



KLIMATILPASNING OG LANDBRUG

- VIDENSYNTSE

MATHIAS N. ANDERSEN (RED.)

DCA RAPPORT NR. 214 • OKTOBER 2023 • RÅDGIVNING



AARHUS
UNIVERSITET

DCA - NATIONALT CENTER FOR FØDEVARER OG JORDBRUG

Vidensyntese om klimatilpasning og landbrug

Rådgivningsrapport fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug

FORFATTERE:

Mathias N. Andersen¹⁾ (red.), Jørgen E. Olesen¹⁾, Niels Holst¹⁾, Henrik Skovgaard¹⁾, Per Kudsk¹⁾, Lise Nistrup Jørgensen¹⁾, Christen Duus Børgesen¹⁾, Lars Juhl Munkholm¹⁾, Bo Vangsø Iversen¹⁾, Per L. Gregersen¹⁾, Inger Holme¹⁾, Henrik Brinch-Pedersen¹⁾, Anne Grete Kongsted¹⁾, Christian Friis Børsting²⁾, Jan Tind Sørensen²⁾, Britt Henriksen²⁾, Henrik Callesen²⁾, Tofuko Woyengo²⁾, Rasmus Ejrnæs³⁾, Camilla Fløjgaard³⁾, Paul Henning Krogh³⁾, Trine Michelle Willumsen⁴⁾, Anders Peter Adamsen⁵⁾, Morten Dam Rasmussen⁵⁾, Lise Bonne Guldberg⁵⁾, Li Rong⁶⁾

¹⁾ Institut for Agroøkologi, Aarhus Universitet

²⁾ Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab, Aarhus Universitet

³⁾ Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet

⁴⁾ Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning, Aarhus Universitet

⁵⁾ Institut for Bio- & Kemiteknologi, Aarhus Universitet

⁶⁾ Institut for Byggeri og Bygningsdesign, Aarhus Universitet

Datablad

Titel:	Klimatilpasning og landbrug – vidensyntese
Serietitel og nummer:	DCA rapport nr. 214
Rapporttype:	Rådgivning
Udgivelsesår:	Oktober 2023. 1. udgave. 1. oplag
Forfattere:	Professor Mathias N. Andersen (red.), Institutleder Jørgen E. Olesen, seniorforsker Niels Holst, seniorforsker Henrik Skovgaard, professor Per Kudsk, seniorforsker Lise Nistrup Jørgensen, seniorforsker Christen Duus Børgesen, professor Lars Juhl Munkholm, lektor Bo Vangsø Iversen, seniorforsker Per Gregersen, akademisk medarbejder Inger Holme, professor Henrik Brinch-Pedersen, seniorforsker Anne Grete Kongsted, Institut for Agroøkologi, AU. Seniorrådgiver Christian Friis Børsting, professor Jan Tind Sørensen, forsker Britt Henriksen, professor Henrik Callesen, lektor Tofuko Woyengo, Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab, AU. Seniorforsker Rasmus Ejrnæssseniorforsker Paul Henning Krogh, Institut for Ecoscience, AU. Seniorrådgiver Trine Michelle Willumsen, Center for Kvantitativ Genetik og Genomforskning, AU. Seniorforsker Anders Peter Adamsen, seniorforsker Morten Dam Rasmussen, seniorrådgiver Lise Bonne Guldberg, Institut for Bio- & Kemiteknologi, AU. Lektor Li Rong, Institut for Byggeri og Bygningsdesign, AU <i>Forfatter(e) er angivet ved de enkelte kapitler.</i>
Fagfællebedømmelse:	Adjunkt Johannes W.M. Pullens, professor Mathias N. Andersen, seniorforsker Mathieu Lamandé, lektor Kim Hebelstrup, seniorforsker Niels Holst, seniorforsker Henrik Skovgaard, professor Per Kudsk, seniorforsker Lise Nistrup Jørgensen, Institut for Agroøkologi, AU. Professor Søren Østergaard, Institut for Husdyr- og Veterinærvidenskab, AU. Seniorforsker Marianne Bruus, Institut for Ecoscience, AU. Seniorforsker Michael Jørgen Hansen, Institut for Bio- & Kemiteknologi, AU <i>Fagfællebedømmer(e) er angivet ved de enkelte kapitler.</i>
Kvalitetssikring, DCA:	Specialkonsulent Anna Feldberg Marsbøll, DCA Centerenheden, AU
Rekvirent:	Landbrugsstyrelsen, Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri
Dato for bestilling/levering:	08.03.2021 / 01.11.2022 (til høring) / 16.01.2023 (oprindelig levering) / 23.08.2023 (revideret levering)
Journalnummer:	2020-0076683
Finansiering:	Rapporten er udarbejdet som led i "Rammeaftale om forskningsbaseret myndighedsbetjening" indgået mellem Miljøministeriet, Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri og Aarhus Universitet under ID nr. 2.26 i "Ydelsesaftale Planteproduktion 2021-2024".
Ekstern kommentering:	Ja. Kommenteringsark inkl. AUs håndtering af kommentarerne kan findes via dette link: https://bitly.ws/Wk2j
Eksterne bidrag:	Nej.
Kommentarer til besvarelse:	Besvarelsen er første gang leveret 16.01. 2023. I nærværende rapport er det tydeliggjort, hvem der er forfatter / fagfællebedømmer i afsnit 3.1 og manglende forfattere i afsnit 4.1 er tilføjet. Herudover er der lavet enkelte redaktionelle ændringer i datablad og forord. Denne rapport erstatter den tidligere leverede besvarelse.

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.

Der er 05.09.2022 (opdateret 23.09.2022) leveret et notat om klimaforandringerne betydning for dansk landbrug baseret på uddrag fra Vidensyntesen om klimatilpasning. Notatet kan findes via dette link: <https://bitly.ws/WCKZ>

Citeres som:	Andersen MN (red.), Olesen JE, Holst N, Skovgaard H, Kudsk P, Jørgensen LN, Børgesen CD, Munkholm LJ, Iversen BV, Gregersen PL, Holme I, Brinch-Pedersen H, Kongsted AG, Børsting CF, Sørensen JT, Henriksen B, Callesen H, Woyengo T, Ejrnæs R, Fløjgaard C, Krogn PH, Willumsen TM, Adamsen AP, Rasmussen MD, Guldberg LB, Rong L. 2023. Vidensyntese om klimatilpasning og landbrug. 123 sider. Rådgivningsrapport fra DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet, leveret: 23.08.2023.
Udgiver:	DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. Blichers Allé 20, 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
Forsidefoto:	Colourbox
Sideantal:	124
Tryk:	DigiSource.dk
ISBN:	Trykt version: 978-87-94420-06-8 Elektronisk version: 978-87-94420-07-5
ISSN:	2245-1684
Internetversion:	https://dcapub.au.dk/djfpublikation/djfpdf/DCArapport214.pdf

Forord

Videnssyntesen om klimatilpasning og landbrug er udarbejdet af forskere ved Aarhus Universitet (AU) efter bestilling fra Landbrugsstyrelsen (LBST) i henhold til Ydelsesaftalen om Planteproduktion under Rammeaftalen om forskningsbaseret myndighedsbetjening indgået mellem AU og Ministeriet for Fødevarer, Landbrug og Fiskeri (FVM) og Miljøministeriet (MIM).

Som beskrevet i bestillingen ønsker LBST at få belyst klimaforandringerne konsekvens for dansk landbrug, samt mulige tilpasningsstrategier, der kan gøre landbruget mere robust og klimatilpasset. Videnssyntesen blev ønsket struktureret over to tidsscenarier hhv. i 2030 (i dag) samt 2050. Der ønskedes en redegørelse for effekter på plante- og husdyrsystemer samt mulighederne for tilpasning inklusiv ny teknologi. Derudover ønskedes det, så vidt muligt, også at syntesen forholdt sig til sideeffekter og trade-offs på fx jordkvalitet, vandmiljø og drivhusgasudledninger. Videnssyntesen opregner også, hvad der i dag betragtes som udekkeede vidensbehov samt igangværende projekter af betydning for klimatilpasningsindsatsen.

Videnssyntesen er struktureret som foreslået i bestillingen fra LBST og beskriver ændringer i klimaet som de registreret op til i dag og forventes at udvikle sig frem til 2050 baseret på DMI's klimaatlas. Påvirkningerne af dansk landbrug og tilpasningerne såvel som tilpasningsmuligheder frem mod 2050 er derefter beskrevet baseret på et litteraturstudie af relevante videnskabelige publikationer fra Danmark og sammenlignelige lande. Resultater fra upublicerede forskningsprojekter og eksperimenter samt personlig kommunikation er også inkluderet, når disse er fundet relevante.

Før færdiggørelsen af bestillingen afholdt LBST et opstartsseminar for interessenter for at få input til bestillingen. Videnssyntesen har været sendt i ekstern høring af LBST inden den endelige rapport blev leveret.

Indholdsfortegnelse

1	Observerede og forventede klimaforandringer i Danmark	7
1.1	Observerede ændringer i klimaet i Danmark	7
1.2	Regionale forskelle i Danmark	11
1.3	Forventede ændringer i klima frem til 2050	12
1.4	Referencer	14
2	Hvordan har klimacændringerne hidtil påvirket dansk landbrug og hvordan har landbruget indtil nu tilpasset sig klimaforandringerne?	16
2.1	Observerede effekter og tilpasninger	16
2.1.1	Afgrødernes udbredelse og udbytter	18
2.1.2	Næringsstoffer	22
2.1.3	Skadegørere	22
2.1.4	Forædling	23
2.1.5	Vanding	24
2.1.6	Afvanding	24
2.1.7	Dyrkningsstrategier	25
2.2	Referencer	25
3	Klimaforandringernes påvirkning af dansk landbrug og dets effekt på natur, miljø, klima og samfund på kort og mellemlangt sigt (2030 og 2050), herunder effekterne af ekstreme og variabilitet.....	29
3.1	Planteproduktion	29
3.1.1	Udbytte.....	29
3.1.2	Jordkvalitet	31
3.1.3	Ukrudt, sygdomme og skadedyr.....	33
3.2	Husdyrproduktion	42
3.2.1	Dyrevelfærd og -sundhed	42
3.2.2	Produktion	46
3.2.3	Foderforsyning og -behov	48
3.3	Klima- og miljøeffekter, sideeffekter – positive og negative	49
3.3.1	Drivhusgasudledninger	49
3.3.2	Vandmiljø	49
3.3.3	Biodiversitet	50
3.4	Referencer	52
4	Fremtidens landbrug – en beskrivelse af teknologier og potentialer for klimatilpasning i landbruget 2030 og 2050	64
4.1	Planteavl	64
4.1.1	Høstudbytter.....	65
4.1.2	Dyrkningssystemer	65
4.1.3	Forædling	66
4.1.4	Virkemidler og teknologi i forhold til klimarobust jord – erosion i relation til jordkvalitet/miljø... ..	75
4.1.5	Dræning/pumper/diger/kanaler	77

4.1.6	Vanding.....	78
4.1.7	Plantebeskyttelse.....	79
4.1.8	Vejrforudsigelser (sæsonprognoser)	82
4.1.9	Forsikring	82
4.2	Husdyr	82
4.2.1	Staldsystemer	82
4.2.2	Dyr på udearealer.....	85
4.2.3	Fodring	88
4.2.4	Avl.....	89
4.3	Referencer	91
5	Tilpasning i en europæisk og global kontekst. Hvordan omstiller dansk landbrug sig i forhold til andre lande?	104
5.1	Klimatilpasning i relation til EU's politikker og tiltag:	105
5.2	Klimatilpasning på globalt plan.....	106
5.3	Referencer	107
6	Klimacændringernes effekter på bæredygtigheds målsætninger	109
6.1	Næringsstofudledninger	110
6.2	Klimagasser.....	111
6.3	Pesticidforbrug	112
6.4	Referencer	112
7	Vidensbehov	115
7.1	Udækkede vidensbehov om klimatilpasning i landbruget.....	115
7.1.1	Planteproduktion	115
7.1.2	Husdyrproduktion	116
7.1.3	Klima- og miljø.....	117
7.2	Igangværende forskning på klimatilpasningsområdet.....	117
7.2.1	Planteproduktion	117
7.2.2	Husdyrproduktion	118
7.2.3	Klima- og miljø.....	119
8	Opsummering og konklusioner	120

1 Observerede og forventede klimaforandringer i Danmark

Forfatter: Jørgen E. Olesen

Fagfællebedømmer: Johannes W.M. Pullens

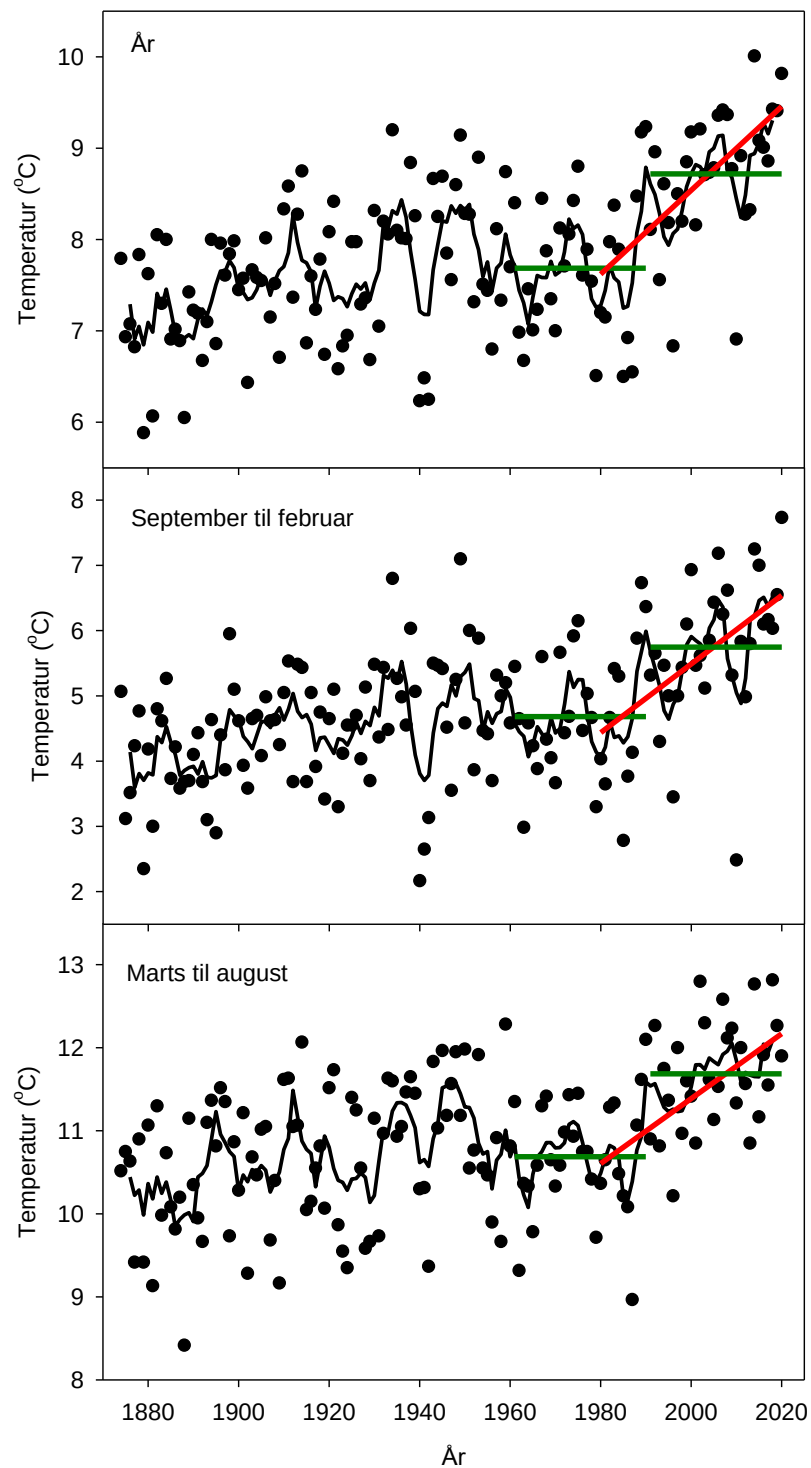
1.1 Observerede ændringer i klimaet i Danmark

Klimaforholdene i Danmark har været systematisk målt gennem et stationsnet siden 1874. Hermed kan udvikling i temperatur og nedbør opgøres over en periode på næsten 150 år (figur 1.1 og 1.2). Klimaet er defineret som det forventede vejr over en årrække, hvor standard for klimanormaler er gennemsnittet over en 30-årig periode. De seneste klimanormaler er for perioden 1991-2020, som har erstattet klimanormalen for 1961-1990. Disse klimanormaler er gennemsnit af målinger i det danske stationsnet. Ved sammenligning af disse klimanormaler fås for hele landet en temperaturstigning på 1,0 °C og en nedbørstigning på 51 mm.

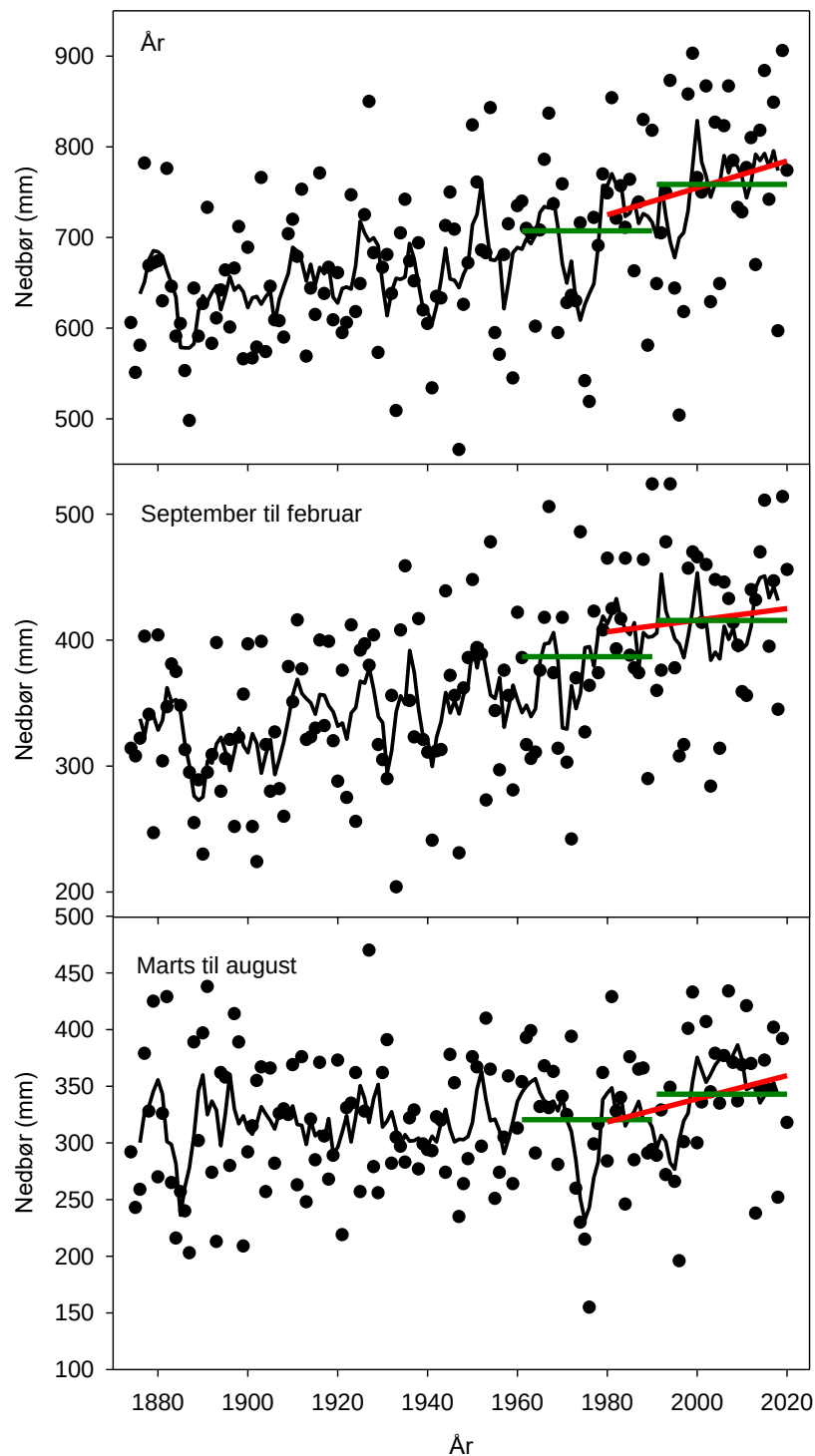
Over de seneste 50 år er den globale middeltemperatur steget med 0,8 °C (IPCC, 2021), og temperaturstigningerne i Danmark har på det seneste endda været endnu større, svarende til ca. 1,8 °C over perioden 1980 til 2020 (figur 1.1). Denne temperaturstigning er beregnet ved lineær regression af temperatur mod tid over perioden 1980 til 2020, og dette giver en større temperaturstigning end sammenligning af de to normalperioder, da sammenligning af normalperioder forudsætter et stationært klima, hvilket ikke er tilfældet med de igangværende klimaændringer. Når temperaturen i Danmark er steget mere end den globale middeltemperatur, så hænger det især sammen med at temperaturen over land på verdensplan er steget 1,4 til 1,7 gange mere end over hav (IPCC, 2021).

Forskellen i middeltemperatur mellem normalperioden 1961-1990 og 1991-2020 er 1,0 °C med meget lille forskel mellem vinter- og sommerhalvår (figur 1.1). På månedsbasis ses den største stigning i vintermånederne (december til marts) og sensommeren (juli til august) (figur 1.3). Siden 1980 er temperaturen steget ca. 0,5 °C pr. årti beregnet ved lineær regression (figur 1.1), og stigningen er konsistent over perioden.

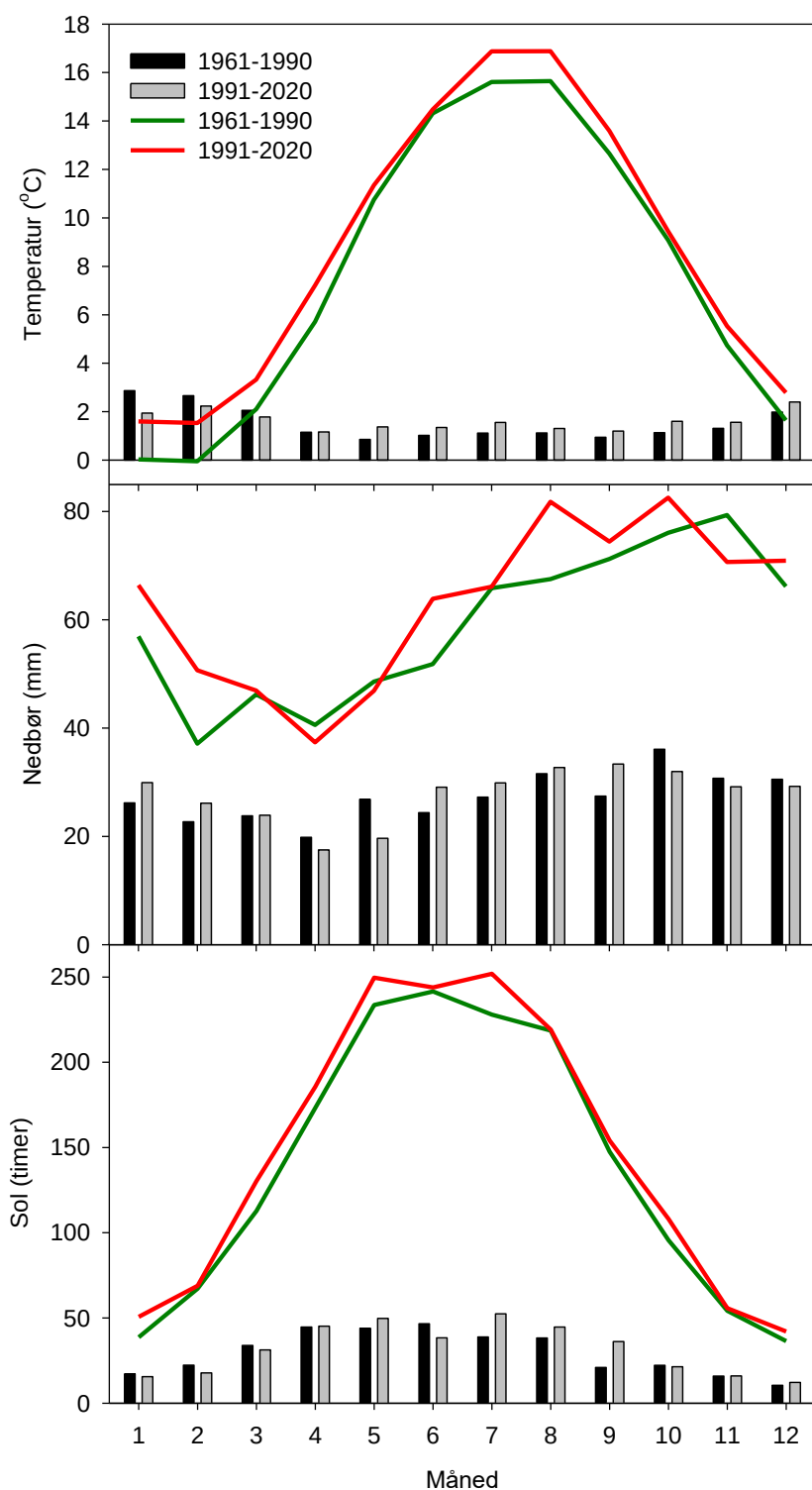
Variationen i temperatur fra år til år er også øget mellem de to normalperioder (figur 1.3). I gennemsnit er spredningen i temperatur steget med 0,1 °C, men det dækker over en reduktion i vinterperioden og en stigning i sommerperioden. Den lavere variabilitet om vinteren er delvis knyttet til ringere snedække og dermed færre situationer med meget lave temperaturer om vinteren, men det er også koblet til ændringer i den atmosfæriske cirkulation og den relativt større opvarmning i Arktis. I månederne fra maj til december er spredningen i temperatur i gennemsnit øget med 0,9 °C. En del af dette er knyttet til de generelt stigende temperaturer, som også øger spredningen over en 30-års periode. Men der er også en øget variation mellem år knyttet til øgede årsforskelle i forekomst af varme og tørre kontra kølige og våde perioder.



Figur 1.1: Middeltemperatur i Danmark i perioden 1874-2020 for hele året, vinter- og sommerhalvåret. Den optrukne linje viser 5-års glidende gennemsnit. De grønne linjer viser gennemsnit for normalperioderne 1961-1990 og 1991-2020, og den røde linje viser den lineære stigning siden 1980 (ca. 0,5 °C pr. årti).



Figur 1.2: *Nedbør i Danmark i perioden 1874-2020 for hele året, vinter- og sommerhalvåret. Den optrukne linje viser 5-års glidende gennemsnit. De grønne linjer viser gennemsnit for normalperioderne 1961-1990 og 1991-2020, og den røde linje viser den lineære stigning siden 1980 (ca. 15 mm pr. årti for årsnedbør).*



Figur 1.3: Månedsnormaler for Danmark for temperatur, nedbør og soltimer for normalperioderne 1961-1990 og 1991-2020. Søjlerne viser spredning på månedsnormalerne.

Vækstsæsonens længde opgøres ofte som den del af året, hvor middeltemperaturen overstiger 5 °C. Mellem de to nævnte normalperioder er vækstsæsonens længde i Danmark øget med 18 dage, heraf 11 dage i foråret og 7 dage i efteråret. Dette har været medvirkende til tidligere såning og generelt tidligere udvikling af afgrøderne (Olesen et al., 2017).

Nedbøren varierer geografiske betydeligt både globalt, men også i Danmark er der store forskelle med den største nedbør i det centrale Jylland og den mindste i Storebæltsregionen (figur 1.4). Der er også betydelig årsvariation (figur 1.2). Den årlige nedbør er over de seneste årtier steget med ca. 15 mm pr. årti beregnet ved lineær regression af nedbør for perioden 1980 til 2020. Stigningen har især været størst i vinter- og sommersæsonerne (figur 1.3). Der er ikke nogen væsentlig ændring over tid i variationen på månedsnedbør.

Antallet af soltimer er steget over de seneste årtier (figur 1.3), og stigningen gælder hele året. På årsbasis er antallet af soltimer steget med 113 timer mellem de to seneste normalperioder. Dette er i overensstemmelse med en generel stigning i indstrålingen over Europa (Sanchez-Lorenzo et al., 2017), som til dels kan tillægges en lavere forurening af atmosfæren med aerosoler.

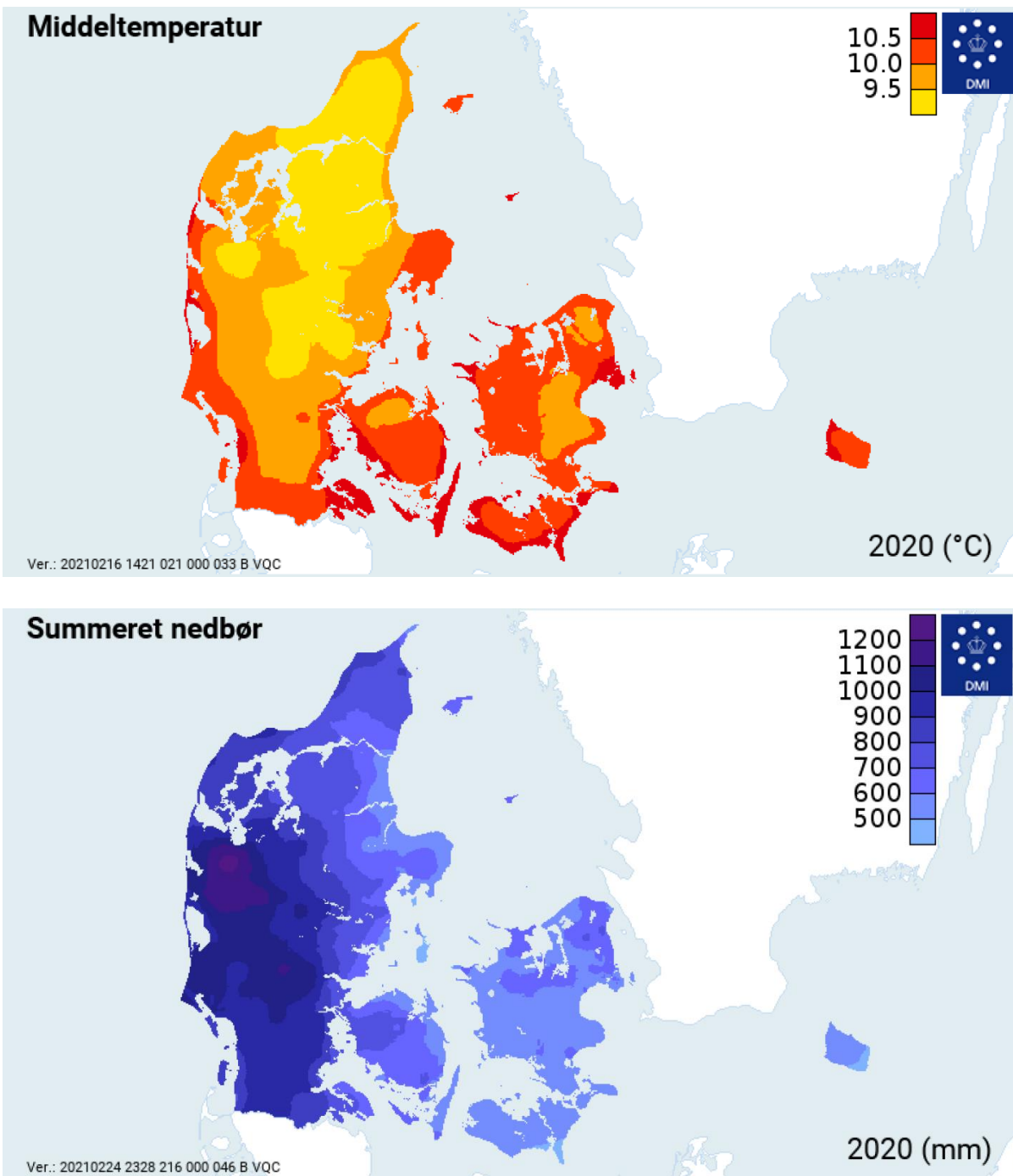
1.2 Regionale forskelle i Danmark

Der er betydelig variation i temperatur og nedbør på tværs af Danmark som illustreret for 2020 i figur 1.4. Temperaturen er omkring 1 °C højere i den sydlige del af landet sammenlignet med Nordjylland. Dette svarer omtrent til den temperaturstigning, der er observeret over de seneste årtier. Forskellene i nedbør er store mellem landsdelene med omtrent dobbelt så stor nedbør i det centrale Jylland sammenlignet med Storebæltsområdet.

De stigende temperaturer og den stigende indstråling har ført til en stigning i fordampningen over hele året. Dette har i nogen grad balanceret den stigende nedbør, men da der har været betydelige regional variation i nedbøren med øgede mængder i Vest- og Nordjylland, har der være konstateret betydeligt stigende afstrømning i vandløb i Jylland, men lavere stigning i afstrømningen på Fyn og ingen ændring på Sjælland (tabel 1.1).

Tabel 1.1: Observerede ændringer i afstrømning (mm/år) i forskellige landsdelen over perioden 1990-2018 (Blicher-Mathiesen et al., 2020).

Landsdel	Ændret afstrømning (mm/år)
Nordjylland	3,2
Vestjylland	4,1
Østjylland	1,7
Fyn	1,4
Sjælland	0,1



Figur 1.4: Middeltemperatur og summeret nedbør for 2020 (Rubæk et al., 2021).

1.3 Forventede ændringer i klima frem til 2050

De forventede klimacændringer er her baseret på det danske klimaatlas (Thejll et al., 2021). Der er her taget udgangspunkt i et medium scenarie for udledninger af drivhusgasser (RCP4.5). Der er dog frem til 2050 kun små forskelle mellem de forskellige udledningsscenarier, og RCP4.5 udgør derfor et godt estimat for de

forventede klimacændringer frem til 2050. Der er betydelig variation mellem forskellige klimamodeller med hensyn til beregnede klimacændringer (Madsen et al., 2012). Fremskrivningerne af klimacændringerne i det danske klimaatlas er baseret på 57 forskellige modelkørsler med globale og regionale klimamodeller, og det repræsenterer således variationen i de nuværende modelfremskrivninger af klimaet i Europa.

Fremskrivningerne af middeltemperatur viser en stigning på 0,73 °C for 2011-2040 sammenlignet med 1981-2010 svarende til en stigning på 0,24 °C pr. årti (tabel 1.2), hvilket er betydeligt mindre end den observerede stigning over de seneste 40 år (figur 1.1). Der er en større stigning i den forventede laveste årlige temperatur end i den højeste temperatur, hvilket stemmer overens med den større observerede stigning i vintertemperatur sammenlignet med resten af året (figur 1.1). Dette afspejler sig også i en reduktion i det forventede årlige temperaturinterval. Derimod forventes ikke ændringer i døgnvariationen i temperatur. Vækstsæsonens længde forventes at stige med 6,5 dage pr. årti, og der forventes mindre stigninger i antallet af varmebølgedage og hedebølgedage (tabel 1.2). Derimod forventes antallet af frostdøgn at falde betydeligt. Hedebølgedage er dage med maksimumtemperatur over 28 °C over mindst 3 dage, og varmebølgedage er dage med maksimumtemperatur over 25 °C over mindst 3 dage. Frostdøgn er døgn med minimumtemperatur under 0 °C. Antallet af frostdøgn forventes at falde med omkring 23 døgn frem mod 2041-2070.

Tabel 1.2: Forventede ændringer (median og 10- og 90-percentiler) i klimaforhold på årsniveau i Danmark for 2011-2040 og 2041-2070 sammenlignet med 1981-2010 under RCP 4.5 i henhold til det danske klimaatlas (Thejll et al., 2021).

Klimavariabel	Reference (1981-2010)	2011-2040	2041-2070
Middeltemperatur	8,45 °C	0,73 °C (0,15; 1,48 °C)	1,45 °C (0,85; 2,18 °C)
Højeste temperatur	29,41 °C	0,38 °C (-0,70; 1,48 °C)	1,04 °C (0,12; 2,30 °C)
Laveste temperatur	-11,06 °C	1,52 °C (0,04; 3,55 °C)	2,98 °C (1,28; 4,79 °C)
Årets temperaturinterval	29,16 °C	-0,74 °C (-2,25; 0,64 °C)	-1,31 °C (-2,86; 0,04 °C)
Døgnets temperaturinterval	7,17 °C	-0,09 °C (-0,26; 0,08 °C)	-0,13 °C (-0,24; 0,09 °C)
Hedebølgedage	1,85 dage	0,50 (-0,73; 2,53)	1,62 (0,12; 3,38)
Varmebølgedage	8,84 dage	2,39 (-2,11; 7,31)	6,33 (2,28; 11,70)
Frostdøgn	78,55 dage	-12,33 (-28,75; -3,64)	-22,73 (-37,58; -12,46)
Vækstsæson længde	249,26 dage	19,63 (3,27; 36,63)	39,45 (25,81; 59,16)
Nedbør	741 mm	4,22 % (-1,88 %; 11,85 %)	5,75 % (-0,31 %; 13,40 %)
Maksimal døgnedbør	32,7 mm	6,28 % (-5,16 %; 18,71 %)	9,71 % (-1,02 %; 22,85 %)
Antal tørre dage	236,8 dage	-0,57 % (-3,83 %; 1,95 %)	0,27 % (-3,27 %; 2,50 %)
Solindstråling pr. dag	117,1 W/m ²	-0,86 % (-2,69; 1,31 %)	-1,43 % (-3,26 %; 0,74)
Potentiel fordampning	598,6 mm	0,58 % (-2,15 %; 4,95 %)	1,81 % (-1,19 %; 5,92 %)

Nedbøren forventes at stige frem mod 2041-2070 (tabel 1.2). Der er dog meget store variationer mellem de forskellige modeller i de forventede ændringer i nedbør. Median-værdien angiver en stigning på ca. 10 mm pr. årti frem mod 2011-2040 og en yderligere stigning på 4 mm pr. årti frem mod 2041-2070. Dette er mindre end den hidtidige observerede nedbørstigning på ca. 15 mm pr. årti (figur 1.2). Der forventes en større stigning i maksimal døgnnedbør end i den gennemsnitlige nedbørsmængde, og derfor en stigning i nedbørintensitet. Der forventes dog ingen ændringer i antallet af tørre dage. Der forventes heller ikke væsentlige ændringer i solindstråling, og den forventede mindre stigning i potentiel fordampning skyldes derfor en stigende temperatur.

Adskillige studier har vist, at der kan forventes en øget variabilitet i fremtidige sommertemperatur over Europa (Fischer et al., 2012; Holmes et al., 2016). Disse ændringer er koblet til stigende variation mellem årene i jordfugtighed mellem fugtige og tørre år. Dette vil øge risikoen for hedeølger og tørke. Med hensyn til luftfugtighed er der for Danmark ikke entydige projicerede ændringer i relativ luftfugtighed (Madsen et al., 2012).

Afgrødernes vækst vil også blive påvirket af udviklingen i atmosfærens CO₂ koncentration. Denne CO₂ koncentration er stigende og var i 2018 ca. 410 ppm. Koncentrationen under RCP4.5 forventes i 2050 at være ca. 487 ppm.

1.4 Referencer

- Blicher-Mathiesen, G., Sørensen, P., Kristensen, T., Andersen, H.E., Petersen, R.J., Audet, J., Tornbjerg, H., Christensen, J.H., Ellerman, T., Nielsen, O.-K., Jensen, J.L., Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Pedersen, B.F., Heckrath, G., Gundersen, P., 2020. Baseline 2027 for udvalgte elementer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. Teknisk rapport nr. 184.
- Fischer, E.M., Rajczak, J., Schär, C., 2012. Changes in European summer temperature variability revisited. *Geophysical Research Letters*, 39, L19702.
- Holmes, C.R., Woollings, T., Hawkins, E., de Vries, H., 2016. Robust future changes in temperature variability under greenhouse gas forcing and the relationship with thermal advection. *Journal of Climate* 29, 2221-2236.
- IPCC, 2021. Summary for Policymakers. 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., 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, pp. 3–32.
- Madsen, M.S., Maule, C.F., McKellar, N., Olesen, J.E., Christensen, J.H., 2012. Selection of climate change scenario data for impact modelling. *Food Additives and Contaminants* 29, 1502-1513.

- Olesen, J.E., Niemeyer, S., Roggero, P.P., Lehtonen, H., Schönhart, M., Kipling, R., 2017. Agriculture. In: Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report. EEA Report No. 1/2017. European Environmental Agency, Copenhagen, Denmark, p. 223-243.
- Rubæk, F., Scharling, M., Cappelen, J., 2021. Danmarks klima 2020 – with English summary. DMI Rapport 21-01.
- Thejll, P., Boberg, F., Schmith, T., Christiansen, B., Christensen, O.B., Madsen, M.S., Su, J., Andree, E., Olsen, S., Langen, P.L., Madsen, K.S., Olesen, M., Pedersen, R.A., Payne, M.R., 2021. Methods used in the Danish Climate Atlas. DMI Report 21-41.
- Sanchez-Lorenzo, A., Enriquez-Alonso, A., Wild, M., Trentman, J., Vicente-Serrano, Sanchez-Romero, A., Posselt, R., Habuka, M.Z., 2017. Trends in downward surface solar radiation from satellites and ground observations over Europe during 1983–2010. *Remote Sensing of Environment* 189, 108–117.

2 Hvordan har klimaændringerne hidtil påvirket dansk landbrug og hvordan har landbruget indtil nu tilpasset sig klimaforandringerne?

Forfattere: Jørgen E. Olesen, Mathias N. Andersen, Niels Holst, Henrik Skovgaard, Per Kudsk, Lise Nistrup Jørgensen, Christen Duus Børgesen, Bo Vangsø Iversen

Fagfællebedømmer: Johannes W.M. Pullens

Klimaet har ændret sig over de seneste årtier, og det har medført ændringer i den landbrugsmæssige anvendelse og dyrkning verden over, herunder i Europa og Danmark (Zhao et al., 2022). Det er i praksis svært at adskille effekter af klimaændringer fra de øvrige drivkræfter, herunder økonomiske og reguleringsmæssige, som påvirker landbrugets arealanvendelse, dyrkningspraksis og afledte miljøeffekter.

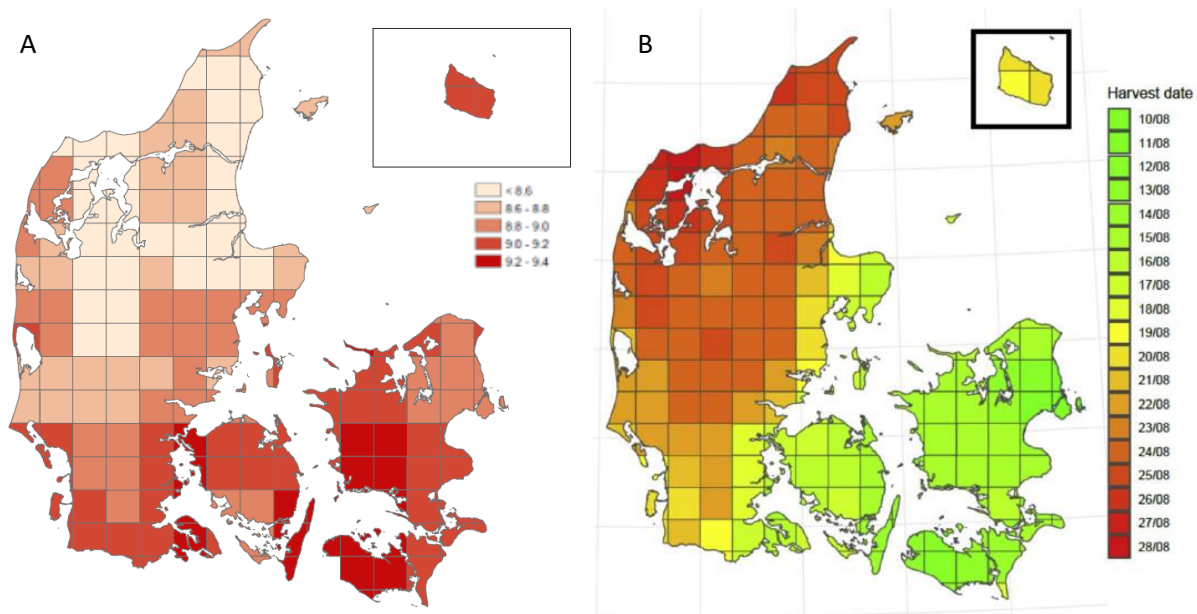
Der er rapporteret negative effekter af klimaændringer på afgrødeproduktion i de fleste afgrøder på verdensplan, herunder Europæiske lande (Peltonen-Sainio et al., 2010), og dette omhandler også faldende udbytter og stigende variabilitet (Olesen et al., 2011). Disse effekter på afgrøder påvirker også husdyrproduktionen gennem adgang til og prisen på foder. Klimaændringer kan dog også give fordele for landbrugsproduktionen, og i Danmark vil dette især ske gennem en længere vækstsæson, som giver mulighed for øgede udbytter i varmekrævende afgrøder som fx majs og vin (Zhao et al., 2022). Det har derfor også i nogen grad påvirket afgrødevalget i dansk landbrug. Desuden giver den stigende atmosfæriske CO₂ koncentration i sig selv stigende udbytter i de fleste afgrøder (Makowski et al., 2015).

2.1 Observerede effekter og tilpasninger

Selvom den hidtidige ændring i middeltemperatur på ca. 1°C over 30 år mellem de to seneste klimanormaler kan synes lille, har den indflydelse på dyrkningen af landbrugsafgrøder. Dyrkningssystemets følsomhed kan illustreres ved at forskellene i middeltemperatur mellem landsdele (Fig. 2.1) giver anledning til en forskel på cirka 18 dage i høsttidspunkt for vinterhvede (Pullens et al., 2021), selvom denne forskel er mindre end 1°C. Klimaændringer har således allerede haft stor indflydelse på valget af afgrøder og mulighederne for deres udvikling og vækst. Som eksempel kan nævnes efterafgrøder, hvor høsttidspunktet for den foregående hovedafgrøde er kritisk for, om de kan nå at udvikle sig i efteråret (Pullens et al., 2021). Det varmere klima har ført til hurtigere udvikling af afgrøderne i løbet af vækstsæsonen, og det er beregnet at blomstringstidspunktet er fremrykket med ca. 2 dage per årti over perioden 1985-2014 (Olesen et al., 2017). Forædling vil generelt mindske hvor meget blomstring og modenhed rykkes frem under danske forhold for at øge udbyttepotentialet (Olesen et al., 2012).

Der har i Danmark kun i mindre omfang været konstateret negative effekter af klimaændringer på afgrøders dyrkning og udbytter. Dette afspejler sig i landmændenes holdninger til klimaændringer, hvor de fleste

landmænd er neutrale i forhold til hvordan de opfatter hvilke effekter klimaændringer vil have for deres landbrug (Woods et al., 2017).



Figur 2.1: Årlig middeltemperatur (A) og modelberegnet høsttidspunkt i vinterhvede (B) for perioden 1999-2018 (Pullens et al., 2021).

Tabel 2.1: Udvikling i det danske landbrugsareals anvendelse, husdyrholdets størrelse og mængden af kvælstof i handelsgødning og husdyrgødning over de seneste 50 år (kilde: Danmarks Statistik).

	1960	1970	1980	1990	2000	2010	2020
Korn (%)	47	59	62	56	57	56	52
Bælgsæd og industrifrø (%)	1	2	4	14	5	7	7
Rodfrugt (%)	18	10	8	8	4	3	4
Græs og grønfoder i rotationen (%)	21	17	14	12	16	22	20
Vedvarende græs (%)	11	10	9	8	6	8	9
Andre afgrøder (%)	2	2	3	2	4	2	2
Braklagt areal (%)	0	0	0	0	7	1	3
Økologisk jordbrug (%)	0	0	0	1	6	7	12
Reduceret jordbearbejdning (%)							19
Kvæg (1000)	3.397	2.842	2.961	2.239	1.868	1.571	1.499
Svin (1000)	7.095	8.361	9.957	9.497	11.921	13.173	13.163
Får (1000)	47	70	56	159	145	159	135
Fjerkræ (1000)	25.340	19.169	15.507	16.249	21.830	18.731	22.133
Kvælstof i handelsgødning (1000 ton N)	123	271	394	400	252	197	235
Kvælstof i husdyrgødning (1000 ton N)			263	244	232	256	224
Pesticider (1000 ton aktivt stof)			6,3	5,4	2,9	4,0	2,5

Det danske landbrugsareal er domineret af korn (tabel 2.1), og udviklingen kan derfor illustreres med udbytter i vårbyg og vinterhvede (figur 2.2). Der er kun ringe ændringer i den overordnede sammensætning af landbrugets afgrøder over tid. Der har dog været større udbyttetigninger i vinterhvede end i vårbyg, og det har ført til et skift i valget af kornart. Fra 1971 til 1997 steg arealet med vinterhvede således fra 86.500 ha til 671.600 ha, og samtidig blev hvedearealet bredt ud fra lerjordene i Østdanmark til de mere sandede jorder i resten af landet (Olesen et al., 2000). Disse udbyttetigninger har været resultatet af nye dyrknings-teknologier, der har fokuseret på at øge både den samlede produktion og hvor stor en del af denne, der kunne høstes og udnyttes. Fremgangen har været en kombination af bedre sorter, mere gødning og bedre plantebeskyttelse. Frem til 1970'erne blev en stor del af udbyttefremgangen nået gennem øget gødning (tabel 2.1), men også det øgede forbrug af pesticider og vækstreguleringsmidler har bidraget til dette.

Der har tilsvarende været en betydelig udvikling i husdyrholdets produktivitet. Nedgangen i kvægbestanden, der fremgår af tabel 2.1, er derfor ikke udtryk for en lavere samlet produktion. Således er mælkeydel-sen steget fra ca. 4.000 kg mælk i 1950 til over 10.000 kg mælk per årsko i 2015 (Lund, 2015). I denne periode er fodringseffektiviteten også forbedret. Derfor har mængden af kvælstof i husdyrgødningen været nogenlunde konstant i hele perioden. Dog var der generelt en meget ringe udnyttelse af husdyrgødningen helt frem til midten af 1980'erne.

Der har over de senere år også været en udvikling i nye dyrkningsformer, herunder økologisk jordbrug og reduceret jordbearbejdning (tabel 2.1), men effekterne på den samlede produktivitet i landbruget har formentlig været beskeden. Økologiske produktionssystemer fører generelt til betydeligt lavere produktivitet i planteavlen (Shah et al., 2017), mens reduceret jordbearbejdning ofte ikke giver signifikante effekter på udbyttet.

