	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiforbrug	Netto klimaeffekt	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
Flerårige energiafgrøder i sædskiftet (KVM7.8)	660	0	407	191	1.258	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Kan variere lidt mellem arter af energiafgrøder samt deres management
Pløjefri dyrkning og forbud mod jordbearbejdning i visse perioder (KVM7.9)	0	0	0	102	102	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Effekter på C lagring og lattergasemission er usikre. Spænd fra 51-102 kg CO ₂ ækv/ha/år for hhv. jordbearbejdning og direkte såning
Præcisionsjordbrug (KVM7.10)	0	0	140	37	177	Kg CO ₂ -ækv/ha	7	Ja	Effekt mellem 127 og 190 kg CO ₂ ækv/ha/år
Reduceret kvælstofnorm (KVM7.11): Min. (5% reduktion i norm)	-32	0	105	0	73	Mio. kg CO ₂ -ækv/år (hele DK)	9	Ja	Spændet i tallene dækker en reduceret norm reduktion fra 5 – 15%
Reduceret kvælstofnorm (KVM7.11): Max. (15% reduktion i norm)	-109	0	361	0	252	Mio. kg CO ₂ -ækv (hele DK)	9	Ja	
Større opbevaringskapacitet af husdyrgødning og ændring er forbud mod udbringning af husdyrgødning om efteråret (KVM7.12)	0	0	2.0	0	2.0	Mio. kg CO ₂ -ækv (hele DK)	9	Ja	Tallet er anslået på baggrund af husdyrgødningsmængde for hele landet samlet

Tabel 3 – AR6	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiforbrug	Netto klimaeffekt	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
Afgrøder med høj N-optagelse (KVM7.13):						Kg CO ₂ -ækv/ha	9		
- Roer – top fjernes	-917	0	500	0	-417			Nej	
- Roer – top fjernes ikke	0	0	-24	0	-24			Nej	
- Fodergræs – renbestand	1.980	0	-1.261	-446	273			Nej	
- Fodergræs – med bælplanter	1980	0	-608	-446	926			Nej	
- Frøgræs	2.900	0	63	0	2.963			Ja	Tal for kulstoflagring i frøgræs er ikke underbygget
Skærpet udnyttelseskrav for N i udvalgte typer husdyrgødning (KVM7.14)	0	0	4,9	0	4,9	Kg CO ₂ -ækv /reduceret kg N input	9	Ja	Reduceret emission fra reduceret produktion af handelsgødning er ikke inkluderet. Skærpede udnyttelseskrav er indført fra 2020-21
Nitrifikationshæmmere til husdyrgødning (KVM7.15.1)	0	0	1,7	0	1,7	Kg CO ₂ -ækv/kg N	9	Ja	
Nitrifikationshæmmere på handelsgødning (KVM7.15.2)	0	0	1.0	0	1.0	Kg CO ₂ -ækv/kg N	9	Ja	
Arealanvendelse									
Udtag af omdriftsareal til permanent ugødet brak (KVM8.1)	594	0	857	361	1.812	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	Afhængig af hvornår brak er etableret og jordbonitet

Tabel 3 – AR6	Drivhusgasreduktioner/effekter					Enhed	TRL*	Sikker positiv klimaeffekt	Bemærkninger
Virkemiddel	CO ₂ /LULUCF	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ /energiforbrug	Netto klimaeffekt	Ton CO ₂ -ækv/ha eller kg CO ₂ -ækv/ton husdyrgødning			
Udyrkede bræmmer langs vandløb og søer på mineraljord (KVM8.2)	1.594	0	857	361	2.812	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Ja	LULUCF bidrag er afhængig af hvornår randzone er etableret
Paludikultur – tidligere drænet omdrift (KVM8.3.1)	42.200	-7.800	5.600	0	40.000	Kg CO ₂ -ækv/ha	6-7	Ja	Ingen tal for energiforbrug
Paludikultur – tidligere drænet vedvarende græs (KVM8.3.2)	30.800	-7.800	3.500	0	26.400	Kg CO ₂ -ækv/ha	6-7	Ja	
Vådområder på mineraljord (KVM8.4)	94	-6.392	1.182	361	-4.755	Kg CO ₂ -ækv/ha	9	Nej	Usikkerhed om LULUCF, metan og lattergasestimer

* Technology readiness level (https://innovationsfonden.dk/sites/default/files/2019-03/technology_readiness_levels_-_trl.pdf).

