



TØRKES BETYDNING FOR KVÆLSTOFUDLEDNING, VANDFØRING OG BIOLOGI I VANDLØB

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 646

2025



AARHUS
UNIVERSITET
DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Tørkes betydning for kvælstofudledning, vandføring og biologi i vandløb

Perspektiver for klimasikring og forvaltning af vores vandressourcer

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 646

2025

Gitte Blicher-Mathiesen¹

Søren Erik Larsen¹

Jes Klitten Jessen Rasmussen¹

Mette Thorsen¹

Ida Karlsson Seidenfaden²

Lars Trolborg²

Maria Ondracek²

Lorraine ten Damme³

Mathias Neumann Andersen³

Anastasia Katharina Kratschmer¹

Emilie Sofie Lissner¹

Henrik Tornbjerg¹

Hans Thodsen¹

¹ Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience,

² De Nationale Geologiske Undersøgelser for
Danmark og Grønland – GEUS

³ Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer:	Tørkes betydning for kvælstofudledning, vandføring og biologi i vandløb. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. xxx
Kategori:	Rådgivningsrapporter
Titel: Undertitel:	Tørkes betydning for kvælstofudledning, vandføring og biologi i vandløb Perspektiver for klimasikring og forvaltning af vores vandressourcer
Forfatter(e):	Gitte Blicher-Mathiesen ¹ , Søren Erik Larsen ¹ , Jes Klitten Jessen Rasmussen ¹ , Mette Thorsen ¹ , Ida Karlsson Seidenfaden ² , Lars Trolborg ² , Maria Ondracek ² , Loraine ten Damme ³ , Mathias Neumann Andersen ³ , Anastasia Katharina Kratschmer ¹ , Emilie Sofie Lissner ¹ , Henrik Tornbjerg ¹ , Hans Thodsen ¹
Institution(er):	1 Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience, 2 De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland - GEUS 3 Aarhus Universitet, Institut for Agroøkologi
Udgiver: URL:	Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi © https://dce.au.dk
Udgivelsesår: Redaktion afsluttet:	Februar 2025 Februar 2025
Faglig kommentering:	Hans Estrup Andersen alle kapitler minus 4 og 8 GEUS kap. 4. Mikkel Boel, kap. 8.
Kvalitetssikring, DCE: Sproglig kvalitetssikring:	Signe Jung-Madsen Anne Mette Poulsen
Ekstern kommentering:	Kommentarerne findes her:
Finansiel støtte:	Klimadastystyrelsen
Bedes citeret:	Blicher-Mathiesen, G., Larsen, S. E., Rasmussen, J. K. J. ¹ , Thorsen, M., Seidenfaden, I. K., Trolborg, L., Ondracek, M., ten Damme, L., Andersen, M. N., Kratschmer, A. K., Lissner, E. S., Tornbjerg, H., Thodsen, H. 2025 Tørkes betydning for kvælstofudledning, vandføring og biologi i vandløb. Perspektiver for klimasikring og forvaltning af vores vandressourcer. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 79 s. - Videnskabelig rapport nr. 646 Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
Sammenfatning:	Tørke giver mindre grundvand og lav vandføring som kan give dårlige levevilkår i vandløb. Ved tørkeramte lave høstudbytter, fjernes der mindre kvælstof fra markerne end forventet. Der vil derfor være et større kvælstofoverskud i jorden, som ved overskudsnedbør vaskes ud af jorden til vandløb og kystvande, hvor det kan bidrage til dårlige økologisk tilstand.
Emneord:	Tørke, kvælstofudbytter og -udledning, vandressource, vandføring, biologi i vandløb.
Illustrationer: Foto forside:	Grafisk Værksted Gitte Blicher-Mathiesen
ISBN: ISSN (elektronisk):	978-87-7156-933-9 2244-9981
Sideantal:	79

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Konklusion	9
1 Indledning	10
2 Datagrundlag for vurdering af effekt af tørke på høst, markbalancer og kvælstofudledning	13
2.1 Geografisk afgræsning for høst, markbalancer og N-kvælstofudledning	13
2.2 Høst-, kvælstof- og fosforudbytter og markbalancer	13
2.3 Strømningsveje i det hydrologiske kredsløb og nitratudvaskning fra Landovervågningen	15
2.4 2.3. Målt afstrømning og total kvælstoftransport i vandløbsoplande	16
3 Klima i Danmark	17
3.1 Tørke ift. nedbør	17
3.2 Standardized Precipitation Index (SPI)	18
4 Hydrologisk tørke	27
4.1 Markvanding og grundvandsmagasiner og vandløb	27
4.2 Effekter af tørke på vandløb og grundvand	33
5 Effekt af tørke og fluktuerende klima på hydrologi, næringsstofkredsløb og nitratudvaskning	38
5.1 Tørke og betydning for nitratudvaskning og nitratkoncentrationer i jordvand	38
Viden fra målinger på stationsmarker i Landovervågningen	38
Vanding ved tørke og nitratudvaskning	42
5.2 Tørke og påvirkning af kvælstofstrømme i det hydrologiske kredsløb	45
6 Ændringer i næringsstofhøst og -balancer relateret til tørke	48
6.1 Høstede næringsstoffer og tørke	48
6.2 Mindre kvælstofhøst ved tørke, opgørelser for fem regioner	51
6.3 Kvælstofmarkbalancer	53
7 Tørkes betydning for kvælstofudledning	55
8 Mulige effekter af tørke og vandføring på økologiske kvalitetselementer i vandløb	62
8.1 Mulige effekter af tørke og vandføring på økologiske kvalitetselementer i vandløb	62
8.2 Overvågningsprogrammet for danske vandløb	62

8.3	Vandføringens betydning for vandløbsorganismer og begrebet Environmental Flows	64
9	Perspektiver for ny viden	69
9.1	Tørke og plantevækst	69
9.2	Ny model til beregning af kvælstofudledning og effekt af tørkes	73
10	Referencer	74

Forord

Klimadatastyrelsen, tidligere Styrelsen for Dataforsyning og Infrastruktur, har bedt Aarhus Universitet om at belyse mulige miljømæssige konsekvenser af tørke, herunder påvirkning af hydrologisk følsomme systemer. Styrelsen ønsker belyst vigtige vejrforhold, der har betydning for, hvordan tørke påvirker miljøet både i forhold til næringsstofudledning til vandmiljøet samt påvirkning af vandressourcer, vandføringen og de afledte effekter på biologi i vandløb.

Nærværende tørkeprojekt er en del af en samlet indsats under forskningsreserven 2024 "*En styrket tørkeindsats*", der arbejder med at styrke vidensgrundlaget for tørker og de konsekvenser, som tørker kan føre med sig i en dansk sammenhæng.