2.1.1 Afgrødernes udbredelse og udbytter

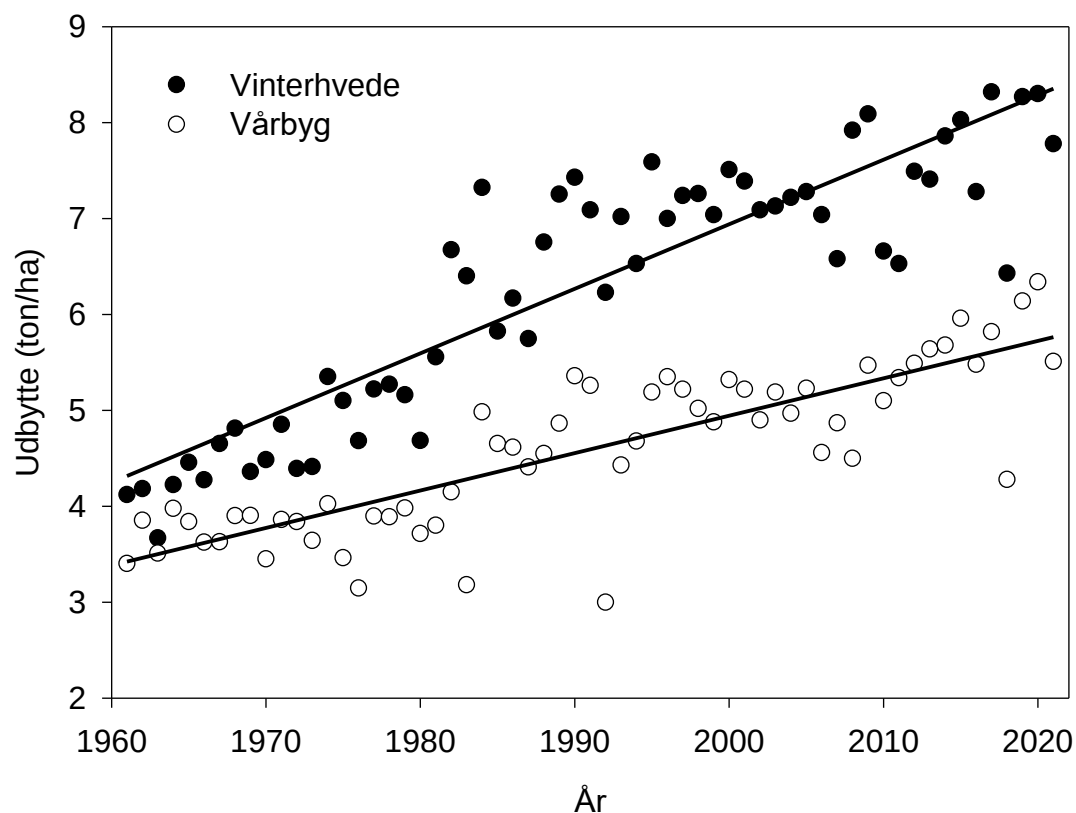
Klimaets påvirker især planteproduktion gennem vækstsæsonens længde samt gennem vækstbetingelserne i løbet af vækstsæsonen, hvor temperatur og nedbør er afgørende. Som beskrevet i de følgende afsnit reagerer forskellige afgrøder forskelligt på disse betingelser. Samtidig påvirkes afgrødernes vækstbetingelser også af samspillet til vandforsyning, jordkvalitet og plantebeskyttelse.

Den længere vækstsæson har sammen med højere temperaturer givet bedre betingelser for varmekrævende afgrøder. Dette har dog stort set kun påvirket omfanget af dyrkning af majs og vin i Danmark. Danmark blev officielt anerkendt som vinproducerende land af EU i 2000, men på trods af et stigende antal vinavlere er arealet med vindyrkning stadig meget lille.

2.1.1.1 Korn

Dansk landbrug er domineret af korndyrkning med både vårsæd og vintersæd, især vårbyg og vinterhvede. De højeste udbytter opnås i vintersæd, som har en længere vækstsæson og som på grund af større rod-dybde også er mindre tørkefølsom end vårsæd (Webber et al., 2018). Denne effekt var særlig tydelig i tørkeåret 2018, hvor effekten blev forstærket af et meget vådt efterår i 2017, der umuliggjorde såning af vintersæd på store arealer. Der var derfor i 2018 et ekstra stort areal med vårsæd, og dermed et større areal med tørkefølsomme afgrøder. Miljøreguleringen af kvælstofudledning har medført et krav om efterafgrøder på et stadigt stigende areal, hvilket i sig selv forudsætter dyrkning af vårsæd, og som på nogle arealer potentielt øger tørkefølsomheden, især over for forsommertørke.

Udbytter i både vårbyg og vinterhvede har været jævnt stigende over de seneste 30 år med omkring 0,6% årligt (Fig. 2.2). Generelt har der kun været mindre årlige udsving i udbytterne på landsplan med tørkeåret 2018 som undtagelse, hvor udbyttet i vinterhvede og vårbyg var henholdsvis 14 og 22% lavere end i de omliggende år.



Figur 2.2: *Udvikling i udbytter i vårbyg og vinterhvede i Danmark (Statistikbanken.dk).*

Kristensen et al. (2011) benyttede data fra forsøg i vinterhvede hos landmænd til at undersøge hvilke vejrforhold, der påvirker udbyttet i vinterhvede. Udbyttet var især negativt påvirket af høje sommertemperaturer, hvorimod høj indstråling (soltimer) i forår og sommer øgede udbyttet. Udbyttet var samlet kun i mindre omfang påvirket af nedbør, da der er både positive og negative effekter knyttet til nedbør afhængig af tidspunkt og mængde.

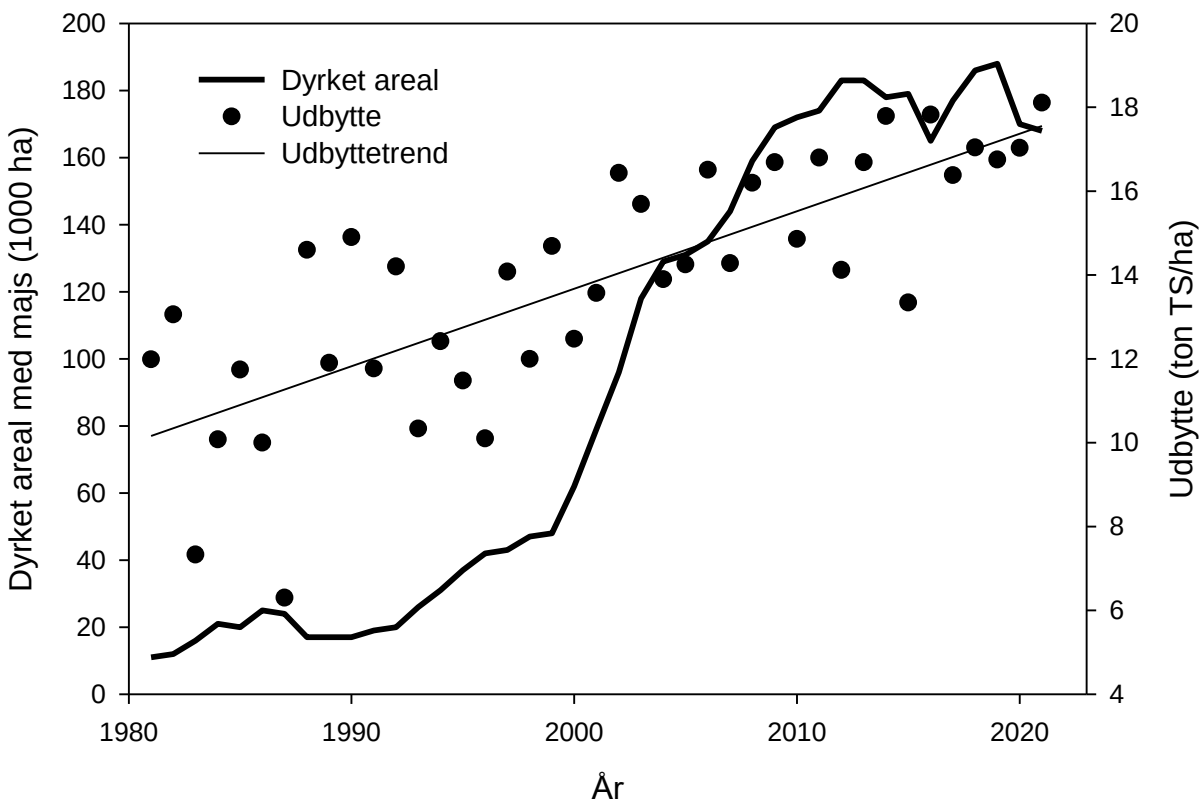
En analyse af sammenhængen mellem vejrforhold og udbytter i vårbyg og vinterhvede på tværs af Europa viste, at betydningen af vejrforhold på udbyttet er steget over tid, formentlig delvis som konsekvens af stigende udbytter men også som følge af stigende variabilitet i klimaet (Trnka et al., 2016). I Danmark har især høje maksimumtemperaturer været negative for kornudbytterne.

2.1.1.2 Olieafgrøder

Vinterraps er den dominerende olieafgrøde i Danmark og Nordeuropa. Arealet med vinterraps i Danmark har tidligere varieret betydeligt, men har i de seneste år ligget stabilt på omkring 160.000 ha. Udbytter i vinterraps har været stigende over de seneste to årtier som følge især af bedre sorter og bedre afgrødeetablering. Vinterraps udnyttes til vegetabilsk olie i fødevareindustrien, men størsteparten går til produktion af biodiesel.

2.1.1.3 Foderafgrøder

Kvæget i Danmark fodres med græs suppleret med energirige foderafgrøder for at sikre en høj mælkeydelse. I tabel 2.1 indgår alle disse afgrøder under kategorien græs og grønfoder. De energirige foderafgrøder har skiftet over tid. Frem til omkring 1990 var der en udbredt dyrkning af fodersukkerroer og helsæd af korn til kvægfoder. Fra midten af 1990'erne steg dyrkningen af majs til helsæd som kvægfoder betydeligt, så den siden 2008 har udgjort ca. 170.000 ha (figur 2.3). Dette har været koblet stigende udbytter i majs, som har gjort majs en mere konkurrencedygtig og stabil foderafgrøde (Odgaard et al., 2011). En analyse af udbyttedata i figur 2.3 viser, at udbyttevariationen langt overvejende forklares af temperaturforskelle mellem årene, og at forædling af nye sorter derfor kun i mindre omfang har været styrende for udbyttevæksten. Tilsvarende udvikling i majsdyrkningen har været set over hele Nordeuropa med en nordgående forskydning af dyrkningsarealet for majs (Elsgaard et al., 2012). Det varmere klima har således betydet, at både økologiske og konventionelle kvægbrug har skiftet til fodring med græs og ensilagemajs.



Figur 2.3: *Udvikling i dyrket areal med ensilagemajs (Statistikbanken.dk) og gennemsnitlige tørstofudbytter i forsøg med majs sorter i Landsforsøgene.*

2.1.1.4 Andre afgrøder

Kartofler har traditionelt været en vigtig afgrøde til direkte konsum i Danmark. Arealet og salget af spisekartofler har dog været aftagende de seneste 10 år fra omkring 16.000 ha i 2010 til nuværende ca. 10.000 ha (Statistikbanken.dk). Til gengæld er arealet med industrikartofler i samme periode steget fra ca. 18.000 ha til over 40.000 ha. Kartofler er særdeles følsomme for høje temperaturer, da middeltemperaturen i vækstsæsonen i Danmark allerede er højere end deres temperaturoptimum (Zhou et al., 2017), der ligger på kun 12-13°C under markforhold (Peng et al., 2021). De to studier indikerede udbyttetab på omkring 10% per °C over optimum i markforsøg. Dette er en væsentlig højere følsomhed over for temperatur end tidligere modelstudier har fundet (Daccha et al., 2011), hvilket kan skyldes, at høj temperatur under markforhold følges af ændringer i andre klimavariabler såsom lavere luftfugtighed mm. De 10% udbyttetab pr. °C over optimum stemmer imidlertid godt overens med tilsvarende undersøgelser af temperaturfølsomheden i andre afgrøder, når temperaturoptimum overskrides fx i majs (Lobell, 2011). Selvom analysen af temperaturfølsomheden i markforsøg i Danmark dækker en 15-årig periode, kan resultatet ikke tages som udtryk for eller

repræsentere effekten af de mere langvarige klimaændringer, da forsøgene ikke reflekterer den forventede stigning i CO₂ i atmosfæren. Den positive effekt af øget CO₂ på udbyttet er sandsynligvis så stor, at den vil mere end opveje den negative effekt af stigende temperatur (Zhao et al., 2022).

2.1.2 Næringsstoffer

Landbruget udleder både kvælstof og fosfor til vandmiljøet, og udledningen af begge næringsstoffer påvirkes af klimaet (Jeppesen et al., 2009, 2011). Det er især stigende vandafstrømning, der øger udledningen af både kvælstof og fosfor. Der har over de seneste årtier især været øgende nedbørsmængder i Vest- og Nordjylland, og dette har ført til betydeligt stigende afstrømning i vandløb i Jylland (stigning på 2-4 mm/år), men lavere stigning i afstrømning på Fyn og ingen ændring på Sjælland (Blicher-Mathiesen et al., 2020). Dette har derfor i sig selv ført til stigende kvælstofudledning til vandmiljøet i Jylland og på Fyn.

Klimaet påvirker også kvælstofudvaskningen indirekte gennem effekter på afgrødernes vækst og kvælstofoptag samt gennem effekter på effektiviteten af virkemidler. Desuden øger temperaturen om vinteren mineraliseringen af kvælstof i jorden og dermed også udvaskningen (Jabloun et al., 2015). Flere typer klimækstremere (fx tørke og ekstrem nedbør) vil gennem påvirkning på afgrøders vækst og virkemidlers effektivitet kunne øge kvælstofudvaskningen (Ten Damme et al., 2022). Kvælstofoptaget bliver især negativt påvirket gennem tørke, som fx i 2018, og dette vil kunne øge den kvælstofmængde, der er til rådighed for udvaskning, hvis det ikke modvirkes af effektive efterafgrøder. God etablering og vækst af efterafgrøder er afgørende for deres evne til at reducere kvælstofudledningen (de Notaris et al., 2018), og dette kræver at afgrøden høstes i så tidligt at efterafgrøden kan få en tilstrækkelig lang vækstperiode inden vinteren. Høsttidspunktet for kornafgrøder viser en betydelig geografisk variation i høsttid (12-18 dage) på tværs af landet (Pullens et al., 2021). Kølige vækstsæsoner og våde høstforhold giver sen høst, og det giver særligt vanskelige forhold for etablering af efterafgrøder i de dele af landet, hvor klimaforholdene i forvejen giver sen høst.

2.1.3 Skadegørere

Der er indtil nu kun få eksempler på øget forekomst af skadegørere, som kan tilskrives klimaforandringer.

2.1.3.1 Ukrudt

Ukrudtsplanter vækst og konkurrenceevne påvirkes især af temperatur og jordfugtighed. Ukrudtsfloraens sammensætning er dog primært et resultat af afgrødefølge og jordtype. Klimaændringer vil imidlertid kunne bidrage til ændringer i ukrudtsfloraens sammensætning, f.eks. er der i de senere år set en stigende forekomst af hanespore og grøn skærmaks i forårssåede rækkeafgrøder som f.eks. majs. Disse arter er varmekrævende, og deres større udbredelse kan tilskrives højere forårs- og sommertemperaturer.

2.1.3.2 Sygdomme

De største tab som følge af svampesygdomme forekommer i korn, kartofler og grønsager. Klimaet er en af de parametre, som har størst indflydelse på angrebsgraden sammen med planternes sygdomsresistens. Anvendelsen af fungicider sker hovedsageligt i korn og kartofler.

Sammenhængen mellem klimaet og forekomsten af sygdomme er komplekse og afhængige af hvordan vejrforholdene påvirker sygdommenes generationstid og infektionsbetingelserne. Vintrene er over de senere år blevet mildere, og det giver bedre betingelser for overvintring af flere sygdomme. Det er således kendt, at gulrust i visse vintre helt kan forsvinde på grund af kraftig frost. Chancerne for en sådan dæmpning af smittepotentiale må forventes at blive mindre, når vintrene bliver mildere. Mildere vintre betyder også, at flere svampe vil gennemløbe flere generationer i løbet af vinterhalvåret og dermed oparbejde et større smittepotentiale i den tidlige vækstsæson, hvor afgrøderne generelt er mest følsomme.

I de seneste år har forsommeren været nedbørfattig, og det kan mindske angreb af fugtelskende svampe som hvedegråplet, skoldplet og bygbladplet. Længere perioder med bladfugt er afgørende for, at disse sygdomme kan spredes og opformeres.

Kartoffelskimmel overlever i Danmark enten ved smitstof i knolde i jorden eller ved egentlig jordsmitte i form af oosporer. Især oosporesmitte er i de senere år set mere hyppigt end tidligere. Mildere vintre og varmere forsomre har øget betydningen af knold- og jordsmitte og ført til tidligere angreb. Varmere somre kan medvirke til kraftigere epidemier af kartoffelskimmel og kan favorisere nye sygdomme som kartoffelbladplet, som trives bedst i varme somre. I sukkerroer vil en temperaturstigning kunne få betydning for udbredelsen af *Cercospora* bladplet og *Ramularia*. Disse er begge kendt for at trives bedst ved højere temperaturer og er derfor almindeligt forekommende i varmere områder af Europa.

2.1.3.3 Skadedyr

Der foreligger ingen evidens for, at klimaforandringerne indtil nu har påvirket forekomsten af skadedyr i dansk landbrug.

2.1.4 Forædling

Der har over de seneste årtier været et stigende fokus på forædling af sorter, der kan øge modstandskraften mod abiotisk stress, herunder tørke, varme og kulde. Der har i Danmark bl.a. været et fokus på at øge roddybden af mange afgrøder for at øge tørketolerancen, og det har ført til screening af stort antal sorter af forskellige afgrøder i et Radimax-anlægget i Taastrup (Svane et al., 2019). Der har samtidigt været set på om en lang række andre genetiske egenskaber påvirker tolerance for tørke og varme og kan give høj produktivitet under stigende forekomst af ekstreme (Sharma et al., 2015).

Da forekomsten af mange forskellige former af klimatiske ekstremer er stigende, vil der også være behov for sorter, der kan sikre gode udbytter under mange forskellige klimatiske forhold. Dette kræver derfor formentlig en stigende diversitet i respons til klimaekstremer af de dyrkede sorter. En undersøgelse af dyrkede sorter af vinterhvede i Europa viser dog et fald i denne responsdiversitet (Kahiluoto et al., 2019).

2.1.5 Vanding

Både vanding og dræning som kulturtekniske tiltag er relevante i forbindelse med de øgede nedbørsmængder i vinterhalvåret og mulige længere tørkeperioder om sommeren. Vurderingen af hvor og hvornår, der er et eventuelt øget behov hæmmes af mangelfuld statistik om den nuværende udbredelse og udvikling.

Omkring 20% af det danske landbrugsareal hovedsageligt sandjord vandes på ejendomme, der har tilladelse til indvinding af vand til markvanding. Ifølge Danmarks Statistik var arealet, der kan vandes, på sit højeste (478.000 ha) i 1997, men Henriksen et al. (2015) bruger dog et større tal (568.000 ha alene i Jylland) i deres analyse af konsekvenserne af øget markvanding vha. DK Modellen. Markvanding er en væsentlig faktor, der stabiliserer udbyttet på ejendomme på sandjord, og bidrager dermed med resiliens mod klimacændringer specielt længere tørkeperioder. Klimacændringerne har forskellige og til dels modsat rettede effekter på vandingsbehovet. Den stigende CO₂ koncentration i atmosfæren vil mindske fordampningen, medens den stigende nedbørsmængde på årsbasis som tidligere nævnt er koncentreret i vinter- og efterårsmånederne og derfor ikke nødvendigvis mindsker vandingsbehovet. Længere perioder med sommertørke og højere sommertemperaturer vil øge behovet for markvanding. Dette modvirkes dog igen af tidligere såning og tidligere afmodning af afgrøderne. Ten Damme og Andersen (2018) analyserede vandingsbehovet i forskellige afgrøder, og landsdele i perioden 1990-2015 og fandt generelt højere vandingsbehov end i ældre undersøgelser. På grund af ændringer i målemetoder med hensyn til fordampning og nedbør og brug af nye vandbalancemodeller, kan det øgede vandingsbehov dog ikke med sikkerhed tilskrives klimacændringerne. En stigende vandindvinding til markvanding, herunder også eventuel udvidelse af det vandede areal, kan have konsekvenser for vandføringen i vandløb (Miljøstyrelsen, 2013). Dette kan medføre et behov for at justere tilladelser til vandindvinding, men der er behov for en grundigere analyse og kortlægning af problemets omfang herunder også om den stigende nedbør øger den tilgængelige vandressource i sommermånederne.

2.1.6 Afvanding

På grund af de stigende nedbørsmængder er der stigende fokus på behovet for dræning af dyrkede arealer. Dræning er en forudsætning for rettidig såning i forårs- og efterårsmånederne og for at mindske eller undgå jordpakning. Dræning bidrager derfor til at opnå højt udbytte, der ofte er betinget af så tidlig såning som muligt, og af at der ikke opstår perioder, hvor planternes rodsystem påvirkes negativt af for lavt iltindhold i jorden. En del lavtliggende arealer, fx i ådale, bliver i disse år udtaget af landbrugsmæssig drift fordi

arealer i stigende grad bliver for våde til dyrkning. Dette kan dog både skyldes at arealerne sætter sig som følge af nedbrydning af jordens organiske stof og at de stigende nedbørsmængder gør afvandingen vanskelig. Der findes ikke gode statistikker på omfanget af dræning, og det er derfor heller ikke muligt at fastlægge hvordan igangværende klimaændringer påvirker omfanget.

2.1.7 Dyrkningsstrategier

Flere dyrkningsstrategier har været fremhævet som mulige løsninger til at give øget tilpasning til klimaændringer. Dette gælder bl.a. for reduceret jordbearbejdning og økologisk landbrug. Både brugen af reduceret jordbearbejdning (herunder conservation agriculture) og økologisk landbrug har været voksende over de seneste år (tabel 2.1). Det er dog ikke muligt at tillægge denne vækst de ændrede klimatiske betingelser. Snarere er der for det økologisk landbrug tale om, at væksten er drevet af en stigende efterspørgsel efter økologiske fødevarer, og for reduceret jordbearbejdning er der i høj grad tale om at reducere arbejds- og maskinforbruget ved dyrkningen.

Der er god evidens for at reduceret jordbearbejdning, især conservation agriculture med direkte såning og tilbageførsel af planterester giver en øget resiliens for tørke (Bodner et al., 2015). Dette skyldes, at den reducerede jordbearbejdning øger infiltrationen af vand i jorden og at planteresterne på jordoverfladen er med til at mindske fordampningen. En forbedret jordkvalitet i form af øget kulstofindhold og øget vandretention kan være med til at forbedre afgrødernes vandforsyning og dermed resiliens mod tørke. Der er dog ikke evidens for at økologiske dyrkningssystemer giver en konsistent bedre jordkvalitet, selvom inklusion af græsmarker konsistent forbedrer jordkvaliteten i dyrkningssystemet (De Notaris et al., 2021). En større resiliens i økologisk jordbrug over for tørke og andre ekstreme klimaforhold kan skyldes de generelt lavere udbytter i økologisk jordbrug, der mindsker risikoen for endnu lavere udbytter under tørke og hedebløgger (Trnka et al., 2012). Skovlandbrug er forslået som en strategi til at øge dyrkningssystemets resiliens mod klimaændringer (Hernandez-Morcillo et al., 2018). Der mangler dog dokumentation for effekten af disse systemer under Nordeuropæiske forhold.

2.2 Referencer

- Blicher-Mathiesen, G., Sørensen, P., Kristensen, T., Andersen, H.E., Petersen, R.J., Audet, J., Tornbjerg, H., Christensen, J.H., Ellerman, T., Nielsen, O.-K., Jensen, J.L., Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Pedersen, B.F., Heckrath, G., Gundersen, P., 2020. Baseline 2027 for udvalgte elementer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. Teknisk rapport nr. 184.
- Bodner, G., Nakhforoosh, A., Kaul, H.-P., 2015. Management of crop water under drought: a review. *Agronomy Sustainable Development* 35, 401-442.
- Daccache, A., Weatherhead, E.K., Stalham, M.A., Knox, J.W., 2011. Impacts of climate change on irrigated potato production in a humid climate *Agricultural Forest Meteorology* 151, 1641-1653, 10.1016/j.agrformet.2011.06.018

- De Notaris, C., Rasmussen, J., Sørensen, P., Olesen, J.E., 2018. Nitrogen leaching: a crop rotation perspective on the effect of N surplus, field management and use of catch crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 255, 1-11.
- De Notaris, C., Jensen, J.L., Olesen, J.E., da Silva, T.S., Rasmussen, J., Panagea, I., Rubæk, G.H., 2021. Long-term soil quality effects of soil and crop management in organic and conventional arable cropping systems *Geoderma* 403, 115383.
- Elsgaard, L., Børgesen, C.D., Olesen, J.E., Siebert, S., Ewert, F., Peltonen-Sainio, P., Rötter, R.P., Skjelvåg, A.O., 2012. Shifts in comparative advantages for maize, oat, and wheat cropping under climate change in Europe. *Food Additives and Contaminants* 29, 1514-1526.
- 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.
- Henriksen, H.J., Rosenbom, A., van der Keur, P., Olesen, J.E., Jørgensen, L.N., Kjær, J., Sonnenborg, T.O., Christensen, O.B., 2013. Prediction of climatic impacts on pesticide leaching to the aquatic environments. Danish Ministry of the Environment. Environmental Protection Agency. Pesticide Research no. 143.
- Henriksen, H.J., Stisen, S., Trolborg, L., He, X., Jørgensen, L.F., 2015. Analyse af øget vandindvinding til markvanding. Vandløbspåvirkning på ID15 niveau for nuværende markvanding samt 25%, 50% og 100% øget markvanding. Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport, No. 2015-29.
- Hernandez-Morcillo, M., Burgess, P., Mirck, J., Pantera, A., Plieninger, T., 2018. Scanning agroforestry-based solutions for climate change mitigation and adaptation in Europe. *Environmental Science and Policy* 80, 44-52.
- Jabloun, M., Schelde, K., Tao, F., Olesen, J.E., 2015. Effect of temperature and precipitation on nitrate leaching from organic cereal cropping systems in Denmark. *European Journal of Agronomy* 62, 55-64.
- Jeppesen, E., Kronvang, B., Meerhoff, M., Søndergaard, M., Hansen, K.M., Andersen, H.E., Lauridsen, T.L., Liboriussen, L., Bekiöglu, M., Özen, A., Olesen, J.E., 2009. Climate change effects on runoff, phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations. *Journal of Environmental Quality* 38, 1930-1941.
- Jeppesen, E., Kronvang, B., Olesen, J.E., Audet, J., Søndergaard, M., Hoffmann, C.C., Andersen, H.E., Lauridsen, T.L., Liboriussen, L., Larsen, S.E., Bekiöglu, M., Meerhoff, M., Özen, A., Özkan, K., 2011. Climate change effects on nitrogen loading from catchment: implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation. *Hydrobiologia* 663, 1-21.
- Kahiluoto, H., Kaseva, J., Balek, J., Olesen, J.E., Ruiz-Ramos, M., Gobin, A., Kersebaum, K.C., Takács, J., Ruget, F., Ferrise, R., Bezak, P., Cappellades, G., Dibari, C., Mäkinen, H., Nendel, C., Ventrella, D., Rodriguez, A., Bindi, M., Trnka, M., 2019. Decline in climate resilience of European wheat. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 123-128.
- Kristensen, K., Schelde, K., Olesen, J.E., 2011. Winter wheat yield response to climate variability in Denmark. *Journal of Agricultural Science* 149, 33-47.
- Lobell, D., Bänziger, M., Magorokosho, C., Vivek, B., 2011. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. *Nature Climate Change* 1, 42-45.
- Lund, P., 2015. Malkekoens ernæring – fodringsstrategier målrettet produktivitet og miljøhensyn. DCA rapport nr. 60.

- Makowski, D., Asseng, S., Ewert, F., Bassu, S., Durand, J.L., Li, T., Martre, P., Adam, M., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Baron, C., Basso, B., Bertuzzi, P., Biernath, C., Boogaard, H., Boote, K.J., Bouman, B., Bregaglio, S., Brisson, N., Buis, S., Cammarano, D., Challinor, A.J., Confalonieri, R., Conijn, J.G., Corbeels, M., Deryng, D., De Sanctis, G., Doltra, J., Fumoto, T., Gaydon, D., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R., Grassini P., Hatfield, J.L., Hasegawa, T., L. Heng, L., Hoek, S., Hooker, J., Hunt, L.A., Ingwersen, J., Izaurralde, R.C., Jongschaap, R.E.E., Jones, J.W., Kemanian, R.A., Kersebaum, K.C., Kim, S.-H., Lizaso, J., Marcaida III, M., Müller, C., Nakagawa, H., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'Leary, G.J., Olesen, J.E., Oriol, P., Osborne, T.M., Palosuo, T., Pravia, M.V., Priesack, E., Ripoche, D., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., F. Ruget, F., Sau, F., Se-menov, M.A., Shcherbak I., Singh, B., Singh, U., Soo, H.K., Steduto, P., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tang, L., Tao, F., Teixeira, E.I., Thorburn, P., Timlin, D., Travasso, M., Rötter, R.P., Waha, K., Wallach, D., White, J.W., Wilkens P., Williams, J.R., Wolf, J., Yin, X., Yoshida, H., Zhang, Z. & Y. Zhu, Y. (2015). A statistical analysis of three ensembles of crop model responses to temperature and CO₂ concentration. *Agricultural and Forest Meteorology* 214-215, 483-493.
- Miljøstyrelsen, 2013. Arbejdsnotat om Balance mellem vandforekomster og vandindvindig til markvanding. Arbejdsgruppenotat, Naturstyrelsen. 82 pp. https://mst.dk/media/114882/markvandingsgruppen_arbejdsnotat_31-01-2013.pdf
- Odgaard, M.V., Bøcher, P.K., Dalgaard, T., Svenning, J.-C., 2011. Climatic and non-climatic drivers of spatio-temporal maize-area dynamics across the northern limit for maize production: A case study from Denmark. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 142, 291-302.
- Olesen, J.E., Bøcher, P.K., Jensen, T., 2000. Comparison of scales of climate and soil data for aggregating simulated yields of winter wheat. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 82, 213-228.
- Olesen, J.E., Børgesen, C.D., Elsgaard, L., Palosuo, T., Rötter, R., Skjelvåg, A.O., Peltonen-Sainio, P., Börjesson, T., Trnka, M., Ewert, F., Siebert, S., Brisson, N., Eitzinger, J., van der Fels-Klerx, H.J., van Asselt, E., 2012. Changes in flowering and maturity time of cereals in Northern Europe under climate change. *Food Additives and Contaminants* 29, 1527-1542.
- Olesen, J.E., Niemeyer, S., Roggero, P.P., Lehtonen, H., Schönhart, M., Kipling, R., 2017. Agriculture. In: Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report. EEA Report No. 1/2017. European Environmental Agency, Copenhagen, Denmark, p. 223-243.
- Peltonen-Sainio, P., Jauhiainen, L., Trnka, M., Olesen, J. E., Calanca, P., Eckersten, H., Eitzinger, J., Gobin, A., Kersebaum, C., Kozyra, J., Kumar, S., Marta, A. D., Micalé, F., Schaap, F., Seguin, B., Skjelvåg, A., Orlandini, S., 2010. Coincidence of variation in yield and climate in Europe. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139, 483-489.
- Peng, J., Manevski, K., Kørup, K., Larsen, R., Zhou, Z., Andersen, M.N., 2021. Environmental constraints to net primary productivity at northern latitudes: A study across scales of radiation interception and biomass production of potato. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*. 94, 102232.
- Pulido-Moncada, M., Petersen, S.O., Munkholm, L.J., 2022. Soil compaction raises nitrous oxide emissions in managed agroecosystems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(3), 38.
- Pullens, J.W.M., Sørensen, C.G., Olesen, J.E., 2021. Temperature-based prediction of harvest date in winter and spring cereals as a basis for assessing viability for growing cover crops. *Field Crops Research* 264, 108085.

- Shah, A., Askegaard, M., Rasmussen, I.A., Jimenez, E.M.C., Olesen, J.E., 2017. Productivity of organic and conventional arable cropping systems in Denmark. *European Journal of Agronomy* 90, 12-22.
- Sharma, D.K., Andersen, S.B., Ottosen, C.O., Rosenqvist, E., 2015. Wheat cultivars selected for high F-v/F-m under heat stress maintain high photosynthesis, total chlorophyll, stomatal conductance, transpiration and dry matter. *Physiologia Plantarum* 153, 284-298.
- Svane, S.F., Jensen, C.F., Thorup-Kristensen, K., 2019. Construction of a large-scale semi-field facility to study genotypic differences in deep root growth and resources acquisition. *Plant Methods* 15, 16.
- ten Damme, L., Jing, S., Montcalm, A.M., Jepson, M., Andersen, M.N., Hansen, E.M., 2022. Proper management of irrigation and nitrogen-application increases crop N-uptake efficiency and reduces nitrate leaching, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 72:1, 913-922.
- ten Damme, L., Andersen, M.N., 2018. The gross- and net-irrigation requirements of crops and model farms with different root zone capacities at ten locations in Denmark 1990-2015. DCA report no. 112. DCA - Danish Centre for Food and Agriculture, Blichers Allé 20, PO box 50, DK-8830 Tjele. 93 pp.
- Trnka, M., Brázdil, R., Olesen, J.E., Eitzinger, J., Zahradníček, P., Kocmánková, E., Dobrovolný, P., Štěpánek, P., Možný, M., Bartošová, L., Hlavinka, P., Semerádová, D., Valášek, H., Havlíček, M., Horáková, V., Fischer, M., Žalud, Z., 2012. Could the changes in regional crop yield be a pointer of climatic change? *Agricultural and Forest Meteorology* 166-167, 62-71.
- Trnka, M., Olesen, J.E., Kersebaum, K.C., Rötter, R.P., Brázdil, R., Eitzinger, J., Jansen, S., Skjelvåg, A.O., Peltonen-Sainio, P., Hlavinka, P., Balek, J., Eckersten, H., Gobin, A., Vučetić, V., Dalla-Marta, A., Orlandini, S., Alexandrov, V., Semerádová, D., Štěpánek, P., Svobodová, E., Rajdl, K., 2016. Changing regional weather-crop yield relationship across Europe between 1901 and 2012. *Climate Research* 70, 195-214.
- Webber, H., Ewert, F., Olesen, J.E., Müller, S., Fronzek, S., Ruane, A., Ababaei, B., Bindi, M., Bourgault, M., Ferrise, R., Finger, R., Fodor, N., Gabaldón-Leal, C., Gaiser, R., Jabloun, M., Kersebaum, K.C., Lizaso, J.I., Lorite, I., Manceau, L., Martre, P., Moriondo, M., Nendel, C., Rodríguez, A., Ramos, M.R., Semenov, M.A., Siebert, S., Stella, T., Stratonovitch, P., Trombi, G., Wallach, D., 2018. Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. *Nature Communications* 9, 4249.
- Woods, B.A., Nielsen, H.Ø., Pedersen, A.B., Kristofersson, D., 2017. Farmers' perceptions of climate change and their likely responses in Danish agriculture. *Land Use Policy* 65, 109-120.
- Zhao, J., Bindi, M., Eitzinger, J., Ferrise, R., Gaile, Z., Gobin, A., Holzkämper, A., Kersebaum, K.C., Kozyra, J., Kriaučiūnienė, Z., Loit, E., Nejedlik, P., Nendel, C., Niinemets, Ü., Palosuo, T., Peltonen-Sainio, P., Potopová, V., Ruiz-Ramos, M., Reidsma, P., Rijk, B., Trnka, M., van Ittersum, M.K., Olesen, J.E., 2022. Priority for climate adaptation measures in European crop production systems. *European Journal of Agronomy* 138, 126516.
- Zhou, Z., Plauborg, F., Kristensen, K., Andersen, M.N., 2017. Dry matter production, radiation interception and radiation use efficiency of potato in response to temperature and nitrogen application regimes. *Agricultural and Forest Meteorology* 232, 595-605.

3 Klimaforandringernes påvirkning af dansk landbrug og dets effekt på natur, miljø, klima og samfund på kort og mellemlangt sigt (2030 og 2050), herunder effekterne af ekstreme og variabilitet

3.1 Planteproduktion

Forfattere: Afsnit 3.1.1 Mathias N. Andersen, Jørgen E. Olesen; Afsnit 3.1.2: Lars Juhl Munkholm, Paul Henning Krogh; Afsnit 3.1.3.1: Per Kudsk; Afsnit 3.1.3.2: Lise Nistrup Jørgensen; Afsnit 3.1.3.3: Niels Holst, Henrik Skovgaard

Fagfællebedømmere: Afsnit 3.1.1: Johannes W.M. Pullens; Afsnit 3.1.2: Mathieu Lamandé, Marianne Bruus; Afsnit 3.1.3.1: Niels Holst; Afsnit 3.1.3.2: Henrik Skovgaard; Afsnit 3.1.3.3: Per Kudsk, Lise Nistrup Jørgensen

3.1.1 Udbytte

Dyrkningen af afgrøder, deres udbytter og kvalitet, er direkte afhængig af en række forskellige klimafaktorer, især temperatur og nedbør, men også atmosfærens CO₂ indhold påvirker udbyttet direkte gennem påvirkning på fotosyntesen og indirekte gennem effekter på vandforbrug (Olesen og Bindi, 2002). Disse forhold vil også påvirke udbyttets kvalitet, fx gennem lavere proteinindhold i kornafgrøder (Asseng et al., 2019) og risiko for kvalitetsdefekter i grønsager (Grevsen et al., 2003).

Klimaændringer vil fortsætte med at påvirke produktiviteten i landbruget på globalt, kontinentalt, nationalt og regionalt niveau med store forskelle i udfordringer og muligheder mellem forskellige egne (Olesen et al., 2011; Zhao et al., 2022). Det anerkendes generelt, at afgrødernes produktivitet vil blive øget i Nordeuropa på grund af længere vækstsæson og en længere frostfri periode. I Sydeuropa vil klimaændringerne være negative for afgrøderne på grund af øget tørke og hedeølger og en general fald i adgang til vand, herunder til vanding (Iglesias et al., 2010). Variation i udbytter fra år til år forventes at stige overalt i Europa som følgende øget frekvens af klimaekstremer og stigende risiko for biotisk stress, herunder sygdomme og skadedyr (Kristensen et al., 2011; Trnka et al., 2014). Der er tilsvarende variation i effekter på udbyttets kvalitet mellem regioner og år (Olesen og Grevsen, 1993; Asseng et al., 2019).

Et varmere klima vil føre til en længere vækstsæson med en tidligere start i foråret og senere afslutning i efteråret. Det er især en tidligere start i foråret, der vil være fordelagtigt for afgrøderne, da lysforholdene er bedre i foråret end om efteråret. Datoen for den seneste frost i foråret forventes forekomme tidligere med 5-10 dage i 2030 og 10-15 dage i 2050 over det meste af Europa (Trnka et al., 2011). En øget vækstsæson vil være særlig fordelagtigt under Nordeuropæiske forhold for afgrøder, der ikke er afhængig af at modne i løbet af sommeren, som fx græs og sukkerroer (Trnka et al., 2020). En længere og varmere vækstsæson kan også føre til introduktion af nye afgrøder, hvor især afgrøder som majs til modenhed og sojabønne kan

være aktuelle. En længere vækstsæson forventes at være særlig fordelagtig for afgrøder i Nordeuropa og kan føre til stigende udbytter, især hvis afgrøder og sorter tilpasses de ændrede forhold (Elsgaard et al., 2012; Olesen et al., 2012).

De stigende temperaturer vil fremme afgrødernes udvikling fra såning til blomstring, modenhed og høst. For kornafgrøderne vil det føre til tidligere blomstring og modenhed over hele Europa, også i Danmark (Olesen et al., 2012). Blomstringen i vinterhede forventes at blive fremskyndet med op til to uger frem til 2050, og datoen for modenhed forventes at blive yderligere fremskyndet, så perioden fra blomstring til modenhed forkortes. Denne forventede kortere kernefyldningsperiode vil føre til lavere udbytter i kornafgrøderne (Kristensen et al., 2011; Asseng et al., 2015). I nogle afgrøder, som fx kartofler, kan høje temperaturer reducere tilvæksten og dermed føre til lavere udbytter (Peng et al., 2021). En af de væsentligste tilpasninger til klimacændringer er forædling af sorter, der tidsmæssigt er bedre tilpasset til temperaturforholdene og kan udnytte vækstsæsonens længde (Semenov et al., 2014).

Et øget indhold af CO₂ i atmosfæren vil stimulere fotosyntesen hos planter, der har C3-fotosyntese, og det omfatter de fleste plantearter i Danmark med undtagelse af majs og *Miscanthus*, der har C4-fotosyntese. Omfanget af stimulering af fotosyntesen afhænger af afgrøde og vækstbetingelser (Wang et al., 2011). Der er formentlig muligheder for at øge den genetiske variation for at øge udbytter under øget atmosfærisk CO₂ (Ingvordsen et al., 2015). Stimuleringen er særlig stor i bælplanter, da øget tilgængelighed af kulhydrater stimulerer den biologiske kvælstoffiksering (Vadez et al., 2011). Højere CO₂ koncentration vil reducere stomatamodstanden hos alle plantearter og dermed øge planternes vandudnyttelse (Kruijt et al., 2008). Dette er af særlig stor betydning under tørre forhold, hvor en lavere transpiration vil forsinke effekter af tørke. Den overordnede effekt af øget CO₂ koncentration vil derfor være at balancere det udbyttefald som øget temperatur typisk giver i mange afgrøder (Makowski et al., 2015). Den øgede fotosyntese ved øget CO₂ koncentration giver ændringer i planternes sammensætning, især i form af en lavere kvælstofkoncentration i plantematerialet, hvilke også påvirker kvaliteten af udbyttet (Högy et al., 2012).

Modelberegninger af klimacændringernes effekter på udbytter i danske afgrøder og sædskifter viser generelt set stabile eller stigende udbytter for de fleste afgrøder under danske forhold (Doltra et al., 2014; Webber et al. 2018; Pullens et al., 2019). Vårsæd kan dog være særlig udfordret under de forventede klimacændringer (Doltra et al., 2014), hvilket dels skyldes at vårsæd har en kortere vækstsæson end vintersæd, og dels at vårsæd er mere følsom over for forsommertørke end vintersæd. Der har i de senere år været et stort fokus på at inkludere efterafgrøder i sædskifterne for at mindske kvælstofudledningen, og det har ført til et stigende behov i visse egne for dyrkning af vårsæd. Modelberegninger med en række forskellige klimamodeller for vinterhede i Danmark under klimacændringer viser, at udbyttet kan opretholdes, men at det vil kræve øget gødskning med kvælstof, bl.a. for at kompensere for effekten af øget nitratudvaskning (Öztürk et al., 2017). Disse beregninger af klimacændringers effekter på udbytter inddrager dog kun i meget beskednen omfang konsekvenser af øget forekomst af vejrekstremer og en øget årsvariation i hedebløjer, tørke

og oversvømmelser. Det må derfor forventes, at der selv for den generelt fordelagtige betingelser for afgrøder i Danmark, vil være en øget risiko for udbyttetab som følge af vejrekstremer.

3.1.2 Jordkvalitet

I nærværende notat fokuseres på emnerne "kulstof i jord", "jordpakning" og "erosion", som antages at være de væsentligste udfordringer i forhold til jordkvalitet i Danmark (Schjønning et al., 2009).

3.1.2.1 Kulstof

Dyrkningsjordens kulstofindhold har generelt set været faldende på de lerede jorde og ligget på et stabilt niveau for de sandede jorde over de seneste 4 årtier (Heidmann et al., 2001; Taghizadeh-Toosi et al., 2014). Tabet af kulstof på de østdanske lerbjorde forklares med ændringer i dyrkningspraksis i form af mindre andel af græs i sædskiftet, fjernelse af halm og mindre husdyrgødning. Observerede klimaforandringer inden for samme 40-årige periode (1,8 grader øget middeltemperatur og 60 mm øget nedbør) (se kapitel 1) har med stor sandsynlighed også påvirket kulstofindholdet i den dyrkede jord, men klimaforandringerne er ikke blevet relateret direkte til ændringerne i kulstofindholdet. Klimaforandringerne påvirker i betydelig grad både kulstoftilførsel og -fratagelse. Øget temperatur og udvidet vækstsæson vil alt andet lige give bedre betingelser for plantevæksten for både hoved- og især efterafgrøde (dvs. øget biomasseproduktion) og dermed øge kulstoftilførslen til jorden. Dette vil blive modvirket af øget kulstofomsætning og dermed kulstoffratagelse. Smith et al. (2005) simulerede, at øget biomasseproduktion i et varmere klima ville opveje effekten af øget nedbrydningshastighed. I et senere studie simulerede Wiesmeier et al. (2016), at klimaforandringer ville resultere i et tab af kulstof i perioden 2000-2095 for tyske jorde fra Bayern på 11-16% ved uændret kulstoftilførsel og 3-8% ved 20% øget kulstoftilførsel. Om klimaforandringerne resulterer i et faldende kulstofindhold vil således stærkt afhænge af om de forbedrede vækstbetingelser i et varmere klima – særligt for plantevækst i vinterhalvåret – udnyttes fuldt ud til at øge biomasseproduktionen. Et klimabetinget fald i kulstofindholdet forventes under danske forhold at have størst effekt for jordkvaliteten på de lerede jorde, som allerede har et lavt og faldende kulstofindhold. Her forventes i så fald, at kulstoffabet forårsager øgede problemer med dårlig strukturstabilitet og evne til at smuldre og danne et godt såbed (Jensen et al., 2019;2020; Obour et al., 2019; Qi et al., 2022). Dårligere strukturstabilitet øger risikoen for erosion og tilslemning – som har afledte problemer for både planteproduktion og miljø (Schjønning et al., 2009). Endvidere forventes et faldende kulstofindhold at reducere jordens vandholdende evne og vandinfiltrationsevne.

3.1.2.2 Jordpakning

Jordpakning – primært forårsaget af kørsel med tunge maskiner - er et betydeligt problem under danske forhold på grund af pakningsfølsomme jorde, vådt klima og brug af tunge maskiner (Schjønning et al., 2019). Den observerede og forventede øgede vinter nedbør vil alt andet lige øge risikoen for jordpakning og effekten af kørsel med tunge maskiner på våd og dermed pakningsfølsom jord (Schjønning et al., 2019).

Det vil give anledning til pakning i både over- og underjord, hvoraf særligt sidstnævnte er alvorligt, da pakningsskader i underjorden er meget vanskelige at udbedre (Schjønning et al., 2015; Pulido-Moncada et al., 2020). Jordpakning giver anledning til øgede problemer med afdræning, tab af lattergas, hæmmet rod-vækst og planteudvikling samt erosion (Keller et al., 2019; Schjønning et al., 2019; Petersen og Abrahamsen, 2021; Pulido-Moncada et al., 2022). En dårligere afdræning som følge af pakning vil mindske tidsvinduet for optimal planteetablering (Obour et al., 2018). I værste fald kan det betyde mislykket etablering. Der er risiko for, at der opstår en ond spiral, hvor kørsel på våd jord om vinteren forringer afdræningsevnen og dermed forstærker effekten af klimaforandringer i forhold til afdræning og de afledte problemer i forhold til planteproduktion og miljø.

3.1.2.3 Erosion

Risikoen for vanderosion er generelt set lav under danske forhold (Heckrath et al., 2020; Onnen et al. 2019), men kan have betydelige miljømæssige konsekvenser, som følge af tab af særligt fosfor. Klimaforandringerne vil øge risikoen for vanderosion som følge af øget nedbør og ikke mindst øget forekomst af intensive regnhændelser -dvs. erosiviteten (R-faktor i RUSLE erosionsmodellen, Renard et al., 1997) øges. Samtidig forventes jordens sårbarhed – erodibiliteten (K faktor i RUSLE) - over for både vind og vanderosion også at øges som følge af tab af kulstof og ikke mindst øget forekomst af jordpakning (Jensen et al., 2019; Daraghmeh et al., 2019), som også angivet oven for. Intensiv jordbearbejdning øger generelt set også jordens erodibilitet ved at nedbryde stabile makroaggregater (Daraghmeh et al., 2019). Lav erodibilitet er således kendetegnet for jord, der har et passende højt kulstofindhold og er fri for pakkede områder (hjulspor, foragre mm) eller jordlag med lav vandledningsevne, som opsummeret af Schjønning et al. (2009). Den klimabetingende øgede risiko for jordpakning i vinterhalvåret vil alt andet lige øget behovet for intensiv jordbearbejdning og dermed risikoen for vind- og vanderosion umiddelbart efter jordbearbejdningen. Det gælder særligt, hvor der anvendes tunge maskiner til høst om efteråret eller udkørsel af husdyrgødning om foråret.

Risikoen for både vind og vanderosion er desuden afhængig af afgrøde- og jorddækket (C og P faktorer i RUSLE). Jo større dækningsgrad des mindre erosionsrisiko. Længere vækstsæson og varmere vintre forbedrer betingelserne for plantevækst i vinterhalvåret, hvilket muliggør en større grad af dække med levende planter i denne følsomme periode for vanderosion (Schjønning et al., 2009). Jorddækket med planterester afhænger af om planteresterne (typisk halm) fjernes og af jordbearbejdningsintensiteten. Pløjefri dyrkning og efterladelse af planterester giver normalt en effektiv beskyttelse mod vind- og vanderosion (Skaalsveen et al., 2019; Munkholm og Sibbesen, 1997). Pløjefri dyrkning – og særligt direkte såning vil ligeledes effektivt beskytte mod jordbearbejdningserosion, som vurderes at være den væsentligste erosionsform under danske forhold (Schjønning et al., 2009).

3.1.2.4 Biodiversitet i jorden

Jordbundsfaunaen påvirkes negativt af tørke og positivt af stigende nedbør (Peng et al., 2022). For naturlige økosystemer har Blankinship et al. (2011) vist, at de positive virkninger af forhøjet CO₂ på jordbundsorganismer falder med tiden, hvorimod den negative effekt af opvarmning og positive effekt af nedbør intensiveres med tiden. Mens klimacændringer således kan sætte sine spor, er det imidlertid selve landbrugspraksis, der har afgørende betydning for diversitet og den levende biomasse (Yin et al., 2022). Måden hvorpå landbruget imødegår klimaforandringerne er vigtigere for jordbundsøkosystemet, end selve klimaforandringerne. Intensivering fører til mindre fødemængder til nyttedyrene i form af planter, rødder, førne, organisk gødning og tilførte organiske spildprodukter og vil være negativt for jordbundsorganismerne. Fører klimaforandringer til intensivering, vil det således forringe jordbundssundheden mht. økosystemtjenester leveret af jordbundsmikroorganismer og jordbundsdyr.

De foregående afsnit om kulstofindhold og jordpakning (3.1.2.1 og 3.1.2.2) berører faktorer af stor betydning for jordbundens dyreliv. Ved vedvarende tab af kulstof i jorden vil biodiversiteten i jordbunden falde, men tabet vil formentligt blive imødegået af ændringer i dyrkningssystemerne. Den forventede indsats for at øge jordens kulstofindhold vil have en positiv effekt ved at danne en buffer mod tørkestress og bidrage både til føde og jordbundens habitatkvalitet. Jordbunden som levested for jordbundsorganismer er nemlig bestemt af jordbundsstrukturen, humus og organisk materiale og jordbearbejdning er afgørende: det er deres "kost og logi". Imødegåelse af tørkeperioder og perioder med vandmætning i jordbunden via nye dyrkningssystemer vil være en fordel for biodiversiteten og mildne effekterne af klimacændringerne.

Fremtidens dyrkningssystemer vil have en afgørende betydning for jordbundslivet og dermed de processer det bidrager med. Der vil komme ændringer af dyrkningspraksis, gødskning, jordbearbejdning, dræning, vanding og plantebeskyttelse som beskrevet af Olesen et al. (2022), og forudsigelsen om større arealer med flerårige afgrøder (Olesen et al., 2022) vil have en markant effekt på diversitet og funktion af jordbundsorganismerne.

3.1.3 Ukrudt, sygdomme og skadedyr

3.1.3.1 Ukrudt

Ukrudt konkurrerer med afgrøden om lys, vand og næringsstoffer, og hvis ukrudtsbekæmpelsen er utilstrækkelig, reduceres udbyttet. Ukrudt kan endvidere forårsage høstproblemer og øge udgifterne til tørring af afgrøden, og forekomst af ukrudtsfrø i den høstede afgrøde kan forringe kvaliteten af afgrøden. Fremtidige klimacændringer såsom højere temperaturer og CO₂ indhold vil kunne have en effekt på ukrudtsfloraens sammensætning, konkurrencen imellem afgrøde og ukrudt samt herbicidernes effekt på ukrudtet (Ziska et al., 2019).