11 Bilag 2 Boblerlisten

Landbrugsstyrelsen har ønsket en liste over yderligere virkemidler, der eventuelt kan inkluderes i klimavirkemiddelkataloget (boblerlisten). Det er muligt for både ministerierne og AU at foreslå virkemidler, og den endelige beslutning om hvorvidt et virkemiddel skal inkluderes tages i dialog forud for hver årlig opdatering.

På boblerlisten indgår potentielle virkemidler til reduktion af drivhusgasudledninger i landbruget, hvor der på nuværende tidspunkt ikke i tilstrækkelig grad er dokumenteret en klimaeffekt. Det er hensigten, at der årligt i forbindelse med arbejdet med opdatering af klimavirkemiddelkataloget skal tages stilling til, om der i det forløbne år, er tilvejebragt tilstrækkelig viden til at et virkemiddel kan flyttes fra boblerlisten og ind i kataloget.

Ønskes nye virkemidler med kvantificeret effekt-vurdering optaget i kataloget, skal en undersøgelse af virkemidlet være bestilt forud herfor til afklaring af om der er, såfremt et tilstrækkeligt grundlag for optagelse i Klimavirkemiddelkataloget endnu ikke foreligger. Der må dog gerne tilføjes virkemidler, hvor effekten pt. ikke er kendt, men som har potentiale for at have en effekt (stor som lille). I så fald beskrives det, hvad AU mener, der skal til, før man kan angive en kvantitativ effekt af virkemidlet.

I nedenstående liste indgår både virkemidler foreslået af FVM og AU. Virkemidlerne på listen er endnu ikke drøftet, dvs. der er endnu ikke taget stilling til deres status på boblerlisten.

Husdyrproduktion

- Reduktion af malkekvæg (national produktionskvote)
- Reduktion af svin (national produktionskvote)
- Avl for malkekøer med reduceret tab af metan
- Avl for fodereffektivitet i svineproduktionen
- Avl i retning af toformålsmalkeracer
- Anvendelse af systematiske krydsningssystemer hos malkekvæg
- Avl for fodereffektivitet hos kvæg
- Kulstofbinding i jorden ved græsning med naturkvæg (frem for på stald med højt ydende foderprodukter)
- Foderoptag fra afgræsning (økologi)
- Holistisk afgræsning
- Reduktionseffekter afhængig af fedtsyreprofilen og fedtkoncentration i foder tildelt kvæg.
- Effekten af ændret kraftfoder/grovfoderforhold
- Forlænget laktation

Husdyrgødning

- Daglig udslusning (linespil)
- Alternative gyllekummer med mål om udslusning oftere end ugentligt
- Reduktionseffekten af staldteknologier (fx hyppig udslusning, køling og forsuring) i kombination med lagerteknologier (fx fakkelafløb, biofilter, forsuring og overdækning m. ventileret flydelag)
- Vaskerobot
- Tilsætningsstoffet NoGas

- Plasmabehandling af husdyrgødning
- Nedfældning af gylle
- Bioforsuring af gylle

Afgrødeproduktion

- Afgrøder med høj N-optagelse (græs)
- Foderplanter med mindre enterisk metanemission
- Designergødning
- Plantesorter forædlet til fodring
- Valg og forædling af proteinafgrødekilder og -sorter til plantebaseret fødevareproduktion
- Valg og kvælstofeffektive driftsmetoder til grøntsager
- Nye genomteknikker (NGT) til planteforædling (f.eks. CRISPR-CAS9)
- Effekten af skift mellem afgrødetyper