I nærværende rapport bidrager De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark & Grønland, GEUS, med at definere og beskrive den hydrologiske tørkes betydning for grundvand og for afstrømning i vandløb. Institut for Agroøkologi, AU, bidrager med et afsnit om vanding ved tørke og tørkes betydning for nitratudvaskning. Institut for Ecoscience bidrager med at beskrive, hvordan tørkeår giver lavere høst af kvælstof og fosfor fra marker, giver højere kvælstofbalancer og dermed også højere kvælstofudledning til vandløb og kystvande. Og desuden evalueres videngrundlag for at vurdere hvordan tørke og lav vandføring kan påvirke biologi i vandløb.

Denne rapport belyser ovennævnte faglige elementer i forhold til tørke. Projektet blev igangsat i juni 2024. I projektet er ressourcerne prioriteret således, at arbejdet med effekten af tørke på kvælstofudledning har højeste prioritet. Grunden hertil er, at der for dette emne findes tilgængelige data fra NO-VANA-overvågningen.

Sammenfatning

Aarhus Universitet og med bidrag fra GEUS har i nærværende rapport belyst viden om miljømæssige konsekvenser af tørke. Heri skelnes mellem hhv. hydrologisk tørke, som påvirker grundvandsmagasinerne samt vandløbenes vandføring og biologi, og agronomisk tørke, som påvirker afgrødevækst og udbytter og tab af kvælstof til vandløb og kystvande. Formålet med rapporten er at øge vidensgrundlaget omkring tørke med henblik på at forbedre overvågning og udvikling af forvaltningsmæssige metoder, der kan modvirke de negative effekter af tørke på grundvand, vandløb og på kvælstoftab og dermed den økologiske kvalitet i kystvande.

I rapporten beskrives, hvordan vandressourcen i dag er udnyttet i forhold til vandforsyningen (drikkevand, industriforbrug og markvanding). GEUS har opgjort den bæredygtige grundvandsressource på baggrund af beregninger med den Nationale Hydrologiske Model og ni indikatorer. Indikatorerne bruges til at vurdere påvirkningen af vandindvinding på grundvand og vandløb. Den bæredygtige udnyttelse af grundvandsressourcen vurderes ved at tage højde for de naturlige klimavariationer, og dermed er tørkehændelser kun indirekte repræsenteret.

Den Nationale Hydrologiske Model bruges derudover til at udregne hydrologiske standardiserede indeks, der beskriver anomalier og sammenhænge i det hydrologiske system og er et stærkt værktøj til at evaluere hydrologisk tørke i Danmark. Med et af disse indeks (jordvandsindhold) undersøges også, i hvilken grad indekset kan anvendes til at beskrive anvendte vandmængder til markvanding.

For biologien i vandløb belyses det, hvorvidt den hidtidige praksis med anvendelse af vandføringsvariable er tilstrækkelig til sikring af de økologiske kvalitetselementer i et fremtidigt klima med både mere ekstrem nedbør og tørke.

Endelig inddrages høstudbytter fra Danmarks Statistik og måledata fra NOVANA (det Nationale overvågningsprogram for vandmiljø og natur) vedrørende hhv. nitratudvaskning fra rodzonen og kvælstofudledning til vandløb. Data for nitratudvaskning og kvælstofudledning målt under tørkeår sammenholdes med opgørelser for de øvrige år i perioden 1990/91-2022/23. Høst af kvælstof og målt udledning af kvælstof til vandløb er opgjort for fem regioner (Nordjylland, Vest- og Sønderjylland, Østjylland, Fyn og Sjælland) og for tre perioder. Det undersøges, hvordan sammenhænge (ligninger) mellem vandafstrømning og kvælstofudledning påvirkes af tørkeår, hvor der er lave høstudbytter.

Markvanding kan modvirke tørkeeffekt, men påvirker grundvand og vandføring

Analyserne med de hydrologiske standardiserede indeks, viser at hydrologisk tørke, hvor både vandføring i vandløb og grundvandsmagasiner påvirkes, var særligt udtalt i årene 1995-1997. Hydrologisk tørke afhænger af nedbør og fordampningsforhold, og resultaterne viser hvordan tørke forplanter sig hurtigst i det terrænnære, mens det dybere grundvand reagerer langsommere.

Analysen af de ni indikatorer, der bruges til at beregne den bæredygtige grundvandsressource viser, at særligt omkring de store byer er grundvandsressourcen overudnyttet, og indikatorerne peger på, at det ofte er indikatorer, der beskriver grundvandsmagasinernes egen bæredygtighed, som begrænser ressourcens størrelse, frem for indikatorer, der beskriver indvindingens påvirkning på vandløbsafstrømning eller vådarealer. Udnyttelsesgraden i områder med meget markvanding falder betydeligt, når beregninger gennemføres på baggrund af indvinding uden markvanding.

I Danmark skal landmænd have en tilladelse til at pumpe vand op til markvanding, tilladelserne udstedes af kommunerne. Tilladelser gives på baggrund af undersøgelser af vandingsbehovet, den tilgængelige ressource og påvirkning af vandløb. Markvandingsbehovet er størst på sandede jorde. Under særlige tørkeperioder kan der være et øget vandingsbehov, som kan imødekommes med kortidstilladelser på op til tre måneder.

Markvanding kan modvirke den negative effekt af tørke på høstudbyttet og dermed på kvælstofudledning. Ved at markvande, vil afgrøderne gro bedre og danne dybere rødder. Herved kan de optage mere kvælstof og fosfor end hvis afgrøderne ikke blev vandet. Ud over mindsket planteoptag af kvælstof under tørke er der yderligere mindst én faktor, som bidrager til øget udvaskning efter tørke. Dette er den såkaldte Birch-effekt, som forekommer, når udtørret jord genopfugtes. Dette resulterer i øget mineralisering af det organiske stof i jorden, hvilket bl.a. kan måles ved en øget CO₂-afgivelse fra jorden. Denne effekt er også målt i danske vandingsforsøg i form af større N-optagelse i afgrøder efter tørke, idet mineraliseringen af det organiske stof frigør mineralsk kvælstof, men øget mineralisering giver også øget nitrat, som kan udvaskes om efteråret og vinter med overskudsnedbør. Men øget markvanding kan dog være problematisk for områder, der allerede oplever stor udnyttelse af grundvandsressourcen, fx store dele af Sjælland, samt områderne omkring Odense og Aarhus. Øget markvanding kan desuden reducere vandføring og vil dermed kunne påvirke den økologiske tilstand i vandløb gennem påvirkning af de økologiske parametre for fisk, smådyr, planter, alger og de fysiske forhold. En gennemgang af de eksisterende hydrologiske parametre samt internationale og danske værktøjer viser, at der ikke er tilstrækkelig viden eller værktøjer til at bestemme hydrologiske tålegrænser for især kritisk lave vandføringer i danske vandløb, som har betydning for vandløbenes fysiske og afledte biologiske forhold. Derfor er det nødvendigt at tilvejebringe ny viden og metoder til at udvikle nye hydrologiske parametre, undersøge sammenhænge mellem disse parametre og økologisk tilstand i især små vandløb, samt at evaluere hvorvidt de eksisterende økologiske indikatorer for fisk, smådyr og planter mv. er tilstrækkeligt følsomme til at kunne repræsentere faktiske ændringer i de biologiske samfund, der kan opstå som konsekvens af reduceret vandføring.