Tidligere var det en udbredt opfattelse, at den genetiske variation i en ukrudtspopulation er stor, og at ukrudsplanter kunne beskrives som havende "general-purpose genotypes" (Baker, 1994). Med dette udgangspunkt kan man forvente, at ukrudsarter vil være bedre til at tilpasse sig klimaændringer end afgrøderne, hvor den genetiske variation som regel er lav. I de senere år er den antagelse blevet udfordret, idet resultaterne fra undersøgelser af den genetiske variation i ukrudtspopulationer, er meget variable (Neve et al., 2009). Man kan dog antage, at den genetisk variation vil være stor i populationer af ukrudsarter, som er fremmedbestøvere, hvor frøbanken er stor, og hvor der fra tid til anden er introduktion af individer fra andre områder. Modsat kan den genetiske variation være lille i populationer, som er selvbestøvere. Eksempler på førstnævnte er ukrudtsgræsser som agerrævehale (*Alopecurus myosuroides*) og alm. rajgræs (*Lolium perenne*).

Klimaændringerne de sidste ca. 50 år har sandsynligvis allerede påvirket nutidens ukrudtspopulationer, men der er meget lidt dokumentation for denne påstand. Et eksempel er et studie med flyvehavre, hvor planter dyrket fra frø indsamlet i 1960'erne blev sammenlignet med planter dyrket fra frø indsamlet i samme område i 2014 ved 302 og 402 $\mu\text{mol mol}^{-1} \text{CO}_2$, som var niveauet i atmosfæren i henholdsvis 1960'erne og 2014 (Ziska, 2017). Forsøget viste, at planterne fra frø indsamlet i 2014 responderede på det højere CO_2 indhold i form af større bladareal og -vægt, mens det ikke var tilfældet for planter fra frø indsamlet i 1960'erne. Tilsvarende var planterne fra frø indsamlet i 2014 mere konkurrencestærke over for alm. havre ved det høje CO_2 niveau end ved det lave CO_2 indhold, hvilket indikerer, at der sket en akklimatisering eller selektion til de ændrede klimaforhold i flyvehavrepopulationen.

Der er udført en række studier, hvor man med baggrund i de nuværende klimaforhold har forsøgt at fremskrive udbredelsen af udvalgte ukrudsarter ved forskellige fremtidige klimascenarier ("bioclimatic envelope modelling"). Kun få af disse undersøgelser omfatter Nordeuropa. Hyvönen et al. (2012) modellerede udbredelsen af 25 udvalgte tokimbladede ukrudsarter frem til perioden 2051-2080, bestemt af to klimascenarier, som IPCC arbejdede med i 2001 (IPCC, 2001). De fandt ved begge klimascenarier, at ca. halvdelen af ukrudsarterne vil øge deres udbredelse, mens udbredelsen af den anden halvdel ville reduceres. En af de arter, som vil øge sin udbredelse signifikant, er opret amarant (*Amaranthus retroflexus*), som i dag er en almindelig forekommende ukrudsart i Central- og Sydeuropa. Mht. antallet af ukrudsarter fandt Hyvönen et al. (2012), at det ville reduceres i Sydeuropa og øges i det nordligste Europa. For det område, som Danmark ligger i, vil antallet være uændret, dvs. ukrudsfloraen vil ændre sammensætning men antallet af arter vil være uændret.

Ovennævnte modelbetragtninger kan give en indikation om, hvorvidt en ukrudsart kan blive et fremtidigt problem. Men der er en række andre faktorer, som i endnu højere grad påvirker en ukrudsarts sandsynlighed for at etablere sig, som f.eks. dyrkningsforholdene og ikke mindst konkurrencen med afgrøden. Planter fotosyntese karakteriseres enten som C_3 eller C_4 fotosyntese. Antagelsen er, at planter med C_3 fotosyntese vil have større fordel af stigende CO_2 koncentrationer end planter med C_4 fotosyntese, og det er også hvad

en række forsøg med dyrkning af planter ved forskellige CO₂ koncentrationer har vist (Ziska, 2001, 2019). Situationen er imidlertid en anden, hvis flere klimacændringer sker samtidigt som f.eks. højere CO₂ indhold og højere temperaturer eller tørkestress, hvor konkurrenceforholdet kan være anderledes (Alberto et al., 1996; Valerio et al., 2011). I Danmark har alle afgrøder (med undtagelse af majs) og hovedparten af ukrudtsarterne C₃ fotosyntese, dvs. både afgrøder og ukrudtsarter vil favoriseres af højere CO₂ indhold i atmosfæren. Flere af de ukrudtsarter, der er kommet til i de senere år, som hanespore (*Echinochloa crus-galli*), grøn skærmaks (*Setaria viridis*), kinajute (*Abutilon theophrastis*) og alm. pigæble (*Datura stramonium*) er C₄ planter, som typisk favoriseres af højere temperaturer i forhold til C₃ planter.

Et eksempel på, hvad afgrødekongurrence kan betyde for den potentielle udbredelse af en ukrudtsart er agerrævehale i Storbritannien. Selv om de ændrede klimaforhold i 2046-2065 og 2080-2099 vil gøre det muligt for agerrævehale at blive mere udbredt i det nordlige England og sydlige Skotland, viste modelberegninger, at det ikke vil påvirke vinterhvedeudbyttet negativt. Det skyldes, at mere udbredt forårstørke i fremtiden vil begunstige vinterhvede med et dybt rodnet i forhold til agerrævehale med et mere overfladisk rodnet (Stratonovitch et al., 2012). Tilsvarende konkluderede Hyvönen og Ramula (2013), at selv om en temperaturstigning på 3°C vil betyde, at opret amarant og hanespore vil være i stand til at etablere sig i Finland, så vil det sandsynligvis ikke ske, fordi de ikke vil kunne konkurrere med afgrøden (byg og majs) ved kontinuerlig dyrkning af afgrøder.

En anden effekt af klimacændringerne er, at ukrudtsarternes følsomhed over for herbiciderne påvirkes. For en række ukrudtsarter såsom agertidsel (*Cirsium arvense*), alm. kvik (*Elymus repens*) og hvidmelet gåsefod (*Chenopodium album*) er der observeret en nedsat effekt ved forhøjede CO₂ indhold sammenlignet med de nuværende niveauer (Ziska, 2004). En mulig effekt af stigende CO₂ indhold og stigende temperaturer er, at vokslagets sammensætning og tykkelse ændres, hvilket kan påvirke bladoptagelsen af herbicider. Mere konkret har en række studier vist, at et øget CO₂ indhold fremmer rodvæksten mere end skudvæksten hos flerårige ukrudtsarter såsom agertidsel, ager-svinemælk (*Sonchus arvensis*) og agersnerle (*Convolvulus arvensis*) (Ziska et al., 2011). Dette øger forholdet imellem rod- og skudbiomassen, hvilket fører til en fortynding af herbiciderne i rødderne, da afsætningen på bladene ikke forøges. Dette kan forklare den nedsatte effekt over for flerårige ukrudtsarter. En anden mulig effekt af klimacændringerne er, at enårige ukrudtsarters vækstrytmen ændres, og at ukrudtsplanterne vil være i de tidlige og mest følsomme stadier i kortere tid, dvs. det optimale tidsrum for sprøjtning er kortere.

Der foreligger kun viden om få herbiciders effekt ved ændrede klimaforhold. Man kunne formode, at herbicider, som virker ved at blokere for fotosyntesen vil fremmes af klimaforhold, som stimulerer fotosyntesen. Omvendt forventes et øget CO₂ indhold at resultere i et lavere proteinindhold (Taub et al., 2008), og man vil derfor kunne forvente en nedsat effekt af herbicider, som blokerer for aminosyresyntesen som f.eks. glyphosat og ALS-hæmmere. Mange af de undersøgelser, hvor der er fundet en nedsat effekt, er netop udført med glyphosat.

3.1.3.2 Svampesygdomme

De største tab som følge af svampesygdomme i dansk landbrug er i korn, kartofler og grønsager. Klimaet er en af de parametre, som har størst indflydelse på angrebsgraden sammen med planternes sygdomsresistens. Tabel 3.1 viser en oversigt over de almindeligste afgrøder i Danmark og deres aktuelle svampe skadegørere.

Tabel 3.1: De vigtigste landbrugsafgrøder og svampesygdomme som kan angribe afgrøderne. Desuden er listet den typiske indsats med fungicider i konventionelle afgrøder. Sygdommene er rangordnet efter relativ betydning (delvis baseret på Bekæmpelsesmiddelstatistikken).

Afgrøde	Mest aktuelle skadegørere	Typisk antal sprøjtninger i afgrøden per sæson
Vinterhvede	Hvedegråplet, gulrust, meldug, brunrust, hvedebladplet, goldfodsyge, knækkefodsyge, havrerødsot	1-3
Vinterbyg	Bygrust, skoldplet, bygbladplet, meldug, Ramularia bladplet, havrerødsot	1-2
Vårbyg	Bygrust, bygbladplet, skoldplet, meldug, Ramularia bladplet	1-2
Rug og triticale	Meldug, gulrust, brunrust, hvedegråplet, hvedebrunplet, skoldplet, havrerødsot, goldfodsyge, knækkefodsyge	1
Raps	Stor knoldbæger svamp, alternaria, kålbrok	1-2
Sukkerroer	Meldug, rust, ramularia bladplet og cercospora bladplet	1-2
Kartofler	Kartoffelskimmel, alternaria bladplet	2-14
Ærter	Gråskimmel, ærteskimmel	0-2
Hestebønner	Rust, chokoladeplet, Vikkeskimmel	0-2
Frøgræs	Rustsygdomme (kronrust, sortrust mfl), meldug, og andre bladplet-sygdomme	0-2

Plantesygdomme er dybt påvirket af miljøet. En modtagelig vært vil ikke blive inficeret med et virulent patogen, hvis miljøforholdene ikke er befordrende for sygdom. Ændringen i CO₂-koncentrationer, temperatur og vandtilgængelighed kan have positive, neutrale eller negative effekter på sygdomsudvikling, da hver sygdom kan reagere forskelligt på disse variationer. Hvordan de kombinerede virkninger af flere miljøforhold påvirker specifikke angreb af plantesygdomme er fortsat uafklaret for de fleste skadegørere og kræver specifikke undersøgelser af plante-patogen-interaktioner. En generel effekt i forhold til at modstå alvorlige angreb af nye skadedyr og sygdomme er også at sikre diversitet i marker og mellem marker.

Planter har veludviklede forsvarssystemer overfor plantepatogener. Flere undersøgelser peger på at disse forskellige forsvarssystemer (RNA baseret PAMP- triggered, eller hormonelt reguleret) også er påvirket af ændringer i miljøforhold som temperatur- og fugtighedsforhold (Velásquez et al., 2019). Ændringer som

ikke entydigt er bestemt, men som vurderes vigtige i relation til fremtidig planteforædling og udvælgelse af sorter med god sygdomsresistens.

Generelt vurderes det at mildere vintre vil øge risikoen for, at flere sygdomsfremkaldende patogener vil kunne overvintre. Det er således kendt, at gulrust (*Puccinia striiformis*), brunrust (*Puccinia triticina*) og byggrust (*Puccinia hordei*) i visse vintre helt kan forsvinde på grund af kraftig frost, mens de under milde vintre vil overleve i betydeligt omfang og give grobund for nye epidemier i næste vækstsæson (Glad-ders et al., 2007). Mulighederne for en dæmpning af smittepotentiale/inokulum forventes at være mindre, nu hvor vintrene er blevet mildere. Mildere vintre betyder også, at flere svampe vil gennemløbe flere generationer i løbet af vinterhalvåret og dermed oparbejde et større smittepotentiale i den tidlige vækstsæson, hvor afgrøderne generelt er mest følsomme. Dette er f.eks. tilfældet for hvedegråplet (*Zymoseptoria tritici*).

Forårssæsonen er den vigtigste periode i forhold til svampesygdommenes udvikling og opbygning af skadelige effekter på afgrøderne. I de senere år har man hyppigt set tørre perioder i forårs månederne (april, maj). En fortsættelse af disse scenarier kan medvirke til at mindske risikoen for svampesygdomme, som det har været tilfældet i de seneste år i f.eks. 2018 og 2022. Især svampesygdomme der fremmes af fugtige perioder såsom hvedegråplet, skoldplet (*Rhynchosporium commune*) og bygbladplet (*Pyrenophora teres*) kan dæmpes af et tørt forår, da længere perioder med bladfugt er afgørende for, at disse patogener kan spredes og opformeres. I Frankrig er der lavet specifikke modelkørsler, som viser risikoen for hvedegråplet (septoria) formodentlig mindskes i fremtiden som følge af varmere og tørrer somre, (Gauche et al., 2013), om det samme vil være tilfældet i Danmark vil afhænge meget af især nedbørsmønsteret i maj og juni.

Som eksempel på svampe der påvirkes af øgede CO₂ niveauer kan nævnes aksfusarium i hvede forårsaget af *Fusarium graminearum*. Modtageligheden har i undersøgelser vist en stigning i alle typer af hvedesorter ligesom svampen viste en større grad af virulens (aggressivitet), hvilket resulterede i mere alvorlige angreb (Vary et al., 2015). Også længere perioder med fugtige forhold vil øge risikoen for kraftigere angreb af *Fusarium graminearum* og de deraf afledte indhold af mycotoxiner i kornet (Cowger et al., 2009).

Aksfusarium som vi kender det i Danmark består af et kompleks af fusariumsvampe, hvor især *F. graminearum* er kendt for at fremmes af højere temperaturer og øgede CO₂ niveauer. Denne art er specielt uønsket på grund af dens betydelige mycotoxinproduktion. Angreb af fusariumsvampe i korn er også øget i takt med, at arealet med majs er steget, idet svampen kan overføres via planterester af majs til den efterfølgende vinterhvedeafgrøde (Nielsen et al., 2014). Betydning af aksfusarium i hvede skal således ses i sammenhæng med sædskiftet, herunder hvor meget arealet med især majs og korn som forfrugt er øget, forhold der formodentlig har større betydning for risikoen for angreb end de specifikke klimacændringer. Indtil videre har vi ikke kunnet dokumentere en egentlig stigning i problemerne med mycotoxin i danske hvedeprøver (Landsforsøgene, 2021), Kun i enkelte tilfælde har kornprøver fra 2003 til 2021 overskredet de grænseværdier som er fastsat i forhold til anvendelse som foder og human ernæring.

Brunrust (og undertiden sortrust) er ligeledes kendt som et betydeligt problem i den varmere del af Europa, og ses normalt kun hos i Danmark i år med meget varme somre. Hvis temperaturen stiger om sommeren vil angrebene af disse sygdomme forventeligt øges. Ind til videre har man hyppigst set angreb af brunrust på Lolland, mens det er mere sporadisk i resten af landet.

Det gennemsnitligt merudbytte for svampebekæmpelse i kornforsøg opgøres årligt og peger ikke på at der har været et stigende niveau af respons og dermed formodentlig heller ikke er et decideret øget niveau af skadelige plantesygdomme i vores kornafgrøder (Jørgensen et al., 2022).

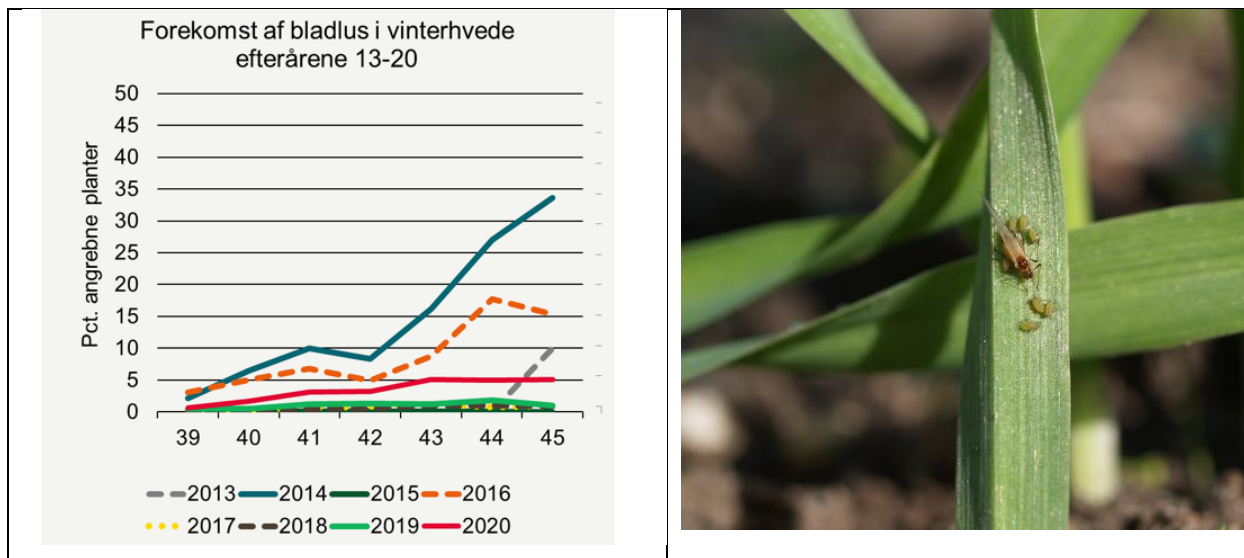
Kartoffelskimmel (*Phytophthora infestans*) overlever i Danmark enten ved smitstof i knolde i jorden eller ved egentlig jordsmitte i form af oosporer. Især oosporesmitte er i de senere år set mere hyppigt end tidligere. Mildere vintre og varmere forsomre kan øge betydningen af knold- og jordsmitte og føre til tidligere angreb. Varmere somre kan medvirke til kraftigere epidemier af kartoffelskimmel og kan favorisere bl.a. kartoffelbladplet (*Alternaria spp.*). Sidstnævnte har i de senere år haft større økonomisk betydning (Abuley & Nielsen, 2019). Et modelstudie fra Skotland har vist at klimacændringer kan øge risikoen for kartoffelskimmel først på vækstsæsonen mens risikoen vil mindske senere på sæsonen (Skelsey et al., 2016). Det er også sandsynligt at kartoffelskimmel er blevet mere hyppig pga af at de specialiserede avlere dyrker mere intenst med kortere afstand i tid og rum mellem kartoffelafgrøder.

I sukkerroer har en temperaturstigning hen over sommeren betydning for udbredelsen af *Cercospora* (*Cercospora beticola*) og *Ramularia* bladplet (*Ramularia beticola*). Disse er begge kendt for at trives bedst ved højere temperaturer og er derfor almindeligt forekommende i varmere områder af Europa. Især *Cercospora* bladplet er meget tabsgivende under varmere forhold og kræver store indsatser med fungicider for at blive tilstrækkeligt bekæmpet. I de senere år er der set hyppigere forekomst af *Cercospora* bladplet også i Danmark (Heick et al., 2021), men dog stadig ikke på niveau med de angreb vi ser i central Europa.

Der er i litteraturen flere eksempler på at svampesygdomme har tilpasset sig til ændrede klimaforhold, hvilket er en slags 'dark horse' i forhold til klimacændringernes mulige konsekvenser på lang sigt. Bl.a. har man set at gulrust har spredt sig til varmere områder i USA (hvedebæltet) og Vestaustralien, hvor den tidligere var enten fraværende eller uden reel betydning (Milus et al., 2009), hvilket er et slående eksempel på hvor uforudsigeligt plantesygdomme kan være.

De varmere efterår og mildere vintre har allerede haft betydning for hyppigere angreb af havrerødsot i vintersædsafgrøder. Havrerødsot er en virussygdom, som spredes via bladlus. De mildere efterår gør at bladlus er aktive i længere perioder om efteråret og kan dermed øge risikoen for angreb (Fig. 3.1). Som følge af den øgede risiko er der iværksat et registrering-net via SEGES, samt lavet modelkørsler der baseret på temperatursummer hjælper landmændene med at beslutte hvornår der er behov for kemisk bekæmpelse af bladlus for at minimere risikoen for angreb. Tidlig såning af vintersæd er et virkemiddel i forhold til N-udvaskning. Det er relativt udbredt i konventionel dyrkning, de år hvor det er muligt. Det er forventeligt at

tidlig såning alene vil fremme svampesygdomme som havrerødsot, og på den måde et kendt eksempel på at forskellige reguleringer kan trække andre problemstillinger i uønskede retninger.



Figur 3.1: Eksempel på årlige variation i forekomsten af bladlus i vinterhvede bedømt i efteråret. Data fra konsulenternes registreringsnet. Foto: Ghita C. Nielsen

3.1.3.3 Skadedyr

Insekter er en stor og diverse gruppe af leddyr, hvoraf flere arter optræder som økonomisk betydelende skadedyr på friland i Danmark. De er vekselvarme dyr, hvis vækst og formering generelt vil blive begunstiget af et varmere klima, særligt på vore breddegrader – i mindre grad mod syd (Lehmann et al., 2020). De insekter, som er skadedyr, er karakteriseret ved at have gode evner til opformering og spredning.

Der findes forskning i klimaforandrings indflydelse på de insektarter, som vi kan forvente vil udgøre et voksende problem i Danmark, da de allerede har økonomisk betydning her eller andre steder (Andrew et al., 2013). Således kan man i litteraturen som regel finde insekternes temperatur-respons i form af udviklingsrate og frugtbarhed (Lehmann et al., 2020). Imidlertid indgår arterne i komplekse økologiske samspil, som også vil være påvirkede af klimaforandringer. De andre arter (dyr, planter, patogener) er som regel mindre velbeskrevne, bortset fra enkelte naturlige fjender af skadedyr, da de ikke har direkte økonomisk betydning; de er blot en del af biodiversiteten. Alt i alt gør den manglende viden om skadedyrenes økologiske samspil det usikkert, hvordan forskellige insektarter vil reagere på klimaforandringer (Lehmann et al., 2020), og det vil ikke være muligt at sige, hvilke skadedyr som vil give os de største problemer, og hvornår de vil indtræffe i f.eks. Danmark. Det vil være nødvendigt først at fremskaffe mere grundig viden om skadedyrenes økologi. Eksempelvis kan klimaforandringer forskyde planter og dyrs fænologi (dvs. deres forekomst året rundt), hvorved eksisterende samspil kan brydes og økosystemet destabiliseres; insekter er (sammen med fisk) den dyregruppe, som i højeste grad vil forskyde sin fænologi (Thackeray et al., 2016).

Man kan med sikkerhed sige, at risikoen for, at nye skadedyr etablerer sig i Danmark, vil stige med tiden, efterhånden som klimaforandringerne tager til; samtidigt vil hyppigheden af alvorlige insektangreb stige. Klimascenariernes fremskrivning af temperatur, nedbør og solindstråling (som forventede gennemsnit og ekstremer) lader sig imidlertid ikke umiddelbart kombinere med insektarternes respons, bestemt i laboratoriet under eksperimentelle klimaforhold eller ved feltstudier under de eksisterende klimaforhold; dette skyldes den ringe viden om skadedyrenes økologiske samspil (Lehmann et al., 2020).

Insektpopulationernes geografiske udbredelse vil ændres med klimaforandringerne; de mest mobile (herunder skadedyr) vil flytte sig med, mens mindre mobile arter (herunder mange af skadedyrenes naturlige fjender) risikerer at uddø, særligt i landskaber som det danske med en lav forekomst af naturlige habitater (Bebber et al., 2013). Klimaforandringer kan generelt føre til, at eksisterende biologisk bekæmpelse af skadedyr sættes ud af spil; men der foreligger meget lidt forskning på området (Eigenbrode et al., 2015).

Skadedyrenes høje formeringsrate giver dem en genetisk fordel; de forekommer allerede i forskellige racer rundt om i Europa, og nogle vil kunne tilpasse sig de ændringer, som klimaforandringer vil medføre. Således har man påvist, at coloradobillen har ændret sin fysiologi under sin spredning nordpå i Europa, hvor den har tilegnet sig forbedrede egenskaber for vinterdvale (Lehmann et al., 2014). Det er ikke muligt at forudsige forskellige insektarters potentiale for tilpasning til klimaforandringer, uden at have undersøgt dette potentielt eksperimentelt; der er et stort forskningsbehov for sådanne undersøgelser. Man ville således risikere at foretage en fejlslutning, hvis man sagde om en art, at den ikke vil kunne overvintre i Danmark, da vinteren er for kold og våd; det har jo vist sig, at coloradobillen kan omgå en sådan barriere ved at udvikle en egenskab til at gå i vinterdvale. Men kolde vintre er faktisk en barriere for mange insekter ind til videre (Bale and Hayward 2010). Disse arter har i modsætning til coloradobillen (og visse andre arter; se Merilä and Hendry 2014) ikke kunnet tilpasse sig vinterkulden; mildere vintre vil således alt andet lige forøge deres chance for at overvintre i Danmark.

Truslen om stigende udbyttetab forårsaget af insekter kan imødegås ved at forøge diversiteten i landbrugsdriften. Det drejer sig om diversitet i sædskiftet (variation i afgrøder; se Wan and Yang 2016) og diversitet i bekæmpelsesmidlerne (insekticider, insektresistente sorter, herunder genmodificerede sorter). Desuden kan landskabet som helhed gøres mere modstandsdygtigt (ecological services) ved at øge dets indhold af naturlige biotoper og samtidig øge biodiversiteten (Bebber et al., 2013).

De eksisterende monitoringssystemer for skadedyrsangreb bør udvides til at omfatte flere skadedyr, efterhånden som de dukker op i fremtiden. Sådanne systemer kan anvendes til målrettet bekæmpelse af skadedyrene, hvad enten det er den del af den landbrugsmæssige drift, eller det handler om inddæmning af lokale skadedyrsangreb, hvor dette skulle være muligt (Wan and Yang 2016).

Forventede effekter på hjemmehørende arter: I Danmark er bladlys blandt de mest betydende skadedyr. Det handler om havrebladlus (*Rhopalosiphum padi*), kornbladlus (*Sitobion avenae*), bededbladlus (*Aphis*

fabae) og ferskenbladlus (*Myzus persicae*). I Danmark er bladlus de fleste år holocykliske, dvs. de kommer igennem vinteren i ægstadiet. Sydpå er de samme arter overvejende anholocykliske, dvs. de findes som voksne hele året rundt. Dette skifte i livscyklus vil i sig selv give bladluspopulationerne større chance for hurtigt at komme i gang om foråret med vækst og spredning, hvilket igen vil øge risikoen for tabsgivende angreb i markerne. Ud over de direkte effekter på afgrøderne har bladlus også vigtige afledte effekter, da de fungerer som vektorer for virus, der forårsager sygdomme såsom havrerødsot.

De vigtigste skadedyr i vinterraps er glimmerbøsser (*Meligethes aeneus*), men de senere år i stigende grad også jordlopper (*Alticini* sp.). En forøgelse af temperaturen vil med stor sandsynlighed øge problemet i forårsmånederne med begge skadedyr.

Coloradobillen (*Leptinotarsa decemlineata*), som i Danmark endnu kun optræde sporadisk i Sønderjylland og på Sydfyn, er et alvorligt skadedyr på kartofler. Da den befinder sig på sin nordlige udbredelsesgrænse i Europa, og da den har en god spredningsevne, må man forvente at den vil sprede sig til hele landet. Det vides dog ikke, om dens begrænsede udbredelse i Danmark skyldes en direkte indvirkning af temperaturen, eller om andre forhold begrænser den.

For majs er de nuværende skadedyrsproblemer minimale. Majshalvmøllet (*Ostrinia nubilalis*) har ligesom coloradobillen en begrænset udbredelse i dag (Sønderjylland og Sydfyn), og den vil have de samme muligheder for at brede sig.

Forventede effekter på sydlige arter, herunder karantæneskadedyr: Skadedyr, som lige nu findes syd for os, må forventes at øge deres udbredelse nordpå mod Danmark som følge af klimaforandringer (Bebber et al., 2013). Majsrodbillen (*Diabrotica vertifera*) er et betydende skadedyr i det sydlige og centrale Europa, men er endnu ikke fundet i Danmark. I Danmark vil den som sydpå kunne forårsage markante udbyttetab i majs. Larverne ødelægger majsplanternes rodsystem og hæmmer dermed planternes vandtransport samt, samtidigt med at de voksne biller forstyrrer bestøvningen og dermed hæmmer udviklingen af kerner i kolben.

Blandt karantæneskadegørerne, som kan indvandre sydfra, finder vi japanbillen (*Polonia japonica*), der har etableret sig i det nordlige Italien. Billen har mere end 300 forskellige plantearter på menukortet. Som skadedyr i Danmark vil den forstyrre produktionen af mange forskellige landbrugs- og gartneriafgrøder. Kartoffeljordloppen (*Epitrix* sp.) er ligeledes en karantæneskadegører med en endnu begrænset udbredelse i Europa (Spanien og Portugal). Den er et alvorligt skadedyr på kartofler. Til dato er der 250 karantæneskadegørere på EU's liste, hvoraf flere er potentielle skadedyr i landbrugs- og væksthushusholdninger for Danmark (Landbrugsstyrelsen, 2022). De vil alle kunne ændre deres globale udbredelse som følger af klimaforandringer og utilsigtet spredning med menneskelig hjælp.

3.1.3.4 Konklusion

Samlet set vurderes klimacændringerne at resultere i stigende problemer med skadegørere og et større behov for bekæmpelse. Klimacændringer vurderes at øge behovet for bekæmpelse af sygdomme og skadedyr mere end for ukrudt. For at imødegå disse trusler er det vigtigt at opretholde monitoringsystemer for skadegørere, da de vil gøre det muligt at målrette bekæmpelsen. Generelt vil et mere divers landskab og en mere divers landbrugsdrift forsinke skadegøreres spredning og opformering og derved mindske risikoen for skadegørerudbrud.

3.2 Husdyrproduktion

Forfattere: Christian Friis Børsting, Tofuko Woyengo, Jan Tind Sørensen, Britt Henriksen, Henrik Callesen, Morten Dam Rasmussen, Trine Michelle Villumsen

Fagfællebedømmer: Søren Østergaard

Dyr i produktionslandbruget har gennem mange generationer været avlet efter parametre såsom højere ydelse, højere tilvækst og bedre fodereffektivitet. Dette har medført at nutidens produktionsracer har et højt stofskifte og dermed en høj varmeproduktion, som har medvirket til at gøre produktionsdyrene mindre tolerante over for varmestress (Hansen, 2007). Dette har man delvis forsøgt at kompensere for ved fysisk tilpasning af dyrenes omgivelser såsom isolering og regulering af ventilation i stalde, overbrusning og ændret fodring. Med udsigt til mere ekstremt vejr som følge af klimaforandringer, herunder flere dage med høje temperaturer, evt. kombineret med højere luftfugtighed, vil der kunne forventes flere dage årligt med varmestress hos produktionsdyrene. Dette vil udover at påvirke dyrevelfærd og -sundhed også påvirke produktionsegenskaber såsom tilvækst, fodereffektivitet, mælkeydelse og reproduktionsresultater negativt (Renaudeau et al., 2012, Baumgard & Rhoads, 2013, Polsky & von Keyserlingk, 2017).

3.2.1 Dyrevelfærd og -sundhed

Klimacændringer vil kunne påvirke husdyrenes velfærd både direkte f.eks. via varmestress (metaboliske forstyrrelser, oxidativ stress og immunsuppression) og indirekte via tilgang på foder og vand. Tilgang på foder og vand af god kvalitet er basale behov, og mangel eller dårlig kvalitet vil kunne stresser dyrene og føre til sygdom eller sult. Højere temperaturer kan også være positivt for udegående produktionsdyr i områder med kolde vintre, med reduceret dødelighed og/eller bedre sundhed og velfærd (Lacetera, 2019).

3.2.1.1 Varmestress

Risiko for varmestress er en af de største udfordringer ved klimacændringerne vi kender i dag, og er en risiko for dyr både på udearealer, i stalde og ved transport. Varmestress opstår hvis dyrene ikke kan regulere deres kropstemperatur så den holder sig inden for deres termoneutrale zone eller komfortzone. Dyrenes termoregulering kan deles ind i termiske zoner, hvor termoneutral zone er temperaturer mellem dyrets øvre og nedre kritiske temperatur, hvor dyrene bruger minimal energi på termoregulering (Godyń et al., 2019).

Ved temperaturer ud over den termoneutrale zone vil dyrene få sværere ved at regulere kropstemperaturen, og vil bruge ekstra energi på at aktivt forsøge at reducere kropstemperaturen (eller øge temperaturen ved nedkøling) ved f.eks. at søge skygge, større vandoptag og reduceret foderoptag. Kombination af vind, temperatur, luftfugtighed og solstråling afgør dyrs mulighed for termoregulering.

En potentiel lavere solindstråling i Danmark (kapitel 1, tabel 2) er positivt i forhold til risikoen for varmemstress hos udegående produktionsdyr i Danmark, men en forventning om højere gennemsnitstemperatur og flere varmebølgedage er negativt. Udendørs kan tørkeperioder med høje dagtemperaturer lede til varmemstress, dersom dyrene ikke kan opnå afkøling via skygge, vind og/eller vand. En vurdering af udegående dyrs behov for skygge i sommerperioden (Fogsgaard et al., 2017) konkluderede at der er stor risiko for at udegående dyr i Danmark er udsat for periodisk varmemstress, og særlig dyr uden tilgang til skygge. Vurderingen blev lavet på baggrund af historiske meteorologiske data fra 2000-2016, og på temperaturer målt i skygge. Indendørs kan overskydende varme fra de enkelte dyr forstærke varmen i stalden, og gøre det endnu sværere for dyrene at komme af med overskydende varme.

3.2.1.2 Nedbør og vind

Større nedbørsmængder og højere vindhastighed vil kunne bidrage til nedkøling af dyr på udearealer. Store nedbørsmængder vil også kunne føre til våde områder, og mudrede udeareal pga. optrædning. Mudrede areal vil kunne være negativt for klov sundhed og yveret kan blive udsat for flere bakterier, med risiko for yverbetændelse. Det kan også betyde flere parasitter, f.eks. leverikter i vandpytter. I perioder med høj luftfugtighed kan det være vanskeligt at holde strøelsen i stalden tør, hvilket forbedrer vækstbetingelserne for patogene bakterier i strøelsen.

3.2.1.3 Parasitter og insekter

Højere temperaturer vil også kunne lede til flere og/eller andre parasitter og insekter. Parasitter er afhængige af at have en vært og er svært påvirket af vejrforhold og mikroklima. Litteratur tyder på at nogle parasitforekomster vil stige, pga. mildere vintre, mens andre bliver reduceret pga. højere dødelighed ved højere temperaturer (Rose et al., 2015). Store bestande af forskellige insektarter, kan påvirke husdyrs sundhed negativt på grund af overførsel af smitsomme og parasitære sygdomme og frembringelse af insektallergi (Baldacchino et al., 2014a). Insekt-bårne sygdomme bevæger sig gennem Europa i takt med længerevarende perioder med højere temperaturer. West Nile Virus er et eksempel (Albæk 2021), som har stikmyg som smittespredere, hvis virus kan opformeres i myggens spytkirtler. Et eksempel fra USA er en øget udbredelse af Borreliose (Lyme's sygdom), i takt med øget udbredelse af flåter (Beard et al. 2016). Blodsugende insekter kan også være svært irriterende og stressende for dyr, og det kan gå ud over deres produktion (Baldacchino et al., 2014b; Kamut and Jezierski, 2014).

3.2.1.4 De enkelte husdyrarter

Grise har ingen svedkirtler. Varmestress påvirker grisens respiration, kropstemperatur og foderoptag (Pearce et al., 2013). Der er registreret højere so-dødelighed om sommeren end om vinteren (Sørensen & Thomsen, 2017), og særlig søer i traditionelle farestalde hvor soen fikseres, er i risiko for varmemestress (Muns et al., 2016). Søer der skal fare har en termoneutrale zone mellem 18-20 °C (Silva et al., 2009), mens smågrise skal have temperaturer på 25-30 °C (Herpin et al., 2002). Tiltag for at sikre en høj temperatur for smågrise eller høje sommertemperaturer kan derfor lede til varmemestress hos soen. Det er også vist at risikoen for varmemestress er større indendørs end udendørs, dersom ikke den overskydende temperatur som dyrene frigør køles ned (Mikovits et al., 2019; Schauburger et al., 2021). Løsgående søer og lavere belægningsgrad vil reducere risikoen for varmemestress. Temperaturændringer vil også påvirke grisens adfærd, med flere grise liggende på spaltearealet og større tilgrissing af fast gulv ved høje temperaturer (Huynh et al., 2005).

Fjerkræ har ligesom grise ingen svedkirtler, og kan derfor først og fremmest frigive varme via deres luftveje (Saeed et al., 2019). De er derfor meget følsomme overfor høje temperaturer. Kropstemperaturen hos fugle varierer mere end hos pattedyr, og varierer blandt andet med alder, køn (hanfugle har højere temperatur end hunfugle), vægt, race (mindre racer har højere kropstemperatur end store racer), fjerskifte (højere kropstemperatur under fjerskifte end med fuld fjerdragt) (Saeed et al., 2019). Termoneutral zone til kyllinger er på 27,5–37,7 °C (Kampen et al., 1979). Fugle er generelt komfortable ved en temperatur på omkring 24 °C og fungerer normalt op til ca. 27 °C (Saeed et al., 2019). Forøget respiration ved varmemestress frigør mere carbondioxid til omgivelserne, og der opstår forhøjet pH i blodet som forstyrrer syre-base balancen i kroppen. Dette har skadelige effekter både på dyrenes sundhed og produktion. Avl på højproduktive dyr har ført til mindre varme-tolerante dyr (Kumar et al., 2021).

Kvæg: Køer kan svede, men de har få svedkirtler, så de skal primært regulere kropstemperaturen gennem respiration. Den termoneutrale zone for køer i laktation ligger omkring -0,5 til 20 °C (West, 2003). Der er dog individuelle variationer i forhold til laktation og ydelsesniveau, hvor køer i deres første laktation er mindre sensitive til varmemestress end køer der har haft flere laktationer (Bernabucci et al., 2014), og højtydende malkøkøer producerer mere varme og er mere sensitive til varmemestress end køer med lavere ydelse (Herbut et al., 2021). Risikoen for varmemestress hos kvæg afhænger af temperatur og luftfugtighed og kan beregnes i indekset THI (Temperature Humidity Index) (Collier et al., 2012) (Tabel 3.2). Ved det almindelige niveau af luftfugtighed i Danmark, kan der allerede ved temperaturer på 20-22 °C ses varmemestress hos køerne (SEGES 2020; Segnalini et al., 2013). Kvæg reagerer på varmemestress ved at være mindre aktive og optage mindre foder for at reducere varmeproduktionen (Allen et al., 2015). For at slippe af med varmen vil koen begynde at svede og få hurtige vejtrækninger, og søge skygge og træk/brise. Man kan derfor få indikation på varmemestress ved at vurdere koens åndedræt, for eksempel ved hjælp af et udviklet "Panting score system" (Gaughan et al., 2008). De drikker også meget mere vand, og produktion af mælk bliver reduceret (dos Santos et al., 2021; Herbut et al., 2021). Lavere foderoptag vil kunne påvirke dyrenes energibalance, og

dyrene bliver mindre robuste mod sygdomme, med risiko for yverbetændelse, klovlidelser og stofskiftelidelser (Gantner et al., 2016; Seon et al., 2022). For eksempel så steg celletallet hos mælkekøer i Danmark på landsplan ved tørke sommer 2018 og høj luftfugtighed i 2019 (SEGES, 2021). De negative effekter af varmestress om dagen kan dæmpes ved afkøling om natten (Herbut et al., 2021).

Tabel 3.2: *Risikoen for varmestress hos kvæg afhænger af temperatur og luftfugtighed og kan beregnes i indekset $THI = Tdb - [0.55 - (0.55 \cdot RH/100)] \cdot (Tdb - 58)$ hvor Tdb er lufttemperatur i Fahrenheit og RH står for relativ luftfugtighed (Collier et al., 2012). Equivalent Temperature Index (ETIC) tager også hensyn til lufthastighed og solindfald (Wang et al., 2018).*

Mild stress	Moderat stress	Alvorligt stress	Letal fare
$68 \leq THI < 72$	$72 \leq THI < 80$	$80 \leq THI < 90$	$THI \geq 90$
$18 \leq ETIC < 20$	$20 \leq ETIC < 25$	$25 \leq ETIC < 32$	$ETIC \geq 32$

Ved en temperatur på 21 grader og 60 % luftfugtighed beregnes THI til 67. Ved 25 grader (varmebølgedag) og 60 % luftfugtighed beregnes THI til 73 med moderat stress til følge. Equivalent Temperature Index (ETIC) tager desuden hensyn til lufthastighed og solindfald (Wang et al., 2018). Thornton (et al., 2021) har samlet tilsvarende tal for grise og fjerkræ, men pointerer at der vil være raceforskelle som endnu ikke er undersøgt (tabel 3.3). Da der fremover forventes en stigning af antal varmebølgedage, med over 15 varmebølgedage på et år, inden 2070 (mod ca 9 i 2010, tabel 1.2), vil man kunne forvente at både grise, fjerkræ og køer vil opleve flere perioder med moderat stress, end det de gør i dag. Varmebølgedage er dage med maksimumtemperatur over 25 °C over mindst 3 dage, som er over den termoneutrale zone for de fleste af vore produktionsdyr. Prognoserne viser også en stigning i antal hede bølgedage, men kun op til ca. 3 dage pr. år før 2070. Selv om luftfugtigheden i Danmark generelt er høj (relativ luftfugtighed > 60 %), vil der være forholdsvis få dage, hvor dyrene kommer i alvorlig stress. Man skal dog være opmærksom på risiko for alvorlig stress ved temperaturer over 30 grader og 60 % luftfugtighed, hvor THI beregnes til 80, som stiger til 83 ved 80 % luftfugtighed.

Tabel 3.3: *Risikoen for varmestress hos grise og fjerkræ beregnet ud fra variationer af indekset $THI = 0,8 \times T + ((RH/100) \times (T - 14,3)) + 46,4$ (Thom, 1959), fra Thornton (et al., 2021).*

Animal	Moderat stress	Alvorligt stress	Letal fare
Pigs	75	79	84
Poultry—broilers	74	79	84
Poultry—layers	71	76	82
Poultry—general	73	81	85

3.2.2 Produktion

Klimaændringer vil påvirke husdyrproduktionen på en række områder. Påvirkningen vil blive forskellig for forskellige husdyrarter og indenfor forskellige produktionssystemer og dyretyper indenfor de enkelte husdyrarter. Disse forhold vil påvirke produktionen af kød, mælk og æg.

3.2.2.1 Grise

Grise går i Danmark generelt i lukkede ventilerede stalde. Hvis ikke der er tilstrækkelig ventilation til at dyrenes temperatur kan holdes i den termoneutrale zone vil foderoptagelse og tilvækst blive reduceret. En stigning i rumtemperaturen til over den termoneutrale zone resulterer i (Liu et al., 2022):

1. Reduceret foderoptagelse og øget forbrug af foderets energi til vedligeholdelse på bekostning af aflejring, og dermed reduceret fodereffektivitet.
2. Oxidativ stress, som fører til kompromitteret tarmbarriere funktion og oocyt skader.
3. Nedsat muskelfiberudvikling af fostre under drægtigheden.
4. Drægtidsprocent hos søer kan falde fra ca. 89 % til så lavt som 64 %.
5. Reduceret fødselsvægt for pattegrise til mindre end 1,1 kg.

Antallet af hedebløge- og varmebløgedage vil stige frem mod 2050 (se tabel 1.2). Den termoneutrale zone for nyfødte grise er ca. fra 28 – 38 grader, grise til fravænning 19-30 grader og slagtesvin 11 – 25 grader. For slagtesvin ses der dog allerede en nedgang i foderoptagelsen fra 23 grader. Slagtesvin og søer vil blive negativt påvirket af flere dage med høj temperatur, hvis ventilationsluften ikke kan køles. Den reducerede fødselsvægt og muskelfiberudvikling hos pattegrise fører til reduceret overlevelse og tilvækst. Øget energibehov til vedligeholdelse på bekostning af vækst hos voksende grise fører til reduceret fodereffektivitet, tilvækst og slagtevægt. Desuden falder kødprocenten og fedtprocenten stiger i slagtekroppene. Alt dette fører til forringet økonomi ved at produktion af grisekød. Den reducerede fodereffektivitet fører også til øget negativ indvirkning af griseproduktion på miljøet, da der vil blive udskilt mere kvælstof og fosfor pr. kg produceret kød, og desuden vil det kræve dyrkning af en lidt større fodermængde, med den deraf følgende øgede klimapåvirkning.

3.2.2.2 Slagtekyllinger

En stigning i rumtemperaturen til over den termosneutrale zone resulterer i (Teyssier et al., 2022; Rostagno, 2020):

1. Oxidativ stress, som fører til kompromitteret tarmbarrierefunktion, der resulterer i risiko for diarré og absorption af toxiner fra tarmen.

2. Reduceret foderoptagelse og øget forbrug af foderets energi til vedligeholdelse på bekostning af vækst hos slagtekyllinger, hvilket igen fører til reduceret fodereffektivitet og tilvækst samt reduceret slagtevægt ved en given alder.

Ligesom hos grise fører det til forringet økonomi ved at producere slagtekyllinger. Den reducerede fodereffektivitet fører også til øget negativ indvirkning af slagtekyllingeproduktion på miljøet og klimaet af de samme årsager som for grise.

3.2.2.3 Æglæggende høner

En stigning i rumtemperaturen til over den termoneutrale zone resulterer i (Teyssier et al., 2022; Rostagno, 2020):

1. Oxidativ stress, som fører til kompromitteret tarmbarrierefunktion, der resulterer i risiko for diarré og absorption af toxiner fra tarmen.
2. Oocytskader der påvirker ægproduktionen negativt.
3. Varmestress, der fører til produktion af æg med tynde æggeskaller på grund af de negative virkninger af varmemstress på syre-basebalancen.
4. Reduceret foderoptagelse og øget forbrug af foderets energi til vedligeholdelse og større behov til ægproduktion hos æglæggende høner, hvilket fører til nedsat fodereffektivitet og reduceret ægproduktion. Alt i alt fører det til reduceret indkomst ved at producere æg. Den reducerede fodereffektivitet fører også til øget negativ indvirkning af ægproduktion på miljø og klima.

3.2.2.4 Kvæg

Mælkeydelsen forventes fortsat at stige pga. avl, forbedret fodring, opstaldning og management. Den højere mælkeproduktion (Lund et al., 2021) vil føre til en større foderoptagelse og dermed en større varmeproduktion. I lange perioder med høje temperaturer kan mælkeydelsen blive lavere end ellers forventet. Dette kan skyldes varmemstress, men også indirekte effekter som nedsat foderoptagelse og sygdomme. Effekterne vil afhænge af, om dyrene er ude, og hvis de er indenfor vil staldforhold have stor betydning. Varmestress påvirker også dyrenes reproduktionsprocesser, både indirekte via forlænget negativ energibalance og direkte ved at unormal høj kropstemperatur har negativ effekt på udskillelse af reproduktionshormoner, og resulterer i en lavere drægtighedsprocent (Negron-Perez et al., 2019). Et forsøg med køer i klimastald fandt at moderat varmemstress i fire dage reducerede køernes mælkeydelse med 53 % og tørstofoptag med 48 % (Garner et al., 2017).

3.2.3 Foderforsyning og -behov

Overordnet set vil foderforsyningen afhænge af tilgængeligheden og prisen på de enkelte fodermidler. Der kan generelt forventes højere udbytter af afgrøder i Danmark ved et varmere klima i fremtiden. Hvis der i fremtiden forbliver et uændret omfang af de enkelte husdyrproduktioner, vil der være mulighed for en større andel af dansk foder ved et større markudbytte pr. ha. Det er dog uforudsigeligt, hvor stor husdyrproduktionen vil blive, da den både vil afhænge af den danske husdyrproduktions konkurrenceevne, efterspørgslen efter animalske fødevarer og eventuelle lovmæssige tiltag, der måtte begrænse forskellige dele af husdyrproduktionen. Foderforsyningen kan også blive påvirket af regler for anvendelse af specifikke fodermidler, herunder begrænsninger grundet lovregulering eller aftaler indenfor specifikke brancher. Dette kunne f.eks. dreje sig import af foder baseret på genmodiserede (GM) afgrøder, eller soja- og palmeprodukter, der bl.a. dyrkes, hvor der er ryddet regnskov.

Hvis der sker et stop for import af disse to fodermidler, vil foder- og især proteinforsyningen skulle erstattes af fodermidler avlet i Danmark, eller typisk i resten af EU, hvilket vil give en øget konkurrence om disse produkter. I perioden 2011 – 2020 har der været en import af i gennemsnit 1.100 mio. kg protein pr. år til foderbrug i form af oliekgær, -mel og -skrå, hvoraf 2/3 var fra sojaprodukter (Gylling & Hermansen, 2018; Jørgensen et al., 2021). Den samlede import af oliekgær, -mel og -skrå udgjorde 40 % af forbruget af protein til foder i denne periode (Gylling & Hermansen, 2018).

Foderforsyningen vil også være afhængig af, hvordan udbyttet udvikler sig for de enkelte afgrøder både inden for de forskellige kornarter, og mellem forskellige grovfoderkilder som kløvergræs, majs og roer. Hvis andelen af udegående dyr ændres, vil det medføre en ændret samlet foderforsyning. Udegående høner og søer optager kun en mindre del af foderet direkte fra markens produktion, så andelen af udegående høns og søer vil ikke påvirke behovet for korn og proteinfodermidler væsentligt i forhold til nu. Derimod vil f.eks. en større andel af kvæg på græs betyde, at en større andel af foderforsyningen dækkes af græsmarksprodukter. Mildere klima kan i nogle år give mulighed for at lukke dyr tidligere på græs, hvorimod evt. større regnmængder om efteråret vil føre til mudrede og uanvendelige drivgange, så malkekøer må holdes på stald. Længerevarende tørkeperioder vil kunne lede til mangel på græs til afgræsning, og tilskudsfoder vil være nødvendig.

Ved økologisk kvægproduktion skal 60% af fodertørstof være grovfoder, hvilket er lidt højere end der anvendes til konventionel kvægproduktion, og økologisk kvæg skal på græs. Begge dele vil føre til, at en højere andel af foderet vil være græsbaseret, bl.a. fordi økologisk græsproduktion er nemmere at indplacere i sædskiftet end majs. Økologisk fjerkræ og grise skal også have adgang til udeareal, men foder fra marken udgør kun en mindre del af det totale foderbehov, og det øvrige foder ligner det, der anvendes til konventionelle dyr, bortset fra at visse tilsætningsstoffer ikke må anvendes. Ved en ændret andel af økologisk kvæg vil der ske nogen ændring i foderforsyningen, mens det ikke vil give de store ændringer for grise og fjerkræ.

3.3 Klima- og miljøeffekter, sideeffekter – positive og negative

Forfattere: Jørgen E. Olesen, Rasmus Ejrnæs, Camilla Fløjgaard

Fagfællebedømmere: Afsnit 3.3.1 og 3.3.2: Johannes W.M. Pullens; Afsnit 3.3.3 Marianne Bruus

3.3.1 Drivhusgasudledninger

Landbrugets udledninger af klimagasser er især bestemt af mikrobiologisk omsætning i jord, dyr og husdyrgødning, og disse vil i stort omfang være betinget af klimatiske forhold. Der er dog tale om komplicerede sammenhænge, hvor stigende temperatur ikke altid giver øgede udledninger, da andre miljøeffekter (fx jordfugtighed) også spiller ind. Disse effekter indgår derfor kun i begrænset omfang i de nationale emissionsopgørelser. Det er således kun for opgørelsen af kulstof i mineraljord, at temperaturen spiller en rolle for beregningerne af CO₂-udledninger fra dansk landbrug. I disse beregninger, som foretages med C-TOOL modellen (Taghizadeh-Toosi et al., 2014a) vil øget temperatur føre til lavere kulstoflagring i jorden og dermed alt andet lige til større nettoudledninger fra landbruget. Det er vanskeligt at finde denne effekt gennem målinger, men der er indikationer på at øget temperatur mindsker jordens kulstoflager (Taghizadeh-Toosi et al., 2014b).

Emissionen af ammoniak fra åbne kvægstalde stiger eksponentielt med øget temperatur. Methan emissionen fra gødning i stalden er lavest ved 10 grader og stiger svagt enten det bliver koldere eller varmere (Hempel et al., 2016). På varmebølgedage forventes foderoptagelsen at falde og dermed også methanudskillelsen fra vommen. Hybridventilation, hvor en mindre del af luften ventileres bort gennem spaltegulv, kan opsamle 64-83% af ammoniak emissionerne og 10-50% af metan-emissionerne (Rong et al., 2014).