Arealanvendelse

- Skovlandbrug
- Udtagning af kulstofrig jord (vådlægning og ophør af landbrugsdrift)
- Udtagning af landbrugsjord til skov, natur eller lignende (f.eks. 10 % af al landbrugsjord)
- Øget ekstensivering af landbrugsarealer med henblik på øget kulstofslagring og biodiversitet
- Carbon farming / øget kulstofslagring i jorden
- Biogasproduktionens effekt på kulstofsindhold i jorden
- Dyrkning af bælgæd/proteinafgrøder til foder (sojæerstatning) eller humankonsum
- Dyrkning af frugt og grøntsager til fødevarer
- Intercropping (samdyrkning af flere typer afgrøder)
- Pløjefri dyrkning
- Omlægning til regenerativt jordbrug, permakultur, biodynamik eller lignende
- Øget selvforsyning på bedriftsniveau ved f.eks. en præmie til husdyrproducenter, som producerer eget foder, eller til planteavlerne med reduceret gødningsimport.
- Flere træer og læhegn på landbrugsjord
- Afbrydelse af dræn/kontrolleret dræning
- Græs som virkemiddel (intensivt dyrket flerårigt græs)
- Flerårige afgrøder f.eks. flerårige korn- og grøntsagsafgrøder

Brun bioraffinering

- Biokul fra gylledigestat fra biogasanlæg vs nedpløjning af gylledigestat
- Biokul fra digestat fra slambaserede biogasanlæg vs nedpløjning af digestat fra slambaserede biogasanlæg
- Biokul fra træ

Andre, FVM

- Fremstilling af animalske fødevarer (dvs. mælkeprodukter, æg og kød) uden produktion af husdyr (og en tilsvarende reduktion af den "klassiske husdyrproduktion")
- Videreudvikling af plantebaserede fødevarer som erstatning for animalske fødevarer
- Implementering af de officielle kostråd i madplanen hos kantiner i den offentlige sektor
- Omlægning til økologi

Andre, AU

- Behovs- og positionsbestemt kalkning: Jordens pH er vigtig for regulering og modificering af N₂O emissioner. I mere sur jord er der en højere risiko for udledning af N₂O, fordi N₂O-reduktase-enzymet der omdanner N₂O til N₂, hæmmes (Abalos et al., 2020). Behovs- og positionsbestemt kalkning har været anvendt i flere år, men der er ikke undersøgelser der evaluerer gradueringen. Tilsætning af jordbrugskalk fører til CO₂-udledning, da karbonatkalken opløses i jorden og frigiver bikarbonat (2HCO₃), som omdannes til CO₂ og vand (H₂O). Nyere danske studier har vist at målretning mod en pH-værdi lige omkring 6,4 på sandjord synes at være det mest passende niveau i forhold til at afbalancere afgrødeproduktion og minimere lattergasemission (Abalos et al., 2020). Lignende undersøgelser i pH intervallet 5-7 vil kunne afdække lattergasemissioner som funktion af de mest almindelige reaktionstal for danske jorde, hvor også parallelle målinger af N₂O, CO₂ og andre betydende/forklarende mikrobiologiske parametre ved behovsbestemte kalkningsniveauer er nødvendige for at beregne det totale CO₂ ækv./ha/år for behovs- og positionsbestemt kalkning.
- Dræning og forebyggelse af pakning – vigtige virkemidler til at øge C input og mindske risiko for N₂O.
- Vanding – essentielt virkemiddel til at øge C-input på særligt de sandede jorde.
- Bladgødskning - man kan have en formodning om at kvælstofgødning ikke danner N₂O hvis gødningen ikke kommer i kontakt med jorden og dermed denitrificerende bakterier og forhold som lavt iltniveau, men der ligger ingen hverken danske eller udenlandske undersøgelser af dette. Nye systemer som center-pivot vandingsmaskiner og robotter giver mulighed for at dosere en større del (måske 100%) af N-mængden som bladgødskning.
- Naturlige og biologiske nitrifikationshæmmere
- Nitrat som et foderadditiv til kvæg (husdyrproduktion).
- Stof X og X2 som et foderadditiv til kvæg (husdyrproduktion).
- Asparagopsis, tanniner, saponiner, æteriske olier og andre tangarter som et foderadditiv til kvæg (husdyrproduktion).
- Reduceret tildeling af råprotein i foderet og optimering af proteinforsyning igennem dyrets levetid - livstidskvælstofudnyttelse (husdyrproduktion).
- Kvantificering af den metan-reducerende effekt hos kvier og slagtekalve af fra malkekøer velkendte virkemidler til reduktion af metan (husdyrproduktion).
- Tidlig og persistent prægning af vommikrobiomets udvikling hos det unge dyr (husdyrproduktion).
- Øget fodereffektivitet via ændret fodring (husdyrproduktion).
- Reduktion i forekomst af management-betingede sygdomme (husdyrproduktion).
- Optimering af grovfoderproduktionen. Optimering med henblik på optimalt udbytte, foderværdig og reduktion af enterisk metan (husdyrproduktion)