Tørke giver væsentligt lavere høst af kvælstof og fosfor

Når der er lave høstudbytter, fjernes der mindre kvælstof fra markerne end forventet. Der vil derfor være et større kvælstofoverskud i jorden, som ved overskudsnedbør vaskes ud af jorden til vandløb og kystvande. Den lavere fosforhøst under tørke og dermed større nettoinput af fosfor til jorden øger fosformætningsgraden og dermed risikoen for fosfortab.

Analyse af nedbør og høstudbytter påviser agronomisk tørke med tørke-ramte, lave udbytter samt lav kvælstof- og fosforhøst i 1992, 2018 og 2023.

Tørke har bevirket en mindre kvælstofhøst på henholdsvis 65.000, 41.000 og 51.000 ton kvælstof ift. til middel for fem referenceår, der ligger før og efter tørkeåret. For fosfor er høsten henholdsvis 12.000, 13.000 og 11.000 ton fosfor lavere. Fælles for de tre tørkeår er, at alle regioner (Nordjylland, Vest- og Sønderjylland, Østjylland, Fyn og Sjælland) er ramt af lavere kvælstofudbytter, men der er regionale forskelle i omfang. I 1992 var det de jyske regioner, der var hårdest ramt, i 2018 og 2023 var det Fyn og Sjælland. Her kan dækning af mere tørketolerante afgrøder have en betydning, samt at markvanding er mere udbredt i Vest- og Sydjylland.

Tørke giver højere nitrat-koncentrationer i jord- og grundvand samt øget kvælstofudledning til kystvande

Tørke medfører lavere høstudbytte og dermed et større markoverskud af kvælstof. Og deraf forhøjede indhold af kvælstof i jorden, der med overskud af nedbøren vaskes ud af jorden til vandløb og kystvande. Anvendes en simpel sammenhæng mellem markoverskuddet af kvælstof (forskul mellem kvælstof tilført mark og kvælstof fraført mark ved høst) og den normaliserede, totale kvælstofudledning, kan det beregnes, at den mindre kvælstofhøst har givet en øget udledning på 8.400 og 5.300 ton kvælstof i henholdsvis de hydrologiske år 1992/93 og 2018/19. Der er i rapporten udviklet generelle sammenhænge (ligninger) mellem vandafstrømning og kvælstofudledning. Analysen viser også, at der året efter tørkeårene 1992 og 2018 (dvs. i 1993 og 2019) er en højere kvælstofudledning end forventet, og for nogle regioner, kan effekten ses to år efter tørkeåret. Kvælstofudledningen kan være forhøjet året efter tørkeåret, som det ses i det hydrologiske år 2018/2019, hvor der ud over lav nedbør i vækstmånederne også var lav nedbør og dermed kvælstofafstrømning i efterårs- og vintermånederne. Det betød at overskuds af kvælstof blev i jorden til det efterfølgende hydrologiske år 2019/20, særlig på lerjord i egne med lav nedbør. Det betød, at en del af det overskydende kvælstof som ikke blev optaget af de lave afgrødeudbytter, blev i jorden til året efter og først blev vasket ud af jorden og transporteret til vandløbene i det hydrologiske år 2019/20.

De højere kvælstofudledninger for de tørkeramte år og året efter skyldes dog ikke kun de tørkeramte kvælstofudbytter og deraf forhøjede kvælstofbalancer. Der er stor variation omkring regressionsligningen for sammenhænge mellem vandafstrømning og kvælstofudledning for andre år end lige de to tørkeramte år 1992 og 2018 og de efterfølgende år, hhv. 1993 og 2019. En variation som ikke alene skyldes høstudbytter og kvælstofbalancer, men også tilskrives en lang række øvrige forhold som nedbørens fordeling over året, antal frost dage med lav nedbør om vinteren og deraf mindre afstrømning, og om afstrømningen evt. i højere grad sker overfladisk ved frossen jord, som vinteren i 2011.

For specifikt at kunne opgøre, hvor meget tørkeramte lave kvælstofudbytter påvirker kvælstofudledningen, er det nødvendigt at udvikle en model, der inddrager alle relevante forklaringsvariable bl.a. de ovenfor nævnte. Resultaterne af nærværende studie viser dog tydeligt, at der er øget kvælstofudledning efter tørkeår, men det er på nuværende grundlag ikke muligt præcist at opgøre niveauet for hvor meget, der alene skyldes tørke, i det andre faktorer også bidrager til variationen mellem år.

Alligevel peger de viste analyser på, at det vil kunne være nyttigt med en ekstra målrettet indsats for at modvirke merudledning af kvælstof ved ekstrem tørke. Virkemidler kan være dyrkning af mere tørketolerante afgrøder, bedre styring af markvanding hvor dette er muligt, samt anvendelse af

virkemidler mod kvælstofudledning f.eks. drænvirkemidler som vådområder, minivådområder, intelligente bufferzoner mv.

Konklusion

Tørke påvirker både vandløb og grundvand samt afgrødeudbytter, nitratudvaskning og kvælstofudledning. Agronomisk tørke, hvor afgrødeudbyttet er påvirket, forekom i 1992, 2018 og 2023. Analyserne med de hydrologiske standardiserede indeks, viser at hydrologisk tørke, hvor både vandføring i vandløb og grundvandsmagasiner påvirkes, var særligt udtalt i årene 1995-1997. Hydrologisk tørke afhænger af nedbør og fordampningsforhold, og resultaterne viser hvordan tørke forplanter sig hurtigst i det terrænnære, mens det dybere grundvand reagerer langsommere.

Måledata viser øget kvælstofudledning efter de to tørkeår 1992 og 2018. Der er regionale forskelle i, hvor meget kvælstofudbyttet er mindre under tørke. Der er også regionale forskelle i, hvor meget kvælstofudledningen er påvirket. Det er på nuværende grundlag ikke muligt præcist at opgøre niveauet, der skyldes tørke alene. Alligevel peger de udførte analyser på, at det vil være nyttigt med en ekstra målrettet indsats for at modvirke merudledning af kvælstof ved ekstrem tørke.

Øget viden om hvor meget tørkeramte lave kvælstofudbytter påvirker kvælstofudledningen, kræver udvikling af en ny model for kvælstofudledning til kystvande, der på lokalt og regionalt niveau inddrager alle relevante forklaringsvariable bl.a. nedbørens fordeling over året, antal frost dage med lav nedbør om vinteren og deraf mindre afstrømning og om afstrømningen evt. i højere grad sker overfladisk, når jorden er frossen.