3.3.2 Vandmiljø

Med det varmere klima bliver vandmiljøet i både søer og fjorde mere følsomt over for tilførsel af næringsstoffer (Nielsen et al., 2014; Trolle et al., 2019). Dette skyldes, at højere temperatur giver tidligere og længerevarende algeopblomstringer med efterfølgende iltvind og fiskedød. For at kunne opretholde en god økologisk tilstand i vandmiljøet vil der derfor skulle yderligere reduceres i tilførsel af næringsstoffer (kvælstof og fosfor) fra byer og landbrug (Trolle et al., 2015).

Resultater fra både modelbaserede analyser (Doltra et al., 2014) og analyse af langvarige forsøg med kvælstofudvaskning (Jabloun et al., 2015) viser øget kvælstofudvaskning under de forventede klimacændringer. En del af dette skyldes, at øget temperatur i efterårs- og vinterperioden øger omsætning og nedbrydning af organisk stof i jorden. Dermed bliver mere kvælstof mineraliseret og tilgængelig for udvaskning. Dette kan kun modvirkes gennem dyrkning af afgrøder og efterafgrøder i efterårs- og vinterperioden. Der bliver derfor med klimacændringer behov for stigende fokus på sammensætning af sædskiftet med henblik på at minimere næringsstofftab. En anden årsag til øget nitratudvaskning er stigende nedbørsmængder,

som øger afstrømningen og dermed N udvaskningen. Den øgede nitratudvaskning vil både påvirke grundvandet og vandmiljøet gennem øget tilførsel af nitrat. Der foreligger dog ikke undersøgelser, der direkte undersøger effekter på grundvandskvalitet.

Der foreligger et katalog over virkemidler til reduktion af kvælstofudledninger til vandmiljøet (Eriksen et al., 2020) og reduktion af fosforudledninger til vandmiljøet (Andersen et al., 2020). Disse virkemidler vil også være effektive under de forventede klimaændringer, men deres effektivitet vil løbende skulle evalueres og der er brug for yderligere virkemidler. Modelbaserede scenarieanalyser viser at efterafgrøder i nogle tilfælde vil kunne modvirke den øgede nitratudvaskning under klimaændringer, mens de i andre situationer ikke er tilstrækkeligt effektive (Doltra et al., 2014). Der er brug for forskning og udvikling for at sikre tilstrækkeligt effektive virkemidler under de ændrede klimaforhold.

3.3.3 Biodiversitet

Danmarks truede arter og deres levesteder findes langt overvejende på udyrkede arealer (Moeslund et al., 2019). Det er da også her, i den udyrkede natur, vi finder naturtyper og arter beskyttet af EU's habitat og fuglebeskyttelsesdirektiver – arter og naturtyper som overvejende er i tilbagegang (Fredshavn et al., 2019). Desuden er dyrkede marker i reglen hverken det eneste eller det mest optimale levested for de få rødlistede arter, som forekommer her. Selvom mange sanglærker lever på dyrkede marker, trives arten endnu bedre på tørre lysåbne naturtyper som græsland, strandeng og hede. I det følgende vil vi derfor hovedsageligt fokusere på konsekvenserne ved klimatilpasninger i landbruget for arter og levesteder i det udyrkede landskab og ikke på og omkring dyrkningsfladen.

Vi ser fem potentielle effekter på biodiversiteten af landbrugets fremtidige klimatilpasninger. Da det er fremtiden vi taler om, bør både forandringerne og effekterne betragtes som hypoteser mere end sikre forudsigelser.

1) Det er sandsynligt at den intensivering af dyrkningspraksis vi har set gennem de sidste to århundreder, vil fortsætte. Dette vil betyde forringede levevilkår for de arter som i dag udnytter dyrkede marker som levested og/eller fødesøgning (Raven & Wagner 2021). Vi forventer altså at der i fremtiden vil ske en yderligere tilbagegang i tætheden af insekter og fugle på de dyrkede marker. En undtagelse fra denne regel er generalistarter, som ceder direkte af afgrøderne. Gæs, svaner, traner, duer, råger samt rådyr, krondyr og dådyr forventes at klare sig udmærket i fremtidens dyrkningslandskaber. Det samme vil de rovfugle og rovdyr, som nyder godt af mængden af byttedyr (Enserink & Vogel 2006). Til gengæld forventer vi fortsat tilbagegang for mere krævende arter som hare, agerhøne, sanglærke, gulspurv, vibe og stær.

2) Det er sandsynligt at der vil blive udtaget mere marginal landbrugsjord i fremtiden. Dette vil dels ske for at begrænse udledningen af drivhusgasser, men det vil også ske som klimatilpasning ved at forlade de usikre jorder og fokusere dyrkningen på de gode produktionsjorder med høj dyrkningssikkerhed. Samtidig vil det ske for at mindske belastningen på vandmiljøet og for at indfri målsætninger og ønsker om øget

plads til vild natur og friluftsliv. Det er i dag politisk vedtaget at udtage 100.000 ha kulstofrige lavbundsjorder, men det er ikke urealistisk at forestille sig en fremtidig udtagning af landbrugsjord på 2-3 gange dette areal (Altinget Miljø 14/9-2022). En sådan udtagning af dyrkningsjord rummer et stort potentiale for at fremme Danmarks biodiversitet (Ejrnæs et al., 2022). Der er dog én afgørende forudsætning for at udtagne dyrkningsjorder kan blive vigtige levesteder for truede arter i Danmark. Det er afgørende at udtagne jorder disponeres til naturformål og forvaltes derefter. Det har begrænset biodiversitetsværdi, hvis områderne efter ophørt omdrift overgår til anden landbrugsdrift eller skovbrug fx produktion af biomasse, tømmer eller ensidigt fokus på forvaltning og udnyttelse af jagtbart vildt, ligesom det har begrænset værdi hvis områderne overgår til tekniske anlæg som solcelleparker eller rensningsanlæg for næringsrigt drænvand. Størst værdi har det hvis de udtagne jorder indgår som dele af større sammenhængende naturområder, hvor naturlige processer genoprettes. Det vil sige at naturlig hydrologi genoprettes ved lukning af dræen og grøfter, genslyngning af vandløb og hævnning af vandløbsbunden (Fløjgaard et al., 2021). Naturlig kystdynamik genoprettes ved at fjerne barrierer for vinteroversvømmelser og sandflugt. Og en naturlig græsningssfunktion genoprettes ved at introducere vildtlevende planteædere eller ved at iværksætte helårsgræsning med robuste racer af kødkvæg eller heste (Konvička et al., 2021, Dvorsky et al., 2022). På mange af de tidligere dyrkningsjorder vil der være ophobet en unaturligt stor næringsstofmængde i jorden, hvilket vil virke som en begrænsende faktor for genopretning af naturlige økosystemer med levesteder for sårbare arter af planter og tilknyttede invertebrater, og her er der formodentlig størst biodiversitetspotentiale i at tillade etableringen af naturlig sumpskov, som også har mange tilknyttede arter (Bruun et al., 2022, Brunbjerg et al., 2022).

3) Det er sandsynligt at afvandingen vil ophøre på en del af de lavbundsarealer, som i dag afvandes med dyrkning for øje. Dels har mange lavbundsjorder sat sig efter omsætning af kulstoffet i tørv, og dels er der brug for lavtliggende jorder som led i en klimatilpasningsstrategi om at forsinke vandets transport til lavtliggende, kystnære byer efter voldsomme nedbørshændelser. Ophørt afvanding rummer et potentiale for genopretning af naturlig hydrologi, herunder mæandreende vandløb med kontakt til de vandløbsnære arealer og ophør af grødeskæring. Ophørt afvanding er tæt koblet til udtagning af kulstofrige lavbundsjorder (se pkt 2).

4) Det er sandsynligt at der i fremtiden vil være en formindsket næringsstofbelastning af naturområder fra landbruget, men der er dog en række forudsætninger som skal være opfyldt før dette sker. Den animalske produktion udgør i dag en stor del af landbrugets klimabelastning og vi forventer at produktionen derfor vil blive mindre. Hvis man dertil lægger teknologiske fremskridt ved håndteringen af gylle og udluftning af stalde, kan det betyde en fortsat nedgang i den atmosfæriske belastning af naturområder med kvælstof. Sker dette, må det forventes at fremme biodiversiteten i Danmark – især i næringsfattige naturtyper og levesteder som klitter, heder, sure overdrev, højmoser, egekrat og nøjsomme samfund af mosser og laver på sten og stammer.

5) Det er muligt at der vil ske en forskydning af kødproduktionen til en mere omfattende nicheproduktion af kød fra fritgående dyr, som tager aktivt del i naturplejen (Ejrnæs & Bruun 2022). Hvis dette skal medføre forbedret biodiversitet forudsætter det, at produktionsformen tager form af naturlig græsning – det vil sige at græsningstrykket er naturligt lavt og fordelt jævnt over hele året frem for at være koncentreret som intensiv græsning i sommermånedene (Fløjgaard et al., 2021).

3.4 Referencer

- Abuley, I.K., Nielsen, B.J., 2019. Integrating cultivar resistance into the TOMCAST model to control early blight of potato, caused by *Alternaria solani*. *Crop Protection*, Bind 117, 69-76.
- Alberto, A.M., Ziska, L.H., Cervancia, C.R., and Manalo, P.A., 1996. The influence of increasing carbon dioxide and temperature on competitive interactions between a C3 crop, rice (*Oryza sativa*) and a C4 weed (*Echinochloa glabrescens*). *Functional. Plant Biology* 23:795-802.
- Albæk, S., 2021. West Nile Virus rykker tættere på med klimaforandringer. *Dansk Veterinærtidsskrift* nr. 1:30-32.
- Allen, J.D., Hall, L.W., Collier, R.J., Smith, J.F., 2015. Effect of core body temperature, time of day, and climate conditions on behavioral patterns of lactating dairy cows experiencing mild to moderate heat stress. *Journal of Dairy Science* 98, 118-127.
- Altinget Miljø 14/9-2022. Danmark er Europas mest opdyrkede land: "Vi ligger i et smørhul for landbrugsproduktion". <https://www.altinget.dk/foedevare/artikel/danmark-er-europas-mest-opdyrkede-land-vi-ligger-i-et-smørhul-for-landbrugsproduktion>
- Andersen, H.E., Rubæk, G.H., Hasler, B., Jacobsen, B.H., 2020. Virkemidler til reduktion af fosforbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 284 s. - Videnskabelig rapport nr. 379
- Andrew, N.R., Hill, S.J., Binns, M., Bahar, M.H., Ridley, E.V., Jung, M.-P., Fyfe, C., Yates, M., Khushro, M., 2013. Assessing insect responses to climate change: What are we testing for? Where should we be heading? *PeerJ* (San Francisco, CA) 1:e11
- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R.P., Lobell, D.B., Cammarano, D., Kimball, B.A., Ottman, M.J., Wall, G.W., White, J.W., Reynolds, M.P., Alderman, P.D., Prasad, P.V.V., Aggarwal, P.K., Antothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A.J., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Googenboom, G., Hunt, L.A., Izaurralde, R.C., Jabloun, M., Jones, C.D., Kersebaum, K.C., Koehler, A.-K., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'Leary, G., Olesen, J.E., Palosuo, T., Priesack, E., Eyshi Rezaei, E., Ruane, A.C., Semenov, M.A., Shcherbak, I., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P., Waha, K., Wang, E., Wallach, D., Wolf, J., Zhao, Z., Zhu, Y., 2015. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change* 5, 143-147.
- Asseng, S., Martre, P., Maiorano, A., Rötter, R.P., O'Leary, G.J., Fitzgerald, G.J., Girousse, C., Motzo, R., Giunta, F., Babar, M.A., Reynolds, M.P., Kheir, A.M.S., Thorburn, P.J., Waha, K., Ruane, A.C., Aggarwal, P.K., Ahmed, M., Balković, J., Basso, B., Biernath, C., Bindi, M., Cammarano, D., Challinor, A.J., De Sanctis, G., Dumont, B., Eyshi Rezaei, E., Fereres, E., Ferrise, R., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Gao, Y., Horan, H., Hoogenboom, G., Izaurralde, R.C., Jabloun, M., Jones, C.D., Kassie, B.T., Kersebaum, K.C., Klein, C., Koehler, A.K., Liu, B., Minoli, S., Montesino San Martin, M., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., Olesen, J.E., Palosuo, T., Porter, J.R.,

- Priesack, E., Ripoche, D., Semenov, M.A., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Van der Velde, M., Wallach, D., Wang, E., Webber, H., Wolf, J., Woli, P., Xiao, L., Zhang, Z., Zhao, Z., Zhu, Y., Ewert, F., 2019. Climate change impact and adaptation on wheat yield and protein. *Global Change Biology* 25, 155–173.
- Baldacchino, F., Desquesnes, M., Mihok, S., Foil, L.D., Duvallet, G., Jittapalapong, S., 2014a. Tabanids: Neglected subjects of research, but important vectors of disease agents! *Infection, Genetics and Evolution* 28, 596–615.
- Baldacchino, F., Puech, L., Manon, S., Hertzog, L.R., Jay-Robert, P., 2014b. Biting behaviour of Tabanidae on cattle in mountainous summer pastures, Pyrenees, France, and effects of weather variables. *Bulletin of Entomological Research* 104, 471–479.
- Baker, H.G., 1994. The evolution of weeds. *Annu. Rev. Ecol Syst* 5:1–24
- Bale, J.S., Hayward, S.A.L., 2010. Insect overwintering in a changing climate. *Journal of Experimental Biology* 213:980–994.
- Baumgard, L.H., Rhoads, R.P.Jr., 2013. Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 1, 311–337. doi:10.1146/annurev-animal-031412-103644
- Beard, C.B., Eisen, R.J., Barker, C.M., Garofalo, J.F., Hahn, M., Hayden, M., Monaghan, A.J., Ogden, N.H., Schramm, P.J., 2016. Kapitel 5: Vector-borne diseases. I: The impacts of climate change on human health in the United States: A scientific assessment. U.S. Global Change Research Program. <https://health2016.globalchange.gov>
- Bebber, D.P., Ramotowski, M.A.T., Gurr, S.J., 2013. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature climate change* 3:985–988.
- Bekæmpelsesmiddelstatistikken 1996– 2020. Udgivet af Miljøstyreslen.
- Bernabucci, U., Biffani, S., Buggiotti, L., Vitali, A., Lacetera, N., Nardone, A., 2014. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 97, 471–486.
- Blankinship, J.C., Niklaus, P.A., Hungate, B.A., 2011. A meta-analysis of responses of soil biota to global change. *Oecologia* 165, 553–565. <https://doi.org/10.1007/s00442-011-1909-0>
- Bregnballe, T., Amstrup, O., Bak, M., Clausen, P., Pedersen, K.K., Laursen, K., 2014. Udviklingen i forekomsten af vandfugle i Skjern Enge i efterårene 2002–2011. 62 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 130. <http://dce2.au.dk/pub/SR130.pdf>
- Brunbjerg, A.K., Fløjgaard, C., Frøslev, T.G., Andersen, D.K., Bruun, H.H., Dalby, L., m.fl. 2022. Scrub encroachment promotes biodiversity in wetland restoration under eutrophic conditions. *bioRxiv*. 2022.02.24.481733.
- Bruun, H.H., Brunbjerg, A.K., Dalby, L., Fløjgaard, C., Frøslev, T.G., Haarder, S., Heilmann-Clausen, J., Høye, T.T., Læssøe, T., Ejrnæs, R., 2022. Simple attributes predict the value of plants as hosts to fungal and arthropod communities. *Oikos*, 2022, p.e08823.
- Bødker, L., Schulz, H., Jørgensen, L.N., 1988. Forskellige kulturtekniske faktorerers indflydelse på knækkedysse og goldfod-syge i vintersæd. 5. Danske Plan-teværnskonference 1988. Sygdomme og skadedyr: 211–235.
- Collier, R.J., Hall, L.W., Rungruang, S., Zimbelman, R.B. 2012. Quantifying Heat Stress and Its Impact on Metabolism and Performance. *Proc. Florida Ruminant Nutrition Symp*

- Cowger, C., Patton-Ozkurt, J., Brown-Guedira, G., Perugini, L., 2009. Post-anthesis moisture increased *Fusarium* head blight and deoxynivalenol levels in North Carolina winter wheat. *Phytopathology*. 2009; 99:320–327. [PubMed: 19271972]
- Daraghmeh, O.A., Petersen, C.T., Munkholm, L.J., Znova, L., Obour, P.B., Nielsen, S.K., Green, O., 2019. Impact of tillage intensity on clay loam soil structure. *Soil use and Management*, 0(0), 12. <https://doi.org/10.1111/sum.12501>
- Doltra, J., Lægdsmand, M., Olesen, J.E., 2014. Impacts of projected climate change on productivity and nitrogen leaching of crop rotations in arable and pig farming systems in Denmark. *Journal of Agricultural Science* 152, 75–92.
- dos Santos, M.M., Souza-Junior, J.B.F., Dantas, M.R.T., de Macedo Costa, L.L., 2021. An updated review on cattle thermoregulation: physiological responses, biophysical mechanisms, and heat stress alleviation pathways. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 30471–30485.
- Dvorský, M., Mudrák, O., Doležal, J., Jirků, M., 2022. Reintroduction of large herbivores restored plant species richness in abandoned dry temperate grassland. *Plant Ecology*, 223(5), 525–535.
- Eigenbrode, S.D., Davis, T.S., Crowder, D.W., 2015. Climate change and biological control in agricultural systems: principles and examples from North America. Pages 119–135. CABI, Wallingford, UK.
- Ejrnæs, R., Bruun, H.H., 2022. Fagligt grundlag for naturløfter for Friland oksekød. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 17 s. – Fagligt notat nr. 2022|12. https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2022/N2022_12.pdf
- Ejrnæs, R., Bladt, J., Fløjgaard, C., 2022. Potentialet for at reservere 30 % af landarealet til beskyttede og strengt beskyttede områder i Danmark. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 42 s. - Videnskabelig rapport nr. 507 <http://dce2.au.dk/pub/SR507.pdf>
- Elsgaard, L., Børgesen, C.D., Olesen, J.E., Siebert, S., Ewert, F., Peltonen-Sainio, P., Rötter, R.P., Skjelvåg, A.O., 2012. Shifts in comparative advantages for maize, oat, and wheat cropping under climate change in Europe. *Food Additives and Contaminants* 29, 1514–1526.
- Enserink, M., Vogel, G., 2006. The carnivore comeback. *Science Focus*, Vol 314: 746–749.
- 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>
- Fløjgaard, C., Buttenschøn, R.M., Byriel, F.B., Clausen, K.K., Gottlieb, L., Kanstrup, N., Strandberg, B., Ejrnæs, R., 2021. Biodiversitetseffekter af rewilding. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 124 s. - Videnskabelig rapport nr. 425. <http://dce2.au.dk/pub/SR425.pdf>.
- Fløjgaard, C., Andersen, D.K., Baattrup-Pedersen, A., Ebbensgaard, T., Eriksen, P.N., Nygaard, B., Ejrnæs, R., 2021. Guide til bedre biodiversitet i ådale. 2022. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. <https://ecos.au.dk/aadale>.
- Fogsgaard, K.K., Gaillard, C., Christensen, M. 2017. Udegående dyrs behov for skygge i sommerperioden. *Vidensyntese DCA*, 41 s.
- Fredshavn, J., Nygaard, B., Ejrnæs, R., Damgaard, C., Therkildsen, O.R., Elmeros, M., Wind, P., Johansson, L.S., Alnøe, A.B., Dahl, K., Nielsen, E.H., Pedersen, H.B., Sveegaard, S., Galatius A., Teilmann, J., 2019. Bevaringsstatus for naturtyper og arter – 2019. Habitatdirektivets Artikel 17-rapportering. Aarhus Universitet, DCE –

- Nationalt Center for Miljø og Energi, 52 s. Videnskabelig rapport nr. 340. <http://dce2.au.dk/pub/SR340.pdf>.
- Gantner, V., Kuterovac, K., Potočnik, K., 2016. Effect of Heat Stress on Metabolic Disorders Prevalence Risk and Milk Production in Holstein Cows in Croatia. *Annals of Animal Science*, 16 (2), 451-461. <https://doi.org/10.1515/aoas-2015-0097>
- Garner, J.B., Douglas, M., Williams, S.R.O., Wales, W.J., Marett, L.C., Digiacomio, K., Leury, B.J., Hayes, B.J., 2017. Responses of dairy cows to short-term heat stress in controlled-climate chambers. *Animal Production Science* 57, 1233-1241.
- Gaughan, J.B., Mader, T.L., Holt, S.M., Lisle, A., 2008. A new heat load index for feedlot cattle. *Journal of Animal Science* 86, 226-234.
- Gladders, P., Langton, S., Barrie, I., Hardwick, N., Taylor, M., Paveley, N., 2007. The importance of weather and agronomic factors for the overwinter survival of yellow rust (*Puccinia striiformis*) and subsequent disease risk in commercial wheat crops in England. *Annals of Applied Biology*, 150: 371-382. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2007.00131.x>
- Godyń, D., Herbut, P., Angrecka, S., 2019. Measurements of peripheral and deep body temperature in cattle – A review. *Journal of Thermal Biology* 79, 42-49.
- Gouache, D. Bensadoun, A., Brun, F., Pagé, C. Makowski, D. Wallach, D., 2013. Modelling climate change impact on Septoria tritici blotch (STB) in France: Accounting for climate model and disease model uncertainty, *Agricultural and Forest Meteorology*, 170, 242-252, ISSN 0168-1923, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.04.019>.
- Grevsen, K., Olesen, J.E., Veierskov, B., 2003. Effects of temperature and developmental stage on induction of the curd quality defects 'bracting' and 'riceyness' in cauliflower. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 78, 638-646.
- Gylling, M., Hermansen, J., 2018. Kvantificering af forventede fremtidige proteinmarkeder og kortlægning af potentialer i forskellige nye proteinkilder. IFRO rapport 2018/08
- Hansen, P.J., 2007. Exploitation of genetic and physiological determinants of embryonic resistance to elevated temperature to improve embryonic survival in dairy cattle during heat stress. *Theriogenology*, 68, 242-249.
- Hansen, J.G., Abuley, I.K., 2021. Nye skimmelter i 2020 - hvad betyder det og hvad kan man gøre? : Dansk Kartoffelstivelse, 2021, s. 23-24.
- Heckrath, G., Onnen, N., Van Oest, K., 2020. Kortlægning af potentielt fosfortab fra landbrugsjord ved vanderosion. I Andersen, H., Heckrath, G. Fosforkortlægning af dyrkningsjord og vandområder i Danmark. Aarhus Universitet, DCE–Nationalt Center for Miljø og Energi, 340 s.
- Heick, T.M., Hansen, A.L.; Thach, T. et al. Cercospora-bladplet i roer - er det en trussel for dansk sukkerroedyrkning? *Sukkerroe-Nyt*, Vol. 39, No. 3, 09.2021, p. 20-21.
- Heidmann, T., Nielsen, J., Olesen, S.E., Christensen, B.T., Østergaard, H.S., 2001. Ændringer i indhold af kulstof og kvælstof i dyrket jord: Resultater fra Kvadratnettet 1987-1998. (DJF rapport nr. 54. Markbrug). D. JordbrugsForskning.

- Hempel, S., Saha, C.K., Fiedler, M., Berg, W., Hansen, C., Amon, B., Amon, T., 2016. Non-linear temperature dependency of ammonia and methane emissions from a naturally ventilated dairy barn. *Biosystems Engineering* 145, 10-21.
- Herbut, P., Hoffmann, G., Angrecka, S., Godyn, D., Vieira, F.M.C., Adamczyk, K., Kupczynski, R., 2021. THE EFFECTS OF HEAT STRESS ON THE BEHAVIOUR OF DAIRY COWS - A REVIEW. *Annals of Animal Science* 21, 385-402.
- Herpin, P., Damon, M., Le Dividich, J., 2002. Development of thermoregulation and neonatal survival in pigs. *Livestock Production Science* 78, 25-45.
- Huynh, T.T.T., Aarnink, A.J.A., Gerrits, W.J.J., Heetkamp, M.J.H., Canh, T.T., Spoolder, H.A.M., Kemp, B., Verstegen, M.W.A., 2005. Thermal behaviour of growing pigs in response to high temperature and humidity. *Applied Animal Behaviour Science* 91, 1-16.
- Hyvönen, T., Luoto, M., Uotila, P., 2012. Assessment of weed establishment risk in a changing European climate. *Agric. Food Sci.* 21:348-360.
- Hyvönen, T., Ramula, S., 2014. Crop-weed competition rather than temperature limits the population establishment of two annual C4 weeds at the edge of their northern range. *Weed Res.* 54:245-255.
- Jabloun, M., Schelde, K., Tao, F., Olesen, J.E., 2015. Effect of changes in temperature and precipitation in Denmark on nitrate leaching in cereal cropping systems. *European Journal of Agronomy* 62, 55-64.
- Högy, P., Wieser, H., Köhler, P., Schwadorf, K., Breuer, J., Erbs, M., Weber, S., Fangmeier, A., 2012. Does elevated atmospheric CO₂ allow for sufficient wheat grain quality in the future? *Journal of Applied Botany and Food Quality* 82, 114-121.
- Iglesias, A., Mougou, R., Moneo, M., Quiroga, S., 2010. Towards adaptation of agriculture to climate change in the Mediterranean', *Regional Environmental Change* 11, 159-166.
- Ingvorsen, C.H., Backes, G., Lyngkjær, M.F., Peltonen-Sainio, P., Jensen, J.D., Jalli, M., Jahoor, A., Rasmussen, M., Mikkelsen, T.N., Stockmarr, A., Jørgensen, R.B., 2015. Significant decrease in yield under future climate conditions: Stability and production of 138 spring barley accessions. *European Journal of Agronomy* 63, 105-113.
- IPPC, 2001. Climate change 2001: *The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, 881 p
- Jensen, J.L., Schjøning, P., Watts, C.W., Christensen, B.T., Obour, P.B., Munkholm, L.J., 2020. Soil degradation and recovery – Changes in organic matter fractions and structural stability. *Geoderma*, 364, Article 114181. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114181>
- Jensen, J.L., Schjøning, P., Watts, C.W., Christensen, B.T., Peltre, C., Munkholm, L.J., 2019. Relating soil C and organic matter fractions to soil structural stability. *Geoderma*, 337, 834-843. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.034>
- Jørgensen, L.N., Møller, C., Nielsen, G.C., 2003. Risikovurdering af goldfodsyge i hvede. *Grøn Viden* nr. 273.
- Jørgensen, L.N., Heick, T.M., Matzen, N., Kristjansen, H.S.; Madsen, H.-P., 2022. Disease attack in 2021. *Applied Crop Protection* 2021. DCA rapport, Bind 167- s. 11-16.
- Jørgensen, L.N., Hovmøller, M.S., Hansen, J.G., Lassen, P., Clark, B., Bayles, R., Rodemann, B., Jahn, M., Flath, K., Goral, T., Czembor, J., Cheyron, P., Maumene, C., Nielsen, G.C., 2010. Eurowheat –Optimizing Fungicide Input. *Outlooks on Pest Management*. August. 2010 (173-175)

- Jørgensen, U., Børsting, C.F., Lund, P., Mikkelsen, M.H., Kristensen, T., 2021. Notat om drivhusgasudledningen, kvælstofudvaskningen og ammoniakfordampningen ved reduktion af husdyrproduktion og ved reduceret foderimport til Danmark. Rådgivningsnotat fra DCA – National Center for Fødevarer og Jordbrug. 26 pp.
- Jørgensen, L.N., Heick, T.M., Abuley, I.K. et al., 2021. Applied Crop Protection 2021. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, 2022. 93 p. (DCA rapport; No. 204).
- Kampen, V., Mitchell, B.W., Siegel, H.S., 1979. Thermoneutral zone of chickens as determined by measuring heat production, respiration rate, and electromyographic and electroencephalographic activity in light and dark environments and changing ambient temperatures. *The Journal of Agricultural Science* 92, 219-226.
- Kamut, M., Jezierski, T., 2014. Ecological, behavioural and economic effects of insects on grazing farm animals - A review. *Animal Science Papers and Reports* 32, 107-119.
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., Or, D., 2019. Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Konvička, M., Ričl, D., Vodičková, V., Beneš, J., Jirků, M., 2021. Restoring a butterfly hot spot by large ungulates refaunation: the case of the Milovice military training range, Czech Republic. *BMC Ecology and Evolution*, 21(1), 1-18.
- Kristensen, K., Schelde, K., Olesen, J.E., 2011. Winter wheat yield response to climate variability in Denmark. *Journal of Agricultural Science* 149, 33-47.
- Kristoffersen, R., Hansen, L., Cedergreen, N., Munk, L., Jørgensen, L.N., 2018. Control of rust in sugarbeet. *Crop Protection*, 111; 6-16.
- Kruijt, B., Witte, J.-P.M., Jacobs, C.M.J., Kroon, T., 2008. Effect of rising atmospheric CO₂ on evapotranspiration and soil moisture: A practical approach for the Netherlands. *Journal of Hydrology* 349, 257-267.
- Kumar, M., Ratwan, P., Dahiya, S.P., Nehra, A.K., 2021. Climate change and heat stress: Impact on production, reproduction and growth performance of poultry and its mitigation using genetic strategies. *Journal of Thermal Biology* 97.
- Lacetera, N., 2019. Impact of climate change on animal health and welfare. *Animal Frontiers* 9, 26-31.
- Landbrugsstyrelsen, 2022. Bekendtgørelse om planteskadegørere (nr. 1584 af 13.12.2016) på retsinformation.
- Landsforsøgene, 2021. Tabel 36 side 95. Landbrug og Fødevarer. SEGES
- Lehmann, P., Lyytinen, A., Piironen, S., Lindström, L., 2014. Northward range expansion requires synchronization of both overwintering behaviour and physiology with photoperiod in the invasive Colorado potato beetle (*Leptinotarsa decemlineata*). *Oecologia* 176:57-68.
- Lehmann, P., Ammunét, T., Barton, M., Battisti, A., Eigenbrode, S.D., Jepsen, J.U., Kalinkat, G., Neuvonen, Niemelä, S.P., Terblanche, J.S., Økland, B., Björkman, C., 2020. Complex responses of global insect pests to climate warming. *Frontiers in Ecology and the Environment* 18:141-150.
- Liu, F., Zhao, W., Le, H.H., Cottrell, J.J., Green, M.P., Leury, B.J., Dunshea, F.R., Bell, A.W., 2022. Review: What have we learned about the effects of heat stress on the pig industry? *Animal* 16, 100349.

- Lund, P., Hellwing, A.L.F., Weisbjerg, M.R., 2021. Fremskrivning af metanomdannelsesfaktoren (Y_m) for malkekøer i årene 2025, 2030, 2035 og 2040. Notat til Miljø- og Fødevareministeriet. 11 pp.
- Merilä, J., Hendry, A.P., 2014. Climate change, adaptation, and phenotypic plasticity: the problem and the evidence. *Evolutionary Applications* 7:1-14.
- Makowski, D., Asseng, S., Ewert, F., Bassu, S., Durand, J.L., Li, T., Martre, P., Adam, M., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Baron, C., Basso, B., Bertuzzi, P., Biernath, C., Boogaard, H., Boote, K.J., Bouman, B., Bregaglio, S., Brisson, N., Buis, S., Cammarano, D., Challinor, A.J., Confalonieri, R., Conijn, J.G., Corbeels, M., Deryng, D., De Sanctis, G., Doltra, J., Fumoto, T., Gaydon, D., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R., Grassini, P., Hatfield, J.L., Hasegawa, T., Heng, L., Hoek, S., Hooker, J., Hunt, L.A., Ingwersen, J., Izaurralde, R.C., Jongschaap, R.E.E., Jones, J.W., Kemanian, R.A., Kersebaum, K.C., Kim, S.-H., Lizaso, J., Marcaida III, M., Müller, C., Nakagawa, H., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'Leary, G.J., Olesen, J.E., Oriol, P., Osborne, T.M., Palosuo, T., Pravia, M.V., Priesack, E., Ripoche, D., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., F. Ruget, F., Sau, F., Se-menov, M.A., Shcherbak I., Singh, B., Singh, U., Soo, H.K., Steduto, P., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tang, L., Tao, F., Teixeira, E.I., Thorburn, P., Timlin, D., Travasso, M., Rötter, R.P., Waha, K., Wallach, D., White, J.W., Wilkens P., Williams, J.R., Wolf, J., Yin, X., Yoshida, H., Zhang, Z., Zhu, Y., 2015. A statistical analysis of three ensembles of crop model responses to temperature and CO₂ concentration. *Agricultural and Forest Meteorology* 214-215, 483-493.
- Mikovits, C., Zollitsch, W., Hörtenhuber, S.J., Baumgartner, J., Niebuhr, K., Piringer, M., Anders, I., Andre, K., Hennig-Pauka, I., Schönhart, M., Schauburger, G., 2019. Impacts of global warming on confined livestock systems for growing-fattening pigs: simulation of heat stress for 1981 to 2017 in Central Europe. *International Journal of Biometeorology* 63, 221-230.
- Milus, E.A., Kristensen, K., Hovmøller, M.S., 2009. Evidence for Increased Aggressiveness in a Recent Wide-spread Strain of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* Causing Stripe Rust of Wheat. *Phytopathology* 99 (1), 89-94
- Moeslund, J.E., Nygaard, B., Ejrnæs, R., Bell, N., Bruun, L.D., Bygebjerg, R., Carl, H., Damgaard, J., Dylmer, E., Elmeros, M., Flensted, K., Fog, K., Goldberg, I., Gønget, H., Helsing, F., Holmen, M., Jørum, P., Lissner, J., Læssøe, T., Madsen, H.B., Misser, J., Møller, P.R., Nielsen, O.F., Olsen, K., Sterup, J., Søchting, U., Wiberg-Larsen, P. og Wind, P. 2019. Den danske Rødliste. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. www.redlist.au.dk.
- Munkholm, L.J., Sibbesen, E., 1997. Tab af fosfor fra landbrugsjord. *Miljøforskning* 30.
- Muns, R., Malmkvist, J., Larsen, M.L.V., Sørensen, D., Pedersen, L.J., 2016. High environmental temperature around farrowing induced heat stress in crated sows. *J. Anim. Sci.* 94, 377-384.
- Negron-Perez, V.M., Fausnacht, D.W., Rhoads, M.L., 2019. Invited review: Management strategies capable of improving the reproductive performance of heat-stressed dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 102, 10695-10710.
- Neve, P., Vila-Auib, M., Roux, F., 2009. Evolutionary thinking in agricultural weed management. *New Phytol* 184: 83-793
- Nielsen, L.K., Jensen, J.D., Nielsen, G.C., Jensen, J.E., Spliid, N.H., Thomsen, K., Justesen, A.F., Collinge, D.B., Jørgensen, L.N., 2011. *Fusarium* Head Blight of Cereals in Denmark: Species Complex and Related Mycotoxins. *Phytopathology*, Vol 101, 8, 960-969
- Nielsen, A., Trolle, D., Bjerring, R., Søndergaard, M., Olesen, J.E., Janse, J.H., Mooij, Jeppesen, E., 2014. Effects of climate and nutrient load on the water quality of shallow lakes assessed through ensemble model runs by PCLake. *Ecological Applications* 24, 1926-1944.

- Nielsen, G.C., 2016. Havrerødsot i vintersæd. Plantekongres 2016. Session 11: Planteværn i tidligt sået vintersæd, pp. 60-62
- Obour, P.B., Keller, T., Jensen, J. L., Edwards, G., Lamandé, M., Watts, C.W., Sørensen, C.G., Munkholm, L.J., 2019. Soil water contents for tillage: A comparison of approaches and consequences for the number of workable days. *Soil and Tillage Research*, 195, Article 104384. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104384>
- Obour, P.B., Kolberg, D., Lamandé, M., Børresen, T., Edwards, G., Sørensen, C.G., Munkholm, L.J., 2018. Compaction and sowing date change soil physical properties and crop yield in a loamy temperate soil. *Soil and Tillage Research*, 184, 153-163. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.07.014>
- Olesen, J.E., Bindi, M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy* 16, 239-262.
- Olesen, J.E., Grevsen, K., 1993. Simulated effects of climate change on summer cauliflower production in Europe. *European Journal of Agronomy* 2, 313-323.
- Olesen, J.E., Trnka, M., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Rossi, F., Kozyra, J., Micale, F., 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy* 34, 96-112.
- Olesen, J.E., Børgesen, C.D., Elsgaard, L., Palosuo, T., Rötter, R., Skjelvåg, A.O., Peltonen-Sainio, P., Börjesson, T., Trnka, M., Ewert, F., Siebert, S., Brisson, N., Eitzinger, J., van der Fels-Klerx, H.J., van Asselt, E., 2012. Changes in flowering and maturity time of cereals in Northern Europe under climate change. *Food Additives and Contaminants* 29, 1527-1542.
- Olesen, J.E., Munkholm, L.J., Kudsk, P., Gregersen, P.L., Kongsted, A.G., Børsting, C.F., Sørensen, J.T., Henriksen, B., Woyengo, T., Villumsen, T.M., Rasmussen, M.D., Andersen, M.N., 2022. Notat om klimaforandringerne betydning for dansk landbrug. Rådgivningsnotat fra DCA – National Center for Fødevarer og Jordbrug.
- 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. *Geomorphology*, 342, 150-162. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.06.011>
- Pearce, S.C., Gabler, N.K., Ross, J.W., Escobar, J., Patience, J.F., Rhoads, R.P., Baumgard, L.H., 2013. The effects of heat stress and plane of nutrition on metabolism in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91, 2108-2118.
- Peng, Y., Peñuelas, J., Vesterdal, L., Yue, K., Peguero, G., Fornara, D.A., Heděnc, P., Steffens, C., Wu, F., 2022. Responses of soil fauna communities to the individual and combined effects of multiple global change factors. *Ecol. Lett.* 25, 1961-1973. <https://doi.org/10.1111/ele.14068>
- Peng, J., Manevski, K., Kørup, K., Larsen, R., Zhou, Z., Andersen, M.N., 2021. Environmental constraints to net primary productivity at northern latitudes: A study across scales of radiation interception and biomass production of potato. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* 94, 102232.
- Petersen, C.T., Abrahamsen, P., 2021. Predicting effects of soil compaction on crop yield and nitrogen dynamics. Report. University of Copenhagen.
- Polsky, L., von Keyserlingk, M.A.G., 2017. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare, *Journal of Dairy Science*, 100, 8645-8657. doi:10.3168/jds.2017-12651.
- Pulido-Moncada, M., Petersen, S.O., Munkholm, L.J., 2022. Soil compaction raises nitrous oxide emissions in managed agroecosystems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42, 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00773-9>

- Pulido-Moncada, M., Schjønning, P., Labouriau, R., Munkholm, L.J., 2020. Residual effects of compaction on the subsoil pore system - a functional perspective. *Soil Science Society of America Journal*, 84, 717-730. <https://doi.org/10.1002/saj2.20061>
- Pullens, J.W.M., Sharif, B., Trnka, M., Balek, J., Semenov, M., Olesen, J.E., 2019. Risk factors for European winter oilseed rape production under climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 272-273, 30-39.
- Qi, J., Jensen, J.L., Christensen, B.T., Munkholm, L.J., 2022. Soil structural stability following decades of straw incorporation and use of ryegrass cover crops. *Geoderma*, 406, 115463.
- Raven, P.H., Wagner, D.L., 2021. Agricultural intensification and climate change are rapidly decreasing insect biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(2), e2002548117.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conversation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), Agriculture Handbook Number 703. United States Department of Agriculture.
- Renaudeau, D., Gilbert, H., Noblet, J., 2012. Effect of climatic environment on feed efficiency in swine. In: Patience J. F., editor, *Feed efficiency in swine*. Wageningen, NL: Wageningen Academic, 183-210.
- Rong, L., Liu, D., Pedersen, E., Zhang, G., 2014. Effect of climate parameters on air exchange rate and ammonia and methane emissions from a hybrid ventilated dairy cow building. *Energy and Buildings*, 82, 632e643.
- Rostagno, M.R., 2020. Effects of heat stress on gut health of poultry. *J. Anim. Sci.* 98, 4, 1-9
- Rose, H., Wang, T., van Dijk, J., Morgan, E.R., 2015. GLOWORM-FL: A simulation model of the effects of climate and climate change on the free-living stages of gastro-intestinal nematode parasites of ruminants. *Ecological Modelling* 297, 232-245.
- Saeed, M., Abbas, G., Alagawany, M., Kamboh, A.A., Abd El-Hack, M.E., Khafaga, A.F., Chao, S., 2019. Heat stress management in poultry farms: A comprehensive overview. *Journal of Thermal Biology* 84, 414-425.
- Schauberger, G., Schönhart, M., Zollitsch, W., Hörtenhuber, S.J., Kirner, L., Mikovits, C., Baumgartner, J., Piringer, M., Knauder, W., Anders, I., Andre, K., Hennig-Pauka, I., 2021. Economic risk assessment by weather-related heat stress indices for confined livestock buildings: A case study for fattening pigs in Central Europe. *Agriculture (Switzerland)* 11, 1-22.
- Schjønning, P., Lamandé, M., Thorsøe, M.H., 2019. Soil compaction (DCA Report No. 155). Aarhus University.
- Schjønning, P., van den Akker, J.J.H., Keller, T., Greve, M.H., Lamandé, M., Simojoki, A., Stettler, M., Arvidsson, J., Breuning-Madsen, H., 2015. Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction-A European perspective. *Advances in Agronomy*, 133, 183-237).
- Schjønning, P., Heckrath, G., Christensen, B.T., 2009. Threats to soil quality in Denmark (DJF report Plant Science No. 143).
- Schulz, H., Bødker L. Jørgensen, LN, Kristensen, K. (1990) Influence of different cultural practices on distribution and incidence of eyespot (*Pseudocercospora herpotrichoides*) in winter rye and winter wheat. *Danish J. for Plant and Soil Science*. 94, nr. 2 : S. 211-221
- SEGES, 2020. Faktaark på dansk med THI-indeks - Undgå varmemstress hos køerne Landbrugsinfo 1.maj 2020. https://www.landbrugsinfo.dk/-/media/landbrugsinfo/public/8/0/d/sundhed_sygdomme_undga_varmestress_koer_sommerhalvar_b1_dk.pdf

- SEGES, 2021a. Sådan påvirker varmemstress køernes. Landbrugsinfo. https://www.landbrugsinfo.dk/public/4/7/e/sundhed_velfard_sadan_pavirker_varmestress_sundhed
- SEGES, 2021b. Landsforsøgene 2021, side 91.
- Segnalini, M., Bernabucci, U., Vitali, A., Nardone, A., Lacetera, N., 2013. Temperature humidity index scenarios in the Mediterranean basin. *International Journal of Biometeorology* 57, 451-458.
- Semenov, M. A., Stratonovitch, P., Alghabari, F. and Gooding, M. J., 2014. Adapting wheat in Europe for climate change. *Journal of Cereal Science* 59, 245-256.
- Seon, H.K., Sonny C. R., Raniel A. V., Yong, C., Sang S.L. 2022. Heat Stress: Effects on Rumen Microbes and Host Physiology, and Strategies to Alleviate the Negative Impacts on Lactating Dairy Cows. *Front. Microbiol., Sec. Systems Microbiology*. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.804562>
- Silva, B.A., Noblet, J., Oliveira, R.F., Donzele, J.L., Primot, Y., Renaudeau, D., 2009. Effects of dietary protein concentration and amino acid supplementation on the feeding behavior of multiparous lactating sows in a tropical humid climate. *J. Anim. Sci.* 87, 2104-2112.
- Skaalsveen, K., Ingram, J., Clarke, L.E., 2019. The effect of no-till farming on the soil functions of water purification and retention in north-western Europe: A literature review. *Soil and Tillage Research*, 189, 98-109. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.004>
- Skelsey, P., Cooke, D.E.L., Lynott, J.S., Lees, A.K., 2016. Crop connectivity under climate change: future environmental and geographic risks of potato late blight in Scotland. *Glob Chang Biol.* 2016; 22:3724-3738. [PubMed: 27214030]
- Smith, H.J., Smith, P., Wattenbach, M., Zaehle, S., Hiederer, R., Jones, R.J.A., Montanarella, L., Rounsevell, M.D.A., Reginster, I., Ewert, F., 2005. Projected changes in mineral soil carbon of European croplands and grasslands, 1990-2080. *Global Change Biology*, 11, 2141-2152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001075.x>
- Stratonovitch, P., Storkey, J., Semenov, M., 2012. A process-based approach to modelling impacts of climate change on the damage niche of an agricultural weed. *Global Change Biol.* 18:2071-2080.
- Sørensen, J.T., Thomsen, R., 2017. Identification of risk factors and strategies for reducing sow mortality. DCA rapport NO. 097, pp. 35
- Taghizadeh-Toosi, A., Christensen, B.T., Hutchings, N.J., Vejlin, J., Kätterer, T., Glendining, M., Olesen, J.E., 2014a. C-TOOL: A simple model for simulating whole-profile carbon storage in temperate agricultural soils. *Ecological Modelling* 292, 11-25.
- Taghizadeh-Toosi, A., Olesen, J.E., Kristensen, K., Elsgaard, L., Østergaard, H.S., Lægdsmand, M., Greve, M.H., Christensen, B.T., 2014b. Changes in carbon stocks of Danish agricultural mineral soils during 1986 -2009: effects of management. *European Journal of Soil Science* 65, 730-740.
- 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 between 1986 and 2009. *European Journal of Soil Science*, 65(5), 730-740.
- Taub, D.R., Miller, B., Allen, H., 2008. Effects of elevated CO₂ on the protein concentration of food crops: a meta-analysis. *Global Change Biol.* 14: 565-575.

- Teyssier, J.R., Preynat, A., Cozannet, P., Briens, M., Mauromoustakos, A., Greene, E.S. Owens, C.M. Dridi, S., Rochell, S.J., 2022. Constant and cyclic chronic heat stress models differentially influence growth performance, carcass traits and meat quality of broilers. *Poultry Science* 101:101963 <https://doi.org/10.1016/j.psj.2022.101963>
- Thackeray, S.J., Henrys, P.A., Hemming, D., Bell, J.R., Botham, M.S., Burthe, S., Helaouet, P., Johns, D.G., Jones, I.D., Leech, D.I., Mackay, E.B., Massimino, D., Atkinson, S., Bacon, P.J., Brereton, T. M., Carvalho, L., Clutton-Brock, T.H., Duck, C., Edwards, M., Elliott, J.M., Hall, S.J.G., Harrington, R., Pearce-Higgins, J.W., Høye, T.T., Kruuk, L.E.B., Pemberton, J.M., Sparks, T.H., Thompson, P.M., White, I., Winfield, I. J., Wanless, S., 2016. Phenological sensitivity to climate across taxa and trophic levels. *Nature (London)* 535:241-245.
- Thornton, P., Nelson, G., Mayberry, D., Herrero, M., 2021. Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century. *Global Change Biology* 27, 5762– 5772. DOI: 10.1111/gcb.15825
- Trnka, M., Olesen, J.E., Kersebaum, K.C., Skjelvåg, A.O., Eitzinger, J., Seguin, B., Peltonen-Sainio, P., Orlandini, S., Dubrovsky, M., Hlavinka, P., Balek, J., Eckersten, H., Cloppet, E., Calanca, P., Rötter, R., Gobin, A., Vucetic, V., Nejedlik, P., Kumar, S., Lalic, B., Mestre, A., Rossi, F., Alexandrov, V., Kozyra, J., Schaap, B., Zalud, Z., 2011. Agroclimatic conditions in Europe under climate change. *Global Change Biology* 17, 2298-2318.
- Trnka, M., Rötter, R., Ruiz-Ramos, M., Kersebaum, K.C., Olesen, J.E., Zalud, Z., Semenov, M.A., 2014. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nature Climate Change* 4, 637-643.
- Trnka, M., Balek, J., Semenov, M.A., Semerádová, D., Belinová, M., Hlavinka, P., Olesen, J.E., Eitzinger, J., Schaumberger, A., Zahradníček, P., Kopencký, D., Zalud, Z., 2020. Future agroclimatic conditions and implications for European grasslands. *Biologia Plantarum* 64, 865-880.
- Trolle, D., Nielsen, A., Rolighed, J., Thodsen, H., Andersen, H.E., Karlsson, I.B., Refsgaard, J.C., Olesen, J.E., Bolding, K., Kronvang, B., Søndergaard, M., Jeppesen, E., 2015. Projecting the future ecological state of lakes in a 6 degree warming scenario. *Climate Research* 64, 55-72
- Trolle, D., Nielsen, A., Andersen, H.E., Thodsen, H., Olesen, J.E., Børgesen, C.D., Refsgaard, J.C., Sonnenborg, T.O., Karlsson, I.B., Christensen, J.P., Markager, S., Jeppesen, E., 2019. Effects of changes in land use and climate on aquatic ecosystems: Coupling of models and decomposition of uncertainties *Science of the Total Environment* 657, 627-633.
- Vadez, V., Berger, J.D., Warkentin, T., Asseng, S., Ratnakumar, P., Rao, K.P.C., Gaur, P.M., Munier-Jolain, N., Larmure, A., Voisin, A.-S., Sharma, H.C., Pande, S., Sharma, M., Krishnamurthy, L., Zaman, M.A., 2011. Adaptation of grain legumes to climate change: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 31-44.
- Valerio, M., Tomecek, M.B, Lovelli, S., Ziska, L.H., 2011. Quantifying the effect of drought on carbon dioxide-induced changes in competition between a C3 crop (tomato) and a C4 weed (*Amaranthus retroflexus*). *Weed Res.* 51:591-600.
- Váry, Z., Mullins, E., McElwain, J.C., Doohan, F.M., 2015. The severity of wheat diseases increases when plants and pathogens are acclimatized to elevated carbon dioxide. *Glob Chang Biol.* 2015; 21:2661-2669.
- Velásquez, A.C., Castroverde, C.D.M., He, S.Y., 2018. Plant-Pathogen Warfare under Changing Climate Conditions. *Curr Biol.* 2018 May 21;28(10):R619-R634. doi: 10.1016/j.cub.2018.03.054. PMID: 29787730; PMCID: PMC5967643.

- Wan, F.-H., Yang, N.-W., 2016. Invasion and Management of Agricultural Alien Insects in China. *Annual Review of Entomology* 61:77-98.
- Wang, D., Heckathorn, S.A., Wang, X., Philpott, S.M., 2011. A meta-analysis of plant physiological and growth responses to temperature and elevated CO₂. *Oecologia* 169, 1-13.
- Wang, X., Gao, H., Gebremedhin, K. G., Bjerg, B. S., Van Os, J., Tucker, C. B., and Zhang, G. 2018. A predictive model of equivalent temperature index for dairy cattle (ETIC), *J. Therm. Biol.*, 76, 165-170, <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.07.013> , 2018.
- Webber, H., Ewert, F., Olesen, J.E., Müller, S., Fronzek, S., Ruane, A., Ababaei, B., Bindi, M., Bourgault, M., Ferrise, R., Finger, R., Fodor, N., Gabaldón-Leal, C., Gaiser, R., Jabloun, M. Kersebaum, K.C., Lizaso, J.I., Lorite, I., Manceau, L., Martre, P., Moriondo, M., Nendel, C., Rodríguez, A., Ramos, M.R., Semenov, M.A., Siebert, S., Stella, T., Stratonovitch, P., Trombi, G., Wallach, D., 2018. Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. *Nature Communications* 9, 4249.
- West, J.W., 2003. Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science* 86, 2131-2144.
- Wiesmeier, M., Poeplau, C., Sierra, C.A., Maier, H., Frühauf, C., Hübner, R., Kühnel, A., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., 2016. Projected loss of soil organic carbon in temperate agricultural soils in the 21st century: effects of climate change and carbon input trends. *Scientific reports*, 6, 1-17.
- Zhao, J., Bindi, M., Eitzinger, J., Ferrise, R., Gaile, Z., Gobin, A., Holzkämper, A., Kersebaum, K.C., Kozyra, J., Kriaučiūnienė, Z., Loit, E., Nejedlik, P., Nendel, C., Niinemets, Ü., Palosuo, T., Peltonen-Sainio, P., Potopová, V., Ruiz-Ramos, M., Reidsma, P., Rijk, B., Trnka, M., van Ittersum, M.K., Olesen, J.E., 2022, Priority for climate adaptation measures in European crop production systems. *European Journal of Agronomy* 138, 126516.
- Ziska, L.H., 2001. Changes in competitive ability between a C4 crop and a C3 weed with elevated carbon dioxide. *Weed Sci.* 49:622-627
- Ziska, L.H., 2017. Could recent increases in atmospheric CO₂ have acted as a selection factor in *Avena fatua* populations? A case study of cultivated and wild oat competition. *Weed Res.* 57:399-405
- Ziska, L.H., Blumenthal, D.M., Franks, S.J., 2019. Understanding the nexus of rising CO₂, climate change, and evolution in weed biology. *Invasive Plant Sci. Manag.* 12:79-88
- Ziska, L.H., Blumenthal, D.M., Runion, G.B., Hunt Jr., E.R., Diaz-Soltero, H. 2011. Invasive species and climate change: an agronomic perspective. *Climate Change* 105:13-42
- Ziska, L.H., George, K., 2004. Rising carbon dioxide and invasive, noxious plants: Potential threats and consequences. *World Res. Rev.* 16:427-447.
- Yin, R., Kardol, P., Eisenhauer, N., Schädler, M., 2022. Land-use intensification reduces soil macrofauna biomass at the community but not individual level. *Agric., Ecosyst. Environ.* 337, 108079. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108079>
- Öztürk, I., Sharif, B., Baby, S., Jabloun, M., Olesen, J.E., 2017. The long-term effect of climate change on productivity of winter wheat in Denmark: a scenario analysis using three crop models. *Journal of Agricultural Science* 155, 733-750.