Om DCA

DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug er den faglige indgang til jordbrugs- og fødevareforskningen ved Aarhus Universitet.

Centret omfatter institutter og forskningsmiljøer, der har aktiviteter på jordbrugs- og fødevareområdet. Det er primært Institut for Agroøkologi, Institut for Husdyrvidenskab, Institut for Fødevarer, Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning samt dele af Institut for Ingeniørvidenskab.

Aktiviteterne i DCA understøttes af en centerenhed, der varetager og koordinerer opgaver omkring myndighedsbetjening, erhvervs- og sektorsamarbejde, internationalt samarbejde og kommunikation.

Forskningsresultater fra DCA

Resultater fra forskningen publiceres i internationale, videnskabelige tidsskrifter. Publikationerne kan findes via universitets publikationsdatabase (pure.au.dk).

DCA rapporter

DCA's rapportserie formidler hovedsageligt myndighedsrådgivning fra DCA til Miljø- og Fødevareministeriet. Der kan også udgives rapporter, som formidler viden fra forskningsaktiviteter. Rapporterne kan frit hentes på centrets hjemmeside: dca.au.dk.

Nyhedsbreve

DCA udsender et nyhedsbrev, der løbende orienterer om jordbrugs- og fødevareforskningen og herunder om nye forskningsresultater, rådgivning, uddannelse, arrangementer og andre aktiviteter. Det er gratis at tilmelde sig nyhedsbrevet, og det kan ske på dca.au.dk.



RESUME

På bestilling af ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri er der udarbejdet et nyt katalog over virkemidler, der kan reducere klimagasser i landbruget.

Det ny virkemiddelkatalog erstatter kataloget fra 2020, og rapporten ventes at danne grundlag for fremtidige initiativer og politikker, der kan gøre landbruget mere bæredygtig og reducere dets samlede klimapåvirkning.

Rapporten præsenterer en opdateret version af Klimavirkemiddeltabellen og introducerer forskellige virkemidler til at bekæmpe drivhusgasudledninger i landbruget. Rapporten fokuserer på centrale områder som husdyrproduktion, husdyrgødning, afgødeproduktion og arealanvendelse. Gennem omfattende analyse præsenterer den en række konkrete foranstaltninger, der kan reducere landbrugets klimapåvirkning.

Kataloget er lavet i et samarbejde mellem otte institutter på Aarhus Universitet (Agroøkologi. Veterinær- og Husdyrvidenskab. Kvantitativ Genetik og Genomforskning. Bio- og Kemiteknologi. Elektro- og Computerteknologi. Eco-science. Miljøvidenskab. Fødevarer)