I forhold til betydningen af tørke for den økologiske tilstand i vandløb, er der ikke på nuværende tidspunkt tilstrækkelig viden eller værktøjer til at bestemme hydrologiske tålegrænser for især kritisk lave vandføringer i danske vandløb. Bestemmelsen af hydrologiske tålegrænser, som ville kunne anvendes til at understøtte vandløbsforvaltningen og Vandrammedirektivets krav om opnåelse/vedligeholdelse af god økologisk tilstand, kræver en række forsknings- og udviklingsaktiviteter.

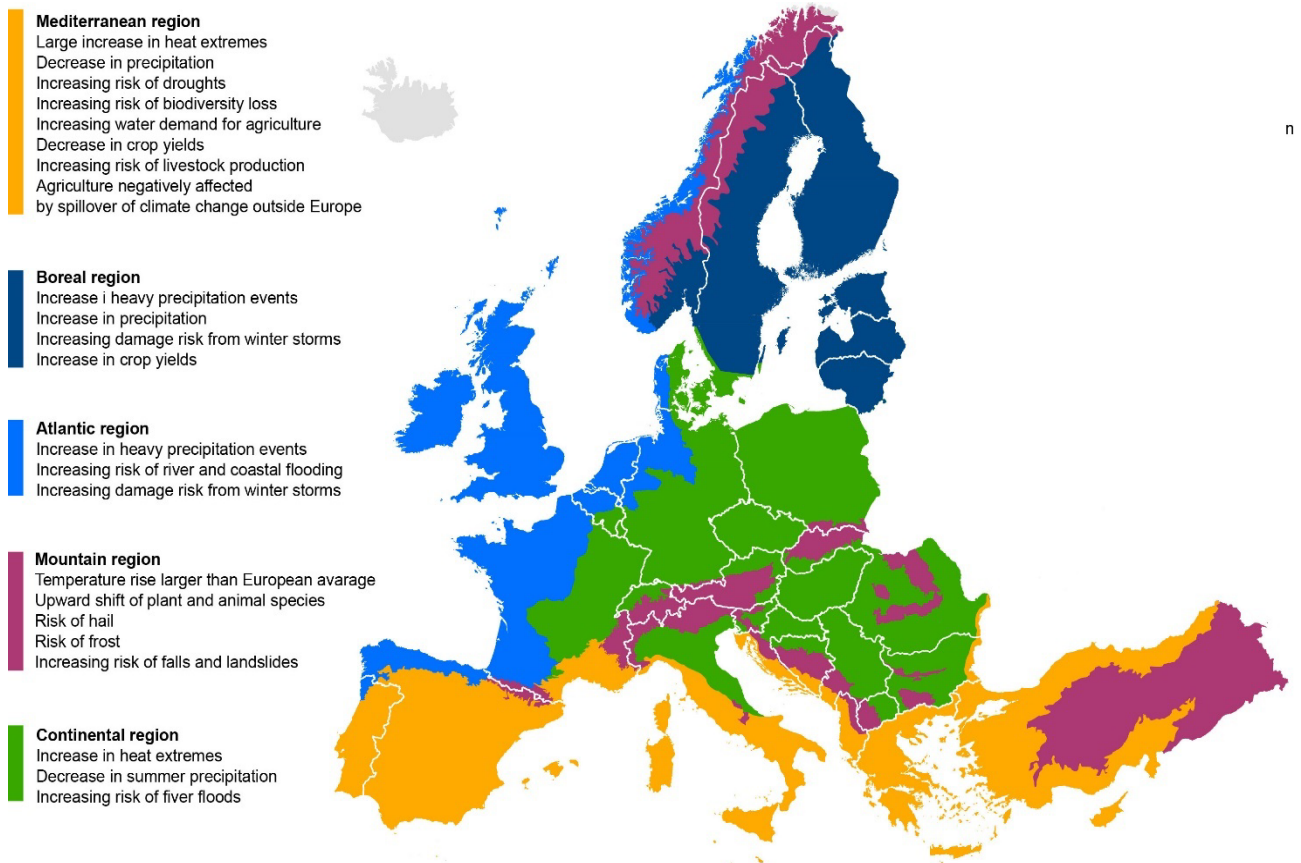
1 Indledning

Gitte Blicher-Mathiesen, ECOS

Klimaforandringer mærkes allerede i form af øget af nedbør, hyppigere oversvømmelser, stigende temperaturer og øget frekvens af ekstrem tørke.

I et review af, hvordan klimaforandringer påvirker landbrugsproduktionen i EU, fremhæves det, at klimaændringer allerede påvirker landbrugssektoren negativt, og at dette vil fortsætte i fremtiden (EEA, 2019).

I reviewet er EU-landene inddelt i forskellige biogeografiske zoner. Her ses det, at Danmark er inddelt i to zoner, som skiller ned midt gennem Jylland ved israndslinjen for udbredelse af den sidste istid. De to zoner er: hhv. a) "Atlanterszonen" med stigning i kraftige nedbørshændelser, stigende risiko for vandløbs- og kystoversvømmelser og stigende skadesrisiko fra vinterstorme, og b) "Fastlandszonen" med stigning i ekstreme varmekonforhold, fald i sommernedbør og stigende risiko for oversvømmelser.



Figur 1.1. Vigtigste effekt af klimaændringer på landbrugsproduktionsvilkår i Europa (EEA, 2019).

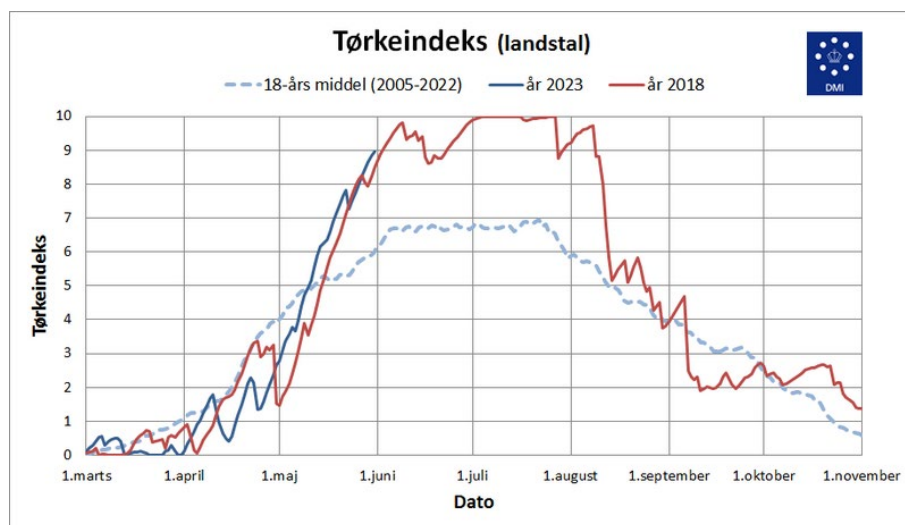
Fremtidige klimaændringer kan også have nogle positive virkninger for landbrugssektoren på grund af længere vækstsæsoner og mere hensigtsmæssige afgrødeforhold som f.eks. øget dyrkning af græs eller helsæd, at dyrke en græsafgrøde før majs, som først sås i starten af maj. Antallet af ekstreme hændelser, der påvirker landbruget i Europa negativt, forventes imidlertid at stige. En konsekvens af klimaændringerne er en større variabilitet i klimaet, og som følge heraf må der forventes længere og mere udtalte tørkeperioder,

selvom antallet af tørre dage og nedbøren i sommerperioden forventes uændret (Andersen et al., 2023; DMI KlimaAtlas). Tørke vil derfor i fremtiden i stigende grad også kunne ramme de gode jorde med høj vandholdende evne i de østlige egne af landet.