4 Fremtidens landbrug – en beskrivelse af teknologier og potentialer for klimatilpasning i landbruget 2030 og 2050

Ændringer i den fremtidige landbrugsdrift vil blive drevet af både politisk regulering begrundet i hensyn til miljøet, energi- og fødevarer sikkerhed og af markedet. Dansk landbrug er en hovedudleder af drivhusgasser og kvælstof til vandmiljøet, som nødvendigvis må reduceres i henhold til internationale aftaler. Dette er i sig selv en vanskelig opgave, som skal bringes til at gå hånd i hånd med klimatilpasningen. Denne tilpasning vil således skulle understøtte den grønne omstilling. Markedsudviklingen er svær at spå om, da produktionen i dansk landbrug ikke nødvendigvis vil følge efterspørgslen på globalt plan, hvor der stadig er en stigende efterspørgsel efter animalske produkter grundet i global befolkningstilvækst og velstandsstigning i udviklingslandene. Samtidig er der dog globalt en stadig stærkere forbrugerbevidsthed om at en større andel af vegetabiliske produkter i kosten er sundere og er med til at nedbringe udledningen af drivhusgasser. Der må derfor forventes en større efterspørgsel på plantebaserede produkter, men samtidig vil der også være en stigende efterspørgsel på bioenergi og biomaterialer. En del af denne efterspørgsel vil kunne sikres gennem produktion af biomasser, der efterfølgende gennem bioraffinering opgraderes til fødevarer, foder, energi og materialer.

4.1 Planteavl

Forfattere: Jørgen E. Olesen, Mathias N. Andersen, Per L. Gregersen, Henrik Brinch-Pedersen, Inger Holme, Niels Holst, Henrik Skovgaard, Per Kudsk, Lise Nistrup Jørgensen, Lars Juhl Munkholm, Christen Duus Børgesen, Bo Vangsø Iversen

Fagfællebedømmere: Johannes W.M. Pullens, Kim Hebelstrup, Mathieu Lamandé, Søren Østergaard

Inden for planteavlen forventes både nye dyrkningssystemer med forbedret teknologi og fortsat forædling af nye sorter og arter af landbrugsplanter at kunne bidrage med større udbytte og bedre og mere målrettet kvalitet under de ændrede klimaforhold at kunne bidrage til et mindre klima- og miljøaftryk i planteproduktionen. Denne indsats vil skulle fokusere på tilpasning til et varmere og mere variabelt klima, hvor temperatur og nedbør varierer mere mellem årene end i det nuværende klima. Dette kræver en højere grad af resiliens i dyrkningssystemer, hvor effekter af øget tørke og oversvømmelser minimeres. Dette opnås gennem ændring i dyrkningssystemer og dyrkningsteknologi, men også forædling af sorter med bedre tolerance over for ekstreme spiller en rolle. Hertil kan varsling mod ekstreme og forsikring mod disse spille en rolle (Zhao et al., 2022).

4.1.1 Høstudbytter

Tilpasning til klimaændringer vil i stort omfang have fokus på at opretholde udbytte og udbyttestabilitet. Der vil dog også være behov for at håndtere effekter på afgrødernes kvalitet. Det er således påvist at proteinindholdet i hvede vil falde under klimaændringer (Asseng et al., 2019), ligesom kvaliteten af visse grønsager kan blive negativt påvirket (Olesen og Grevsen, 1993). Klimatilpasninger for at styrke udbytter og kvalitet vil have fokus på valg af arter og sorter af afgrøder, rettidighed i afgrødeetablering og høst, gødning, plantebeskyttelse og vanding. I denne sammenhæng spiller planteforædling målrettet mod ændrede og mere variable klimaforhold en betydelig rolle (Kahiluoto et al., 2019). Hertil kommer behovet for en veldrænet og dyrkningssikker jord. Der er således tale om mange forskellige tiltag, hvor forventningerne om øget klimavariabilitet øger behovet for resiliens i dyrkningssystemet, især i forhold til at modvirke tørke og oversvømmelser.

4.1.2 Dyrkningssystemer

Ændringer i det fremtidige afgrødevalg vil på samme måde som landbruget generelt blive drevet af både politisk regulering og af markedet. I forhold til klimatilpasning vil der især være fokus på at sikre en stabil og høj planteproduktion af god kvalitet. Dette involverer dyrkning af nye arter og sorter, ændringer i dyrkningsteknik, gødskning, jordbearbejdning, dræning, vanding og plantebeskyttelse. Hertil kommer at krav om lavere udledninger af næringsstoffer og drivhusgasser også kræver ændringer i dyrkningsformer. Dette vil formentlig medføre en udvikling mod større arealer af flerårige afgrøder, især græsafgrøder, men på længere sigt også udvikling af nye typer flerårige afgrøder, fx flerårige kornafgrøder, især af rug og hvede. Sådanne afgrøder vil have et dybere rodnet og ikke kræve intensiv jordbearbejdning. De vil dermed generelt være mere resiliente over for både tørke og oversvømmelser. Den længere vækstsæson giver også bedre mulighed for at dyrke en række arter/sorter af bælgeplanter, ligesom nye arter og blandinger af efterafgrøder bør undersøges med henblik på grøngødning eller endog høst.

4.1.2.1 Dyrkning og gødskning

Højere temperatur giver ændrede betingelser for afgrødernes vækst i forår og efterår, og dermed også ændrede optimale tidspunkter for såning og gødskning (Doltra et al., 2014). I efteråret vil vintersæden alt andet lige skulle sås senere, men dette øger risikoen for kvælstofudvaskning, og der vil derfor skulle udvikles nye dyrkningsformer og sorter der sikrer tidlig såning af vintersæd uden af dette øger problemer med sygdomme og skadedyr. De vårsåede afgrøder vil kunne sås tidligere, forudsat af markerne er tilstrækkeligt veldrænede (Olesen et al., 2012). Korn- og frøafgrøder vil modne tidligere og dette giver bedre mulighed for dyrkning af efterafgrøder, og der vil kunne udvikles dyrkningssystemer hvor efterafgrøder vil kunne høstes og bruges til foder og bioraffinering (Pullens et al., 2021). Sådanne ændringer i afgrøder og dyrkningssystemer vil også give anledning til ændret behov for gødning, og dette kan medføre behov for ændringer i reguleringen af landbrugets næringsstofanvendelse, fx gødskning af efterafgrøder.

4.1.2.2 Nye arter og sorter

Der er i Danmark allerede sket en tilpasning med dyrkning af majs til ensilage til fodring af kvæg. Med yderligere opvarmning vil dyrkning af majs modenhed som svinefoder blive relevant. Dette er dog delvis udfordret af krav om lav kvælstofudledning til vandmiljøet, og der vil skulle udvikles effektive efterafgrøder, der vil kunne sikre lav kvælstofudledning fra majsdyrkning (Doltra et al., 2014). Et varmere klima giver nye muligheder for dyrkning af proteinafgrøder til plantebaserede fødevarer, som fx sojabønne og quinoa. Disse afgrøder vil dog i betydelig grad være udfordret i forhold til den øgede klimavariabilitet, da disse i varierende grad vil være påvirkede af tørke og/eller oversvømmelser.

Der er i høj grad brug for udvikling flerårige afgrøder med dybere rodnet, som bedre vil kunne modstå både tørke og oversvømmelser. Dette omfatter i første række græsmarksplanter som arter af græs og kløver. Disse afgrøder vil kunne anvendes som grundlag for bioraffinering til foder, fødevarer, energi og materialer. Sådanne afgrøder vil desuden kunne mindske landbrugets næringsstofudledninger (Manevski et al., 2018). Denne udvikling kræver derfor også udvikling af en bioraffineringsindustri. For mange af de eksisterende afgrøder (især kornafgrøderne) er der et stærkt behov for udvikling af mere resiliente dyrkningsformer. I den nuværende dyrkning anvendes hovedsageligt en enkelt sort af kornafgrøder på den enkelte mark. Der er gode indikationer for at sorter af vinterhvede reagerer forskelligt på klimaekstremer og dyrkning af en blanding af sorter med forskellig respons på klimaekstremer vil derfor kunne forøge resiliensen (Kahiluoto et al., 2019).

4.1.3 Forædling

4.1.3.1 Afgrøde- og sortsvalg

Ændringer i det fremtidige afgrødevalg vil sandsynligvis blive drevet af både politisk regulering og af markedet. Et fremtidigt krav om større kulstofindlejring i landbrugsjorden vil medføre en udvikling mod større arealer af flerårige afgrøder, især græsafgrøder, men på længere sigt også udvikling af nye typer flerårige afgrøder, fx flerårige kornafgrøder, især af rug og hvede. Alt sammen pga. højere vedvarende rodbiomasse for flerårige afgrøder. Da en stor del af landbrugsarealet i dag går til dyrkning af foder, vil afgrødevalget i høj grad også afhænge af de ændringer/indskrænkninger, der eventuelt måtte komme for husdyrproduktionen. I fht. til husdyrproduktionen kan nye lokalt dyrkede arter med forbedret foderkvalitet blive relevant, og allerede dyrker arter kan fortsat forbedres mht. husdyrenes udnyttelse af næringsstoffer i foderet. Med en udvikling mod betydeligt flere plantebaserede fødevarer vil dyrkning af flere proteinafgrøder være en del af løsningen: nye proteinrige arter, fx hestebønner, kikærter, andre bønnetyper, quinoa og græs som proteinkilde til fødevarer og foder, samt andre specialafgrøder, der kan indgå i plantebaserede fødevarer.

Den fremtidige forædling af nye sorter og sortsvalget for landmanden vil være baseret på samme principper og med samme mål som nu, dvs. sorter med en kombination af højt udbytte og kvalitet af det høstede produkt og også sorter, som klarer sig godt især mht. sygdomme. Nyt vil sandsynligvis være en betoning af

nye egenskaber, som øget modstandsdygtighed over for tørke og oversvømmelser, og på kvalitetssiden fx sorter med forbedret foderkvalitet, hvor næringsstoffer udnyttes bedre. Evne til kulstofindlejring i landbrugsjorden vil sandsynligvis primært være et spørgsmål om afgrødevalg, men kan dog også ved en målrettet forædling komme på tale på sortsniveau.

4.1.3.2 Planteforædling, herunder nye genteknologier som fx CRISPR, mutagenese

Planteforædling går overordnet ud på at selekttere de bedste gener og kombinere dem i en plantesort. Med det store antal gener, der findes i en enkelt plante, er dette en kompleks proces, men udviklingen i molekylærbiologien og den genomiske information, som især DNA-sekventeringsteknologierne har lagt grunden til, gør det muligt at arbejde målrettet med variationer på enkeltgen-niveau og deres virkning på planternes egenskaber. Med tanke på hvor vigtig mutationer/ændringer i enkeltgener har været for domesticering og de sidste århundredes forædling af de dyrkede arter, er der fortsat store muligheder i at arbejde med variationen/mutation af enkeltgener i udviklingen af fremtidens klimatilpassede afgrøder (Monroe et al., 2020). Egenskaberne, der skal arbejdes med, skal findes inden for to felter: 1) afbødning af klimapåvirkning, dvs. mere modstandsdygtige afgrøder overfor øget klimarelateret abiotisk og biotisk stress, og 2) direkte virkning på klimagasser gennem øget kulstofindlejring i jorden eller mindsket udledning af især lattergas. Samtidig skal forædlingen fortsat levere sorter med højt udbytte og gode kvalitetsegenskaber i fht. slutforbrug af de høstede afgrøder. Ahmad et al. (2021) oplister omkring 100 gener på tværs af flere arter, hvor der allerede har været lavet studier med genom-redigering af specifikke enkelt-gener med det formål at forbedre stress-tolerance, udbyttekomponenter eller kvalitet. Denne liste af gener vil vokse eksponentielt de kommende år, og i horisonten frem til 2050 må der forventes store muligheder i at udnytte de nye teknologier til målrettede forbedringer af de dyrkede afgrøder.

Genomisk information:

Den genomiske information om geners DNA-sekvens og position i genomet vokser for en række plantearter eksponentielt i disse år med fremkomsten af ikke kun reference-genomsekvenser for vigtige landbrugsafgrøder, men også såkaldte pan-genomer, hvor spændvidden i den genetiske variation inden for arterne afspejles (Thudi et al., 2021). Variationen findes ikke kun inden for de dyrkede arter/sorter, men også i samlinger af vilde beslægtede arter/typer og såkaldte landracer af lokalt dyrkede typer af forskellige afgrøder (Milner et al., 2019). Dette udgør en vigtig ressource for at kunne kortlægge genetikken bag centrale egenskaber i forædlingen af klimarobuste afgrøder, fx sygdoms- og tørkeresistens. Denne kortlægning, sammen med det molekylærbiologiske/biokemiske kendskab til funktionen af enkeltgener, vil, hvis de nødvendige ressourcer er til rådighed, gøre det muligt målrettet at arbejde med enkeltgen-egenskaber i fremtidens plantesorter for at tilpasse dem de kommende mere barske klimaforhold og generelt at forbedre deres egenskaber.

Domesticering – enkeltgen-egenskaber i planteforædlingens historie.

Den historiske domesticering af de dyrkede arter (især for dem, hvor modne frø udnyttes) baserede sig i høj grad på variation/mutation af enkeltgener, de såkaldte domesticeringsgener, som fx forhindrer tab af frø fra modne aks (*brittle*-gener hos kornafgrøderne) og også gør dem tærskbare (Doebley et al., 2006). Plan-teforædlingens historie (efter år 1900) er også fuld af eksempler på udnyttelsen af egenskaber baseret på introduktionen af enkeltgener, fx sygdomsresistens-gener (R-gener) indkrydset i dyrket kartoffel fra vilde kartoffelarter (Jansky et al., 2013), men også med en række eksempler på gener, der påvirker plantens statur, især dværggenerne i kornafgrøderne kendt fra 1960'ernes grønne revolution (Monroe et al., 2020). Mutationsforædlingens fremkomst med fysisk eller kemisk mutagenese i midten af 1900-tallet var, inden man reelt kendte til enkeltgeners funktion, et værktøj til at inducere og selekttere gunstige enkeltgen-mutationer (Lundqvist, 2014). Inducerede mutationer i enkeltgener blev således udnyttet længe før, man kendte til funktionerne af disse gener. Fx kunne man i midten af forrige århundrede fremskynde blomstringstidspunktet i byg ved selektion blandt muterede planter uden at kende til detaljerne for det enkeltgen, man muterede (Zakhrabekova et al., 2012).

Nye teknologier i forædlingen.

Præcisionsforædling. Den moderne planteforædlings arbejde med enkeltgener kan udføres meget mere præcist end mutationsforædlingens tilfældige tilgang med stråling eller kemisk behandling. Dette baserer sig især på væksten i genomisk information pga. de nye DNA-sekventeringsteknologier, og også det øgede molekylærbiologiske kendskab til enkeltgeners rolle og funktion i samspillet mellem gener og mellem gener og miljø. Derudover er teknologierne, de såkaldt nye forædlingsteknikker (NGT – New Genomic Techniques), i rivende udvikling, især CRISPR/Cas som den mest populære blandt flere teknologier, der kan introducere præcise mutationer i specifikke gener (Brinch-Pedersen et al., 2018). Man må forvente en yderligere udvikling af disse teknologier de kommende år, eventuelt også med nye metoder. De introducerede mutationer kan enten være mutationer, som ødelægger den kodende gen-sekvens ("knockout/loss-of-function" mutationer) eller, med nye udviklinger af teknologien, ændringer af gen-sekvensen gennem udskiftning af en eller flere baser i DNA'et med "base editing" (Gao, 2021) eller "prime editing" (Hao et al., 2021). En stor fordel ved genom-redigering med CRISPR/Cas i fht. klassisk mutationsforædling eller indkrydsning af gener fra vilde arter er, at en præcis mutation i et specifikt gen kan laves i en elitesort, uden at der medfølger mutationer i andre gener eller koblede uheldige gener fra vilde arter/slægtninge, såkaldt "linkage drag", som er et problem ved disse indkrydsninger af alleler.

Transgene planter. De nye genom-redigeringsteknikker kan, ud over muligheden for præcise specifikke mutationer, også anvendes til at lave præcise gen-modificeringer med indsættelse af fremmed DNA i transgene planter. Dette har været og er fortsat politisk kontroversielt i Europa, men vil ikke desto mindre være en mulighed i fremtidens udvikling af klimatilpassede afgrøder. Oplagte muligheder ville være at anvende GM-teknologier til at samle flere gunstige gener i samme elitesort, fx sygdomsresistensgener (Jo et al., 2016). Denne metode betegnes som cisgenese, da den kun overfører DNA mellem planter inden for

samme art (Rommens et al., 2007). Nye sorter, som er skabt ved genom-redigering direkte i de forædlede planter uden indsættelse af fremmed DNA eller ved cisgenetiske metoder, vil, under den nuværende lovgivning, også blive betragtet som GM-planter, selvom de ikke vil indeholde fremmed DNA, men blot modifikation af plantens eget DNA. Der pågår i øjeblikket en politisk proces på EU-niveau mht. den fremtidige regulatoriske status af sorter frembragt ved disse metoder (https://ec.europa.eu/food/plant/gmo/modern_biotech/new-genomic-techniques_en). Heri konkluderes det at NGT har potentiale til at bidrage til bæredygtige agro-fødevarer systemer i overensstemmelse med de Europæiske "Green Deal" og "Farm to Fork" strategier. Endvidere nævnes det uhensigtsmæssige i at anvende forskellige niveauer af lovgivningsmæssig regulering af ens produkter med lignende risikoniveauer, som det er tilfældet for planter, der er henholdsvis konventionelt muteret og opnået via NGT. Mulighederne for at udnytte de nye teknologier i den planteforædling, som er påkrævet for at udvikle nye klima-tilpassede afgrøder, vil afhænge af deres regulatoriske status, idet det vurderes, at en hel eller delvis deregulering alt andet lige vil forbedre mulighederne for små og mellemstore forædlingsvirksomheder mht. at udnytte teknologierne (Brinch-Pedersen et al., 2018).

TILLING. Selv hvis NGT uden indsættelse af fremmed DNA fortsat vil blive betragtet som en GM-metode (og derved besværlig at udnytte i forædlingen), vil udviklingen i de såkaldte TILLING-metoder (Targeted Induced Local Lesions IN Genomes) (McCallum et al., 2000) alligevel gøre det muligt at finde mutationer i specifikke gener og derved udnytte den akkumulerede bioinformatiske viden. Ved effektive screeningsmetoder er det muligt at finde en specifik mutation i meget store mutantpopulationer (Knudsen et al., 2021) og derefter indkrydse mutationen i elitesorter. Der er således sket en udvikling, hvor forskellen på den klassiske mutationsforædling og de nye NGT'er ikke er stor mht. til at finde og udnytte mutationer. Forskellen er først og fremmest, at planter frembragt ved TILLING-metoderne kan have mange, op til flere tusind, medfølgende mutationer (Holme et al., 2019), hvilket i høj grad taler i NBT'ernes favør. Modsat kræver sorter udviklet ved hjælp af TILLING ingen godkendelse i fht. den nuværende GM-lovgivning. I tilfælde af en ren GMO regulering af NGT forventes teknikken anvendt sammen med TILLING teknikken. Således vil vigtige mutationer identificeret via NBT ofte kunne genfindes i en TILLING populationen og dermed kommercialiseres uden reguleringsomkostninger, men så dog med en væsentlig grad af uidentificerede sidemutationer.

Speed breeding. Planteforædling er normalt en langsom proces, hvor det kan tage mange år at udvikle en ny sort år, fx >10 år for hvede. Udviklingen af såkaldt "speed breeding", hvor generationstiden for de første generationer i selektionen af nye sorter væsentligt afkortes, kan få stor betydning for, at klimatilpassede sorter kan nå at komme på markedet, så de kan få en effekt i løbet af de kommende årtiers grønne omstilling (Watson et al., 2018). Forskellige metoder kan anvendes til at afkorte generationstiden, men den væsentligste er at forlænge den daglige lysperiode under kunstig belysning, hvorved blomstring og frøudvikling fremskyndes.

Tab-af-funktion-mutationer

Den nemmeste måde at inducere genetiske ændringer i planter er ved hjælp af knockout-mutationer, dvs. at der er tale om tab af en gen-funktion ("loss-of-function"), som i mange tilfælde kan føre til forbedrede egenskaber (Gao, 2021; Monroe et al., 2020). Dette kræver kun en enkelt, mere eller mindre tilfældig DNA-baseændring eller deletion i den kodende DNA-sekvens. Det er straks vanskeligere at inducere en positiv ændring af en gen-funktion, hvor en helt specifik base-ændring fører til enten højere ekspression af et gen eller en ændret enzymatisk funktion. Heldigvis har det vist sig, både for den historiske domesticering af afgrødeplanter og i mutationsforædlingen, at der kan opnås gunstige egenskaber ved at fjerne gen-funktioner i afgrødeplanter i fht. vilde planter. Mange af de egenskaber, som vi anser for fundamentale hos de dyrkede afgrøder, er således baseret på tab-af-funktion-mutationer. De klassiske domesticeringsgener, som beskrevet ovenfor, gode eksempler på dette, mens dværggenerne i fx ris og hvede fra den grønne revolution i 1950-60'erne er eksempler fra den klassiske mutationsforædling (Monroe et al., 2020). De fremtidige muligheder for at generere gunstige egenskaber ved tab-af-funktion mutationer er meget store, i særdeleshed pga. af stigningen i den genetiske information og udviklingen af NBT.

Re-domesticering/"re-wilding"

Den historiske domesticering af landbrugsafgrøderne ledte til en indsnævring af den genetiske diversitet i de dyrkede afgrøder, sandsynligvis fordi de blev selekteret på basis af få mutationer i domesticeringsgenerne (Doebley et al., 2006). I denne proces gik mange gener for nyttige egenskaber fx for sygdomsresistens eller abiotisk stress-tolerance sandsynligvis tabt i de udvalgte planter. Mange bestræbelser går nu ud på at (gen)introducere diversiteten fra vilde arter og fra lokale såkaldte landracer i de dyrkede arter med det mål at forbedre disse. Overordnet kan dette gøres på to måder, enten ved re-domesticering, hvor domesticeringen genskabes, men nu med blik for mange nyttige egenskaber, eller ved en slags "re-wilding" (Andersen et al., 2015), hvor nyttige gener/alleler fra beslægtede vilde arter hentes ind eller genskabes i allerede dyrkede sorter.

"Re-wilding" ved hjælp af indkrydsning af egenskaber i de dyrkede arter fra beslægtede vilde arter har været brugt i mange år, men er en besværlig proces pga. krydsningsbarrierer og det såkaldte "linkage drag", hvor uheldige gener kan være koblet til genet for den ønskede egenskab (Brinch-Pedersen et al., 2018). Hvis genet for den ønskede egenskab og dets lokalisering i genomet er kendt, kan indkrydsningen effektiviseres ved brug af såkaldt "marker assisted selection", hvor DNA-markører anvendes til effektivt at frasortere andre gener end det ønskede i krydsningsafkom. Alternativt, hvis den gunstige allel i den vilde slægtning eller i en anden art har en sekvens-variation, fx en enkelt-base forskel, som kan genskabes ved hjælp af NGT, kan dette gøres direkte i en elitesort ved såkaldt "trait sharing" (Gao, 2021). Mutationen i Mlo-genet, som giver meldugresistens, er et eksempel på dette (se nedenfor).

Domesticering af nye afgrøder og re-domesticering af allerede dyrkede arter for at indføre nye egenskaber i dyrkningen kan gøres mere effektivt og hurtigere ved at mutere kendte domesticeringsgener, så de fikses i plantematerialet før videre forædling (Lyzenga et al., 2021). Eventuelt skal flere gener muteres, før en brugbar plante er skabt.

Skabelse af øget genetisk variation

Som alternativ til at anvende genetisk variation fra vilde slægtninge kan man bruge de nye genom-redigeringsteknikker til at skabe øget genetisk variation direkte i elitesorter. Den klassiske mutationsforædling skabte ved brug af bestråling eller kemisk behandling kunstig genetisk variation i en plantepopulation, som derefter kunne screenes for ønskede fænotyper (Kharkwal, 2011). Som nævnt ovenfor gav dette en vis succes i forædlingen, men var også begrænset af især mange uønskede mutationer i screeningspopulationerne. Ved hjælp af CRISPR/Cas9-teknologierne kan man fremstille tilsvarende mutationspopulationer, som kan screenes for ønskede fænotyper, men her med en målrettet mutagenese af et panel af op til flere tusinde kandidatgener og med minimal effekt på andre gener (Gaillochet et al., 2021). Dette vil give store muligheder at afsøge mulighederne i at fremme bestemte egenskaber ved at ændre udtrykket af specifikke gener, enten ved at slå dem ud ("loss-of-funktion") eller ved at modulere deres ekspressionsniveau. Sidstnævnte udgør en særlig måde at inducere variation på ved at være målrettet den regulerende promoter-region af generne (Swinnen et al., 2016). Denne region indeholder både positive og negative DNA-motiver mht. gen-ekspression, og ved at ændre DNA-sekvensen i disse motiver kan ekspressionen af genet moduleres i modsætning til enten-eller situationen, når der anvendes knockout-mutationer. Det er således muligt her også at arbejde målrettet med "gain-of-function" mutationer i fht. at forbedre egenskaber.

Egenskaber i forhold til forædlingsmålene – eksempler på enkeltgener

Udbytte. Uafhængigt af klimaudfordringen skal udbyttelniveauet i landbrugsafgrøderne opretholdes for at kunne brødføde den stadigt voksende verdensbefolkning og også for at opretholde produktiviteten i landbruget. Udbytte er en kvantitativ egenskab bestemt af mange gener, og den kommercielle planteforædling har været fokuseret på denne egenskab og har også været dygtig til at forbedre den gennem klassiske forædlingsprogrammer. De seneste årtier har dog vist en stagnering i udbyttefremgangen hos de større afgrøder så som hvede (Brisson et al., 2010), hvilket påpeger behovet for stadig målrettet at forædle for udbytte. På enkeltgen-niveau er det fx kerneantal og størrelsen i hvede, som kan adresseres. Eksempler på gener, som kan være mål for genom-redigering, er *TaGW2* i hvede og *HvCKX1* i byg, for hvilke mutationer giver større kerner (Ahmad et al., 2021). Forædling for udbytte skal også i fremtiden ses i forhold til kvalitets-egenskaber i afgrøderne.

Kvalitet. Kvalitetsegenskaber mht. brug af slutprodukter fra afgrøder, så som bagekvalitet, proteinindhold, stivelseskvalitet, udseende, smag m.v., vil fortsat være vigtig i forædlingen. Disse egenskaber er som oftest

kvantitative egenskaber, som der selekteres for i forædlingen, men der er for en række af dem også mulighed for at fremme specifikke egenskaber ved hjælp af enkeltgen-mutationer. Eksempler er ændring i koge-kvalitet i stivelsesafgrøder ved mutation i stivelsessyntesegener (Ahmad et al., 2021) og fjernelse af glutenallergener fra hvede (Sánchez-León et al., 2018).

Næringsstofudnyttelse. Håndteringen af især kvælstof i afgrødernes næringsstofforsyning er en væsentlig side af klimaudfordringen, af energi- og miljømæssige årsager, og fordi kvælstof fra kunstgødning og plantenedbrydning giver anledning til lattergasemission. Fremtidens afgrøder skal derfor være effektive i at optage og udnytte kvælstof fra jorden. Det er egenskaber, som er vanskelige at selektere for i den sædvanlige planteforædling pga. kompleksiteten. Der findes et væld af studier mht. involverede gener og processer, som afspejler denne kompleksitet, og en række kandidatgener af betydning for optag, transport og omsætning af kvælstof i planten er blevet foreslået. For at teste deres betydning er mange af dem forsøgt overudtrykt i transgene planter, og en meta-analyse over et stort antal studier (Li et al., 2020) viste, at især gener for transportere kan have en positiv effekt på udnyttelseseffektiviteten. Der er således grundlag for at arbejde videre med kandidatgener på dette område, selvom det primært vil være ved transgene løsninger. For remobiliseringen af kvælstof fra vegetative plantedele til kerner under afmodningen er det dog i hvede vist, at mutationer i enkeltgener kan spille en rolle: en enkelt baseforskel i Gpc-B1-genet kan give højere akkumulering af protein/kvælstof og mikronæringsstoffer i kernerne (Uauy et al., 2006), og en sådan base-ændring kan introduceres med NBT.

Modstandsdygtighed overfor stigende stress. At udvikle mere klima-robuste planter kræver forbedringer i en række specifikke egenskaber hos planterne mht. modstandsdygtighed overfor abiotisk og biotisk stress. Begge former for stress formodes at stige under fremtidens mere barske og varierende vejrforhold. For biotisk stress, dvs. skadedyr og patogene mikroorganismer, er forudsigelsen om konsekvenserne under klimaforandringerne usikre (Juroszek & von Tiedemann, 2015), men der er her en ekstra udfordring i at gøre dyrkningen uafhængig af pesticidanvendelse ud fra et miljøhensyn. Til dette er genetisk bestemt modstandsdygtighed hos de dyrkede arter en meget væsentlig komponent.

Abiotisk stress: den forventede øgede abiotiske stress under fremtidens klimabetingelser omfatter især varme (øgede temperaturer i vækstsæsonen), tørke (pga. længere og mere hyppige perioder uden regn) og oversvømmelser (kraftige regnskyl og øgede regnmængder i vinterhalvåret, som vil genere vinterafgrøder). Stress-responset i planter over for disse faktorer har længe været genstand for studier, og der er et væld af rapporter om især over-udtryk af enkelt-gener, som har indflydelse på responset (Zhang et al., 2021). Der er en lang række muligheder for at op- eller nedregulere udvalgte gener eller at introducere varianter fundet i modstandsdygtige vilde arter/landracer i de dyrkede arter. Især stress-relaterede gener, som koder for transkriptions- og signaleringsfaktorer, er interessante, fordi de styrer et bredt respons i planten (Ahmed et al., 2020). Der vil over de næste par årtier sandsynligvis fortsat vil være stor aktivitet inden for dette felt, som vil kunne føre til udvikling af planter med høj modstandsdygtighed. En komplicerende faktor

er dog, at vækst af planten og tolerance over for stress virker ofte mod hinanden, og vanskeligheden bliver derfor at finde den rette balance mellem disse (Zhang et al., 2021).

Biotisk stress: den forventede øgning i biotisk stress knytter sig til en forventning om, at (visse) sygdomme og skadedyr vil få bedre betingelser under fremtidens klimaforhold, især pga. de højere temperaturer i vækstsæsonen (Skendžić et al., 2021). Sammenspillet mellem værtsplanter og patogene mikroorganismer hhv. skadedyr er komplekst, men efterhånden har vi fået detaljeret kendskab til en lang række faktorer og involverede gener, som forædlingen kan arbejde målrettet med, bl.a. de såkaldte R-gener (Kaur et al., 2021). Her skal nævnes tre strategier, som eksempler på hvordan de nye forædlingsteknologier kan bruges til at udnytte den opnåede viden til at forbedre planternes modstandsdygtighed.

- Samling af flere R-gener ("stacking"). De klassiske R-gener er meget stærke i deres virkning over for bakterie-, svampe- og virussygdomme, men mister let deres effektivitet efter tilpasning af patogenpopulationen. Flere R-gener i samme sort, som virker mod det samme patogen, vil gøre dem langt mere effektive mht. patogenets tilpasning. Denne strategi har vist sig effektiv i fx kartoffel mht. kartoffelskimmelresistens (Ghislain et al., 2019), selvom den stadig skal kombineres med rotation og diversitet i brugen af R-gener for at modvirke opbygning af virulente patogener (Rimbaud et al., 2021). Der er tale om en transgen teknologi, men i udgaven som cis-genese, hvor R-gener inden for samme art effektivt kan flyttes ved hjælp af NGT mellem sorter. Fordelen er, at dette kan ske mellem elitesorter af vegetativt formerede arter som kartoffel og også for selvbestøvende arter som hvede og byg.

- Mutation af modtagelighedsgener. Sygdomsresistens kan opnås ved at fjerne eller ændre såkaldte modtagelighedsgener, som koder for komponenter i planten, der er nødvendige for etablering af patogenet (Engelhardt et al., 2018). Et anerkendt eksempel på dette er mlo-resistens i byg over meldugsvampen (Büschges et al., 1997). Mutation af Mlo-genet forhindrer meldugsvampens indtrængning i bygbladet, og denne mutation har været anvendt i bygforædlingen siden 1980'erne til at opnå varig og bred meldugresistens. Der er bestræbelser i gang på at finde lignende modtagelighedsgener i en langt række arter, fx i kartoffel over for kartoffelskimmel (Sun et al., 2016), og i hvede over for sortrust (Henningsson et al., 2021). Som en ny generel strategi i udviklingen af resistens over for svampe-, bakterie- og virussygdomme tegner dette lovende, især i kombination med præcisionsforædling med NGT.

- RNAi-teknologi. Ved at udtrykke små stykker RNA fra et patogen i værtsplanten kan det såkaldte "gene silencing"-apparat aktiveres, hvorved specifikke gener i patogenet undertrykkes, og patogenets vækst begrænses (Rosa et al., 2018). Dette er en transgen teknologi, som kræver indsættelse af et kort stykke fremmed DNA. Dog kan metoden også modificeres ved at anvende direkte tilførte RNAi-komponenter som et biopesticid (Yan et al., 2020). Fordelen ved RNAi-teknologien er dens simpelhed, og at den kan rettes mod et bredt spektrum af skadegørere fra virus til insekter.

GHG emission og plantegenetik

Flerårighed for frøafgrøder for at øge rodbiomassen. Det er især kornarterne, man har forsøgt at gøre flerårige ved krydsninger med beslægtede flerårige arter, med størst succes for rug dog med lavt kerneudbytte (Acharya et al., 2004), men også med tiltag for hvede (Curwen-McAdams & Jones, 2017). Genetikken bag flerårighed er kompleks, men stærke QTL'er er dog fundet i rug (Gruner & Miedaner, 2021), hvilket kunne lede til karakterisering af specifikke gener for egenskaben. En anden strategi for at opnå flerårige frøafgrøder er at domesticere beslægtede arter, som allerede er flerårige. Som eksempel er man her nået langt med hvedegræs ved klassisk selektion (Crain et al., 2021), og strategier er foreslået for at forbedre det stadig lave frøudbytte gennem målrettet genom-redigering af kendte domesticeringsgener (DeHaan et al., 2020).

Øget kulstofindlejring i jorden via større og dybere rodnet. Ikke kun et skifte fra en- til flerårige afgrøder kan have effekt på kulstofindlejring, men også for en-årige arter kan en målrettet udvikling af sorter med øget dybde og størrelse af rodnettet komme på tale. Dette kan ske i kombination med udvikling af rødder med et forøget indhold af mere bestandige komponenter fx suberin (Schweitzer et al., 2021). De nye forædlings-teknikker vil være oplagte at anvende til dette formål, selvom der kræves yderligere afdækning af de genetiske faktorer/gener, som bestemmer rodtybde og -mængde. Et nyt amerikansk initiativ, Energy Future Initiative, forsøger at udvikle dette område (Energy Future Initiative, 2020).

Emission af lattergas. Som nævnt ovenfor kan en bedre næringsstofoptagelse hæmme lattergasudviklingen ved at fjerne frit nitrat fra jorden. Men derudover er der foreslået strategier, hvor planter modificeres til at hæmme nitrifikationen i jorden, så lattergasemissionen mindskes. Der er tale om transgene planter, der udskiller lattergasnedbrydende enzymer fra jordbakterier (Demone et al., 2018). Planter kan formentlig også selv producere lattergas, selvom mekanismerne endnu ikke er kendte (Timilsina et al., 2020). Hvis de enzymatiske reaktioner afdækkes, vil disse sandsynligvis kunne hæmmes ved hjælp af genom-redigering af involverede gener.

Perspektiver

2030-perspektivet: ti år er kort tid i en planteforædlingskontekst, og de sorter, som vil blive dyrket om ti år, er dem, som bliver selekteret nu. De nye forædlingsteknikker vil således ikke få stor indflydelse på billedet mht. dyrkede sorter om år 2030. Det væsentligste i det kommende årti vil være udviklingen af teknologierne, og om de kan implementeres i planteforædlingen. Her vil den regulatoriske status af NGT på EU-niveau være afgørende. Det kræver en hel eller delvis deregulering af NGT mht. GM-lovgivningen for at give et rygstød til forædlingsvirksomhedernes investeringer i disse teknologier, som for alvor vil kunne forandre mulighederne for at udvikle nye, forbedrede sorter i de følgende årtier.

2050-perspektivet: Anvendelse af NGT vil være afgørende for, at ambitionerne om et klimaneutralt landbrug kan realiseres fra planteforædlingssiden. Afhængigt af de nye teknologiers gennemslag i forædlingsarbejdet vil der være et stort potentiale for, at mange forbedrede sorter vil blive dyrket efter brug af de nye

forædlingsteknologier. De nye teknikker har allerede vist deres potentiale for udvikling af afgrøder, der er modstandsdygtige over for skadevoldere. Hvis ambitionen er et højeffektivt sprøjtefrit landbrug, anses det som en nødvendighed at kunne anvende NGT. På baggrund af den eksisterende molekylærbiologiske/genetiske viden, og den forventede vækst i denne i de kommende år, vil især gener, som er involveret i modstandsdygtighed over for abiotisk og biotisk stress sandsynligvis være mål for forbedringerne i de dyrkede sorter.

4.1.3.3 Fremtidig IPR beskyttelse af nye sorter

I forbindelse med introduktionen af nye planteformodlingsteknikker diskuteres det, om og hvordan nye sorter kan beskyttes af forædlerne. Traditionelt har de beskyttet deres nye sorter igennem plantenyhedsbeskyttelsen (PNB). Forædleren er sikret licensindtægter, hvilket er med til at støtte innovation hos virksomhederne. PNB afholder ikke andre fra at bruge beskyttede sorter til yderligere forædling og dermed udvikle nye sorter, hvilket generelt blandt forædlere anses som fordelagtigt. En anden model er beskyttelse igennem patenter, som er en form for intellektuel ejendomsret, der giver ejeren ret til at ekskludere andre fra at lave, bruge eller sælge deres opfindelse. Man kan altså ikke forædle videre med en patenteret sort uden at krænke patentholderens intellektuelle ejendomsret. Man skal have tilladelse til at anvende det patenterede materiale. EU's direktiver ([EUR-Lex - 31998L0044 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#)) undtager dog patenter for planter eller dyrevarianter eller processer, der er essentielt biologiske, til produktionen af planter eller dyr. En essentiel biologisk proces er f.eks. krydsning af planter, men omfatter også mutationer opstået ved celledeling eller ved påvirkning af ultraviolet lys fra solen. Kontroverser omkring patenter af plantesorter stammer fra diskussionen om, hvad der kan fremkomme via en essentiel biologisk proces. NGT er selvsagt ikke en essentiel biologisk proces, og produkterne derfra er som sådan patenterbare. Men en simpel mutation fremkommet ved genom-redigering kan i nogle tilfælde ikke skelnes fra, hvad der kunne fremkomme f.eks. igennem en celledeling eller ved ultraviolet bestråling. Resultatet af en gen-redigering ved f. eks. CRISPR/Cas kan således ligne en mutation, som er resultat af en essentiel biologisk proces.

4.1.4 Virkemidler og teknologi i forhold til klimarobust jord – erosion i relation til jordkvalitet/miljø

Som omtalt i afsnit 3.1.1 er "kulstof i jord", "jordpakning" og "erosion" væsentlige udfordringer i forhold til jordkvalitet i Danmark. Udfordringer som forstærkes i takt med de forventede klimaforandringer med mere nedbør, højere temperatur og ikke mindst flere ekstreme hændelser i form af tørke og skybrud. Det stiller øgede krav til dyrkningsjordens evne til afvanding, vandhusholdning (plantetilgængeligt vand, fordampning) og til dens erosionsfølsomhed og egenskaber som rodvækst medie. Der er således behov for at udvikle og implementere virkemidler og teknologier til at gøre dyrkningsjorden mere klimarobust.

4.1.4.1 Kulstof og jordkvalitet

De vigtigste virkemidler til at forøge dyrkningsjordens indhold af kulstof under danske forhold indbefatter øget dyrkning af efterafgrøder og græs samt øget efterladelse af halm (Chen et al., 2022; Gómez-Muñoz et al., 2021; Jensen et al., 2022a; Jensen, et al., 2022b; Taghizadeh-Toosi et al., 2014). Selvom potentialet i forhold til kulstoflagring er vurderet til at være forholdsvis begrænset (Rodrigues et al., 2021; Taghizadeh-Toosi og Olesen, 2016) kan virkemidlerne være vigtige i forhold til at gøre jorden mere klimarobust. Efterladelse af halm og efterafgrøder forbedrer generelt set jordens struktur i form af en lettere øget porøsitet (Gómez-Muñoz et al., 2021; Kristensen, 2021; Schjønning, 1985) og en øget aggregatstabilitet (Abdollahi et al., 2017; Qi et al., 2022). Dette bidrager til en øget vandholdende evne (mindre grad) og mindsket risiko for skorpedannelse ved kraftig nedbør. Efterafgrøder med pælerødder har også vist sig at kunne forbedre luftledningsevnen og dermed vandledningsevnen i overjorden (Abdollahi et al., 2014). Øget kulstofindhold, porøsitet og stabilitet øger tidsvinduet hvor vandindholdet er optimalt i forhold til jordbearbejdning (Obour et al., 2018). Det giver flere arbejdsdage med optimal jordbearbejdning (Obour et al., 2019) og dermed mindsket risiko for et såbed med hårde knolde, og deraf følgende negative effekter på afgrødeetablering og tidlig vækst. Øget anvendelse af græs forøger kulstofindholdet og forbedrer jordstrukturen. Schjønning et al. (2007) fandt at inkludering af græs i sædskiftet – inden for en 5-6-årig periode – øgede porøsitet, strukturstabilitet og luftpermeabilitet på både lerblandet sandjord (Foulum) og sandblandet lerjord (Flakkebjerg). Omlægning fra korndyrkning til semi-naturligt græs har i en nyere undersøgelse markant øget kulstofindholdet og strukturstabiliteten indenfor 1 år efter omlægning - uafhængigt af kulstofindhold og strukturstabiliteten i udgangspunktet (Lang'At, 2022).

Biokul er et andet vigtigt virkemiddel til at øge kulstoflagringen i dyrket jord (Abalos og Thers, 2022) og til at forbedre særligt de jordfysiske egenskaber (Arthur og Andersen, 2022). Sidstnævnte konkluderes, at biokul kan øge porøsitet, vandholdende evne og strukturstabilitet – og særligt for sandholdige jorde som er typiske for Danmark. Biokul vil dog i mange tilfælde blive produceret på basis af halm og/eller og husdyrgødning - i så fald sker kulstofinput i biokul på bekostning af direkte kulstofinput i halm eller husdyrgødning. Samtidig vil biokullets positive effekter på jordens struktur også modvirkes af en manglende effekt af kulstofinput i halm og husdyrgødning. Dette skal tages i betragtning ved vurdering af den samlede effekt af at producere og anvende biokul.

4.1.4.2 Jordpakning – forebyggelse af pakning og udbedring af skader

Schjønning et al. (2019) beskriver en række kendte virkemidler og teknologier til at forebygge pakning af underjorden. De omfatter brug af beslutningsværktøj forud for kørsel i forhold til at optimere tidspunkt og dæk, automatisk dæktryksregulering, bæltter, træk på flere aksler, "dog-walk" kørsel for at mindske antal overkørsler, onland pløjning, forbedret dræning mm. Virkemidlerne har fokus på at mindske belastningen (hjullast, dæktryk), antal overkørsler og ikke mindst at begrænse kørslen i marken, når jorden er våd og pakningsfølsom. Forbedret ruteplanlægning kan ligeledes anvendes til at mindske kørselsintensitet og ikke

mindst antallet af overkørsler (Villa-Henriksen et al., 2020). Pakningsskader i pløjelaget kan forholdsvis enkelt udbedres med pløjning eller intensiv harvning. Derimod vurderes pakningsskader i underjorden at være stort set permanente (Schjønning et al., 2015). Dybdegående jordbearbejdning med grubber eller lignede kan løsne jorden, men gør den også følsom for genpakning, hvorfor løsningseffekten som regel er meget kortvarig (Munkholm et al., 2005; Olesen og Munkholm, 2007). Biologisk jordløsning med planter med kraftige pælerødder har vist sig at kunne forbedre strukturen – flere sammenhængende lodrette bioporer - i pakkede lag i pløjelaget og den øverste del af underjorden (Abdollahi et al., 2014; Pulido-Moncada et al., 2021; Pulido-Moncada et al., 2022).

4.1.4.3 Erosion - forebyggelse

Halm efterladt på overfladen – som typisk praktiseres i pløjefri systemer og som er obligatorisk i Conservation Agriculture – har generelt set en gavnlig effekt på dyrkningssegenskaberne, som beskrevet af Munkholm og Heckrath (2020). Halmen beskytter jorden mod vind- og vanderosion samt skorpedannelse. Samtidig fremmes planternes vandforsyning som følge af mindsket fordampning og øget vandholdende evne i de øverste jordlag (0-10 cm). Derimod kan halmens isolerende effekt bidrage til en forsinket opvarmning af jorden om foråret og dermed en forsinket afgrødeudvikling. Effekten af halm efterladt på overfladen kan kompenseres ved at have et jorddække af levende planter i form af afgrøder/efterafrøder i de mest følsomme perioder af året (typisk vinterhalvåret). Tilførsel af kalk, strukturkalk, gips har i svenske og finske undersøgelser vist at kunne øge strukturstabiliteten og dermed mindske jordens erodibilitet (Blomquist og Berglund, 2021; Blomquist et al., 2018; Ekholm et al., 2012; Ulen og Etana, 2014). En række andre virkemidler til at begrænse det erosionsbetingede fosfortab (permanent plantedække på arealer og som barrierer i landskabet, skovrejsning, kørespor og tilgange til at modvirke deres betydning) er beskrevet i Virkemidler til reduktion af fosforbelastningen til af vandmiljøet (Andersen et al., 2020). På landskabsniveau er læhegn et effektivt virkemiddel til at mindske vinderosion (Munkholm og Sibbesen, 1997).

4.1.5 Dræning/pumper/diger/kanaler

Den stigende nedbør i relation til fremtidige klimaforandringer forventes at øge behovet for en mere effektiv kunstig afvanding (dræning) på landbrugsarealer specielt på de produktive lerede højbundjorde. Mangel-fuld dræning kan resultere i mangel på ilt til planternes rødder, hvilket hæmmer næringsstofoptagelse og vækst (Deichman et al. 2019). Et andet og måske større problem er, at jorden i forårs månederne bliver senere tjenlig til såning, hvilket typisk kan medføre udbyttetab (Kronvang et al., 2013). Dette skyldes problemer i forhold til afgrødeetableringen da en dårlig afdrænet jord hindrer kørsel med tunge landbrugsmaskiner. Dette medfører stigende problemer i forhold til afgrødeetableringen både i efteråret og foråret. Samtidigt lægges der pres på den vigtige klimatilpasningsstrategi, der har fokus på at etablere vinter- og vårafgrøder så tidligt som muligt. Dette sikrer en vejetableret afgrøde, der så tidligt som muligt kan optage næringsstoffer samtidig med, at den bliver mere modstandsdygtig, såfremt der opstår tørkeperioder i løbet af sommeren.

I et fremtidigt klimascenarie kan flere landbrugsarealer have behov for at blive drænede og for allerede drænede marker kan der være behov for en fornyelse af allerede eksisterende dræn. Forøgelse af dræningskapaciteten kan gøres ved enten at øge drændimensioneringen dvs. mindske afstanden mellem drænrør eller øge drænrørsdiameteren eller ved at forbedre infiltrationen omkring drænrørene ved foring.

Drænenes effektivitet kan for nogle drænsystemer også forbedres ved at øge recipienternes evne til at bortlede vandet fra drænudløb ud i det akvatiske system. Store nedbørsmængder, hvor vandet hurtigt ledes fra marken (stor drænkapa-citet) og ud til vandløbet sætter generelt pres på vandløbssystemernes bortledningskapacitet. Derfor kan forbedringer af drænkapa-citet på marken medføre oversvømmelser nedstrøms i vandløbssystemet, hvorved der kan ske opstuvning af vand fra vandløbet ind i drænsystemerne. Nedstrøms oversvømmelser er specielt kritiske, hvis terrænfaldet er lavt, eller hvis der er stor vandmodstand i selve vandløbet (skabt af vandløbets dimension, grødevækst eller andre faktorer), hvilket hindrer en effektiv vandtransport i vandløbet. Oversvømmelser i byområder langs vandløb er specielt kritiske da der er store værdier der kan ødelægges og skal erstattes. For at forbedre bortledningskapaciteten i et opland skal der ofte laves meget dyre afværgeforanstaltninger i byer nedstrøms.

Ovenfor nævnte problemstillinger er komplekse og en nærmere forståelse vil kræve en hydrologisk modellering på oplandsniveau for at vurdere hvorvidt bortledningskapaciteten er tilstrækkelig i forbindelse med en øget drænkapa-citet fra markerne i oplandet. Der findes sandsynligvis ikke løsninger på denne problemstilling, der fuldt ud imødekommer landbrugets behov for afvanding af markerne.

Mere nedbør og en samtidig effektivisering af drænsystemerne forventes at medføre større udvaskning af nitrat og fosfor til det akvatiske miljø, hvilket vil kræve en mere effektiv etablering af afværgeforanstaltninger. Her tænkes på forskellige kvælstofvirkemidler såsom øgede efterafgrødearealer, etablering af konstruerede minivådområder, randzoner langs vandløb, m.fl. (Andersen et al. 2020; Eriksen et al., 2020). Et bedre kendskab til drænrørenes beliggenhed, dræna-fstrømningsdynamikken og næringsstoftransporten i dræ-nene vil kunne målrette brugen af drænvirkemidler og herved kunne forøge effektiviteten som er afgørende for at minimere næringsstofudvaskningen fra marker i fremtiden.

4.1.6 Vanding

Som en konsekvens af den større variabilitet i klimaet, må der forventes længere og mere udtalte tørkeperioder, selvom antallet af tørre dage og nedbøren i sommerperioden forventes uændret dog med en lille stigning i fordampning, som omtalt i kapitel 1. Tørke kan derfor også ramme de gode jorde med høj vandholdende evne. Året 2018 var ekstrem i denne henseende med et tab på næsten 4 milliarder kroner i mistet høstudbytte (Schou, 2019). Vanding vil endvidere kunne mindske den øgede N-udvaskning, der ofte følger tørre år, forudsat god vandingstyring (ten Damme et al., 2022). Dette kan dog ikke umiddelbart forventes at lede til en større udvidelse af det vandede areal, da økonomien i dette skal vurderes over en længere årrække på grund af de betydelige investeringer etablering af markvandingsanlæg kræver. Den

lave frekvens af alvorlig tørke gør det i sig selv vanskeligt at planlægge på området (Blauhut et al., 2022). Et andet problem med hensyn til udvidelse af arealet med vanding er at opfylde behovet for vand til vanding i tørkeår, da vandforsyningen til husholdholdninger, industri og vandføring i vandløb er højere prioriteret (Miljøstyrelsen, 2013). Vandingstilladelser giver som regel landmænd ret til at indvinde en begrænset mængde pr år typisk 100 mm til et givet areal, medens behovet i 2018 mange steder var over 250 mm. I en del kommuner blev der i den forbindelse givet dispensation til landbrug til at bruge mere vand. Henriksen et al. (2015) konkluderede, at der er et stort potentiale for øget vandindvinding til markvanding, når der anvendes økologisk flow baserede indikatorer med udgangspunkt i vandløbstilstand. De understreger dog, at mere dybtgående analyser er nødvendige. Der fremgår af ovenstående, at der er et behov for at dispensationsmuligheder til øget vandindvinding i tørre år bliver bedre undersøgt på forhånd, da det jo også er i tørkeår, at minimumsvandføringen i vandløb kan blive kritisk for deres økologiske tilstand. Dette er i overensstemmelse med Blauhut et al. (2022), der anbefaler at planlægningen af tilpasning til og varsling af tørke forbedres på nationalt og europæisk plan. Noget vandingsvand vil kunne spares ved mere præcis tildeling som følge af nye teknologiske muligheder for deficitvanding (Antoniuk et al., 2021). En anden mulighed for at skaffe vand, end ved oppumpning, er opsamling af overskudsnedbør i bassiner. Dette er en forholdsvis dyr løsning, som mest er relevant i forhold til vanding af højværdiafgrøder. På Samsø har grøntsagsavlere fx anlagt bassiner (Meilvang og Tybirk, 2020), da vandressourcerne på øen er sparsomme og yderligere oppumpning af grundvand kan give anledning til saltvandsindtrængning i drikkevandreservoirerne.

4.1.7 Plantebeskyttelse

Behovet for plantebeskyttelse i et fremtidsscenarium afhænger af hvilke afgrøder, der aktuelt vil dyrkes. Dette skyldes at behovet for bekæmpelse i høj grad afhænger af, hvilke specifikke afgrøder der vil vinde frem (se kapitel 2).

1) de forventelige ændrede klimaforhold vil betyde at alvorlige planteskadegørere, som ikke kan etablere sig i Danmark i dag, vil forventes at kunne gøre det i fremtiden. Dette vil både omfatte potentielle karantæne skadegørere, men også gælde for mere almindelige skadegørere, som forventeligt vil kunne overleve vores vintre og have en hurtigere opformeringsrate. Jævnfør informationer fra Landbrugsstyrelsen (<https://lbst.dk/tvaergaaende/plantesundhed/faktaark>) kan en række karantæne skadegørere angribe kartofler (Kartoffelbrok, Kartoffelringbakteriose, Brunbakteriose, Kartoffeljordloppe), men ingen af disse vurderes at give et øget risikoniveau, som følge af varmere klima, da de fleste allerede potentielt kan overleve under vores nuværende forhold. Langt de fleste karantæneskadegørere har potentiale til at angribe diverse træarter, mens det kun er begrænset hvilke der er kendt som angribere af vores dyrkede landbrugsafgrøder. Bakterie-sygdommen *Xylella fastidiosa* regnes dog som en undtagelse, da denne har et meget stort værtsspektrum, som også inkludere danske landbrugsafgrøder. Her vurderes øgede temperature at kunne øge risikoen for at denne sygdom får større betydning.

2) Nye afgrøder i Danmark vil betyde nye skadegørerscenarier og afføde behov for forebyggende monitoring for og afklaring af bekæmpelsesmuligheder for de alvorlige planteskadegørere, der er knyttet til kulturen i lande med sammenlignelige klimaforhold og forventes at ville kunne etablere sig under de fremtidige danske dyrkningsforhold. Dette vil bl.a. omfatte skadegørere i bælgsædsafgrøder som kigærter, soyabønner, og linser, men også skadegørere i vin, solsikker, mm. vil kunne få betydning.

I forlængelse af EU's Jord til bord strategi fremlagt i 2020 har EU fremlagt et forslag til ny forordning, som skal erstatte eksisterende EU-direktiv om bæredygtig anvendelse af pesticider fra 2009. Som en del af forordningen er det foreslået at indføre bindende nationale mål for pesticidområdet, der på EU-plan skal føre til en 50 % reduktion af anvendelsen af pesticider og for Danmarks vedkommende vil betyde krav om en yderligere reduktion pesticidforbruget og -belastningen på 35% i forhold til perioden 2017-2019.

Som en del af forordningsforslaget er der stillet krav om at integreret plantebeskyttelse (IPM) gøres obligatorisk på mindst 90 % af dyrkningsarealet og at der skal sættes skub i brugen af ikke-kemiske alternativer til pesticiderne.

Forordningen er stadig til diskussion, men giver et klart pejlemærke i forhold til hvilken retning fremtidig anvendelse af pesticider går. Et andet tiltag i EU's Jord til Bord strategi er, at arealet med økologisk jordbrug skal øges til 25 %, hvilket også vil bidrage til et reduceret forbrug af syntetiske pesticider.

Nøgleordet i forbindelse med fremtidens ukrudtsbekæmpelse er øget spatial og temporal afgrødediversitet, dvs. mere diverse sædskifter og samdyrkning/stribedyrkning. Øget diversitet vil resultere i en mere artsrig ukrudtspopulation, hvor udbyttetabet og risikoen for opformering af tabsvoldende ukrudtsarter er mindre, og hvor biodiversiteten i både floraen og den tilknyttede fauna vil være større (Adeux et al., 2019).

Fremtidens ukrudtsbekæmpelse vil i endnu højere grad end i dag skulle baseres på en integreret tilgang, hvor flere tiltag kombineres, da den hidtidige forskning har vist, at der kan forventes en reduceret effekt af nogle af de mest anvendte herbicider. Sammen med de stigende problemer med herbicidresistens og et forventet mindre udbud af herbicider er de forventede klimacændringer endnu en årsag til at fremme anvendelsen af integreret ukrudtsbekæmpelse.

Modsat sygdomsbekæmpelse, hvor sortsresistens er et virkemiddel, som kan være lige så effektiv som fungicider, så findes der ikke alternative metoder, som en til en kan erstatte herbicider. I praksis er integreret ukrudtsbekæmpelse en strategi bestående af en række forebyggende og ikke-kemiske bekæmpelsesmetoder og eventuelt en reduceret indsats af herbicider, som tilsammen kan give effekter, som er sammenlignelige med de effekter, der opnås i dag med kemisk bekæmpelse. I EU-projektet IWMPRAISE er der udviklet et værktøj, som rådgivere og landmænd kan anvende til at planlægge integreret ukrudtsbekæmpelse strategier (<https://framework.iwmttool.eu/>).

Der er specielt to områder, hvor der er behov for fortsat innovation, hvis integreret ukrudtsbekæmpelse skal blive en succes i fremtiden. For det første er der behov for mere effektive og selektive ikke-kemiske ukrudtsbekæmpelsesmetoder. Der er i de senere år udviklet mere intelligente kamerastyrede maskiner, som er både mere effektive og selektive end de tidligere metoder, men disse maskiner er ofte meget dyre og derfor kun et alternativ i højtstående afgrøder men ikke i almindelige landbrugsafgrøder. Endvidere er der behov for i højere grad at kunne detektere variationen i forekomsten af ukrudt i markerne, således at indsatsen kan målrettes de områder i marken med mest ukrudt, hvor de potentielle udbyttetab er størst. Det vil reducere omkostningerne ved anvendelse af ikke-kemiske metoder, hvor kapaciteten ofte er mindre end ved kemisk bekæmpelse.

Det forventes at fremtidens skadedyrs- og sygdomsbekæmpelse vil bestå af en kombination af flere indsatsfaktorer. Det vil fortsat være vigtigt, at hvor det er muligt dyrkes/vælges sygdoms og skadedyrs resistente sorter i kombination med anvendelse af plantebeskyttelsesmidler, der i stigende grad forventes at bestå af en færre kemiske fungicider og et stigende antal af alternative midler – herunder mikrobiologiske midler, midler der giver induceret resistens, biostimulanter etc.

Der forskes intensivt i forhold til at afdække om alternative midler kan erstatte de traditionelle fungicider (Wei et al., 2016, Collinge et al., 2019) og flere projekter støtter disse undersøgelser, som også har stor betydning fra de traditionelle kemiske firmaer. Den intensive søgen efter alternativer er styret stigende forbrugerønsker om at få flere pesticidfrie produkter samt mindske risikoen for forurening af grundvandet med pesticider (GEUS.2022). Der mangler pt stadig at ske et væsentlig gennembrud i forhold til at finde alternative midler som kan give effekter på niveau med det vi kender fra de traditionelle kemiske fungicider.

Planteforædlere arbejder intensivt med at forbedre resistensen i dyrkede sorter og generelt ser vi allerede i dag sundere sorter af f.eks. vintersæd sammenlignet med tidligere. Ud over forbedret sygdomsresistens i de enkelte sorter har dyrkning af sortsblandinger også vist sig som et godt tiltag, der kan medvirke til at mindske selektionen for virulente stammer og på den måde mindske selektion for både fungicideresistens og virulens i forhold til sorternes resistensgener (Kristoffersen et al., 2020 og Orellana-Torrejon et al., 2022).

Der udvises også stor interesse for samdyrkning af forskellige arter, der tilsvarende forventes at kunne reducere sygdoms og skadedyrstrykket i den enkelte afgrøde og bidrage til en forbedret biodiversitet. Selvom visse studier viser nedsat effekt på skadegørere fra samdyrkning (Rämert & Lennartsson, 2002), så mangler der stadig dokumentation og viden, som belyser den reducerende effekt på skadegørere fra samdyrkning af de kombinationer, som vil være relevante under vores forhold.

Sortsresistens overfor havrerødsot og hvedegalmyg er gode eksempler på at forædling kan medvirke betydeligt til at reducere behovet for insekticidbekæmpelse.

Sædskiftet har væsentlig betydning for flere skadegørere, men de fleste af disse kan ikke umiddelbart bekæmpes med pesticider, dette gælder f.eks. nematoder, kålbrok, goldfodsyge, ærtesyge m.fl. Jordbrugerne

er generelt selv meget interesserede i at undgå opbygning af disse typiske jordlevende skadegørere, da det på lang sigt forringer deres muligheder for at få gode afgrøder i et sundt sædskifte.

4.1.8 Vejrforudsigelser (sæsonprognoser)

De nuværende vejrudsigter har rimelig sikkerhed op til 10 dage frem i tiden. Dette giver gode muligheder for planlægning af markoperationer for den næste uge, fx plantebeskyttelse og vanding. De nuværende vejrmødeller giver også fremskrivninger af sandsynlige vejrforhold for de næste 2-3 måneder, og det er fundet at sådanne prognoser i Europa kan udnyttes til planlægning af vanding for den kommende ca. 1 måned (Calanca et al., 2010). For perioder ud over 1 måned er disse prognoser for nærværende for usikre, og de vil derfor næppe heller kunne udnyttes til de former for klimatilpasning, der kræver ændringer i fx arts- og sortsvalg. Sæsonprognoser har derfor under danske forhold næppe realistiske muligheder for at kunne anvendes som grundlag for klimatilpasning i landbruget.

4.1.9 Forsikring

Forsikringer har længe været benyttet af landbruget i Danmark til at sikre mod økonomiske tab ved vejrekstremer som storm og hagl. Dette er i de senere år blevet udbygget med forsikring mod lejesæd, hvor kravet er at der ikke skal benyttes stråforkorter og samtidig iagttages andre dyrkningsforhold, der kan modvirke lejesæd. Med de forventede klimaændringer er der mulighed for yderligere at udbygge forsikringer mod økonomiske effekter af vejrekstremer (fx oversvømmelser og tørke) forudsat at den enkelte landmand har implementeret nødvendige foranstaltninger for at modvirke disse forhold. Forskellige typer af forsikringer mod klimaekstremer er allerede i brug i forskellige egne af Europa, især i Sydeuropa (Di Falco et al., 2014; Zhao et al., 2022). Dette er relevant både for planteavl og husdyrproduktion.

4.2 Husdyr

Forfattere: Jan Tind Sørensen, Trine Michelle Willumsen, Tofuko Woyengo, Morten Dam Rasmussen, Anders Peter Adamsen, Christian Børsting, Anne Grete Kongsted, Britt Henriksen, Lise Bonne Guldborg, Li Rong

Fagfællebedømmer: Søren Østergaard

4.2.1 Staldsystemer

4.2.1.1 Kvæg

Der bygges i dag kun åbne stalde til kvæg, hvilket også forventes at være gældende i fremtiden. Staldene har typisk lukkede gavle og helt åbne sider med naturlig ventilation, hvor luftmængden gennem stalden styres ved op- og nedrulning af gardiner. Lufthastigheden omkring dyrene kan nedsætte deres oplevelse af varmestress. Wang et al. (2018) har udviklet en formel til beregning af Equivalent Temperature Index (ETIC) der foruden indflydelse af temperatur og luftfugtighed også baseres på lufthastighed og solindfald.

For at bringe ETIC under 18 på en varmebølgedag med 25 grader og 60 % luftfugtighed skal lufthastigheden i stalden øges til 2,5 m/s. Varmeproduktionen fra en højtydende malkeko er stor og det vil være særlig vigtigt at sørge for intern mekanisk ventilation på opsamlingspladsen til malkestalden, hvor dyrene står tæt. På varme dage skal opholdstiden her minimeres. I stalde med automatisk malkning kan dyrene også stå tæt ved indgangen til malkerobotten og her vil mekanisk ventilation også kunne nedsætte den oplevede varmestress, samt sikre at dyrene kommer frivilligt til malkning. Køling af dyrene ved kombination af overbrusning, tågespray og ventilation anvendes ofte i varme egne. Under israelske forhold anfører Pinto et al. (2019), at 8 daglige overbrusninger er fordelagtigt i sammenligning med 3 perioder. Åndedrættet faldt fra i gennemsnit 60 til 44 pr. min. for 8 daglige overbrusninger og fra 73 til 47 vejtrækninger pr. minut for tre overbrusninger. Overbrusning eller vandforstøvning over dyrene er især en relevant mulighed ved lave luftfugtigheder, men de er mindre effektive, når luftfugtigheden er høj, som ofte er tilfældet under vores klimatiske forhold.

4.2.1.2 Svin

Sostalde i Danmark ventileres generelt med mekanisk ventilationsanlæg og den ønskede indetemperatur for søer holdes på 15 – 20 °C via regulering af ventilationsanlæg. Søer producerer dog mere varme end tidligere på grund af den øgede produktivitet, fordi søer leverer flere smågrise pr. kuld og dermed producerer en større mængde mælk, og også på grund af den betydelige stigning i de voksne søers levende vægt (Bjerg et al., 2020). Derfor er det vigtigt, at staldsystemerne indrettes og styres på en måde, så søerne er i stand til at afgive den øgede varmeproduktion. Især indvirkningen af lufttemperatur på varmestress, som søer lider af, er blevet undersøgt af mange forskere. Bjerg et al. (2020) indikerede, at lakterende søer reducerede deres foderoptagelse med op til 270 g dag⁻¹ °C⁻¹ (pr. én grads øget lufttemperatur efter den er højere end 26 °C). Et gennemsnit baseret på 22 sammenligninger, viste at søernes mælkeydelse faldt med i gennemsnit 184 g dag⁻¹ °C⁻¹ og at patttegrisenes tilvækst (kuldvækst) er reduceret med 49 g dag⁻¹ °C⁻¹. Ud over lufttemperaturen kan højere relativ luftfugtighed (RH) af luft også have en negativ indflydelse på søernes opfattelse af det omgivende termiske miljø. I samme undersøgelse blev det rapporteret, at en stigning i RH fra 30 % og 70 % ved en lufttemperatur på 30 °C svarer til en temperaturstigning på 1,9 °C for voksende grise (data for søer mangler). Derfor bør den negative effekt af RH ved højere lufttemperatur bemærkes, hvis en fordampningsafkølingsstrategi bruges til at afbøde varmestress hos grise. Forøgelse af lufthastigheden i dyrenes opholdszone kan modvirke dyrenes varmestress.

På grund af klimaforandringerne kan voksende grise også have et behov for køling, ellers vil det varme klima have en negativ effekt på produktivitet og dyrevelfærd. Tilgængelige tekniske løsninger svarer til dem, der er nævnt tidligere, herunder tilførsel af luft direkte til dyrenes opholdszone for at øge lufthastigheden omkring grise, højtryksskøling, gulvkøling og så videre. For at minimere de ressourcer, der kræves ved afkøling, er det nødvendigt at forudsige grises termiske status. Dette kan opnås ved at bruge den to-node

mekanistiske termofysiologiske model foreslået af Huang et al. (2021a; 2021b). Emissioner ved høje lufttemperaturer vil resultere i ændring af dyrenes adfærd og derfor føre til svineri i stien (Huynh et al., 2005; Jeppsson et al., 2021b). Ammoniakudledningen stiger med højere temperatur og øgede udledningsarealer forårsaget af f.eks. svineri i stierne. Implementering af forskellige afkølingsstrategier såsom at øge lufthastigheden i hvileområdet og ved at bruse grisene kan føre til reduktion af ammoniakemissioner med henholdsvis 21 % (eller 8,4 til 6,6 g gris¹) og 45 % (Jeppsson et al., 2021b).

4.2.1.3 Fjerkræ

Æg og fjerkræ produceres kommercielt i mekanisk ventilerede stalde. Slagtekyllinger produceres på fast gulv med strøelsesmåtte. Konsumæg produceres typisk på fast gulv eller etageanlæg og eventuelt med udendørsareal. Der findes tekniske muligheder til at modvirke, at temperaturen i dyrenes opholdszone overstiger deres komfort temperaturzone og derved forebygge varmestress. Løsninger omfatter blandt andet øget ventilation, konditionering af ventilationsluften, recirkulation af luften samt isolering af bygning og tagflade som påvirker de luftfysiske parametre temperatur, fugtighed og hastighed (Bjerg et al., 2018). Ventilationsstyring er vigtig for klimastyringen i fjerkræstalder. Øget lufthastighed kan sænke dyrenes kropstemperatur ved konvektionsvarmetab, når lufttemperaturen er lavere end dyrenes kropstemperatur. Bjerg et al. (2018) foreslog en model for effektiv temperatur (ET), hvor luftens chilleffekt (vindafkølingseffekt) er proportional med lufthastigheden eller kvadratroden på lufthastigheden og at chilleffekten aftager lineært med stigende lufttemperatur indtil lufttemperaturen er lig med dyrenes kropstemperatur. På varme dage kan ventilationsluften trækkes ind i stalden gennem de eksisterende luftindtag med en højere lufthastighed og rette vinkling af luftstrømmen for at øge luftcirkulation i dyrenes opholdszone. For at opnå maksimal køling via chilleffekt kan staldene være forsynet med recirkulationsventilatorer eller gavlventilatorer arrangeret til tunnelventilation (Saeed et al., 2019). For gulvproduktion af slagtekyllinger indikerer Bjerg et al., (2019) en lineær effekt af lufthastighed op til mindst 3 m/s og argumenterer for, at en høj densitet begrænser effekten af lufthastighed fordi dyrene giver læ for hinanden og lufthastigheden i det tilfælde nok nærmere er et udtryk for lufthastigheden over dyrene end imellem dyrene. Tilsvarende kan der være vind-skygge effekter i etageanlæg.

Køling af luften med højtryksskøling inde i stalden eller kølepads overrislet med vand i luftindtaget er en mulighed i klimaområder, hvor fugtigheden i udeluften ikke er for høj. Det kræver en omhyggelig overvågning og styring af den resulterende luftfugtighed. Ud over at dyrene skal kunne afgive fordampningsvarme gennem respirationen er styring af temperatur og luftfugtighed vigtig for at holde strøelsen tør, da våd strøelse producerer ammoniak (Saeed et al., 2019). Huset skal være designet til at modvirke penetrering af varme udefra i varme perioder, helst med tagryggen orienteret øst-vest og især isolering af tagfladerne herunder materiale- og farvevalg som mindsker varmeoverførsel fra solindstråling er vigtig (Saeed et al., 2019). For fjerkræ med adgang til udearealer skal der sikres tilstrækkelige skyggemuligheder på udearealerne.

4.2.2 Dyr på udearealer

Som beskrevet i kapitel 1 og kapitel 3 forventes følgende udfordringer ved hold af dyr på udearealer i et fremtidigt klima med a) længerevarende og mere intense varmeperioder samt b) flere og mere intense nedbørhændelser (både sommer og vinter). Dette kan medføre: i) varmemstress og solskoldning (grise); ii) reduceret foderforsyning, iii) øget insekttryk og iv) øget parasittryk. Tabel 4.1 viser en oversigt over potentielle tilpasningsvirkemidler ved hold af dyr på udearealer samt hvilke af ovennævnte udfordringer de forventes at påvirke i større eller mindre grad. Virkemidlerne gennemgås efterfølgende og er relevante for både intensiv og ekstensiv produktion.

Tabel 4.1. *Oversigt over udfordringer i et fremtidigt klima samt potentielle tilpasningsvirkemidler ved hold af dyr på udearealer.*

Udfordring	Foldindretning og -driftspraksis			Foldudstyr		
	Træer/ Skovland- brug	Alternative fourage- rings-afgrø- der	Samgræsning og foldrotation	Over- brus- ning	Insekt- fangere	Læskure
Varmestress/ solskoldning	x			x		x
Øget insekttryk	(x)				x	x
Øget parasit- tryk	x	x	X			
Reduceret fo- derforsyning	x	x	X			

4.2.2.1 Træer/skovlandbrug

Implementering af træer (og buske) på udearealer forventes at forbedre udegående husdyrs muligheder for termoregulering i varme samt solrige perioder, og dermed at mindske risikoen for varmemstress (kvæg, grise, fjerkræ m.fl.) og solskoldning (grise). Mekanismen er todelt i og med, at træerne dels bryder den direkte solindstråling og dels forbedrer det termiske mikroklima i "dyrehøjde" gennem en reduceret jord- og lufttemperatur omkring træerne (Gosme et al., 2016; Schild et al., 2018; Oliveira et al., 2021). Effekten af træer er primært undersøgt i tropiske og subtropiske klimazoner og med fokus på kvæg, der i udbredt grad søger træer på varme og solrige dage (Oliveira et al., 2021). Samspil mellem træer og øvrige husdyr er sparsomt belyst, men danske studier tyder på, at træer kan have en positiv effekt på diegivende søers termiske komfort i varme og solrige perioder (Bonde, 2016; Schild et al., 2018). Tilsvarende effekt forventes for søer i sendrægtigheden, hvilket ligeledes er en periode med høj varmeproduktion. Især stedsegrønne nåletræer og løvtræer har potentielt en læskabende effekt i kolde, blæsende og regnfulde perioder, hvilket er særligt vigtigt for unge dyr. Særligt kalve uden adgang til et indendørs lejeareal er i risiko for nedkøling, hvorfor adgang til (bund)læ i form af træer eller buske kan forventes at forbedre velfærden for denne dyregruppe (Smith et al., 2012).

Det er uvist, hvilken effekt etablering af træer på udearealer har på insekttrykket, men blandt praktikere er der udtrykt bekymring om, hvorvidt træer kan øge risikoen for sommer-mastitis forårsaget af et øget insekttryk (Kongsted, 2021). Modsat vurderes nogle træer, eksempelvis valnøddetræer, at have en repellerende effekt over for insekter (Böllersen, 2017 cf. Hemkes, 2021). Tanninholdige træer som eksempelvis pil menes at have en hæmmende effekt på parasitinfektioner (Waller et al., 2001).

Som nævnt i kapitel 3 kan længerevarende og mere intense tørkeperioder potentielt reducere græsproduktionen og dermed udfordre foderforsyningen til udegående dyr. Veletablerede træer er generelt mere tørkerobuste end græs som følge af deres dybere rodsystem, og især i tropiske og subtropiske klimazoner anses fodertræer til produktion af grøn biomasse (blade og skud) som et vigtigt ernæringsmæssigt tilskud til drøvtyggere i perioder med ekstrem tørke, hvor græsudbytte og kvalitet er markant forringet (Vandermeulen et al., 2018ab). Hurtigvoksende træer som eksempelvis pil, der kan tåle gentagende høst og hvor genvæksten (blade og stængler) har en relativ høj palatabilitet og foderværdi (Emilie et al., 2016; Mahieu et al., 2021), kan udgøre et supplement til udegående dyrs foderforsyning, såfremt det er muligt at etablere træerne i designs, der sikrer lav konkurrence (om næringsstoffer og lys) mellem træer og kløvergræsset.

4.2.2.2 Alternative fourageringsafgrøder

I forhold til udegående dyrs foderforsyning, vurderes der for nuværende ikke at være gode alternativer til de kløvergræsblandinger og -arter, der anvendes i dag i afgræsningssystemer for højtydende malkekøer, men på arealer til slæt kan mere tørkeresistente arter som eksempelvis strandsvingel og hundegræs være et alternativ (Kristensen et al., 2020). Dette er formentlig også tilfældet i ekstensive afgræsningssystemer, hvor foderværdien kan have mindre betydning. Urter som eksempelvis bladcikorie, der har et relativt dybt rodsystem og høj næringsværdi i form af proteinindhold, fordøjelighed og palatabilitet, kan formentlig ligeledes udgøre et værdifuldt fodersupplement især i tørkeperioder for kvæg (Eriksen et al., 2006), grise (Kongsted et al., 2015) og høner (Horsted et al., 2007) med positive sundhedsmæssige sideeffekter (Horsted et al., 2011). Sidstnævnte skyldes bl.a. et højt indhold af tanniner som kan have en hæmmende effekt på parasitter

4.2.2.3 Samgræsning og foldrotation

Vigtige virkemidler i forhold til parasithåndtering er foldrotation og samgræsning, hvor dyr med forskellig græsningsadfærd og/eller er vært for forskellige patogene organismer afgræsser samme område. Ved at planlægge hvornår og hvor længe dyrene er på de aktuelle folde, og i hvilken rækkefølge forskellige aldersgrupper er på folden, kan man reducere smittetrykket af indvoldsparasitter og andre patogene organismer da de typisk er afhængige af en vært inden en vis tid for at overleve (Eysker et al., 1998; Thamsborg et al., 1999; Miao et al., 2004). Flere patogene organismer spredes via dyrenes gødning, og stor dyretæthed i forhold til tilgængelig føde kan forårsage græsning tæt på gødning fra artsfæller, og dermed smitte. Både indvoldsparasitter og patogener som coccidier er typisk artsspecifikke, hvorfor samgræsning potentielt kan

reducere smittetrykket, bl.a. ved at andre dyrearter æder det inficerede græs. Forsøg indikerer således en gavnlig effekt af samgræsning på risikoen for parasitinfection hos får, der samgræsser med kvæg (Martin et al., 2020), samt hos kvier, der samgræsser med drægtige søer (Roepstorff et al., 2000). Sidstnævnte ligeledes suppleret med en positiv effekt på kviernes tilvækst (Sehested et al., 2000). Hos udegrise vil periodisk flytning af hytter, læskure, foderautomater og vandtrug/nipler, samt jævnlig tilgang til nyt græsareal og foldrotation reducere risikoen for kontaminering med patogener (Pietrosemoli and Tang, 2020), som vil kunne påvirke dyrenes sundhed og produktion.

4.2.2.4 Indretning af folde

Tilgang til læskure vil både kunne bidrage til skygge på varme sommerdage, ly og læ på kolde og våde dage. Effekten af læskure afhænger bl.a. af konstruktion (Fogsgaard et al., 2019) og tilgængeligt areal per dyr (Schütz et al., 2014). Adgang til skygge resulterer i en lavere temperatur og reduceret solindstråling (Veissier et al., 2018; Edwards-Callaway et al., 2020). Adgang til læskure som blokerer for solindstråling resulterer i lavere kropstemperatur hos kvæg og grise, og reducerer også risikoen for solskoldning (Pietrosemoli og Tang, 2020; Tucker et al., 2008) og et review af Herbut et al. (2021) viste at kvæg vælger skygge ved temperaturer over 25 grader, og bruger mere tid udendørs end i stalden om natten ved varme sommerdage, og særlig ved regnvejr for afkøling. Reviewet påpegede også at tagkonstruktionens materiale til læskure vil kunne påvirke klimaet og hvilken afkølede effekt skuret har. Selve udformningen af læskur vil også have betydning for hvor meget dyrene bruger læskure. Christensen et al. (2018) konkluderede at islandske heste brugte læskure med to åbninger mere end læskure med kun en åbning, og Fogsgaard et al. (2019) fandt at køer foretrak rektangulært udformet læskure i forhold til et stjerneformet læskur (Christensen et al., 2018; Fogsgaard et al., 2019).

Blodsugende insekter tiltrækkes vanligvis i første omgang af lugt (olfaktoriske stimuli), og når de kommer nærmere, tiltrækkes de via visuelle stimuli (Van Iser et al., 2014). Dette kan være en af årsagerne til at der er observeret færre insektplager i læskure, da det trolig er sværere at skelne dyrene fra baggrunden i læskure end udenfor (Hartmann et al., 2015). Undersøgelser af læskure til heste har vist mindre insektplage-relateret adfærd i læskure end udenfor (Hartmann et al., 2015). Man vil forvente, at dette vil være det samme for andre dyr, da det først og fremmest er de bidende insekter der er problemet for dyrene (Kamut og Jezierski, 2014) og disse flyver sjældent ind i læskure (Christensen et al. 2022). Insekt-fangere på folden placeret ved dyrene kan også være effektive til at reducere irritation hos dyrene pga. insekter (Baldacchino et al., 2014).

Der er positive erfaringer med forstøvning eller sprinkleranlæg til afkøling af kvæg og grise (Correa-Calderon et al., 2004; Pietrosemoli og Tang, 2020). Kvæg vælger skygge frem for afkøling med vand via sprinkleranlæg, selv om vand er en mere effektiv nedkøling og reducerer også insektplage (Schütz et al., 2011). Tilgang til sølebad til grise er vigtig i forhold til termoregulering, forebyggelse af solskoldning, og forebyggelse mod ectoparasitter (Pietrosemoli og Tang, 2020).

4.2.3 Fodring

4.2.3.1 Kvæg

Foruden de muligheder der er nævnt for at reducere varmemproblemet i afsnit 4.2.1 gennem staldindretning, er det også muligt hos kvæg at reducere belastningen gennem fodringen. Den første betingelse for at opretholde produktionen er, at foderoptagelsen kan holdes på det normale niveau. Det er først og fremmest vigtigt at undgå, at ensileret grovfoder tager varme, idet varmen fører til at både smagen og næringsværdien forringes. Dette kan undgås ved korrekt ensilering og udtagning af ensilage ved den daglige fodring, så det sikres, at der ikke allerede er en mikrobiel nedbrydning af foderet i gang før det blandes med resten af foderet. Hvis ikke dette er tilstrækkeligt, kan der tilsættes ascorbat, organiske syrer eller salte af disse til det færdigblandede foder. Det er i det hele taget vigtigt at sikre en god foderhygiejne for at undgå varmedannelse i foderet. Der kan blandes foder to gange i døgnet i stedet for én, så det blandede foder ligger foran dyrene i kortere tid. Der kan fodres med frisk foder sidst på dagen, hvor temperaturen er faldet, da køerne vil optage mere foder på dette tidspunkt end midt på dagen.

De mest højtydende køer har størst risiko for varmemstress, fordi de omsætter mere foder, og derved øges deres varmeproduktion. Hvis køerne får et mere koncentreret foder, vil de have en mindre varmeproduktion. Tilskud af fedt eller stivelse giver højere energi i foderet. Da det samtidigt giver mindre metan (Børsting et al., 2020), bliver dette tiltag sandsynligvis anvendt i fremtiden for at reducere køernes klimapåvirkning. Det er vigtigt for alle husdyr, at der er tilstrækkelig vandforsyning til det større behov, når det er varmt. Hos kvæg kan der anvendes mere salt eller Natriumbicarbonat i foderet op til 4 g Na pr. kg tørstof i foderet for at opretholde dyrenes saltbalance (Martinussen, 2021). Slagtekalve producerer mere varme jo hurtigere de vokser, og jo mere foder de æder. God vandforsyning, ekstra salt eller Natriumbicarbonat i foderet og mindre andel af grovfoder i rationen kan reducere varmemstress hos slagtekalve.

4.2.3.2 Grise

Øget forbrug af protein og fibre er forbundet med øget varmeproduktion, hvorimod øget forbrug af fedt er forbundet med reduceret varmeproduktion. Varmeproduktionen kan minimeres ved: i) reduktion af proteinindholdet i foderet, der kan erstattes med krystallinske, essentielle aminosyrer for at opfylde grisenes aminosyrebehov, ii) delvis udskiftning af kulhydrater (herunder stivelse og fibre) med fedt som energikilde i foder til svin med op til 6% fedt i ratioen, iii) forøgelse af foderets koncentration af næringsstoffer på grund af den reducerede foderoptagelse, iv) antioxidant som E- og C-vitaminer og Se i foderet med det formål at reducere oxidativt stress.

4.2.3.3 Slagtekyllinger og æggelæggere

Ud over afbødningen beskrevet ovenfor for grise, kan følgende strategier anvendes til at afhjælpe de negative virkninger af varmemstress hos slagtekyllinger og æglæggende høner: i) begrænsning af foderoptagelse til køligere timer på dagen, ii) forøgelse af foderpartikelstørrelse, iii) udskiftning af natriumchlorid i foderet med natriumbicarbonat kombineret med en stigning i foderets K-niveau for at opnå en elektrolytbalance på omkring 200 mEq /kg.

4.2.4 Avl

Genetisk selektion for større robusthed er en del af løsningen i tilpasningen af vores produktionsdyr til et mere ekstremt klima i fremtiden. Det forventes at varmemstress vil være den væsentlige parameter som påvirker produktionsdyrene, men det ændrede klima kan også have andre følgevirkninger såsom mulighed for introduktion af nye insekter som kan overføre insektbårne sygdomme, og større nedbørsmængder som kan påvirke forekomsten af visse parasitter fx i forbindelse med afgræsning.

Forudsætningen for genetisk selektion for større robusthed i forhold til en given egenskab er, at der er genetisk variation for egenskaben. Den genetiske fremgang opnås derefter ved, at man i hver generation udvælger de dyr som er mest robuste i forhold til egenskaben som forældre til næste generation. Udvalgelsen bør ske under fortsat hensyntagen til andre væsentlige egenskaber i avlsmåles såsom tilvækst, ydelse og sundhed. Genetisk selektion er en langsigtet strategi over flere generationer, hvor man for hver generation opnår dyr som er mere og mere tolerante i forhold til den egenskab som selekteres for.

Der er grundlæggende set tre måder hvorpå man kan sikre at produktionsdyrene rent genetisk er mere tolerante over for et ændret klima, og følgevirkningerne heraf. Den første er, at vælge racer som er tilpasset en mindre intensiv produktion, da disse har et lavere foderoptag, og dermed mindre varmeproduktion så de ikke er så følsomme overfor varmemstress (kapitel 3.2.1). Den anden mulighed er at skifte race til én som allerede er genetisk tilpasset det ændrede klima og følgevirkningerne heraf, herunder at krydse den ny race ind på den hidtil anvendte race, for at opnå afkom som er mere robuste over for klimaændringerne såsom varme-stress. En variant af dette er, at importere genetik af den aktuelle anvendte race som er selekteret i et klima som svarer til den "nye normal" i Danmark. Dette er specielt relevant, når der findes en anden race/bestand af hidtidige race som på øvrige egenskaber i avlsmålet fx mælkeydelse, kødproduktion og funktionalitet, tilnærmelsesvis kan matche de hidtil anvendte dyr. I praksis har fx kvægracer som er tilpasset et meget varmere klima, ofte en tendens til at favorisere fedtdeponering frem for ydelse ved et højt fodrings- og managementniveau (Berman, 2011). Et tredje alternativ er selektion for tolerance over for fx varmemstress hos de hidtil anvendte produktionsracer (Carabanõ et al., 2019). Såfremt klimaændringerne foregår over en længere tidshorisont, vil der automatisk ske en vis tilpasning til ændringerne, idet de dyr der udvælges som forældre til næste generation, vil være med den genetik som klarer sig bedst under det ændrede klima, for de egenskaber som indgår i avlsindekset.

For aktivt at kunne indarbejde tolerance overfor varmemstress i et avlsprogram, er det nødvendigt til en start at definere egenskaber som har en genetisk sammenhæng til tolerance over for varmemstress, såkaldte indikator egenskaber. Dyrenes indledende reaktioner på varmemstress er stigende respirationsfrekvens som i mere udbredte tilfælde går over i stigende overflade- og rektal-temperatur. Disse er anerkendte fysiologisk parameter til at udtrykke varmemstress, som kan måles direkte på produktionsdyrene (Huynh et al., 2005, Godyń et al., 2019). Der er fundet en moderat arvbarhed for dyrenes temperatur på hhv. 0,11 og 0,17 i studier af malkekvæg fra hhv. Australien og Florida (McMillan & Werf, 2007, Dikmen et al., 2012). Sidstnævnte fandt endvidere en positiv genetisk korrelation mellem dyrenes temperatur og ydelsesegenskaberne, hvilket indikerer at en entydig selektion for lavere temperatur vil medføre køer med lavere genetisk potentiale for ydelse. Hos svin har man tilsvarende fundet moderate arvbarheder for rektaltemperatur, respirations rate og overfladetemperatur som direkte udtryk for varmemstress (Seibert, et al., 2018, Gourdine et al. 2019). Fælles for disse egenskaber er, at de er arvbare, men det vil kræve store ressourcer at bestemme dem rutinemæssigt på et stort antal dyr.

Det er muligt at identificere områder på genomet som har en indflydelse på egenskaber som er tæt forbundet til varmemstress (Kim et al., 2018; Luo et al., 2021; Wolc et al., 2019). Men analyserne har vist, at tolerance over for varmemstress er en egenskab som er bestemt af mange gener, som hver især har en mindre indflydelse på tolerance over for varmemstress (ofte <1 %), dvs. tolerance over for varmemstress kan betegnes som en polygen effekt. Når tolerance over for varmemstress er en polygen egenskab vil det være nødvendigt at have rutinemæssige registreringer for egenskaber der har en sammenhæng til tolerance over for varmemstress for mange dyr, for at kunne udvikle en model, der kan anvendes til at selekttere efter tolerance over for varmemstress.

En mere udbredt tilgang til at avle efter produktionsdyr som er mere tolerante over for varmemstress, er at udnytte de registreringer, som man allerede rutinemæssigt opsamler hos produktionsdyrene, såsom foderudnyttelse, tilvækst, mælkeproduktion og reproduktion. Det er i flere studier vist, at de rutinemæssige registreringer kan anvendes i genetiske modeller hvor der på baggrund af lokale metrologiske data tages højde for temperatur og luftfugtighed (THI-index) for de enkelte produktionsejendomme. Ved at sammenholde ændringer i produktionsegenskaberne med meteorologiske data i de genetiske modeller, bliver det muligt at rangere dyrene efter avlsværdi for tolerance over for varmemstress, idet der således bedre tages højde for, at der er vekselvirkninger mellem arv og miljø (GxE). Studier fra bl.a. Italien og Australien har vist at graden af fald i ydelse hos malkekvæg som følge af varmemstress er en egenskab med lav til moderat arvbarhed (0,1-0,4) (Bernabucci et al., 2014, Nguyen et al., 2016). Hos søer har bl.a. et studie fra USA vist, at arvbarheden for reproduktion afhænger af varmemstress, generelt fandt man lavere arvbarheder (~0,1) jo mere varmemstressede søerne var (Tiezzi, 2020). Usala et al., (2021) fandt tilsvarende at arvbarheden for tilvækst og slagteegenskaber hos svin i USA var påvirket af temperatur og luftfugtighed.

Genetiske modeller til at bestemme avlsværdi for tolerance over for varmemstress anvendes i dag i avlsværdiurderingen hos kvæg i Australien og hos grise hos firmaet Smithfield i USA, og vil også kunne tilpasses til danske forhold, hvis det vurderes at der er et behov for at inddrage tolerance over for varmemstress i fremtidige avlsværdiurderinger. De rutinemæssige registreringer i produktionsbesætninger anvendes allerede, ligesom det er muligt at få adgang til lokale meteorologiske data. I udenlandske studier er der fundet lave til moderate arvbarheder for tolerance over for varmemstress. Arvbarheder er populationsspecifikke, men så længe arvbarheden er større end nul, er det muligt at opnå en genetisk fremgang for egenskaben. Ved at anvende modeller som også tillader inddragelse af genomisk information, vil de individer som er genotypet få avlsværdital for tolerance over for varmemstress som er mere sikkert bestemt end de individer som ikke er genotypet. Inddragelse af genomisk information er specielt en fordel for egenskaber med en lav arvbarhed, hvilket baseret på eksisterende studier må forventes for tolerance over for varmemstress.

Ligesom for varmemstress er det også muligt at avle efter større tolerance for nogle af de afledte effekter af klimaforandringer. Hvis klimaforandringerne fx leder til, at der er bedre overlevelsesvilkår for visse parasitter, som specielt er et problem hos dyr der afgræsser, så er det bl.a. vist hos Romney får i New Zealand, at det er muligt at selekttere linjer for forskellig tolerance over for nermatoder i tarmsystemet. Dyrene blev selekteret på baggrund af hvor længe der gik før de havde behov for første ormekur for at opretholde en tilfredsstillende tilvækst (tællinger viste, at antallet af ormeæg i fæces ikke var forskelligt for linjerne) – denne indikator egenskab for tolerance, havde en arvbarhed på 0,13 og en høj positiv genetisk korrelation til tilvækst på 0,71 (Morris et al., 2010).

Et andet eksempel på en afledt effekt af klimaforandringer kan være længerevarende og intense tørkeperioder som reducerer græsvækst og fordøjelighed, hvilket ved afgræsning øger behovet for dyr der kan trives under de ekstensive forhold. Her er det muligt at udnytte at der fx for kødkvæg er genetisk variation mellem racerne, idet der er racer som gennem mange generationer er udvalgt efter at kunne trives på foder med lav næringsværdi, kaldet ekstensive racer (Faktaark, Kvæg som naturplejere, 2013). Inden for racer er der ligeledes genetisk variation i evnen til at trives og vokse på foder med lav næringsværdi som kan udnyttes i et avlsprogram, såfremt der er rutinemæssige registreringer af egenskaber der er genetisk korreleret til denne evne.

4.3 Referencer

- Abalos, D., Thers, H., 2022. Effects of biochar on the soil greenhouse gas emission balance. In: Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. Elsgaard, L. (red.), p. 67-85.
- Abdollahi, L., Getahun, G.T., Munkholm, L.J., 2017. Eleven Years' Effect of Conservation Practices for Temperate Sandy Loams: I. Soil Physical Properties and Topsoil Carbon Content. Soil Science Society of America Journal, 81, 380-391. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.06.0161>

- Abdollahi, L., Munkholm, L.J., Garbout, A., 2014. Tillage system and cover crop effects on soil quality: II. pore characteristics. *Soil Science Society of America Journal*, 78(1), 271-279.
- Acharya, S.N., Mir, Z., Moyer, J.R., 2004. ACE-1 perennial cereal rye. *Canadian Journal of Plant Science* 84, 819-821.
- Adeux, G., Vieren, E., Carlesi, S., Barberi, P., Munier-Jolain, N., Cordeau, S., 2019. Mitigating crop yield losses through weed diversity. *Nature Sustainability* 2:1018-1026
- Ahmad, S., Tang, L., Shahzad, R., Mawia, A.M., Rao, G.S., Jamil, S., Wei, C., Sheng, Z., Shao, G., Wei, X., Hu, P., Mahfouz, M.M., Hu, S., Tang, S., 2021. CRISPR-Based Crop Improvements: A Way Forward to Achieve Zero Hunger. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 69, 8307-8323.
- Ahmed, R.F., Irfan, M., Shakir, H.A., Khan, M., Chen, L., 2020. Engineering drought tolerance in plants by modification of transcription and signalling factors. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 34, 781-789.
- Andersen, H.E., Rubæk, G.H., Hasler, B., Jacobsen, B.H., 2020. Virkemidler til reduktion af fosforbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 284 s. - Videnskabelig rapport nr. 379
- Andersen, M.M., Landes, X., Xiang, W., Anyshchenko, A., Falhof, J., Østerberg, J.T., Olsen, L.I., Edenbrandt, A.K., Vedel, S.E., Thorsen, B.J., Sandøe, P., Gamborg, C., Kappel, K., Palmgren, M.G., 2015. Feasibility of new breeding techniques for organic farming. *Trends in Plant Science* 20, 426-434.
- Antoniuk, V., Manevski, K., Sørensen, K.K., Larsen, R., Sandholdt, I., Zhang, X., Andersen, M.N., 2021. Diurnal and Seasonal Mapping of Water Deficit Index and Evapotranspiration by an Unmanned Aerial System: A Case Study for Winter Wheat in Denmark, *Remote Sensing* 13 2998. <https://doi.org/10.3390/rs13152998>
- Arthur, E., Andersen, M.N., 2022. Effect of biochar on soil physical and chemical properties. In *Knowledge synthesis on biochar in Danish agriculture*. DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. Elsgaard, L. (red.), p. 40-52.
- Asseng, S., Martre, P., Maiorano, A., Rötter, R.P., O'Leary, G.J., Fitzgerald, G.J., Girousse, C., Motzo, R., Giunta, F., Babar, M.A., Reynolds, M.P., Kheir, A.M.S., Thorburn, P.J., Waha, K., Ruane, A.C., Aggarwal, P.K., Ahmed, M., Balkovič, J., Basso, B., Biernath, C., Bindi, M., Cammarano, D., Challinor, A.J., De Sanctis, G., Dumont, B., Eyshi Rezaei, E., Fereres, E., Ferrel, R., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Gao, Y., Horan, H., Hoogenboom, G., Izaurralde, R.C., Jabloun, M., Jones, C.D., Kassie, B.T., Kersebaum, K.C., Klein, C., Koehler, A.K., Liu, B., Minoli, S., Montesino San Martin, M., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., Olesen, J.E., Palosuo, T., Porter, J.R., Priesack, E., Ripoche, D., Semenov, M.A., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Van der Velde, M., Wallach, D., Wang, E., Webber, H., Wolf, J., Wolli, P., Xiao, L., Zhang, Z., Zhao, Z., Zhu, Y., Ewert, F., 2019. Climate change impact and adaptation on wheat yield and protein. *Global Change Biology* 25, 155-173.
- Baldacchino, F., Puech, L., Manon, S., Hertzog, L.R., Jay-Robert, P., 2014. Biting behaviour of Tabanidae on cattle in mountainous summer pastures, Pyrenees, France, and effects of weather variables. *Bulletin of Entomological Research* 104, 471-479.
- Bernabucci, U., Biffani, S., Buggiotti, L., Vitali, A., Lacetera, N., Nardone, A., 2014. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle, *Journal of Dairy Science*, 97, 471-486, doi: 10.3168/jds.2013-6611.
- Berman, A. 2011. Invited review: Are adaptations present to support dairy cattle productivity in warm climate? *Journal of Dairy Science*, 94, 2147-2158, doi: 10.3168/jds.2010-3962.

- Bjerg, B., Zhang, G., Pedersen, P., Morsing, S., 2018. Effective temperature for poultry and pigs in hot climate. In: Yucel, B., Taskin, T. (Eds.), *Animal Husbandry and Nutrition*. InTechOpen, London, 19.
- Bjerg, B., Brandt, P., Pedersen, P., Zhang, G., 2020. Sows' responses to increased heat load - A review. *J Therm Biol* 94, 102758.
- Blauhut, V., Stoelzle, M., Ahopelto, L., Brunner, M.I., Teutschbein, C., Wendt, D.E., Akstinas, V., Bakke, S.J., Barker, L.J., Bartošová, L., Briede, A., Cammalleri, C., Kalin, K.C., De Stefano, L., Fendeková, M., Finger, D.C., Huysmans, M., Ivanov, M., Jaagus, J., Jakubínský, J., Krakovska, S., Laaha, G., Lakatos, M., Manevski, K., Neumann Andersen, M., Nikolova, N., Osuch, M., Van Oel, P., Radeva, K., Romanowicz, R.J., Toth, E., Trnka, M., Urošev, M., Urquijo Reguera, J., Sauquet, E., Stevkov, A., Tallaksen, L.M., Trofimova, I., Van Loon, A.F., Van Vliet, M.T.H., Vidal, J.P., Wanders, N., Werner, M., Willems, P., Zivković, N., 2022. 'Lessons from the 2018-2019 European droughts: a collective need for unifying drought risk management', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, bind 22, nr. 6, s. 2201-2217. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2201-2022>
- Blomquist, J., Berglund, K., 2021. Timing and conditions modify the effect of structure liming on clay soil. *Agricultural and Food Science* 30, 96-107. <https://doi.org/10.23986/afsci.103422>
- Blomquist, J., Simonsson, M., Etana, A., Berglund, K., 2018. Structure liming enhances aggregate stability and gives varying crop responses on clayey soils. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 68(4), 311-322. <https://doi.org/10.1080/09064710.2017.1400096>
- Bonde, M., 2016. Adfærd og velfærd - Søer og pattegrise I farefolde med pil, på tværs af årstider. Udviklingscenter for Husdyr på Friland. <https://orprints.org/id/eprint/30005/>
- Brinch-Pedersen, H., Gregersen, P.L., Holme, I., Hebelstrup, K., Hougs, L., Boelt, B., Petersen, K.K., Gylling, M., 2018. Vidensyntese om nye planteforædlingsteknikker og deres effekt på dansk landbrug. In: Brinch-Pedersen H, ed, Vol. 127: DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug.
- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., Huard, F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research* 119, 201-212.
- Büschges, R., Hollricher, K., Panstruga, R., Simons, G., Wolter, M., Frijters, A., van Daelen, R., van der Lee, T., Diergaarde, P., Groenendijk, J., Töpsch, S., Vos, P., Salamini, F., Schulze-Lefert, P., 1997. The Barley Mlo Gene: A Novel Control Element of Plant Pathogen Resistance. *Cell* 88, 695-705.
- Böllersen, V., 2017. Rivival der Walnuss: Neues und altes wissen zum walnussanbau in Deutschland, Kevelaer, OLV Organischer Landbau Verlag Kurt Walter Laus Fachverlag für Garten und Ökologie.
- Børsting, C.F., Johansen, M., Lund, P., Møller, H.B., 2020. Notat vedr. optimeret fodring med øget fedt til kvæg og reduktionseffekt på enterisk metan. Notat til Miljø- og Fødevareministeriet. 11 pp.
- Carabanó, M.J., Ramón, M., Menéndez-Buxadera, A., Molina, A., Días, C., 2019. Selecting for heat tolerance. *Animal Frontiers* 9, 62-68. Doi:10.1093/af/vfy033.
- Calanca, P., Bolius, D., Weigel, A.P., Liniger, M.A., 2010. Application of long-range weather forecasts to agricultural decision problems in Europe. *Journal of Agricultural Science* 149, 15-22.
- Chen, J., Manevski, K., Lærke, P.E., Jørgensen, U., 2022. Biomass yield, yield stability and soil carbon and nitrogen content under cropping systems destined for biorefineries. *Soil and Tillage Research*, 221, Article 105397. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105397>
- Christensen, J.W., Olczak, K., Palme, R., Thodberg, K., 2018. The effect of shelter design on shelter use by Icelandic horses in the winter period. *Journal of Veterinary Behavior* 27, 47-54.