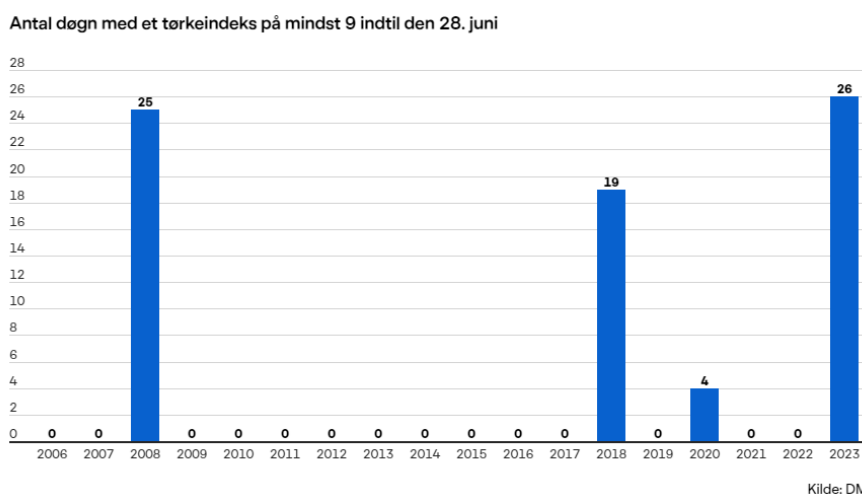
I Danmark findes ikke en officiel definition af tørke. DMI opererer med begrebet tørkeindeks på en skala fra 1 til 10. Når tørkeindekset er mindst 9 i gennemsnit for hele landet, definerer DMI, at vi har et tørkedøgn – se DMI's hjemmeside [992](#).

I figur 1.2 har DMI vist tørkeindekset for det tørkeramte år 2018, de første fem måneder af 2023 og middel for årene 2005-2022. DMI har også opgjort antal døgn med tørke for årene 2006-2023 (figur 1.3). Heraf fremgår det, at der var 28, 16, 4 og 26 tørkedøgn i årene 2008, 2018, 2020 og 2023. Det er altså ikke hvert år, at der forekommer tørkedøgn, men når de gør, er der ofte flere.

Figur 1.2. Tørkeindeks for 2018 og marts-juni 2023 ift. middel for 2005-2022.



Figur 1.3. Antal tørkedøgn i Danmark i perioden 2005-2023. Kilde: DMI.



I agronomisk sammenhæng har Andersen et al. (2024) beskrevet, hvornår lavt vandindholdet i jorden medfører vandmangel og dermed mindre plantevækst. Hydrologisk tørke anvendes om klimasituationer, hvor vandreserverne i søer, vandløb og grundvand er mindre end normalen. Vintertørke kan medvirke til hydrologisk tørke, fordi vinternedbør normalt bidrager til at opfylde grundvandsmagasinerne.

Ift. effekter af tørke på økologiske kvalitetselementer i vandløb samt på næringsstofkredsløb og næringsstofudledning er det ikke kun tørke, der har en betydning, men til en vis grad også frekvensen af ekstreme vejrforhold over året og imellem hydrologiske år.

I denne rapport bliver NOVANA data for høst af kvælstof og kvælstof-overskud i vandløbsoplande og kvælstofudledning sammenstillet med fokus på at belyse tørkes effekt på kvælstofudledning, i denne sammenhæng ud fra mere detaljerede opgørelse på regionalt niveau. Det undersøges fx, om tørke i Danmark optræder lige hyppigt overalt i landet, om det påvirker kvælstofudbytter, kvælstof-overskud og udledning ens inden for landet, og om der er regionale forskelle, som har betydning for, hvordan vi i landet forvalter vores vandressourcer.

Tørkeperioder har indflydelse på kvælstofudledningen, idet tørkebetingede lave kvælstofudbytter giver en øget kvælstofudledning til kystvande. Det har derfor særlig interesse at få afdækket og belyst, hvordan tørke påvirker kvælstofudledning til kystvande, fordi Danmark er forpligtiget til at opnå god økologisk kvalitet i alle vandområder inden 2027 jf. vandrammedirektivet. De i november 2024 indgåede aftaler om implementering af Den Grønne Trepert om anvendelse af 43 mia. kr. til virkemidler til reduktion af kvælstofudledning og klimagasser er centrale, fordi klimaændringer, herunder øget frekvens af tørke, vil øge indsatskravene til reduktion af kvælstofudledning endnu mere end hidtil antaget. De regionale forskelle i, hvor ofte og i hvilket omfang tørke optræder og den afledte påvirkning af kvælstofudbytter, -balancer og -udledning, belyses i denne rapport.

Tørke giver et øget pres på vandressourcerne med øget forbrug af vand til markvanding, især i nedbørsfattige områder. Det vil medføre lave vandføringer i små vandløb, som risikerer at tørre ud. Nogle små vandløb og grøfter udtørres jævnligt, evt. årligt, som en naturlig del af overskudsnedbørens fordeling over året og de hydrologiske strømningsveje. Frekvensen og omfanget af udtørring har en betydning for biologien i vandløbene. I denne rapport belyses tørke ift. pres på vandressourcer og den mulige betydning for biologi i vandløb med perspektiver for, hvordan vi fremadrettet kan få mere viden på dette område.

I rapporten belyses desuden, hvordan vanding påvirker nitratudvaskning fra jorden, hvilket peger frem mod mulige perspektiver for at forvalte vandressourcer i tørkesituationer med øget vandforbrug til markvanding, så kvælstofudbytter i højere grad opretholdes.

Endelig perspektiveres behov for bedre og øget viden fremadrettet for at forvalte vandressourcer og vandmiljøet i såvel kystvande som i vandløb, så de lever op til EU's mål om god økologiske tilstand.

2 Datagrundlag for vurdering af effekt af tørke på høst, markbalancer og kvælstofudledning

Gitte Blicher-Mathiesen, ECOS

2.1 Geografisk afgrænsning for høst, markbalancer og N-kvælstofudledning

Høst af kvælstof og fosfor opgøres for hele landet. For kvælstof foretages der desuden opgørelse for fem regioner. Herudover opgøres høst, markbalancer og vandløbstransporter for syv små landbrugsdominerede vandoplande, (LOOP-oplande), som indgår i NOVANA-landovervågning. Opgørelser for fosfor dækker alene høst og markbalancer, idet tab af fosfor er betinget af transportfaktorer snarere end kortsigtede ændringer- i høst og markbalancer.

Placeringen af de syv LOOP-oplande er vist i figur 2.1. For disse oplande anvendes NOVANA-data. For de fem regioner, Nordjylland, Vest- og Syddjylland, Østjylland, Fyn og Sjælland inkl. Bornholm anvendes data fra Danmarks Statistik. Effekten i kombination med NOVANA-data. Regionerne er vist i figur 2.2.

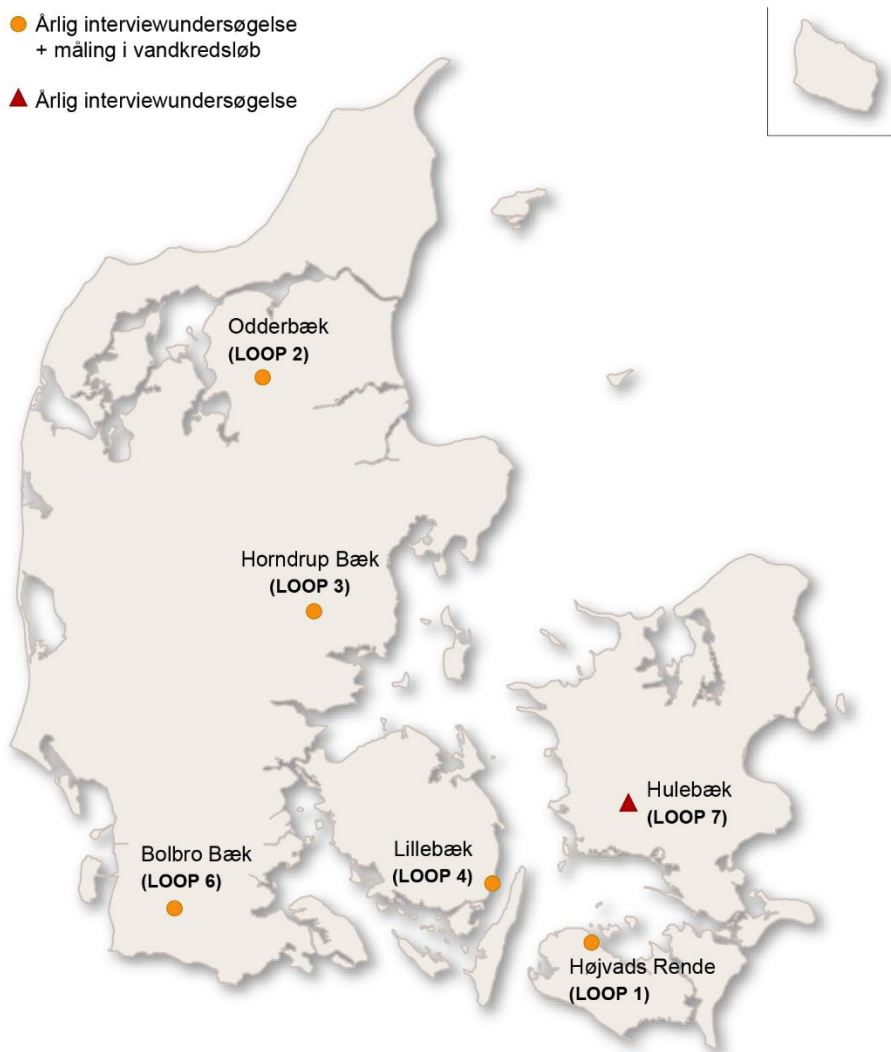
2.2 Høst-, kvælstof- og fosforudbytter og markbalancer

Høstudbytter for de fem regioner og hele landet er hentet fra Danmarks Statistik. Før 2007 er data opgjort for de 14 amter, og efter 2007 er høstudbytterne særskilt for landsdele. Data er herefter summeret til de fem regioner. Kvælstof- og fosforindholdet i afgrøderne er opgjort ud fra det gennemsnitlige udbytte indberettet til Danmarks Statistik og næringsstofindhold i afgrøder som i tilsvarende opgørelser i landovervågningen (Blicher-Mathiesen et al., 2024).

For at belyse tabspotentialet for kvælstof i forbindelse med landbrugsproduktion er kvælstofmarkbalancen opgjort som "tilført minus fraført kvælstof" fra landbrugets marker for både hele landet og landovervågningsoplandene. Tilført kvælstof består i denne sammenhæng af tildelt kvælstof med handelsgødning og husdyrgødning, inklusive udbinding, dvs. kvælstof fra græssende køer, samt kvælstoffiksering, kvælstof tilført i form af såsæd og atmosfærisk deposition (se bilag 3 for opgørelsesmetoder til markbalancer). Fraført kvælstof udgøres af fjernet kvælstof med høstede afgrøder. Fosformarkbalancen er opgjort som tilført fosfor med gødning minus fjernet fosfor med høst af afgrøderne. Opgørelse af markbalancerne følger de samme metoder som i landovervågningen (Blicher-Mathiesen et al., 2024).

Figur 2.1. Oversigt over land-overvågningsoplandenes beliggenhed.

- Årlig interviewundersøgelse + måling i vandkredsløb
- ▲ Årlig interviewundersøgelse