- Christensen, J.W., Strom, C.G., Nicova, K., de Gaillard, C.L., Sandoe, P., Skovgard, H., 2022. Insect-repelling behaviour in horses in relation to insect prevalence and access to shelters. *Applied Animal Behaviour Science*, 247, Article 105560. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2022.105560>
- Collinge, D., Jørgensen, H., Latz, M., Rojas, E.C., Manzotti, A., Jensen, B., Fani, N., 2019. Searching for novel fungal biological control agents for plant disease control among endophytes. In: Hodkinson, F. Doohan, M. Saunders, B. Murphy (Eds.), *Endophytes a Growing World*, Cambridge Univ. Press. (2019)
- Correa-Calderon, A., Armstrong, D., Ray, D., DeNise, S., Enns, M., Howison, C., 2004. Thermoregulatory responses of Holstein and Brown Swiss Heat-Stressed dairy cows to two different cooling systems. *International Journal of Biometeorology* 48, 142-148.
- Crain, J., Haghighattalab, A., DeHaan, L., Poland, J., 2021. Development of whole-genome prediction models to increase the rate of genetic gain in intermediate wheatgrass (*Thinopyrum intermedium*) breeding. *The Plant Genome* 14, e20089.
- Curwen-McAdams, C., Jones, S.S., 2017. Breeding Perennial Grain Crops Based on Wheat. *Crop Science* 57, 1172-1188.
- DeHaan, L., Larson, S., López-Marqués, R.L., Wenkel, S., Gao, C., Palmgren, M., 2020. Roadmap for Accelerated Domestication of an Emerging Perennial Grain Crop. *Trends in Plant Science* 25, 525-537.
- Deichmann, M.M., Andersen, M.N., Thomsen, I.K., Børgesen, C.D., 2019. Impacts of controlled drainage during winter on the physiology and yield of winter wheat in Denmark. *Agricultural Water Management* 216, 118-126. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.01.013>
- Demone, J.J., Wan, S., Nourimand, M., Hansen, A.E., Shu, Q.-y, Altosaar, I., 2018. New Breeding Techniques for Greenhouse Gas (GHG) Mitigation: Plants May Express Nitrous Oxide Reductase. *Climate* 6, 80.
- Dikmen, S., Cole, J.B., Null, D.J., Hansen, P.J., 2012. Heritability of rectal temperature and genetic correlations with production and reproduction traits in dairy cattle. *J. Dairy Sci.*, 95, 3401-3405. doi:10.3168/jds.2011-4306.
- Di Falco, S., Adinolfi, F., Bozzola, M., Capitanio, F., 2014. Crop insurance as a strategy for adapting to climate change. *Journal of Agricultural Economics* 65 485-504.
- Doebley, J.F., Gaut, B.S., Smith, B.D., 2006. The Molecular Genetics of Crop Domestication. *Cell* 127, 1309-1321.
- Doltra, J., Lægdsmand, M., Olesen, J.E., 2014. Impacts of projected climate change on productivity and nitrogen leaching of crop rotations in arable and pig farming systems in Denmark. *Journal of Agricultural Science* 152, 75-92.
- Edwards-Callaway, L.N., Cramer, M.C., Cadaret, C.N., Bigler, E.J., Engle, T.E., Wagner, J.J., Clark, D.L., 2020. Impacts of shade on cattle well-being in the beef supply chain. *Journal of Animal Science* 99.
- Ekholm, P., Valkama, P., Jaakkola, E., Kiirikki, M., Lahti, K., Pietola, L., 2012. Gypsum amendment of soils reduces phosphorus losses in an agricultural catchment. *Agricultural and Food Science*, 21, 279-291.
- Emilie, J.C., Delgarde, R., Barre, P., Novak, S., 2016. Nutritive value and degradability of leaves from temperate woody resources for feeding ruminants in summer. 3rd European Agroforestry Conference – Montpellier 23-25 May 2016.
- Energy Futures Initiative, 2020. From the Ground Up: Cutting-Edge Approaches for Land-Based Carbon Dioxide Removal.

- Engelhardt, S., Stam, R., Hückelhoven, R., 2018. Good Riddance? Breaking Disease Susceptibility in the Era of New Breeding Technologies. *Agronomy* 8, 114.
- Eriksen, J., Søegaard, K., Kristensen, T., Fretté, X.C., Wiking, L. & Holm Nielsen, J., 2006. Herbage and milk production and quality when grazing different legumes and herbs. In: *Quality Legume-Based Forage Systems for Contrasting Environments. Proceedings of the Final Meeting 30th August – 3rd September 2006, Gumpenstein, Austria.* 177-180.
- 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>.
- Eysker, M., van der Aar, W.M., Boersema, J.H., Githiori, J.B., Kooyman, F.N.J., 1998. The effect of repeated moves to clean pasture on the build up of gastrointestinal nematode infections in calves. *Veterinary Parasitology* 76, 81-94.
- Faktaark, kvæg som naturplejere. 2013. Videnscenter for Landbrug. https://okologi.dk/media/jdqlrqkn/pl_kvæg_som_naturplejere.pdf
- Fogsgaard, K.K., Bertelsen, M., Christensen, J.W., 2019. Does shelter design matter? A note on the effect of two shelter types on shelter use by cattle during winter. *Journal of Veterinary Behavior* 34, 18-21.
- Gailloch, C., Develtere, W., Jacobs, T.B., 2021. CRISPR screens in plants: approaches, guidelines, and future prospects. *THE PLANT CELL* 33, 794-813.
- Gao, C., 2021. Genome engineering for crop improvement and future agriculture. *Cell* 184, 1621-1635.
- GEUS, 2022. Ny rapport fra VAP overvågningen. <http://pesticidvarsling.dk/?p=863>
- Ghislain, M., Byarugaba, A.A., Magembe, E., Njoroge, A., Rivera, C., Román, M.L., Tovar, J.C., Gamboa, S., Forbes, G.A., Kreuze, J.F., Barekye, A., Kiggundu, A., 2019. Stacking three late blight resistance genes from wild species directly into African highland potato varieties confers complete field resistance to local blight races. *Plant Biotechnology Journal* 17, 1119-1129.
- Godyń, D., Herbut, P., Angrecka, S., 2019. Measurements of peripheral and deep body temperature in cattle – A review. *Journal of Thermal Biology* 79, 42-49. doi:10.1016/j.jtherbio.2018.11.011
- Gómez-Muñoz, B., Jensen, L.S., Munkholm, L., Olesen, J.E., Møller Hansen, E., 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*, 85, 1465-1478. <https://doi.org/10.1002/saj2.20312>
- Gosme, M., Dufour, L., Inurreta Aguirre, H.D., Dupraz, C., 2016. Microclimatic effect of agroforestry on diurnal temperature cycle. 3. European Agroforestry Conference (EURAF 2016). Montpellier, France.
- Gourdine, J.L., Riquet, J., Rosé, R., Pouillet, N., Giorgi, M., Billon, Y., Renaudeau, D., Gilbert, H., 2019. Genotype by environment interactions for performance and thermoregulation responses in growing pigs 1,2. *J Anim Sci.*, 97, 3699-3713. doi:10.1093/jas/skz245.
- Gruner, P., Miedaner, T., 2021. Perennial Rye: Genetics of Perenniality and Limited Fertility. *Plants* 10, 1210.
- Hao, L., Pu, X., Song, J., 2021. Introduction of mutations in plants with prime editing. *Methods* 194, 83-93.
- Hartmann, E., Hopkins, R.J., von Brömssen, C., Dahlborn, K., 2015. 24-h sheltering behaviour of individually kept horses during Swedish summer weather. *Acta Veterinaria Scandinavica* 57, 45.

- Hemkes, C., 2021. Agroforestry systems in temperate European Climates with walnuts and paulownia. Master thesis, Aarhus University. 62 pp.
- Henningsen, E.C., Omidvar, V., Della Coletta, R., Michno, J.-M., Gilbert, E., Li, F., Miller, M.E., Myers, C.L., Gordon, S.P., Vogel, J.P., Steffenson, B.J., Kianian, S.F., Hirsch, C.D., Figueroa, M., 2021. Identification of Candidate Susceptibility Genes to *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* in Wheat. *Frontiers in Plant Science* 12.
- Henriksen, H.J., Stisen, S., Trolborg, L., He, X., Jørgensen, L.F., 2015. Analyse af øget vandindvinding til markvanding. Vandløbspåvirkning på ID15 niveau for nuværende markvanding samt 25%, 50% og 100% øget markvanding. (Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport; Vol. 2015, No. 29). GEUS. <https://doi.org/10.22008/gpub/30679>
- Herbut, P., Hoffmann, G., Angrecka, S., Godyn, D., Vieira, F.M.C., Adamczyk, K., Kupczynski, R., 2021. THE EFFECTS OF HEAT STRESS ON THE BEHAVIOUR OF DAIRY COWS - A REVIEW. *Annals of Animal Science* 21, 385-402.
- Holme, I.B., Gregersen, P.L., Brinch-Pedersen, H., 2019. Induced Genetic Variation in Crop Plants by Random or Targeted Mutagenesis: Convergence and Differences. *Frontiers in Plant Science* 10.
- Horsted, K., Hermansen, J.E., Ranvig, H., 2007. Crop content in nutrient-restricted versus non-restricted organic laying hens with access to different forage vegetations. *British Poultry Science* 48, 177-184.
- Horsted, K., Søegaard, K., Kristensen, T. 2011. Græsmarkurter og deres indholdsstoffer. DCA rapport nr. 003. DCA, Aarhus Universitet. 64 pp.
- Huang, T., Rong, L., Zhang, G., Brandt, P., Bjerg, B., Pedersen, P., Granath, S.W.L., 2021a. A two-node mechanistic thermophysiological model for pigs reared in hot climates – Part 2: Model performance assessments. *Biosystems Engineering*.
- Huang, T., Rong, L., Zhang, G., Brandt, P., Bjerg, B., Pedersen, P., Granath, S.W.Y., 2021b. A two-node mechanistic thermophysiological model for pigs reared in hot climates – Part 1: Physiological responses and model development. *Biosystems Engineering*.
- Huynh, T.T.T., Aarnink, A.J.A., Verstegen, M.W.A., Gerrits, W.J.J., Heetkamp, M.J.W., Kemp, B., Canh, T.T. 2005. Effects of increasing temperatures on physiological changes in pigs at different relative humidities, *Journal of Animal Science*, 83, 1385–1396, doi:10.2527/2005.8361385x
- Huynh, T.T.T., Aarnink, A.J.A., Gerrits, W.J.J., Heetkamp, M.J.H., Canh, T.T., Spoolder, H.A.M., Kemp, B., Verstegen, M.W.A., 2005. Thermal behaviour of growing pigs in response to high temperature and humidity. *Applied Animal Behaviour Science* 91, 1-16.
- Jansky, S.H., Dempewolf, H., Camadro, E.L., Simon, R., Zimnoch-Guzowska, E., Bisognin, D.A., Bonierbale, M., 2013. A Case for Crop Wild Relative Preservation and Use in Potato. *Crop Science* 53, 746-754.
- 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 [Article]. *Geoderma*, 424, 116022. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116022>
- 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, Article e13173. <https://doi.org/10.1111/ejss.13173>

- Jeppsson, K.-H., Olsson, A.-C., Nasirahmadi, A., 2021b. Increased air velocity in the lying area improves pen hygiene and reduces ammonia emissions from houses with partly slatted pens for growing/finishing pigs. *Livestock Science* 251, 104607.
- Jo, K.-R., Zhu, S., Bai, Y., Hutten, R.C.B., Kessel, G.J.T., Vleeshouwers, V.G.A.A., Jacobsen, E., Visser, R.G.F., Vossen, J.H., 2016. Problematic Crops: 1. Potatoes. *Plant Pathogen Resistance Biotechnology*, 171-191.
- Juroszek, P., von Tiedemann, A., 2015. Linking Plant Disease Models to Climate Change Scenarios to Project Future Risks of Crop Diseases: A Review. *Journal of Plant Diseases and Protection* 122, 3-15.
- Kamut, M., Jezierski, T., 2014, "Ecological, behavioural and economic effects of insects on grazing farm animals - A review", *Animal Science Papers and Reports*, vol. 32, no. 2, pp. 107-119.
- Kahiluoto, H., Kaseva, J., Balek, J., Olesen, J.E., Ruiz-Ramos, M., Gobin, A., Kersebaum, K.C., Takác, J., Ruget, F., Ferrise, R., Bezak, P., Cappellades, G., Dibari, C., Mäkinen, H., Nendel, C., Ventrella, D., Rodriguez, A., Bindi, M., Trnka, M., 2019. Decline in climate resilience of European wheat. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116, 123-128.
- Kaur, B., Bhatia, D., Mavi, G.S., 2021. Eighty years of gene-for-gene relationship and its applications in identification and utilization of R genes. *Journal of Genetics* 100, 50.
- Kharkwal, M.C., 2011. A Brief History of Plant Mutagenesis. In: Shu QY, Forster BP, Nakagawa H, eds. *Plant mutation breeding and biotechnology*. Wallingford: CAB, 21-30.
- Kim, K.S., Seibert, J.T., Edea, Z., Graves, K.L., Kim, E.S., Keating, A.F., Baumgard, L.H., Ross, J.W., Rothschild, M.F., 2018. Characterization of the acute heat stress response in gilts: III. Genome-wide association studies of thermotolerance traits in pigs. *Journal of animal science*, 96, 2074-2085. <https://doi.org/10.1093/jas/sky131>
- Knudsen, S., Wendt, T., Dockter, C., Thomsen, H.C., Rasmussen, M., Jørgensen, M.E., Lu, Q., Voss, C., Murozuka, E., Østerberg, J.T., Harholt, J., Braumann, I., Cuesta-Seijo, J.A., Bodevin, S., Petersen, L.T., Carciofi, M., Pedas, P.R., Husum, J.O., Simmelsgaard Nielsen, M.T., Nielsen, K., Jensen, M.K., Møller, L.A., Gojkovic, Z., Striebeck, A., Lengeler, K., Fennessy, R.T., Katz, M., Garcia Sanchez, R., Solodovnikova, N., Förster, J., Olsen, O., Møller, B.L., Fincher, G.B., Skadhauge, B., 2021. FIND-IT: Ultrafast mining of genome diversity. *bioRxiv*, 2021.2005.2020.444969.
- Kongsted, A.G. 2021. First field workshop in NW1 (Livestock in agroforestry concepts), Denmark. Internt notat I MIXED projektet.
- Kongsted, A.G., Nørgaard, J.V., Jensen, S.K., Lauridsen, C., Juul-Madsen, H.R., Norup, L.R., Engberg, R.M., Horsted, K., Hermansen, J.E., 2015. Influence of genotype and feeding strategy on pig performance, plasma concentrations of micro nutrients, immune responses and faecal microbiota composition of growing-finishing pigs in a forage-based system. *Livestock Science*, 178, 263-271.
- Kristensen, T., Eriksen, J., Johansen, M., Weisbjerg, M.R., 2020. Management af græs og græsnings i økologiske besætninger afhængig af klimatiske forhold. Aarhus Universitet. [https://pure.au.dk/portal/en/persons/troels-kristensen\(0bcc12e6-8323-497a-bf1d-7e9a8e9e9e84\)/publications/management-af-graes-og-graesning-i-oekologiske-besaetninger-afhaengig-af-klimatiske-forhold\(407de645-3134-4000-b2ad-dfc2208db513\).html](https://pure.au.dk/portal/en/persons/troels-kristensen(0bcc12e6-8323-497a-bf1d-7e9a8e9e9e84)/publications/management-af-graes-og-graesning-i-oekologiske-besaetninger-afhaengig-af-klimatiske-forhold(407de645-3134-4000-b2ad-dfc2208db513).html)
- Kristensen, J.B., 2021. The long-term effect of straw incorporation and cover crops on soil structure and functions. MSc thesis Aarhus University.

- Kristoffersen, R., Heick, T.M., Møller, G., Eriksen, L.B., Nielsen, G.C., Jørgensen, L.N., 2020. The potential of cultivar mixtures to reduce fungicide input and mitigate fungicide resistance development, *Agronomy for Sustainable Development*, 40:36 <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00639-y>
- Kronvang, B., Kristiansen, S.M., Schelde, K., Børgesen, C.D., 2013, 'Udredningsprojekt vedrørende dræns betydning for afvanding - og de naturlige og menneskeskabte faktorer som influerer på dræns virke som vandafløder fra marker', 47 s., Notat fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. https://dce.au.dk/file-admin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2014/Draennotat_DCE__endelig.pdf
- Lang'At, S.C., 2022. The evolution of soil structural stability and soil organic carbon in response to straw incorporation, use of cover crop and conversion to semi-natural grassland. MSc thesis Aarhus University.
- Li, M., Xu, J., Gao, Z., Tian, H., Gao, Y., Kariman, K., 2020. Genetically modified crops are superior in their nitrogen use efficiency-A meta-analysis of three major cereals. *Scientific Reports* 10, 8568.
- Lundqvist, U., 2014. Scandinavian mutation research in barley – a historical review. *Hereditas* 151, 123-131.
- Luo, H., Li, X., Hu, L., Xu, W., Chu, Q., Liu, A., Guo, G., Liu, L., Brito, L.F., Wang, Y., 2021. Genomic analyses and biological validation of candidate genes for rectal temperature as an indicator of heat stress in Holstein cattle, *J. Dairy Sci.*, 104, 4441-4451, doi:10.3168/jds.2020-18725
- Lyzenga, W.J., Pozniak, C.J., Kagale, S., 2021. Advanced domestication: harnessing the precision of gene editing in crop breeding. *Plant Biotechnology Journal* 19, 660-670.
- Mahieu, S., Novak, S., Barre, P., Delagarde, R., Niderkorn, V., Gastal, F., Emile, J.-C., 2021. Diversity in the chemical composition and digestibility of leaves from fifty woody species in temperate areas. *Agroforestry Systems*.
- Manevski, K., Lærke, P., Olesen, J.E., Jørgensen, U., 2018. Nitrogen balances of innovative cropping systems for feedstock production to future biorefineries. *Science of the Total Environment* 633, 372-390.
- Martin, G., Barth, K., Benoit, M., Brock, C., Destruel, M., Dumont, B., Grillot, M., Hübner, S., Magne, M.-A., Moerman, M., Mosnier, C., Parsons, D., Ronchi, B., Schanz, L., Steinmetz, L., Werne, S., Winckler, C., Primi, R., 2020. Potential of multi-species livestock farming to improve the sustainability of livestock farms: A review. *Agricultural Systems* 181, 102821.
- Martinussen, H. 2021. Tilpas køernes fodring i varme perioder. Tilpas køernes fodring i varme perioder (landbrugsinfo.dk)
- McCallum, C.M., Comai, L., Greene, E.A., Henikoff, S., 2000. Targeting induced local lesions in genomes (TILLING) for plant functional genomics. *Plant Physiol* 123, 439-442.
- Mcmillan, A.M. Werf, J.H.J.V. 2007. Genetic variation in rectal temperature and its association with heat tolerance in Australian dairy cattle. Proc. 17th Conference of the Association for the Advancement of Animal Breeding and Genetics, Sep. 23-26, Armidale, New South Wales, Australia. 553-556
- Meilvang, B. og Tybirk, K. 2020 Drænvand som cirkulær ressource. *Fagtidsskriftet Vand og Jord*, februar 2020, 28-31. http://vand-og-jord.dk/wp-content/uploads/2021/05/VJ-1_20_Draenvand_s28-31.pdf
- Miao, Z.H., Glatz, P.C., Ru, Y.J., 2004. Review of production, husbandry and sustainability of free-range pig production systems. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences* 17, 1615-1634.
- Miljøstyrelsen, 2013. Arbejdsnotat om Balance mellem vandforekomster og vandindvinding til markvanding. https://mst.dk/media/114882/markvandingsgruppen_arbejdsnotat_31-01-2013.pdf

- Milner, S.G., Jost, M., Taketa, S., Mazón, E.R., Himmelbach, A., Oppermann, M., Weise, S., Knüpffer, H., Basterrechea, M., König, P., Schüler, D., Sharma, R., Pasam, R.K., Rutten, T., Guo, G., Xu, D., Zhang, J., Herren, G., Müller, T., Krattinger, S.G., Keller, B., Jiang, Y., González, M.Y., Zhao, Y., Habekuß, A., Färber, S., Ordon, F., Lange, M., Börner, A., Graner, A., Reif, J.C., Scholz, U., Mascher, M., Stein, N., 2019. Genebank genomics highlights the diversity of a global barley collection. *Nature Genetics* 51, 319-326.
- Monroe, J.G., Arciniegas, J.P., Moreno, J.L., Sánchez, F., Sierra, S., Valdes, S., Torkamaneh, D., Chavarriaga, P., 2020. The lowest hanging fruit: Beneficial gene knockouts in past, present, and future crop evolution. *Current Plant Biology* 24, 100185.
- Morris, C.A., Bisset, S.A., Vlassoff, A., Wheeler, M., West, C.J., Devantier, B.P., Mackay, A.D., 2010. Selecting for resilience in Romney sheep under nematode parasite challenge, New Zeal. J. Agric. Res., 53 pp. 245-261 doi:10.1080/00288233.2010.500714
- Munkholm, L.J. Sibbesen, E., 1997. Tab af fosfor fra landbrugsjord. *Miljøforskning* 30.
- Munkholm, L.J., Heckrath, G.J., 2020. In: *Vidensyntese om Conservation Agriculture*. DCA rapport, nr. 177, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Munkholm, L.J., Hansen, E.M., Melander, B., Kudsk, P., Jørgensen, L.N., Heckrath, G.J., Ravnskov, S., Axelsen, J.A., p. 85-96. <https://dcapub.au.dk/djfpublikation/index.asp?action=show&id=1455>
- Munkholm, L.J., Schjønning, P., Ruegg, K., 2005. Mitigation of subsoil recompaction by light traffic and on-land ploughing I. Soil response. *Soil & Tillage Research*, 80, 149-158.
- Nguyen, T.T.T., Bowman, P.J., Haile-Mariam, M., Pryce, J.E., Hayes, B.J., 2016. Genomic selection for tolerance to heat stress in Australian dairy cattle. *J Dairy Sci.* 99, 2849-2862. doi: 10.3168/jds.2015-9685.
- Obour, P.B., Jensen, J.L., Lamandé, M., Watts, C.W., Munkholm, L.J., 2018. Soil organic matter widens the range of water contents for tillage. *Soil and Tillage Research* 182, 57-65
- Obour, P.B., Keller, T., Jensen, J.L., Edwards, G., Lamandé, M., Watts, C.W., Munkholm, L.J., 2019. Soil water contents for tillage: A comparison of approaches and consequences for the number of workable days. *Soil and Tillage Research*, 195, [104384].
- Olesen, J.E., Grevsen, K., 1993. Simulated effects of climate change on summer cauli-flower production in Europe. *European Journal of Agronomy* 2, 313-323.
- Olesen, J.E., Munkholm, L.J., 2007. Subsoil loosening in a crop rotation for organic farming eliminated plough pan with mixed effects on crop yield. *Soil and Tillage Research*, 94, 376-385.
- Olesen, J.E., Børgesen, C.D., Elsgaard, L., Palosuo, T., Rötter, R., Skjelvåg, A.O., Peltonen-Sainio, P., Börjeson, T., Trnka, M., Ewert, F., Siebert, S., Brisson, N., Eitzinger, J., van der Fels-Klerx, H.J., van Asselt, E., 2012. Changes in flowering and maturity time of cereals in Northern Europe under climate change. *Food Additives and Contaminants* 29, 1527-1542.
- Oliveira, C.C.D., Almeida, R.G.D., Karvattu Junior, N., Villela, S.D.J., Bungenstab, D.J., Alves, F.V., 2021. Daytime ingestive behaviour of grazing heifers under tropical silvopastoral systems: Responses to shade and grazing management. *Applied Animal Behaviour Science*, 240.
- Orellana-Torrejon, C., Vidal, T., Boixel, A.-L., Gélisse, S., Saint-Jean, S., Suffert, F., 2022. Annual dynamics of *Zymoseptoria tritici* populations in wheat cultivar mixtures: A compromise between the efficacy and durability of a recently broken-down resistance gene? *Plant Pathology*, 71, 289– 303. <https://doi.org/10.1111/ppa.13458>

- Pietrosemoli, S., Tang, C., 2020. Animal Welfare and Production Challenges Associated with Pasture Pig Systems: A Review. *Agriculture-Basel* 10.
- Pinto, S., Hoffmann, G., Ammon, C., Heuwieser, W., Levit, H., Halachmi, I., Amon, T., 2019. Effect of two cooling frequencies on respiration rate in lactating dairy cows under hot and humid climate conditions, *Ann. Anim. Sci.*, 19, 821–834, <https://doi.org/10.2478/aoas-2019-0026>, 2019.
- Pullens, J.W.M., Sørensen, C.G., Olesen, J.E., 2021. Temperature-based prediction of harvest date in winter and spring cereals as a basis for assessing viability for growing cover crops. *Field Crops Research* 264, 108085.
- Pulido-Moncada, M., Katuwal, S., Kristensen, J.B., Munkholm, L.J., 2021. Effects of bio-subsoilers on subsoil pore-system functionality: Case study with intact soil columns. *Geoderma*, 385, Article 114897. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114897>
- Pulido-Moncada, M., Katuwal, S., Munkholm, L.J., 2022. Characterisation of soil pore structure anisotropy caused by the growth of bio-subsoilers. *Geoderma*, 409, 115571. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115571>
- Qi, J., Jensen, J.L., Christensen, B.T., Munkholm, L.J., 2022. Soil structural stability following decades of straw incorporation and use of ryegrass cover crops. *Geoderma*, 406, 115463. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115463>
- Rimbaud, L., Fabre, F., Papaix, J., Moury, B., Lannou, C., Barrett, L.G., Thrall, P.H., 2021. Models of Plant Resistance Deployment. *Annual Review of Phytopathology* 59, 125-152.
- Rodrigues, L., Hardy, B., Huyghebeart, B., Fohrafellner, J., Fornara, D., Barančíková, G., Bárcena, T. G., De Boever, M., Di Bene, C., Feizienė, D., Kätterer, T., Laszlo, P., O'Sullivan, L., Seitz, D., Leifeld, J., 2021. Achievable agricultural soil carbon sequestration across Europe from country-specific estimates. *Global Change Biology*, 27(24), 6363-6380. <https://doi.org/10.1111/gcb.15897>
- Roepstorff, A., Monrad, J., Sehested, J., Nansen, P., 2000. Mixed grazing with sows and heifers-parasitological aspects. *Proceedings from NJF-Seminar* 303, 41-44.
- Rommens, C.M., Haring, M.A., Swords, K., Davies, H.V., Belknap, W.R., 2007. The intragenic approach as a new extension to traditional plant breeding. *Trends in Plant Science* 12, 397-403.
- Rosa, C., Kuo, Y.-W., Wuriyangan, H., Falk, B.W., 2018. RNA Interference Mechanisms and Applications in Plant Pathology. *Annual Review of Phytopathology* 56, 581-610.
- Rämert, B & Lennartsson, M. (2002) The use of mixed species cropping to manage pests and diseases – theory and practice. In: Powell, Jane and et al. (Eds.) *Proceedings of the UK Organic Research 2002 Conference*, Organic Centre Wales, Institute of Rural Studies, University of Wales Aberystwyth, pp. 207-210.
- Saeed, M., Abbas, G., Alagawany, M., Kamboh, A.A., Abd El-Hack, M.E., Khafaga, A.F., Chao, S., 2019. Heat stress management in poultry farms: A comprehensive overview. *Journal of Thermal Biology* 84, 414-425.
- Sánchez-León, S., Gil-Humanes, J., Ozuna, C.V., Giménez, M.J., Sousa, C., Voytas, D.F., Barro, F., 2018. Low-gluten, nontransgenic wheat engineered with CRISPR/Cas9. *Plant Biotechnology Journal* 16, 902-910.
- Schild, S.-L.A., Rangstrup-Christensen, L., Bonde, M., Pedersen, L.J., 2018. The use of a shaded area during farrowing and lactation in sows kept outdoors. *Applied Animal Behaviour Science* 209:22-29.

- Schjønning, P., 1985. Soil pore characteristics. II. Effect of incorporation of straw and soil tillage. *Tidsskrift for Planteavl*, 89, 425-433.
- Schjønning, P., Lamandé, M., Thorsøe, M.H., 2019. Soil compaction (DCA Report No. 155), Aarhus University.
- Schjønning, P., Munkholm, L.J., Elmholt, S., Olesen, J.E., 2007. Organic matter and soil tilth in arable farming: Management makes a difference within 5-6 years. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 122(2), 157-172.
- Schjønning, P., van den Akker, J.J.H., Keller, T., Greve, M.H., Lamandé, M., Simojoki, A., Stettler, M., Arvidsson, J., Breuning-Madsen, H., 2015. Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) analysis and risk assessment for soil compaction-A European perspective. *Advances in Agronomy*, 133, 183-237.
- Schou, J.S. (red.), 2019. Landbrugets Økonomi 2018. Institut for Fødevare- og Ressourceøkonomi, Københavns Universitet. Landbrugets Økonomi Bind 2018
- Schutz, K.E., Rogers, A.R., Cox, N.R., Webster, J.R., Tucker, C.B., 2011. Dairy cattle prefer shade over sprinklers: Effects on behavior and physiology. *Journal of Dairy Science* 94, 273-283.
- Schutz, K.E., Cox, N.R., Tucker, C.B., 2014. A field study of the behavioral and physiological effects of varying amounts of shade for lactating cows at pasture. *J Dairy Sci*, 97, 3599-605.
- Schweitzer, H., Aalto, N.J., Busch, W., Chat Chan, D.T., Chiesa, M., Elvevoll, E.O., Gerlach, R., Krause, K., Mocaer, K., Moran, J.J., Noel, J.P., Patil, S.K., Schwab, Y., Wijffels, R.H., Wulff, A., Øvreås, L., Bernstein, H.C., 2021. Innovating carbon-capture biotechnologies through ecosystem-inspired solutions. *One Earth* 4, 49-59.
- Sehested, J., Søgaard, K., Danielsen, V., Kristensen, V.F., 2000. Mixed grazing with sows and heifers: effects on animal performance and pasture, *Ecological Animal Husbandry in the Nordic Countries*, pp. 35-40.
- Seibert, J.T., Graves, K.L., Hale, B.J., Keating, A.F., Baumgard, L.H., Ross, J.W., 2018. Characterizing the acute heat stress response in gilts: I. Thermoregulatory and production variables. *J Anim Sci*. 2018, 96, 941-949. doi: 10.1093/jas/skx036
- Skendžić, S., Zovko, M., Živković, I.P., Lešić, V., Lemić, D., 2021. The Impact of Climate Change on Agricultural Insect Pests. *Insects* 12, 440.
- Smith, J., Pearce, B.D., Wolfe, M.S., 2012. Reconciling productivity with protection of the environment: Is temperate agroforestry the answer? *Renewable Agriculture and Food Systems*, 28, 80-92.
- Sun, K., Wolters, A.-M.A., Vossen, J.H., Rouwet, M.E., Loonen, A.E.H.M., Jacobsen, E., Visser, R.G.F., Bai, Y., 2016. Silencing of six susceptibility genes results in potato late blight resistance. *Transgenic Research* 25, 731-742.
- Swinnen, G., Goossens, A., Pauwels, L., 2016. Lessons from Domestication: Targeting Cis-Regulatory Elements for Crop Improvement. *Trends in Plant Science* 21, 506-515.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.03.004>
- 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 between 1986 and 2009. *European Journal of Soil Science*, 65(5), 730-740.

- ten Damme, L, Jing, S, Montcalm, AM, Jepson, M, Andersen, MN, Hansen, EM 2022, Proper management of irrigation and nitrogen-application increases crop N-uptake efficiency and reduces nitrate leaching, *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, bind 72, nr. 1, s. 913-922. <https://doi.org/10.1080/09064710.2022.2122864>
- Thamsborg, S.M., Roepstorff, A., Larsen, M., 1999. Integrated and biological control of parasites in organic and conventional production systems. *Veterinary Parasitology* 84, 169-186.
- Thudi, M., Palakurthi, R., Schnable, J.C., Chitikineni, A., Dreisigacker, S., Mace, E., Srivastava, R.K., Satyavathi, C.T., Odeny, D., Tiwari, V.K., Lam, H.-M., Hong, Y.B., Singh, V.K., Li, G., Xu, Y., Chen, X., Kaila, S., Nguyen, H., Sivasankar, S., Jackson, S.A., Close, T.J., Shubo, W., Varshney, R.K., 2021. Genomic resources in plant breeding for sustainable agriculture. *Journal of Plant Physiology* 257, 153351.
- Tiezzi, F., Brito, L.F., Howard, J., Huang, Y.J., Gray, K., Schwab, C., Fix, J., Maltecca, C., 2020, Genomics of Heat Tolerance in Reproductive Performance Investigated in Four Independent Maternal Lines of Pigs, *Frontiers in Genetics*, 11, 629, doi:10.3389/fgene.2020.00629
- Timilsina, A., Zhang, C., Pandey, B., Bizimana, F., Dong, W., Hu, C., 2020. Potential Pathway of Nitrous Oxide Formation in Plants. *Frontiers in Plant Science* 11.
- Tucker, C.B., Rogers, A.R., Schütz, K.E., 2008. Effect of solar radiation on dairycattle behaviour, use of shade and body temperature in a pasture-based system. *Applied Animal Behaviour Science* 109(2-4):141-154.
- Uauy, C., Distelfeld, A., Fahima, T., Blechl, A., Dubcovsky, J., 2006. A NAC gene regulating senescence improves grain protein, zinc, and iron content in wheat. *Science* 314, 1298-1301.
- Ulen, B., Etana, A., 2014. Phosphorus leaching from clay soils can be counteracted by structure liming. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 64(5), 425-433. <https://doi.org/10.1080/09064710.2014.920043>
- Usala, M., Macciotta, N.P.P., Bergamaschi, M., Maltecca, C., Fix, J., Schwab, C., Shull, C., Tiezzi, F., 2021. Genetic Parameters for Tolerance to Heat Stress in Crossbred Swine Carcass Traits, *Frontiers in Genetics*, 11, 1821, doi: 10.3389/fgene.2020.612815
- Villa-Henriksen, A., Skou-Nielsen, N., Munkholm, L.J., Sørensen, C.A.G., Green, O., Edwards, G.T.C., 2020. In-field optimized route planning in harvesting operations for risk of soil compaction reduction. *Soil use and Management*. <https://doi.org/10.1111/sum.12654>
- Vandermeulen, S., Ramírez-Restrepo, C.A., Beckers, Y., Classens, H., Bindelle, J., 2018a. Agroforestry for ruminants: a review of trees and shrubs as fodder in silvopastoral temperate and tropical production systems. *Animal Production Science*, 58.
- Vandermeulen, S., Ramírez-Restrepo, C.A., Marche, C., Decruyenaere, V., Beckers, Y., Bindelle J., 2018b. Behaviour and browse species selectivity of heifers grazing in a temperate silvopastoral system. *Agroforest. Syst.* 92: 705-716
- Van laer, E., Moons, C.P.H., Sonck, B., Tuytens, F.A.M., 2014. Importance of outdoor shelter for cattle in temperate climates. *Livestock Science* 159, 87-101.
- Veissier, I., Van laer, E., Palme, R., Moons, C.P.H., Ampe, B., Sonck, B., Andanson, S., Tuytens, F.A.M., 2018. Heat stress in cows at pasture and benefit of shade in a temperate climate region. *International Journal of Biometeorology* 62, 585-595.

- Waller, P.J., Bernes, G., Thamsborg, S.M., Sukura, A., Richter, S.H., Ingebrigtsen, K., Höglund, J., 2001. Plants as de-worming agents of livestock in the nordic countries: Historical perspectives, popular beliefs and prospects for the future. *Acta vet. Scand.* 42: 31-44
- Wang, X., Gao, H., Gebremedhin, K.G., Bjerg, B.S., Van Os, J., Tucker, C.B., Zhang, G., 2018. A predictive model of equivalent temperature index for dairy cattle (ETIC), *J. Therm. Biol.*, 76, 165–170, <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2018.07.013>, 2018.
- Watson, A., Ghosh, S., Williams, M.J., Cuddy, W.S., Simmonds, J., Rey, M.-D., Asyraf Md Hatta, M., Hinchliffe, A., Steed, A., Reynolds, D., Adamski, N.M., Breakspear, A., Korolev, A., Rayner, T., Dixon, L.E., Riaz, A., Martin, W., Ryan, M., Edwards, D., Batley, J., Raman, H., Carter, J., Rogers, C., Domoney, C., Moore, G., Harwood, W., Nicholson, P., Dieters, M.J., DeLacy, I.H., Zhou, J., Uauy, C., Boden, S.A., Park, R.F., Wulff, B.B.H., Hickey, L.T., 2018. Speed breeding is a powerful tool to accelerate crop research and breeding. *Nature Plants* 4, 23-29.
- Wei, F., Hu, X., Xu, X., 2016. Dispersal of *Bacillus subtilis* and its effect on strawberry phyllosphere microbiota under open field and protection conditions. *Sci. Rep.* 6, 22611. <https://doi.org/10.1038/srep22611>
- Wolc, A., Arango, J., Settari, P., Fulton, J.E., O'Sullivan, N.P., Dekkers, J.C.M., 2019. Genome wide association study for heat stress induced mortality in a white egg layer line. *Poultry Science*, 98, 92-96, doi: 10.3382/ps/pey403
- Yan, S., Ren, B., Zeng, B., Shen, J., 2020. Improving RNAi efficiency for pest control in crop species. *BioTechniques* 68, 283-290.
- Zakhrabekova, S., Gough, S.P., Braumann, I., Müller, A.H., Lundqvist, J., Ahmann, K., Dockter, C., Matyszczyk, I., Kurowska, M., Druka, A., Waugh, R., Graner, A., Stein, N., Steuernagel, B., Lundqvist, U., Hansson, M., 2012. Induced mutations in circadian clock regulator *Mat-a* facilitated short-season adaptation and range extension in cultivated barley. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, 4326-4331.
- Zhang, H., Zhu, J., Gong, Z., Zhu, J.-K., 2021. Abiotic stress responses in plants. *Nature Reviews Genetics*.
- Zhao, J., Bindi, M., Eitzinger, J., Ferrise, R., Gaile, Z., Gobin, A., Holzkämper, A., Kersebaum, K.C., Kozyra, J., Kriaučiūnienė, Z., Loit, E., Nejedlik, P., Nendel, C., Niinemets, Ü., Palosuo, T., Peltonen-Sainio, P., Po-topová, V., Ruiz-Ramos, M., Reidsma, P., Rijk, B., Trnka, M., van Ittersum, M.K., Olesen, J.E., 2022, 'Priority for climate adaptation measures in European crop production systems', *European Journal of Agro-nomy*, bind 138, 126516. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126516>

5 Tilpasning i en europæisk og global kontekst. Hvordan omstiller dansk landbrug sig i forhold til andre lande?

Forfattere: Mathias N. Andersen, Jørgen E. Olesen

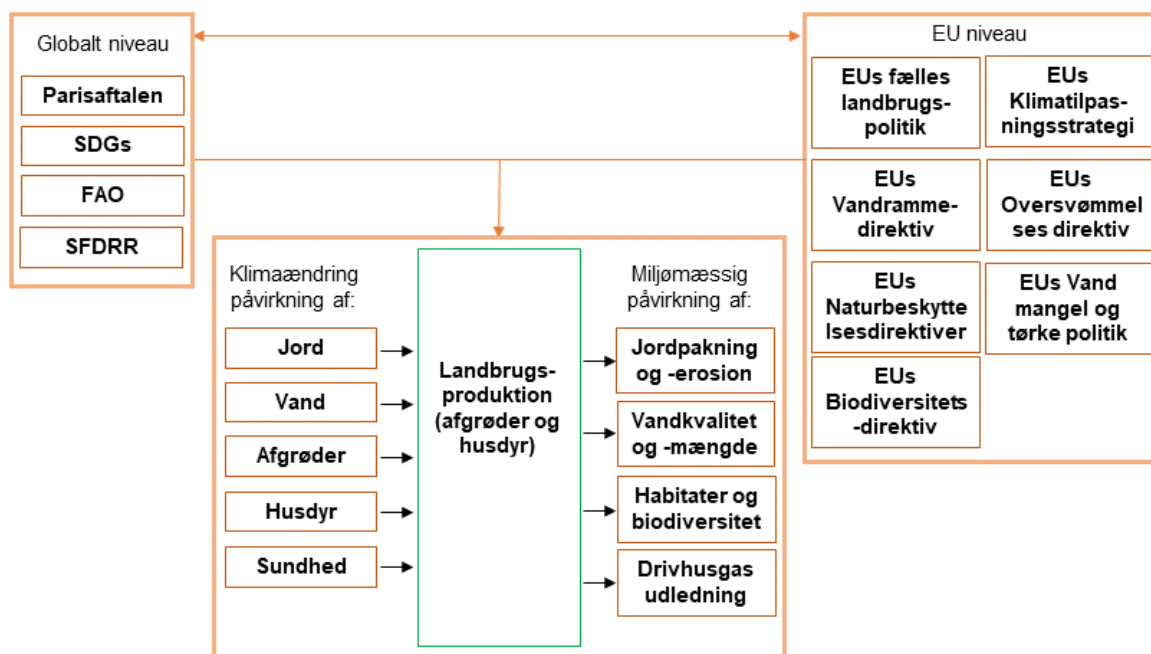
Fagfællebedømmer: Johannes W.M. Pullens

Klimacændringer vil påvirke det globale fødevareproduktion og stigende temperaturer vil reducere udbytter af de fleste kornarter på verdensplan (Makowski et al., 2015). Dette skyldes at stigende temperaturer reducerer afgrødernes vækstperioder og at stigende temperatur også reducerer afgrødernes vandudnyttelse, især i tørre og varme områder af verden. Samtidig forventes omfanget af tørke at stige voldsomt med de stigende temperaturer, og dette vil især påvirke verdens kornproduktion negativt (Trnka et al., 2019). Der ses allerede stigende forekomst af tørke i de tørre egne af verden, og dette har ført til betydelig fokus på mulighederne for tilpasning i disse områder, især gennem forbedringer af vandhusholdning og vandforsyning til afgrøderne (Zhao et al., 2022). Dette er dog udfordret af at brugen af ferskvand mange steder i verden i forvejen overstiger det bæredygtige niveau og at den samlede ressource er aftagende især i områder med middelhavsklima på grund af klimacændringer. Dette taler for, at der for at opretholde en samlet fødevareforsyning ville skulle en større fokus på en bæredygtig fødevareproduktion i de egne af verden, der som i Nordeuropa er mindre truet af klimaforandringer.

På internationalt plan er der en række overordnede politikker og politikskabende organisationer, der adresserer påvirkningerne fra klimacændringerne på landbruget og understøtter sektorens behov for klimatilpasning (Fig. 5.1). Disse samler og analyserer den internationale viden om påvirkningerne og hvordan tilpasning til disse kan ske herunder ikke mindst prognoser for påvirkningerne på kort og langt sigt. Paris-aftalen (UNFCCC, 2015) er den første bindende internationale aftale om at bekæmpe klimacændringerne og klimatilpasning. Aftalen har som mål at fremme sidstnævnte ved samarbejde om teknologier, kapacitetsopbygning og overførsel af midler til udviklingslande. I udviklingslandene er der et stort fokus på landbrugssektoren, der ofte er central i deres økonomier og dermed spiller en afgørende rolle for at nå bæredygtighedsmålsætningerne, men også gør dem specielt sårbare overfor klimacændringerne. Effektiv klimatilpasning i landbruget forudsætter både etablering af understøttende institutioner på det organisatoriske niveau, forskning og udvikling af teknologier til klimatilpasning (klimasmarte løsninger) samt vidensdeling og udbredelse af sådanne teknologier. Både i regi af FAO og EU er der etableret forskningsprogrammer og videnscentre, der opsamler, systematiserer og spreder viden om konkrete teknologier og hvordan disse kan indpasses i en lokal landbrugs kontekst. Et eksempel på dette er den FAO-workshop, der blev afholdt i Koronivia i Polen i 2017 med input fra en lang række FN-medlemsstater (FAO, 2018). Konferencen adresserede og systematiserede eksemplerne på klimatilpasningstiltag i de forskellige lande indenfor de klimatilpasningsområder, der er vist skematisk i figur 2.1. Der er et stort behov for samordning og koordinering på

klimatilpasningsområdet, med henblik på at uddrage generelle principper og evaluere effektiviteten af forskellige lokale løsninger.

Figur 5.1: Oversigt over det internationale samarbejde og politikker omkring klimatilpasning i landbrugssektoren (mod. fra EEA, 2019). SDGs: FN's bæredygtighedsmålsætninger, FAO: FN's landbrugs- og fødevarer



reorganisation, SFDRR: FN's organisation for katastrofeforebyggelse.

5.1 Klimatilpasning i relation til EU's politikker og tiltag

Selv inden for et geografisk velafgrænset område, som det der udgøres af EU, er der store regionale forskelle i klima, påvirkningerne fra klimaændringerne og landbrugen socioøkonomiske stadi, størrelse, produktionstyper og dyrkningspraksis (EEA, 2019). Dette gør det vanskeligt at lave generelle politikker og tiltag. EU's strategi for klimatilpasning på landbrugsområdet (EC, 2013; EC, 2021) har som formål at øge resiliensen overfor klimaændringer og gøre EU-landene bedre forberedt. Medlemsstaterne er forpligtet til at rapportere fremskridt på klimatilpasningsområdet som en del af indrapporteringen omkring drivhusgasudledninger i henhold til EU overvågningsmekanisme (MMR) som senest er specificeret i et regulativ fra 2020 (EC, 2020a). Medlemsstaternes indrapportering omkring klimatilpasning offentliggøres på Climate-ADAPT hjemmesiden, som er EU's hub for deling af viden om klimatilpasning: <https://climate-adapt.eea.europa.eu/>.

EU's fælles landbrugspolitik (CAP) giver mulighed for at understøtte klimatilpasning gennem de forskellige instrumenter i CAP. Specifikt har midler fra fonden til Udvikling af landdistrikterne finansieret en lang række lokale klimatilpasningstiltag omfattende bl.a. genskabelse af våd- og tørveområder, udarbejdelse af planer mod oversvømmelse og øget kulstofbinding i udpinte jorde (EEA, 2019). Selvom klimatilpasning er blevet

indarbejdet som et vigtigt mål i den fælles landbrugspolitik, indeholder den fortsat ordninger, der modarbejder tilpasning, f.eks. tilskud til traditionelle men særligt vandforbrugende afgrøder mm. (EEA, 2019). De sydøsteuropæiske lande står på mange områder inden for landbruget med langt større udfordringer pga. klimacændringerne end de nordvesteuropæiske. Dette gælder især aftagende nedbør og dermed endnu mere udbredt vandmangel og tørke end tidligere. Hertil kommer temperaturstigningen med øget frekvens af ekstremt høje temperaturer som påvirker både afgrøder og husdyr negativt. Der forventes således udbyttenedgange på 10-50% i mange af hovedafgrøderne i Sydeuropa specielt under uvandede forhold, medens der modsat forventes status quo eller endog stigninger i udbytte i Nordvesteuropa (EEA, 2019, Olesen, 2016). Klimatilpasningsudfordringerne er således massive i Sydeuropa og synes til dels uløselige, da yderligere træk på vandressourcer til vanding de fleste steder ikke er en mulighed. Der er dog stadigvæk mulighed for f.eks. at benytte vandingsteknologier, som er mere effektive. Samlet set vurderer EEA (2019), at påvirkningerne af landbrugssektoren i EU selv med klimatilpasning vil kunne give et tab på ca. 1% af EU's BNP men at det pga. den relativt høje købekraft i EU-landene ikke burde kunne lede til fødevaremangel.

EU fremmer endvidere klimatilpasning gennem fælles forskningsprogrammer. Et af de mest omtalte programmer inden for dette er det såkaldte "Green Deal" program, der har som målsætning at øge fødevaresikkerheden gennem brugen af bæredygtige teknologier og driftsformer såsom præcisions-landbrug, økologisk landbrug, agroøkologi, skovlandbrug, såkaldte biosolutions omfattende biologiske alternativer til plantebeskyttelse og gødning samt strengere regler på husdyrvelfærds-området (EC, 2020b). Udover projekterne under "Green Deal" er der igangsat en lang række forskningsprojekter omkring klimatilpasning i underprogrammerne under Horizon-Europe. Andre programmer med projekter der adresserer klimatilpasning, er forskellige ERA-NET, Joint Programming Initiatives, Climate-KIC programmet, EIP Water såvel som Copernicus-programmet, der udforsker mulighederne i at udnytte satellit-data til både forudsigelse af påvirkninger fra vejrdata og analyse og videregivelse af data, der er relevante i klimatilpasningssammenhæng. Ikke desto mindre lister EU nye klimatilpasningsstrategi (EC, 2021) en længere række af problemer i EU i forhold til opnåelse af en sammenhængende og effektiv klimatilpasning. Den konkluderer at EU stadig ikke er tilstrækkeligt forberedt på de eksisterende og kommende påvirkninger fra klimacændringerne.

5.2 Klimatilpasning på globalt plan

I udviklingslandene synes udfordringerne i forbindelse med klimatilpasning næsten uoverstigelige. Dels er der et stigende behov for fødevarer til en stigende befolkning, dels er mange af landene beliggende i tropiske og subtropiske områder, hvor klimacændringerne forudses at blive store både med hensyn til temperaturstigning og ændringer i nedbør og hyppigere forekomst af ekstremhændelser. Endvidere spiller landbrug en stor rolle i mange af landenes økonomi og BNP og landbruget anses som en af de mest sårbare sektorer overfor klimacændringerne. Mange af landbrugene er små og har ikke de nødvendige ressourcer til at tilpasse dyrkningen fx ved brug af vanding, selvom der måtte være god økonomi i tiltaget (Danso et al., 2018). Efter en periode med aftagende mangel på fødevarer, er antallet af mennesker der rammes af

sult igen stigende og estimeres at omfatte 700-800 millioner for nuværende (FAO et al., 2021), hvilket står i voldsom kontrast til FNs bæredygtighedsmålsætninger (se kapitel 6). De industrialiserede lande afgav ved COP15 i København i 2009 og igen i Paris-aftalen (UNFCCC, 2015,) løfte om såkaldt klimafinansiering til udviklingslandene på 100 milliarder dollars årligt fra 2020 udover den eksisterende bistand, men dette mål er ikke blevet opfyldt (OECD, 2019; Timperly, 2021). Dette har bl.a derfor igen været et stort diskussionsemne under dens eneste COP27 i Egypten i november 2022. Udover manglen på finansiering til infrastruktur mv, gør også manglen på forskning, data og fungerende rådgivningssystemer, tilpasning vanskelig i udviklingslandene. FAO er formentlig det vigtigste knudepunkt for indsamling og formidling af viden om klimatilpasningsstrategier i udviklingslandene. FAOs tilgang til klimatilpasning er baseret på helhedsbetragtning af "Agrifood" systemet inklusive værdikæder og miljøpåvirkninger og fokuseret på at indfri SDG1 og SDG2 ved en systemorienteret tilgang til Landbruget (FAO, 2022). Danmark giver klimafinansiering til både bilaterale og multilaterale projekter og organisationer (<https://kefm.dk/klima-og-vejr/klimafinansiering>). Endvidere er en del af den ordinære udviklingsbistand rettet mod klimatilpasning eller at klimasikre andre typer af projekter. En lille del af udviklingsbistanden bruges på kapacitetsopbygning på universiteter i Danmarks samarbejdslande og denne del har i længere tid fokuseret på forskning i klimatilpasning og resiliens herunder også i landbruget.

5.3 Referencer

- Danso, EO, Atta-Darkwa, T, Plauborg, F, Sabi, EB, Kugblenu-Darrah, Y, Abenney-Mickson, S, Andersen, MN 2018, Development of a Low-Cost Solar-Powered Water Supply System for Small-Scale Drip Irrigation Farms in Sub-Saharan Africa: Dosing Tank and Bell Siphon Perspective, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, bind 144, nr. 7. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001315](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001315)
- EC, 2013. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions — An EU Strategy on adaptation to climate change (COM(2013) 216 final, Brussels, 16.04.2013).
- EC, 2020a. COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION (EU) 2020/1208 of 7 August 2020 on structure, format, submission processes and review of information reported by Member States pursuant to Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Implementing Regulation (EU) No 749/2014
- EC, 2020b. COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT. Analysis of links between CAP Reform and Green Deal. SWD(2020) 93 final. https://agriculture.ec.europa.eu/system/files/2020-05/analysis-of-links-between-cap-and-green-deal_en_0.pdf
- EC, 2021. Forging a climate-resilient Europe - the new EU Strategy on Adaptation to Climate Change. COM(2021) 82 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2021:82:FIN>
- EEA, 2019. Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe. EEA Report No 04/2019. 112 pp.
- FAO, 2018. Koronivia Joint Work on Agriculture: Analysis of Submissions. Environment and Natural Resources Management Series, Working Paper 71, Rome. 52 pages. <https://www.fao.org/3/ca2586en/CA2586EN.pdf>.