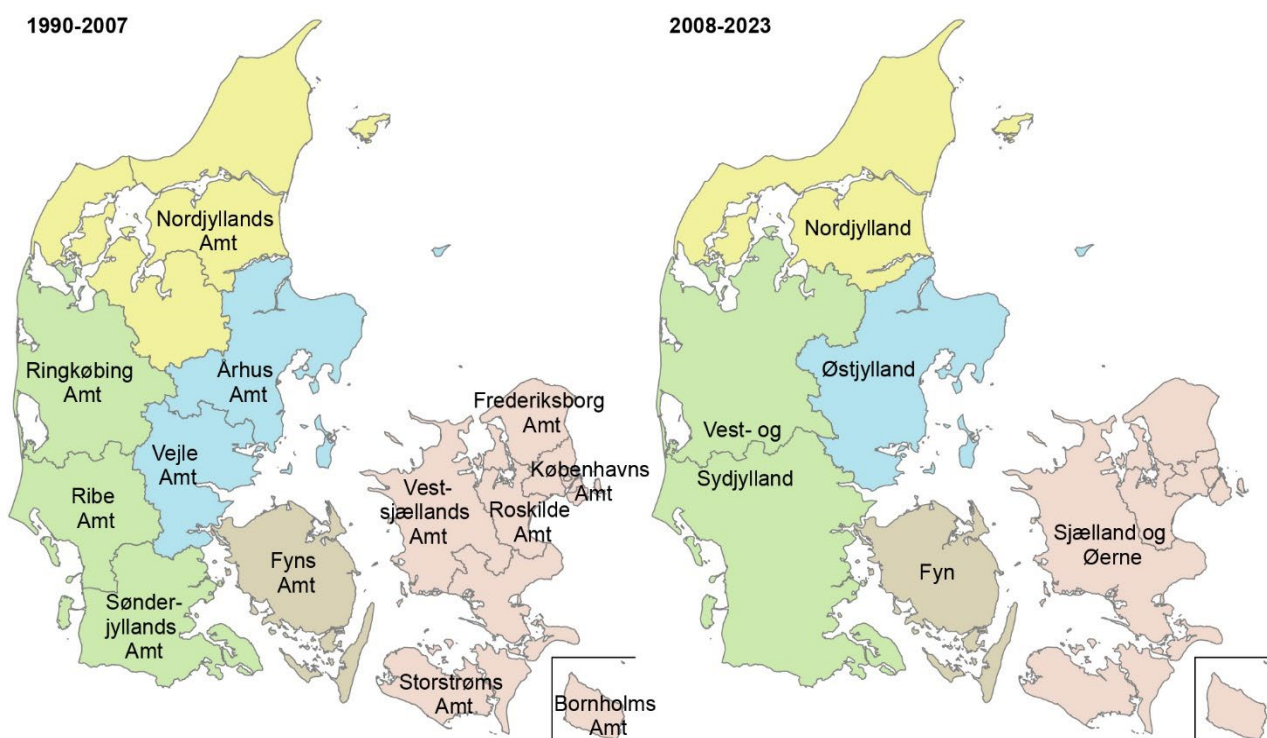


2.3 Strømningsveje i det hydrologiske kredsløb og nitratudvaskning fra Landovervågningen

Data til opgørelse af nitratudvaskning og nitratkoncentrationer i det hydrologiske kredsløb stammer fra landovervågningen (Blicher-Mathiesen et al., 2024). Kvælstofindhold i jordvand fra rodzonen måles på 31 jordvandsstationer (sugecellefelter) fordelt over fem oplande. Der foretages ugentlige målinger i perioder med tilstrækkeligt vand i jorden omkring sugecellerne. For at opgøre nitratudvaskningen beregnes vandstrømning, defineret som perkolation ud af rodzonen, med rodzonemodellen Daisy.

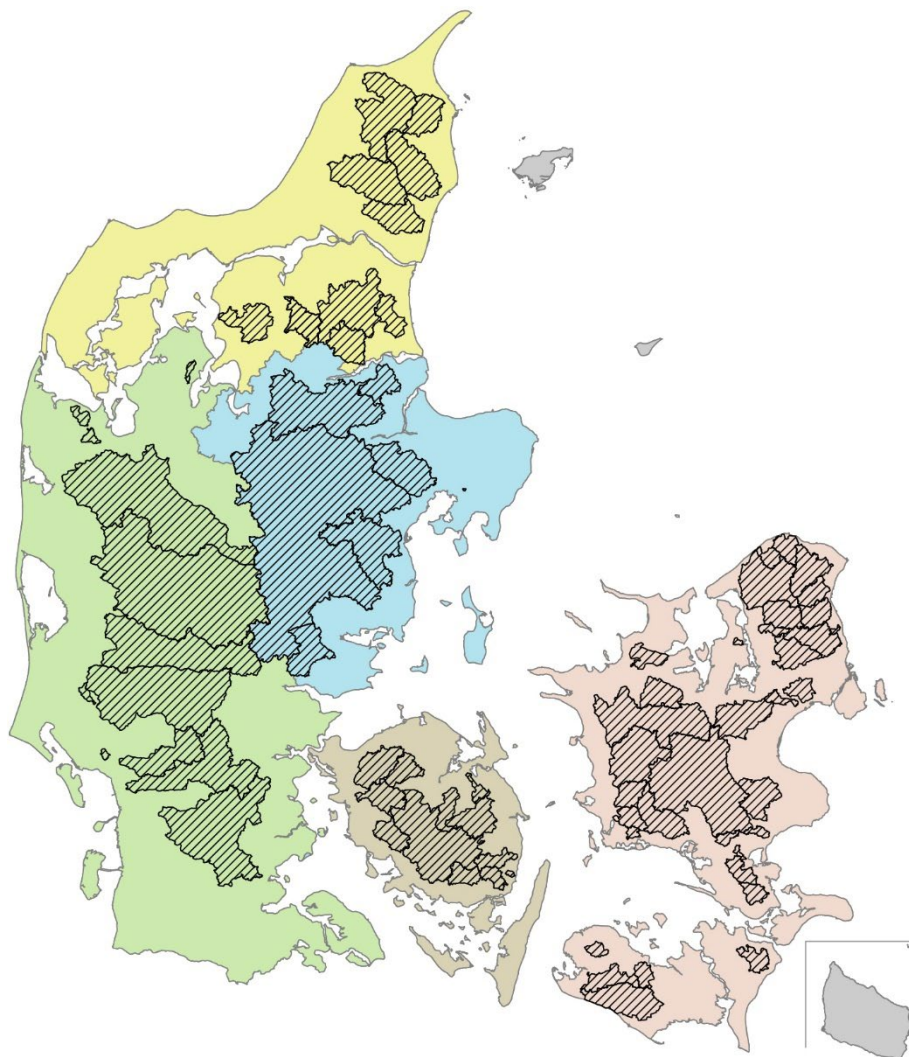
Transport af kvælstof til overfladevand via dræn måles på seks stationer på lerjord, på fire lokaliteter i LOOP 1 (Storstrøm) og på to lokaliteter i LOOP 4 (Fyn). Desuden måles på et lavtliggende sandjordsareal i LOOP 2 (Himmerland).

I drænvandsprøver måles koncentrationen af total-kvælstof, nitrat-nitrit og ammonium. Prøver af drænvandet udtages som stikprøver en gang per uge i deres afstrømningsperiode. Vandføringen i dræn beregnes ved en relation mellem en ugentlig målt afstrømning og daglig registrering af drænvandshøjden ved et overfaldsbygværk (et V-overfald). Døgntransport af næringsstoffer beregnes ved at gange en lineært interpoleret døgnkoncentration mellem de enkelte ugentlige enkeltmålinger af kvælstofkoncentrationen med den daglige vandføring i drænet. Beskrivelse af prøvetagning af drænvand findes i to tekniske anvisninger (Grant, 2011, 2012).



Figur 2.2. Afgrænsning af fem regioner til opgørelser af årlig kvælstofhøst og -balancer for 1990-2023. Kortet tv. afgrænses fem regioner før 2007, hvor Vest- og Sønderjylland består af Ringkøbing, Ribe og Sønderjyllands amt, Østjylland af Vejle og Århus amt. Kortet th. er afgrænsning af regioner og landsdele fra 2007 og frem. For Vest- og Sydjylland er data efter 2007 opgjort som en region, for Fyn og Sjælland er den samme fysiske afgrænsning brugt i hele perioden, mens der er forskelle for afgrænsningen af de jyske regioner.