- FAO, International Fund for Agricultural Development, United Nations Children's Fund, World Food Programme and World Health Organization. 2021. The State of Food Security and Nutrition in the World 2021: Transforming Food Systems for Food Security, Improved Nutrition and Affordable Healthy Diets for All. Rome, FAO. <http://www.fao.org/3/cb4474en/cb4474en.pdf>
- FAO, 2022. FAO Strategy on Climate Change 2022-2031. CL 170/4. <https://www.fao.org/3/ni706en/ni706en.pdf>
- Makowski, D., Asseng, S., Ewert, F., Bassu, S., Durand, J.L., Li, T., Martre, P., Adam, M., Aggarwal, P.K., Angulo, C., Baron, C., Basso, B., Bertuzzi, P., Biernath, C., Boogaard, H., Boote, K.J., Bouman, B., Bregaglio, S., Brisson, N. Buis, S., Cammarano, D., Challinor, A.J., Confalonieri, R., Conijn, J.G., Corbeels, M., Deryng, D., De Sanctis, G., Doltra, J., Fumoto, T., Gaydon, D., Gayler, S., Goldberg, R., Grant, R., Grassini P., Hatfield, J.L., Hasegawa, T., L. Heng, L., Hoek, S., Hooker, J., Hunt, L.A., Ingwersen, J., Izaurralde, R.C., Jongschaap, R.E.E., Jones, J.W., Kemanian, R.A., Kersebaum, K.C., Kim, S.-H., Lizaso, J., Marcaida III, M., Müller, C., Nakagawa, H., Naresh Kumar, S., Nendel, C., O'Leary, G.J., Olesen, J.E., Oriol, P., Os-borne, T.M., Palosuo, T., Pravia, M.V., Priesack, E., Ripoche, D., Rosenzweig, C., Ruane, A.C., F. Ruget, F., Sau, F., Semenov, M.A., Shcherbak I., Singh, B., Singh, U., Soo, H.K., Steduto, P., Stöckle, C., Stra-tonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tang, L., Tao, F., Teixeira, E.I., Thorburn, P., Timlin, D., Travasso, M., Rötter, R.P., Waha, K., Wallach, D., White, J.W., Wilkens P., Williams, J.R., Wolf, J., Yin, X., Yoshida, H., Zhang, Z., Zhu, Y., 2015. A statistical analysis of three ensembles of crop model responses to temperature and CO₂ concentration. *Agricultural and Forest Meteorology* 214-215, 483-493.
- Olesen, J.E., 2016, 'Socio-economic impacts — Agricultural systems', in: *North Sea region climate change assessment. Regional Climate Studies*, Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-39745-0_13
- Timperley, J., 2021. The broken \$100-billion promise of climate finance — and how to fix it. *Nature* 598, 400-402. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-02846-3>
- Trnka, M., Feng, S., Semenov, M.A., Olesen, J.E., Kersebaum, K.C., Rötter, R.P., Semerádová, D., Klem, K., Huang, W., Ruiz-Ramos, M., Hlavinka, P., Meitner, J., Balek, J., Havlik, P., Büntgen, U., 2019. Mitigation efforts will not fully alleviate the increase in water scarcity occurrence probability in wheat-producing areas. *Science Advances* 5, eaau2406.
- UNFCCC, 2015, Adoption of the Paris Agreement, United Nations Framework Convention on Climate Change, Bonn, Germany (<https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/I09r01.pdf>).
- Zhao, J, Bindi, M, Eitzinger, J, Ferrise, R, Gaile, Z, Gobin, A, Holzkämper, A, Kersebaum, KC, Kozyra, J, Kriaučiūnienė, Z, Loit, E, Nejedlik, P, Nendel, C, Niinemets, Ü, Palosuo, T, Peltonen-Sainio, P, Po-topová, V, Ruiz-Ramos, M, Reidsma, P, Rijk, B, Trnka, M, van Ittersum, MK & Olesen, JE 2022, 'Priority for climate adaptation measures in European crop production systems', *European Journal of Agro-nomy*, bind 138, 126516. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126516>

6 Klimaændringernes effekter på bæredygtigheds målsætninger

Forfatter: Jørgen E. Olesen

Fagfællebedømmer: Johannes W.M. Pullens

Landbruget og fødevarereproduktionen står over for en lang række meget omfattende udfordringer omkring bæredygtighed, som hver især er massive, men som tilsammen kan synes næsten uoverstigelige. Dette omfatter:

- Verdens behov for fødevarer forventes at stige med omkring 45% over perioden fra 2010 til 2050 (Xu et al., 2021).
- Verdens behov for bioenergi vil skulle firedobles frem mod 2050 for at imødekomme krav til udfasning af fossil energi (Bauer et al., 2020).
- Landbrug og fødevarereproduktion står globalt for 34% af drivhusgasemissioner (Crippa et al., 2021) og for Danmark er det 35 % (Olesen et al., 2021). Der er politiske målsætninger om at nå klimaneutralitet i 2050.
- Landbruget bidrager til hovedparten af udnyttelsen af verdens landareal, nedgangen i biodiversitet, forurening med næringsstoffer og overforbrug af ferskvand (Campbell et al., 2017). I en dansk sammenhæng er der særligt fokus på at beskytte grundvand og vandmiljø. Dette handler i forhold til Vandrammedirektivet især om at reducere næringsstofbelastningen af vandmiljøet (Dalgaard et al., 2014) og en substantiel reduktion af pesticidforbruget (Möhring et al., 2020). Der er desuden planer for at øge naturarealet og styrke biodiversiteten (Maes et al., 2013).

Grundlæggende kræver en bæredygtig udvikling, at landbrug og skovbrug fylder mindre på verdens landareal og at disse produktionssystemer forurener langt mindre end for nuværende. Samtidig skal de selvfølgelig kunne levere nok fødevarer, bioenergi og biomaterialer til at opfylde de menneskelige behov. Dette kræver nye produktionssystemer med øget produktivitet og lavere input, hvor al for form for spild reduceres, samtidig med at det menneskelige forbrug, især af areal, nedsættes.

En bæredygtig udvikling kræver indsatser på mange områder, og i Danmark udarbejdede danske forskere ved universiteter og videninstitutioner en roadmap for hvordan forskning og innovation kan sikre en dansk udvikling, der kan opfylde målene (Olesen et al., 2021). Dette omfatter indsatser inden for arealanvendelse, husdyrbrug, plantebaserede fødevarer og nye bioteknologiske muligheder til fødevarereproduktion. Planerne for udvikling og implementering af bæredygtige løsninger kan dog i flere tilfælde blive udfordret af de ændrede vilkår, som klimaændringer giver, og dette er i mange tilfælde ikke inkluderet i planerne for

den grønne omstilling. I denne sammenhæng fokuseres på de problemstillinger, der er mest direkte knyttet til landbrugsproduktionen: næringsstofudledninger, klimagasser og pesticider.

6.1 Næringsstofudledninger

De klimatiske forhold påvirker udledning af kvælstof og fosfor fra landbrugsarealet til vandmiljøet med konsekvenser for eutrofiering af vandløb, søer, fjorde og havmiljø (Jeppesen et al., 2009, 2011). Udledningerne kan opgøres som produktet af den gennemsnitlige næringsstofkoncentration og mængden af afstrømmende vand. Begge dele påvirkes af klimaet og dermed af klimacændringer.

Den stigende afstrømning med øget nedbør vil øge fosforudledningerne fra dyrket landbrugsjord, og denne effekt kan under de forventede klimacændringer i indeværende århundrede øge fosforudledningen med op til 10% (Jeppesen et al., 2009). Den forventede stigning i nedbørintensitet vil fremme dette, da det vil mobilisere kolloid bundet fosfor på jordoverfladen samt øge jorderosion, der også fremmer transport af fosfor til vandmiljøet. Dette øger behovet for tiltag til at beskytte landbrugsjord mod vanderosion samt at beskytte mod fosforudledning fra særligt sårbare områder.

Resultater fra både modelbaserede analyser (Doltra et al., 2014) og analyse af langvarige forsøg med kvælstofudvaskning (Jabloun et al., 2015) viser øget kvælstofudvaskning under de forventede klimacændringer. En del af dette skyldes, at øget temperatur i efterårs- og vinterperioden øger omsætning og nedbrydning af organisk stof i jorden. Dermed bliver mere kvælstof mineraliseret og tilgængelig for udvaskning. Dette modvirkes gennem dyrkning af afgrøder og efterafgrøder i efterårs- og vinterperioden. Der bliver derfor med klimacændringer behov for stigende fokus på sammensætning af sædskiftet med henblik på at minimere næringsstoffab. En anden årsag til øget kvælstofudvaskning er stigende nedbør, som øger afstrømningen og dermed udvaskningen.

Flere typer klimaekstremer (f.eks. tørke og ekstrem nedbør) vil gennem påvirkning på afgrøders vækst og virkemidlers effektivitet kunne øge kvælstofudvaskningen. Kvælstofoptaget bliver især negativt påvirket gennem tørke, og dette kan øge nitratudvaskningen i den følgende vinter. De igangværende klimacændringer må således forventes at føre til øget kvælstofudvaskning, både gennem direkte effekter på kvælstofudvaskningen fra landbrugsafgrøder og gennem indirekte effekter af klimaekstremer på afgrøders vækst og effekt af virkemidler. Der er dog knyttet betydelige usikkerheder til disse effekter, og disse må forventes også at variere mellem dyrkningssystemer, afhængig af afgrøder og virkemidler til reduktion af udvaskningen. Mange forskellige studier med scenarier for ændringer i klima og dyrkningssystemer viser øget nitratudvaskning under klimacændringer (Doltra et al., 2014; Bartosova et al., 2020; Olesen et al., 2019). Öztürk et al. (2018) benyttede tre forskellige afgrødemodeller til at fremskrive udviklingen i nitratudvaskning under klimacændringer under kontinueret dyrkning af vinterhvede og fandt at betydelig variation i stignin-

gen i udvaskningen frem mod 2050 varierende fra 2 til 10 kg N ha⁻¹. På grund af forskelle i nedbørsmængder er det sandsynligt at stigningerne vil være større i den nordlige og vestlige del af Jylland end i Østjylland og på Øerne (Blicher-Mathiesen et al., 2020).

6.2 Klimagasser

Udledningerne af klimagasser fra landbruget er relateret til mikrobielle processer, som er stærkt påvirkede af det omgivende miljø. Temperatur har betydelig rolle for aktiviteten af disse mikrobielle processer, og dette vil potentielt kunne øge visse udledninger af klimagasser fra landbruget. Der sker dog næppe ændringer i metanudledninger fra husdyrenes fordøjelse, da klimaændringer ikke direkte påvirker aktiviteten i vommen hos drøvtyggere. Effekterne vil derfor være knyttet til opbevaring af husdyrgødningen og til udledninger fra marken.

Metanudledninger fra lagring af husdyrgødning som gylle øges væsentligt ved lagring under højere temperatur, og dette afspejler sig bl.a. i forskelle i udledninger fra håndtering af husdyrgødning i forskellige egne af Europe (Sommer et al., 2009). Selv med stigende temperatur vil denne dog formentlig fortsat være så lav i vinterperioden i Danmark, at metandannelsen er begrænset. De fleste gylletanke tømmes i forbindelse med udbringning i foråret, og effekter af øget temperatur på metan fra gylletanke vil derfor primært være knyttet til sommer og efterår. Dette taler for at der yderligere fokuseres på tiltag til at mindske metan fra gyllelagre i disse perioder.

Udledninger af lattergas fra tilførsel af gødning og planterester i marken påvirkes af temperatur og vandindhold i jorden (Hansen et al., 2019). Sammenhængene er dog komplekse, og lattergasdannelse er især påvirket af jordens vandindhold (Brozyna et al., 2013). Da jordens vandindhold påvirkes af både ændringer i nedbørsmønstre og fordampning og at der kan være stor tidsmæssig variation i dette, kan der ikke generelt konkluderes om klimaændringernes påvirkning af lattergas fra marken.

Jordens kulstoflager påvirkes af tilførsel af organisk materiale gennem planterester og husdyrgødning og af mikroorganismernes nedbrydning af både det tilførte organiske materiale og det eksisterende indhold af organisk stof i jorden. En global analyse af opvarmningens effekter på tab af kulstof fra jord viser, at det især er på høje breddegrader, at der er risiko for øget udledning af CO₂ fra nedbrydning af jordkulstof som følge af højere temperaturer (Crowther et al., 2016). Dette studie beregnede at den øgede udledning fra nedbrydning af organisk stof kunne udgøre 12-17 % af de forventede antropogene udledninger frem til 2050. Effekter af opvarmning på ændringer i jordkulstof i dyrkningsjorden i Danmark er behæftet med større usikkerhed, da denne også afhænger af ændringer i tilførsel af kulstof fra afgrøderester. Öztürk et al. (2018) sammenlignede resultater fra tre forskellige simuleringsmodeller til beregning af udvikling i jordkulstof i kontinueret vinterhvede og fandt stor variation i de beregnede effekter fra ingen ændring til betydelige tab af jordkulstof. Der er således stor usikkerhed omkring effekten, men det må forventes, at klimaændringerne

isoleret set vil medføre et tab af jordkulstof, hvilket øger behovet for andre tiltag til at reducere udledninger af klimagasser og øge binding af kulstof.

6.3 Pesticidforbrug

Pesticidanvendelse under fremtidige klimaændringer afhænger af afgrødevalg, sædskifter, timingen i produktionen, og forekomsten af ukrudt, skadedyr og sygdomme. Alle disse effekter påvirkes også af klimaændringerne. Således vil mildere vintre øge overlevelsen af sygdomme og skadedyr og dermed bekæmpelsesbehovet. Henriksen et al. (2013). opstillede scenarier for sædskifter for nutidigt og fremtidigt (2050) klima for kvægbedrifter og plantebedrifter/svinebedrifter for sandjord og lerjord. Scenarierne for sædskifter, landbrugspraksis og pesticidanvendelse for udvalgte landbrugstyper viste ingen ændringer i sædskifter for kvægbedrifter og kun små ændringer for svineproduktion. Et varmere klima og ændringer i jordens vandindhold vil ændre såstidspunkt med tidligere såning af vårafgrøder og senere såning af vinterafgrøder, ligesom afgrødeudvikling påvirkes, så der generelt opnås en hurtigere udvikling med tidligere blomstring og tidligere høst. Dette vil have konsekvenser for timingen af pesticidanvendelsen. Scenarierne viser dog kun små ændringer i pesticidanvendelse for de fleste afgrøder. Der var imidlertid en generel tendens til øget brug af pesticider på ca. 10%.

6.4 Referencer

- Bartosova, A., Capell, R., Olesen, J.E., Jabloun, M., Refsgaard, J.C., Donnelly, C., Hyytiäinen, K., Pihlainen, S., Zandersen, M., Arheimer, B., 2019. Future socioeconomic conditions may have larger impact on nutrient loads to the Baltic Sea than climate change. *Ambio* 48, 1325-1336.
- Bauer, N., Rose, S.K., Fujimori, S., van Vuuren, D.P., Weyant, J., Wise, M., Cui, Y., Daioglou, V., Gidden, M.J., Kato, E., Kitous, A., Leblanc, F., Sands, R., Sano, F., Strefler, J., Tsutsui, J., Bibas, R., Fricko, O., Hasegawa, T., Klein, D., Kurosawa, A., Mima, S., Muratori, M., 2020. Global energy sector emission reductions and bioenergy use: overview of the bioenergy demand phase of the EMF-33 model comparison. *Climatic Change* 163, 1553-1568.
- Blicher-Mathiesen, G., Sørensen, P., Kristensen, T., Andersen, H.E., Petersen, R.J., Audet, J., Tornbjerg, H., Christensen, J.H., Ellerman, T., Nielsen, O.-K., Jensen, J.L., Thomsen, I.K., Olesen, J.E., Pedersen, B.F., Heckrath, G., Gundersen, P., 2020. Baseline 2027 for udvalgte elementer. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. Teknisk rapport nr. 184.
- Brozyna, M.A., Petersen, S.O., Chirinda, N., Olesen, J.E., 2013. Effects of grass-clover management and cover crops on nitrogen cycling and nitrous oxide emissions in a stockless organic crop rotation. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 181, 115-126.
- Campbell, B.M., Beare, D.J., Bennett, E.M., Hall-Spencer, J.M., Ingram, J.S.I., Jaramillo, F., Ortiz, R., Ramankutty, N., Sayer, J.A., Shindell, D., 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society* 22, 8.
- Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F.N., Leip, A., 2021. Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food* 2, 198-207.

- Crowther, T.W., Todd-Brown, K.E.O., Rowe, C.W., Wieder, W.R., Carey, J.C., Machmuller, M.B., Snoek, B.L., Fang, S., Zhou, G., Allison, S.D., Blair, J.M., Bridgman, S.D., Burton, A.J., Camillo, Y., Reich, P.B., Clark, J.S., Classen, A.T., Dijkstra, F.A., Elberling, B., Emmett, B.A., Estiarte, M., Frey, S.D., Guo, J., Harte, J., Jiang, L., Johnson, B.R., Kröel-Dulay, G., Larsen, K.S., Laudon, H., Lavalley, J.M., Luo, Y., Lupascu, M., Ma, L.N., Marhan, S., Michelsen, A., Mohan, J., Niu, S., Pendall, E., Peñuelas, J., Pfeifer-Meister, L., Poll, C., Reinsch, S., Reynolds, L.L., Schmidt, I.K., Sistla, S., Sokol, N.W., Templer, P.H., Treseder, K.K., Welker, J.M., Bradford, M.A., 2016. Quantifying global soil carbon losses in response to warming. *Nature* 540, 104-109.
- Dalgaard, T., Hansen, B., Hasler, B., Hertel, O., Hutchings, N.J., Jacobsen, B., Kronvang, B., Olesen, J.E., Schjørring, J., Termansen, M., Vejre, H., 2014. Policies for agricultural nitrogen management - trends, challenges and prospects for improved efficiency in Denmark. *Environmental Research Letters* 9, 115002.
- Doltra, J., Lægdsmand, M., Olesen, J.E., 2014. Impacts of projected climate change on productivity and nitrogen leaching of crop rotations in arable and pig farming systems in Denmark. *Journal of Agricultural Science* 152, 75-92.
- Hansen, S., Frøseth, R.B., Stenberg, M., Stalenga, J., Olesen, J.E., Krauss, M., Radzikowski, P., Doltra, J., Nadeem, S., Torp, T., Pappa, V., Watson, C.A., 2019. Review of causes and sources for N₂O emissions and NO₃-leaching from organic arable crop rotations. *Biogeochemistry* 16, 2795-2819.
- Henriksen, H.J., Rosenbom, A., van der Keur, P., Olesen, J.E., Jørgensen, L.N., Kjær, J., Sonnenborg, T.O., Christensen, O.B., 2013. Prediction of climatic impacts on pesticide leaching to the aquatic environments. Danish Ministry of the Environment. Environmental Protection Agency. Pesticide Research no. 143.
- Jabloun, M., Schelde, K., Tao, F., Olesen, J.E., 2015. Effect of temperature and precipitation on nitrate leaching from organic cereal cropping systems in Denmark. *European Journal of Agronomy* 62, 55-64.
- Jeppesen, E., Kronvang, B., Meerhoff, M., Søndergaard, M., Hansen, K.M., Andersen, H.E., Lauridsen, T.L., Liboriussen, L., Bekioglou, M., Ozen, A., Olesen, J.E., 2009. Climate change effects on runoff, phosphorus loading and lake ecological state, and potential adaptations. *Journal of Environmental Quality* 38, 1930-1941.
- Jeppesen, E., Kronvang, B., Olesen, J.E., Audet, J., Søndergaard, M., Hoffmann, C.C., Andersen, H.E., Lauridsen, T.L., Liboriussen, L., Larsen, S.E., Bekioglou, M., Meerhoff, M., Özen, A., Özkan, K., 2011. Climate change effects on nitrogen loading from catchment: implications for nitrogen retention, ecological state of lakes and adaptation. *Hydrobiologia* 663, 1-21.
- Maes, J., Hauck, J., Paracchini, L., Ratamäki, O., Hutchins, M., Termansen, M., Furman E., Perez-Saba, M., Braat, L., Bidoglio, G., 2013. Mainstreaming ecosystem services into EU policy. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, 128-134.
- Möhring, N., Ingold, K., Kudsk, P., Martin-Laurent, F., Niggli, U., Siegrist, M., Studer, B., Walter, A., Finger, R., 2020. Pathways for advancing pesticide policies. *Nature Food* 1, 535-540.
- Olesen, J.E., Børgesen, C.D., Hashemi, F., Jabloun, M., Bar-Michalczyk, D., Zurek, A.J., Bartosova, A., Bosshard, T., Hansen, A.L., Refsgaard, J.C., 2019. Nitrate leaching losses from two Baltic Sea catchments under scenarios of changes in land use, land management and climate. *Ambio* 48, 1252-1263.
- Olesen, J.E., Christensen, S., Jensen, P.R., Schultz, E., 2021. AgriFoodTure: Roadmap for sustainable transformation of the Danish Agri-Food system. Redigeret af Rasmussen, C., Kjer, K.H., Kristensen, T.N., Gade, J.J., Haslund, S., Henriksen, C.B., Persson, M., Kryger, K., Henriksen, L. SEGES, Aarhus, Denmark. 96 pp.

- Sommer, S.G., Olesen, J.E., Petersen, S.O., Weisbjerg, M.R., Valli, L., Rodhe, L., Béline, F., 2009. Region-specific assessment of greenhouse gas mitigation with different manure management strategies in four agroecological zones. *Global Change Biology* 15, 2825-2837.
- Xu, X., Sharma, P., Shu, S., Lin, T.-S., Ciais, P., Tubiello, F.N., Smith, P., Campbell, N., Jain, A.K., 2021. Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nature Food* 2, 724-732.
- Öztürk, I., Sharif, B., Baby, S., Jabloun, M., Olesen J.E., 2018. Long-term simulation of temporal change of soil organic carbon in Denmark: comparison of three model performances under climate change. *Journal of Agricultural Science* 156, 139-150.

7 Vidensbehov

Forfatter: Mathias N. Andersen

Fagfællebedømmer: Johannes W.M. Pullens

Klimatilpasning i landbruget kræver både gode prognoser for klimaet (langt sigt) og vejret (kort sigt) samt en værktøjskasse, der indeholder de fornødne redskaber og giver vejledning i hvilke, der mest fordelagtigt anvendes til at imødegå en påvirkning i en given situation. De situationer og påvirkninger, som landbruget vil blive udsat for, er ofte meget kontekst-specifikke, da de afhænger af landskab, jordtype, staldtyper, dyreart, dyrekategori mv., samt samspil mellem disse og en given klimaudvikling og/eller vejsituation. Dermed bliver løsningerne mht. klimatilpasning også diverse. Det er derfor vigtigt, at systemerne til klimatilpasning i form af vejledninger, beslutningsstøtteværktøjer, teknologier og anlæg afspejler denne diversitet, som også indbefatter forskellige skalaer fra mark og stald over bedrifter til landskabsniveau. Systemerne bør udvikles i en form, der kan bruges af landbrugets konsulenttjeneste for at sikre, at råd og vejledning når ud til de enkelte landmænd. Da landbrugssektoren på samme tid vil skulle bidrage til at nedsætte en række miljøpåvirkninger, bør tilpasningsstrategier fokusere på indsatser som har multiple fordele mht. tilpasning, drivhusgasreduktion og øget biodiversitet (EEA, 2019).

7.1 Udækkede vidensbehov om klimatilpasning i landbruget

7.1.1 Planteproduktion

Afgrøders vandbalance og vandingsbehov. Der er behov for en styrket indsats og et værktøj til at estimere produktionstabene som følge af tørke og udpege hvilke arealer der er profitable at vande og hvilke, der ikke er. For de sidstnævnte, er der brug for at styrke forskningen i hvordan vandtilgængeligheden i rodzonen kan øges f.eks. ved brug af biochar på en måde så rodtybden øges.

Indsats imod utilsigtet oversvømmelse. De større regnmængder i vinterperioden kombineret med en forventet større dræningsindsats på markniveau vil skabe større problemer med oversvømmelse nedstrøms i vore vandløbssystemer. Dette gælder både i by og på landbrugsjord. Der er behov for at undersøge om kontrolleret dræning (hvor vand ophobes under overfladeniveau på markerne) i kombination med at udlægning af græsområder til opsamlingsbassiner, der fyldes i perioder med stor nedbør, kan afhjælpe eller forhindre ukontrollerede oversvømmelser. Herunder om græsarealet, der fungerer som vådområde, kan være med til at fjerne N der er udvasket og samtidig producere biomasse til f.eks. bioraffinering af protein.

Afgrøders modstandsdygtighed mod varmemstress. Langvarige forsøgsserier omtalt i kapitel 2 viser, at både hvede og kartofler er meget følsomme overfor høje temperaturer under danske forhold. Udbyttetab som følge af højere temperatur kan nemt overses da de helt eller delvist vil blive overskygget af det stigende kuldioxidindhold i luften. Der er behov for både en forædlingsindsats og nye kulturtekniske metoder til at opnå bedre tolerance.

Skovlandbrug og opstilling af solpaneler på landbrugsarealer er interessante mht reduktion af drivhusgas-emissioner og øget biodiversitet. Der er behov for en mere grundlæggende forskningsindsats i hvordan de ændrede dyrkningsbetingelser i sådanne systemer påvirker vandbalance og temperaturforhold i marken og hvordan dette kan udnyttes optimalt i afgrødeproduktionen i relation til klimatilpasning og resiliens.

Klimarobust jord. Der er brug for at udvikle teknologier, dyrkningssystemer og beslutningsstøtteværktøjer til at gøre jorden mere robust i forhold til klimaforandringer. Det gælder i forhold til at sikre en god etablering af afgrøden under variable klimaforhold, og mindske risikoen for vanderosion i forbindelse med skybrud, Der er også behov for at udvikle strategier til at mindske risikoen for skadelig jordpakning, da effekterne heraf forstærkes (dårlig afdræning og rodvækst) i et fremtidigt klima med øgede problemer for både for meget og for lidt vand.

Økologiske sædskifter med fokus på dynamikker, der fremmer jordfrugtbarhed, recirkulering og robusthed.

Udover de nævnte forskningsbehov, er der beskrevet en lang række forskningsbehov i ROADMAP FOR SUSTAINABLE TRANSFORMATION OF THE DANISH AGRI-FOOD SYSTEM (https://pure.au.dk/portal/files/219295609/Climate_roadmap_white_paper_06.07.2021_final_version.pdf). I dette roadmap listes forskningsbehov bl.a. indenfor emnerne: "LAND USE AND MANAGEMENT"; "PLANT-BASED FOOD PRODUCTION"; "BIOTECHNOLOGY-BASED FOOD PRODUCTION AND ALTERNATIVE PROTEIN SOURCES"; "CROSS-CUTTING ASPECTS: Governing the Danish agri-food transition" og "CROSSCUTTING ASPECTS: Climate and resource-efficient food production"

7.1.2 Husdyrproduktion

Der mangler viden om varmemstress og samspil mellem produktion, sundhed, velfærd og reproduktion hos husdyr under danske produktionsforhold. Der er generelt et behov for mere viden om udegående dyrs termiske komfort under danske forhold, og hvordan det interagerer med de gennemgåede virkemidler, herunder træer som forventes at have en markant positiv effekt på udegående dyrs muligheder for termoregulering. Der er også behov for mere viden omkring reduktion af insektsbelastning i områder hvor dyr ikke har mulighed for at komme væk fra belastningen, ved f.eks. udvikling og brug af mobile læskure eller effekt af type beplantning.

Der skal udvikles nye teknologier til staldindretninger, der kan mitiggere effekten af varmere klima. Det kan f.eks. være bedre teknologier til mekanisk ventilation, herunder intern ventilation i åbne kvægstalde, forstøvning af vand. Der vil efterfølgende mangle viden om effekten dels på dyrenes produktion, sundhed og velfærd, dels på emissioner af ammoniak og klimagasser fra stalde og gødningslagre.

7.1.3 Klima- og miljø

Den forventede praktiske anvendelse af flerårige afgrøder i sammenhæng med nye og gamle dyrknings-elementer bør efterprøves for sin virkning på jordbundssundhed og biodiversitet.

7.2 Igangværende forskning på klimatilpasningsområdet

7.2.1 Planteproduktion

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projekt-le-der	Projekt-periode	Bevillings-giver
ClimOptic	Formålet med Organic RDD-projektet ClimOptic er at udvikle, dokumentere og demonstrere optimerede organiske gødninger til anvendelse i samspil med ændringer i sædskifte og gødningshåndtering for mere klimaeffektiv økologisk planteproduktion	Jørgen Eivind Olesen	2019-2022	GUDP
ClimateVeg	Det overordnede mål med ClimateVeg er at dokumentere klima- og miljøprofilen for danske økologiske grøntsager og identificere forbedringsmuligheder i tæt samarbejde med store danske økologiske grøntsagsproducenter.	Hanne Lakkenborg Kristensen	2021-2024	GUDP
Klimagræs	Projektet er rettet mod at udvikle kvægsædskifter som et omkostningseffektivt virkemiddel til reduktion af drivhusgasemission. Projektet leverer implementeringsparat videnskabeligt grundlag for opførelse af kulstoflagring i jord og emissioner af drivhusgasser, herunder klimaeffekter for hhv. græs i om-drift og nitrifikationshæmmere	Jørgen Eriksen	2019-2023	LBST
GrainLegsGo	Formålet med GrainLegsGo er at øge dyrkning af friske bælgfrugter til konsum, samtidig med at det giver miljø- og klimafordele og fremmer cirkulær bioøkonomi. Med en tværfaglig tilgang bringer GrainLegsGo nøgleinteressenter sammen, øger forbrugernes bevidsthed og fremmer dyrkningen af traditionelle og nye bælgfrugter til frisk høst.	Jim Rasmussen	2021-2024	GUDP
FruitBunch	Projektet er et forskningskapacitets-opbygningsprojekt mellem to universiteter i Ghana og AU med det formål at anviser veje for grøntsagsavlere i Ghana til at klimatilpasse deres produktion ved udvælgelse af tørke	Mathias Neumann Andersen	2020-2025	Danida

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projekt-le-der	Projekt-periode	Bevillings-giver
	og varmetolerante sorter, øget kulstofindhold i jorden bl.a. vha biochar og vanding			

7.2.2 Husdyrproduktion

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projekt-le-der	Projekt-periode	Bevillings-giver
Samspil mellem klima, miljø og dyrevelfærd	At belyse om, og i hvilket omfang, udvalgte tiltag til reduktion af klima og miljø-belastning fra husdyrholdet påvirker dyrevelfærd, særligt i forhold til adfærds- og sundhedsmæssige reaktioner og i hvilket omfang eventuelle negative effekter kan reduceres.	Jan Tind Sørensen	2022-2023	Rådgivningsprojekt under rammeaftalen på Husdyrproduktion mellem AU og FVM
Udvidelse af Normtal for husdyrgødning med kulstof for at kunne modellere udledning af drivhusgasser fra husdyrene, stalde og lagre	At kvantificere udledning af drivhusgasser, især metan fra husdyr, stalde og lagre ved at inddrage kulstof i det nuværende Normtalssystem for beregning af husdyrgødningens indhold af N, P og K. Klimaforandringer vil påvirke emissioner af ammoniak og metan fra stalde og lagre.	Christian Børsting	2021-2024	LBST
Udvikling af model for kvægbesætnings udledning af enterisk metan under forskellige management strategier	En fortsat stor dansk mælkeproduktion kan være model for andre lande, hvis Danmark kan finde klimæløsninger, som dels er anvendelige i praksis, dels er effektive, både når man ser på bedriftens samlede klimagas udledning og på det økonomiske perspektiv. Den enkelte malkekvægbesætnings produktions-og managementsystem er et centralt og nødvendigt delsystem i, at kunne forstå og kvantificere den samlede danske klimabelastning for produktion af mælk og kød. Projektets hovedaktivitet er at udvikle en ny besætningsmodel til simulering af tekniske og økonomiske konsekvenser af managementtiltag til reduktion af klimaaftryk i malkekvægsbesætninger	Søren Østergaard	2021-2024	GUDP
Outdoor sows in novel concepts to benefit the environment (OUTFIT)	Hovedformålet er at bidrage til udvikling af økonomisk bæredygtige foldkoncepter, der sikrer lave næringsstofftab samtidig med høj biodiversitet og kulstofbinding. Der er således mere fokus på climate <i>mitigation</i> end climate <i>adaptation</i> , men der er også en mindre demonstration/udviklings-aktivitet,	Anne Grete Kongsted	2021-2024	Organic RDD6 (GUDP)

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projekt-le-der	Projekt-periode	Bevillings-giver
	som belyser træers skyggeeffekt og eksempelvis effekten af høst/styning af poppel/pil i forskellige højder på genvækst og skyggeeffekt (og dermed grisenes muligheder for termoregulering).			
Facilitating innovations for resilient livestock farming systems (Re-Live-stock)	Formålet er at reducere husdyrproduktionens klimapåvirkning samt at øge produktionsens robusthed overfor fremtidige klimændringer ved at evaluere og understøtte innovationer (implementeret på dyr-, besætnings-, bedrift-, sektor- og regionsniveau) på tværs af Europa. Fokus i DK er økologiske husdyrsystemer.	David R. Yanez-Ruiz (CSIC, Spanien) DK delta-gere: Anne Grete Kongsted, AU, og ICOEL	2022-2027	EU (H2021)

7.2.3 Klima- og miljø

Projekttitel	Formål og kort beskrivelse	Projekt-le-der	Projekt-periode	Bevillings-giver
KLIMINI: Klima- og miljøeffekter af nitrifikationshæmmere	Projektets overordnede formål er at sikre en miljømæssigt forsvarlig brug af nitrifikationsinhibitorer (NI) til reduktion af N ₂ O-emissioner fra dansk landbrug.	Anne Winding, Miljøvidenskab	2019-2023	LBST
Miljøkonsekvenser af gødskning med forsuret gylle	Forsuring af gylle er en betydelig ændring af gyllens sammensætning og biologi og kan derfor ændre dens reaktion i jordbundsmiljøet samt forårsage udvaskning af fosfat og sulfat. Jordbundssundheds-effekter vurderes ud fra effekter på jord-bundsbiologien.	Dominik Henrik Zak, Ecoscience	2022-2024	Miljøstyrelsen
PROENV: Balancing production and environment	Undersøgelse af konkrete tiltag til at reducere kvælstof (N) tab fra gylle og i videreudvikling af et eksisterende softwareværktøj, der gør det muligt at konstruere scenarier for gylle N udnyttelse på mark, bedrift og regional skala. Dette værktøj er udviklet til brug i en specifik region, men i PROENV vil dets tekniske og modellerende kapaciteter blive udvidet for at muliggøre dets brug i andre regioner i Europa ved hjælp af data, der er tilgængelige i hele Europa. Endelig vil de praktiske og teoretiske komponenter samles i en udforskning af nutidens produktion og scenarier, herunder fodringsstrategi for reduktion af drivhusgasemissioner på landbrugsskala i de forskellige partnerlande, herunder brugen af livscyklusvurdering og evaluering af energi, kvælstof og arealudnyttelse.	Nick Hutchings and Johannes Pullens	2022-2025	FACCE-JPI

8 Opsummering og konklusioner

Forfatter: Mathias N. Andersen

Fagfællebedømmer: Johannes W.M. Pullens

Corona-epidemien og krigen i Ukraine har skabt øget fokus på fødevareresikkerheden i Europa. Landbruget er sandsynligvis den sektor i samfundet som er mest afhængig af vejret og derfor yderst følsom over for klimacændringer. Klimacændringerne er derfor en yderligere, vigtig faktor, som bidrager til usikkerheden om forsyningsstabiliteten. Dette er en følge af, dels en generelt negativ effekt af ændringerne i sig selv og behovet for tilpasning på produktiviteten i landbruget, dels af den større variabilitet og forekomst af ekstreme i klimaet i fremtiden medfører mere ugunstige forhold som tørke og oversvømmelse mm. I den danske kontekst tegner der sig et billede, som ikke er så negativt som i mange andre dele af Europa og verden, men som stadig rummer en række udfordringer med hensyn til klimatilpasning. Landbrugssektoren vil parallelt med tilpasningen skulle bidrage væsentligt til at nedsætte udledningerne af drivhusgasser samt en række andre miljømålsætninger.

Klimaet har ændret sig i Danmark og ifølge FN's klimapanel, IPCC, er disse ændringer utvetydigt påvirket af menneskelig aktivitet specielt udledning af drivhusgasser. I Danmark er temperaturen steget med ca. 1,8 grader siden 1980 og med 1,0 grader fra normalperioden 1960-90 og næste klimanormal 1990-2020. Dermed er vækstsæsonens længde øget med 18 dage. Ligeledes er mængden af nedbør øget, i gennemsnit 1,5 mm per år. Stigningen har især været koncentreret i januar til februar og august til oktober. Også antallet af soltimer pr år er steget og har sammen med den højere temperatur resulteret i højere fordampning, hvilket har dæmpet stigningen i afstrømning. Fremskrivninger til 2050 viser ifølge det danske klimaatlas en fortsat stigning i temperatur med 0,34 grader per årti. Det er især vintertemperaturen, der forventes at stige. Følgelig forventes vækstsæsonens længde at øges med 6,5 dage per årti. Også stigningen i nedbør forventes at fortsætte frem mod 2050 dog i lidt lavere takt med ca. 1,0 mm pr. år. Samtidig forventes større nedbørsintensitet. Variabiliteten i klimaet forventes at stige hermed også risikoen for hedeølger og tørke. Endelig forventes atmosfærens kuldioxidkoncentration at stige fra nuværende ca. 410 ppm til ca. 490 ppm i 2050.

Selvom de konstaterede klimacændringer kan synes små ved første øjekast, har de allerede haft indflydelse på landbruget, som formentlig er den samfundssektor, der er mest følsom over for ændringerne. Arealet med majs er øget markant siden 1990 og mulighederne for at etablere efterafgrøder er markant forbedret. Der har været store udbyttestigninger i de fleste afgrøder, som til dels kan tilskrives den stigende kuldioxidkoncentration i atmosfæren. Både i kartofler og hvede er der imidlertid fundet en ganske negativ effekt af høje temperaturer i sommerperioden. Det er velkendt at mængden af udvasket kvælstof stiger med stigende vandafstrømning og dermed har den øgede nedbør og afstrømning specielt i Jylland og Fyn en negativ effekt på vandmiljøet. Det samme gør sig gældende for de højere vintertemperaturer, som fremmer

jordens kvælstofmineralisering. Sammenhængen mellem klima og forekomst af ukrudt, sygdomme og skadedyr er komplekst og der er ikke fundet sikre udviklingstendenser endnu. Det må imidlertid forventes at smittepotentialet af f.eks. gulrust og kartoffelskimmel øges pga. bedre betingelser for overvintring i milde vintre. Noget tilsvarende gør sig gældende for bladlus, og deres opformering fremmes endvidere af højere sommertemperaturer i lighed med en række svampesygdomme. Både forædling af mere modstandsdygtige og genetisk diverse sorter samt forskellige dyrkningstekniske tiltag kan anvendes til at imødegå de udfordringerne klimaændringerne giver i landbruget. De dyrkningstekniske tiltag omfatter både øget vandning og dræning, der dog kan give øgede problemer med hensyn til for lille eller for stor vandføring i vandløb. Ligeledes nævnes conservation agriculture og økologisk landbrug, som i nogen udstrækning værende mere robuste og med mindre udbyttetab under tørke.

På kort og mellemlangt sigt indtil 2050 vil klimaændringerne i stigende grad påvirke produktiviteten i landbruget afhængig af hvor på kloden man befinder sig. Generelt vil mange afgrøders produktivitet blive øget i Nordeuropa på grund af længere vækstsæson og en længere frostfri periode, i modsætning til f.eks. Sydeuropa, hvor øget tørke og hedebølger forventes at få endog stærkt negative konsekvenser. I begge regioner forventes variabiliteten i udbytterne mellem år at stige som følge af hyppigere forekomst af klimaekstremer og sygdomme og skadedyr. Den stigende temperatur kan have negative konsekvenser for jordkvaliteten på længere sigt, da mineraliseringen af organisk kulstof fremmes. Et lavere indhold af organisk stof vil påvirke en række kemiske, fysiske og mekaniske egenskaber af betydning for såbedstilberedning og dyrkning negativt. Dette vil dog kunne modvirkes af en øget planteproduktion, som tilfører mere kulstof til jorden. Den stigende nedbør i vintermånederne øger risikoen for jordpakning, som også skader jordkvaliteten. Nedsat kulstofindhold sammen med jordpakning og øget og mere intens nedbør giver øget risiko for vanderosion og tilførsel af fosfor til vandmiljøet. I det omfang dyrkningssystemer tilpasses til klimaforandringerne f.eks. med flere flerårige afgrøder, vil dette kunne have en positiv indvirkning på jordbundsfaunaens biodiversitet. Det har været en antagelse at ukrudt pga. større genetisk variation var bedre til at tilpasse sig klimaændringerne end afgrøderne. Dette har dog vist sig ikke altid at holde stik. Ukrudsplanters udbredelse påvirkes af klimaændringerne, men deres mulighed for vækst er stadig bestemt af konkurrencen med afgrøderne samt om der sker skift i deres følsomhed overfor herbicider, som kan påvirkes af bl.a. den højere kuldioxidkoncentration. Svampesygdommes mulighed for etablering og udbredelse er som nævnt stærkt afhængig af klimaforholdene. Den forventede effekt på de mest alvorlige sygdomme varierer og er kort beskrevet. Tilsvarende vil skadedyrs udbredelse blive påvirket og forventede effekter på en række almindelige arter er beskrevet. Risikoen for at nye skadedyr etablerer sig i Danmark vil stige med graden af klimaændring. Varmere vintre vil give nogle arter bedre mulighed for at overvinde og øget temperatur resultere i større formeringsrate.

På husdyrproduktionssiden forventes en række negative påvirkninger fra klimaændringerne. Moderne produktionsdyr har en høj følsomhed over for varmestress og vil derfor blive påvirket negativt af de stigende temperaturer og flere hedebølger. Dette gælder både dyr på stald og udegående dyr og vil gå ud over

både dyrenes velfærd, sundhed samt en række produktionsparametre. Højere vintertemperatur kan dog være positivt for udegående dyr. Større nedbør kan påvirke udegående dyrs klov- og yversundhed og øge antallet af parasitter. Ligeledes kan antallet af insekter blive øget og nye arter komme til. Dette giver anledning til større udbredelse af insektoverførte sygdomme f.eks. West Nile Virus og Borreliose. Indflydelsen af klimacændringerne på de enkelte husdyrracers velfærd og sundhed er beskrevet i en række separate afsnit med fokus på temperaturstigningerne. Tilsvarende er indflydelsen på de forskellige husdyrarters produktion beskrevet. Generelt er der fare for at staldklimaet forringes da det bliver sværere at holde temperaturen nede og inden for arternes tolerance den såkaldte termoneutrale zone. Dette kan lede til forringet foderudnyttelse og forringet tilvækst og produktion. Endelig er husdyrproduktionen afhængig af en konstant foderforsyning af høj kvalitet og denne stabilitet kan også blive forringet af klimacændringerne bl.a. som følge af længere tørkeperioder og påvirkning af kvalitet af foderafgrøders kvalitet fra højere kuldioxidkoncentration og temperatur.

De miljømæssige konsekvenser af klimacændringerne omfatter risiko for en accelereret udledning af drivhusgasser f.eks. den tidligere nævnte hurtigere nedbrydning af organisk stof i jorden, som vil føre til øget udslip af kuldioxid. Effekten er dog ikke nødvendigvis entydig, da klimaets påvirkning af de mikrobielle jordprocesser, der leder til lattergasemission er komplekse og noget tilsvarende gør sig gældende mht. metanproduktion fra drøvtyggere og fra lagre. Udvaskningen af kvælstof i vinterperioden forventes at øges pga. øget afstrømning og tilsvarende vil der være en forøget risiko for fosfortab til vandmiljøet pga. af øget jorderosion fra overfladeafstrømning. Med hensyn til biodiversitet tegner der sig ikke et entydigt billede af klimacændringernes effekt, da meget afhænger af arealudnyttelsen. Fortsat intensivering af landbrugsdriften vil føre til yderligere tilbagegang i antallet og diversiteten af fugle og insekter. Dette kan dog modvirkes af at flere arealer vil blive ekstensiveret eller helt taget ud af dyrkningen f.eks. i forbindelse med vådlægning af arealer som følge af det bliver stadig vanskeligere at skaffe sig af med overskudsnedbør og at øget dræning på højbundsjorde vil føre til større oversvømmede området andre steder i landskabet.

Ændringer i den fremtidige landbrugsdrift vil blive drevet af både politisk regulering begrundet i hensyn til miljøet, energi- og fødevarer sikkerhed og af markedet. Dansk landbrug er en hovedudleder af drivhusgasser og kvælstof til vandmiljøet, som nødvendigvis må reduceres i henhold til internationale aftaler. Dette er i sig selv en vanskelig opgave, som skal bringes til at gå hånd i hånd med klimatilpasningen. Denne tilpasning vil således skulle understøtte den grønne omstilling. Inden for planteavlens forventes både nye dyrkningssystemer med forbedret teknologi og fortsat forædling af nye sorter og arter af landbrugsplanter at kunne bidrage med større udbytte og bedre og mere målrettet kvalitet under de ændrede klimaforhold at kunne bidrage til et mindre klima- og miljøaftryk i planteproduktionen. Dette kræver en højere grad af resiliens i dyrkningssystemer, hvor effekter af øget tørke og oversvømmelser minimeres. Dette opnås gennem ændring i dyrkningssystemer og dyrkningsteknologi, men også forædling af arter og sorter med bedre tolerance over for ekstremer spiller en vigtig rolle. Bedre varslingsmod ekstremer og forsikring mod disse kan også bidrage. Ændringer i dyrkningssystemet omfatter dyrkning af nye arter og sorter samt en øget diversitet

fx sortsblandinger og større genetisk diversitet mellem marker, ændringer i dyrkningsteknik, gødskning, jordbearbejdning, dræning, vanding og plantebeskyttelse. Formentlig vil vi se en udvikling hen mod nye typer af flerårige afgrøder som oftest er mere resiliente både overfor tørke og oversvømmelse og har en bedre miljøprofil end enårige. Den længere dyrkningssæson vil give bedre mulighed for udnyttelse af efterafgrøder til f.eks. biogas eller bioraffinering og i nogle tilfælde vil der kunne dyrkes to afgrøder per sæson, specielt grønsager. Til at imødegå klimaforandringerne eller udnytte de muligheder, der ligger i det ændrede klima vil en intensiveret forædling af nye sorter spille en fremtrædende rolle. Planterforædlingen er i de seneste årtier blevet et langt stærkere værktøj pga. de nye muligheder som anvendelse af bioteknologiske teknikker har medført. Disse teknikker er beskrevet, og forventes at blive et afgørende kort i klimatilpasningen. Den regulatoriske status af teknikkerne på EU-niveau vil være afgørende for virksomhedernes muligheder for at udvikle nye klimatilpassede sorter, med en vis nødvendig deregulering ift. den nuværende GM-lovgivning. En række egenskaber som vil være mål for forbedring er beskrevet og omfatter udbytte og kvalitet, modstandsdygtighed overfor biotisk og abiotisk stress samt forbedret optag og udnyttelse af næringsstoffer. Det er også muligt målrettet at forædle for større kulstofbinding i jorden og sorter, der mindsker udslippet af lattergas. En række dyrkningsteknologier kan være med til at opbygge kulstof i jorden, undgå jordpakning og erosion samt oversvømmelse og tørke. Muligheder og begrænsninger indenfor disse områder er kort beskrevet. Det samme gælder nye former for plantebeskyttelse, mulighederne for bedre og længere vejrforudsigelser samt mulighederne, der ligger i at forsikre sig mod tab på grund af klimændringsextremer.

På husdyrbrugsområdet er der også en lang række muligheder for at begrænse den øgede varmestress som vil være en følge af klimændringerne medmindre der tages de rette forholdsregler. En del af disse kendes allerede fra varmere egne, f.eks. øget ventilation i stalde og overbrusning af dyrene. Der er allerede opbygget en god viden om effektiviteten af forskellige virkemidler og staldsystemer og inventar der kan modvirke for høje temperaturer hos de forskellige husdyrarter. På udearealer er det også muligt at undgå eller nedsætte varmestress f.eks. ved brug af skyggetræer eller deciderede skovlandbrugssystemer. Disse kan også være med til at nedsætte parasittrykket og give alternative fourageringsmuligheder. Potentialet i dette samt i græsningssystemer og anvendelse af foldudstyr er beskrevet. Tilsvarende er der en række muligheder forbundet med fodersammensætning og fodringsteknikker til at nedsætte varmestress og disse er kort beskrevet for de forskellige arter. Endelig er der ligesom på plantesiden mulighed for avl og forædlings af husdyr, som er mere robuste over for det ændrede klima herunder højere temperatur. Det samme gælder avl af husdyr, som er mere tolerante overfor afledede effekter af klimændringerne f.eks. et højere parasittryk.

Klimatilpasningsindsatsen i dansk landbrug er perspektiveret ved at sætte den ind i en global og europæisk kontekst. De vigtigste internationale organisationer inden for området er kort omtalt og specielt EU's politikker og tiltag indenfor samordning og forskning i klimatilpasning som har betydning for dansk landbrug er omtalt. Den fælles landbrugspolitik giver en række muligheder for at understøtte både klimatilpasning og

mindskelse af drivhusgasudledningerne fra landbruget. Generelt er både de sydlige lande i EU og udviklingslandenes landbrugssektor langt mere udfordret af klimaændringerne end i Danmark. Dette skyldes ikke kun at klimaændringerne forværrer dyrkningsbetingelserne i disse lande men også at f.eks. uddannelsesniveauet og samfundenes ressourcer mv er mindre og dermed evne til omstilling. Ligeledes er rådgivningen til landmændene ofte langt svagere end i Danmark.

I relation til opfyldelse af en række bæredygtighedsmålsætninger er klimaændringerne endnu en stor udfordring for landbruget som kommer oveni en lang række andre. Både behovet for fødevarer og bioenergi er stærkt stigende på globalt plan bl.a. på grund af en stærkt stigende befolkning. Dette kommer samtidig med at landbruget skal bidrage til en lang række af miljøpolitiske målsætninger, der inkluderer formindsket udledning af drivhusgasser og næringsstoffer, mindsket brug af pesticider og øget biodiversitet.

Rapporten lister afslutningsvis en række igangværende udækkede vidensbehov og forskningsprojekter, der tager sigte på mere effektiv klimatilpasning i landbruget.

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

Vidensyntesen om klimatilpasning og landbrug i Danmark er udarbejdet af forskere fra Aarhus Universitet efter bestilling fra Landbrugsstyrelsen. Formålet med syntesen er at belyse konsekvenserne af klimaforandringerne for dansk landbrug frem mod 2050.

Landbruget er sandsynligvis den sektor i samfundet, som er mest afhængig af vejret og derfor ekstremt følsom over for klimaændringer. De observerede stigninger i temperatur og nedbør har allerede en række konsekvenser for landbrugets drift.

Vidensyntesen fokuserer på klimaforandringernes effekter på plante- og husdyrsystemer samt på mulighederne for tilpasning og den potentielle rolle, ny teknologi kan spille. Rapporten undersøger også sideeffekter og trade-offs i forhold til eksempelvis jordkvalitet, vandmiljø og drivhusgasudledninger.

Desuden belyser rapporten mulige tilpasningsstrategier, der kan gøre landbruget mere robust og klimatilpasset i fremtiden, samt identificerer områder, hvor der er behov for yderligere viden og forskning.