Figur 2.3. Afgrænsning af vandløbsoplande inden for fem regioner til opgørelser af årlig kvælstofudledning for de hydrologiske år 1990/91-2022/23.



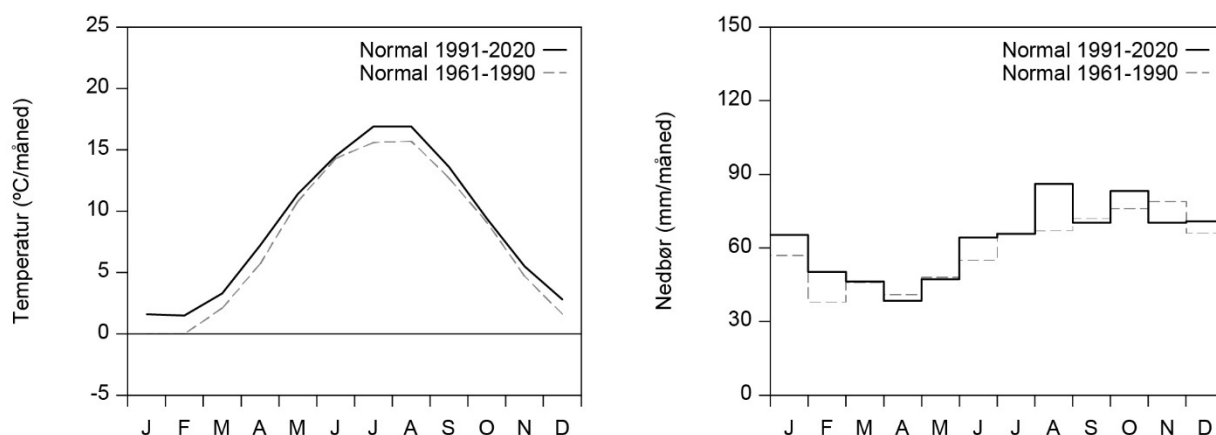
2.4 Målt afstrømning og total kvælstoftransport i vandløbsoplande

NOVANA-måledata for perioden 1990-2023 er anvendt til at beregne årlig vandafstrømning og diffus, total kvælstoftransport for hver målestation på hydrologiske år, 1. juni-31. maj ((Windolf et al., 2012). Landsdækkende indgår 29 målestationer. Vandafstrømningen beregnes ud fra kontinuert registrering af vandstand og måling af vandføring i vandløb hver anden uge. Måling af kvælstofkoncentrationer foretages på vandprøver udtaget i vandløb ca. hver anden uge. Opgørelser af vandafstrømning samt koncentration og transport af kvælstof er foretaget for hydrologiske år, dvs. perioden fra 1. juni til 31. maj det efterfølgende år. Alle målinger og opgørelser følger tekniske anvisninger og metoder beskrevet i NOVANA overvågning for Stoftransport (Thodsen et al., 2024)Opgørelser for hvert opland danner baggrund for at opgøre total vandafstrømning og kvælstoftransport for hver af de fem regioner. Fordeling af de målte oplande på de fem regioner fremgår af figur 2.3.

3 Klima i Danmark

Gitte Blicher-Mathiesen og Emilie Sofie Lissner, ECOS

Klimaet er defineret som det forventede vejr over en årrække, hvor standard for klimanormaler er gennemsnittet over en 30-årig periode. Den seneste klimanormal er for perioden 1991-2020, som har erstattet klimanormalen for 1961-1990. Disse klimanormaler er beregnet som gennemsnit over målinger i det danske stationsnet. Som gennemsnit for hele landet er der en temperaturstigning på 1,0 °C og en nedbørstigning på 51 mm fra den gamle til den nye klimanormal. For temperatur er der en meget lille forskel mellem vinter- og sommerhalvår (figur 3.1). På månedsbasis ses den største stigning i vintermånederne (december til marts) og sensommeren (juli til august) (figur 3.1).



Figur 3.1. Månedsnormaler for Danmark for temperatur og nedbør for normalperioderne 1961-1990 og 1991-2020.

3.1 Tørke ift. nedbør

Begrebet tørke anvendes bredt, men ikke nødvendigvis entydigt. I nærværende projekt gøres tørkebegrebet mere specifikt for at kunne beskrive, hvilken effekt tørke har på kvælstofudledning og biologi i vandløb. Hertil anvendes et standardiseret nedbørsindeks, Standardized Precipitation Index (SPI), som primært grupperer nedbøren ift. høj og lav nedbør.

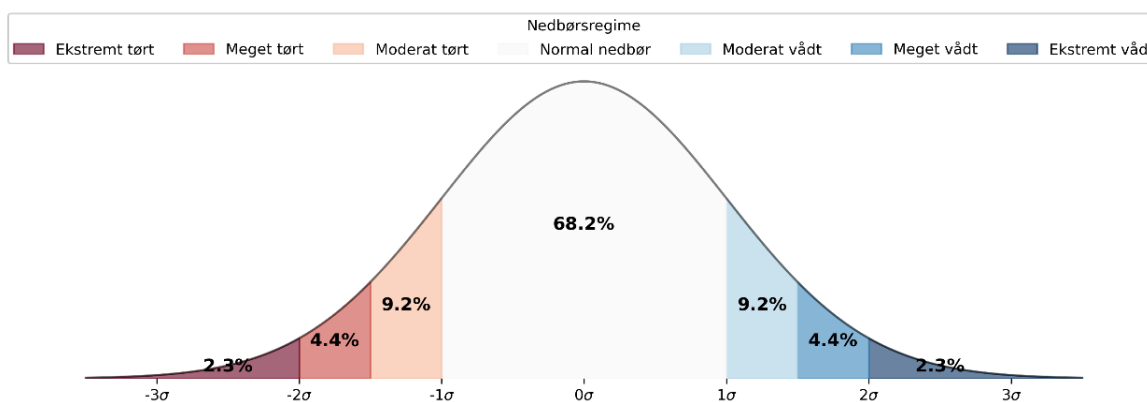
I forhold til kvælstofudledning vil ekstremt vandunderskud ift. at forsyne afgrøder med vand være i fokus. Er vandunderskuddet så stort, at det påvirker afgrødernes udbytneniveau, vil der være et større kvælstofoverskud i jorden, som vil blive udvasket med jordvand til vandløb og senere til kystvande.

Eftersom tørke har betydning for vandføring i vandløb, er det også nyttigt at definere den hydrologiske tørke. Dette gøres i kapitel 4. Den hydrologiske tørke kan medføre, at små vandløb tørrer ud, og det har en afgørende betydning for biologien i vandløb. Dette perspektiveres i kapitel 8.

3.2 Standardized Precipitation Index (SPI)

Standardized Precipitation Index (SPI) blev udviklet i 1993 og bruges bredt til at overvåge og karakterisere tørke. SPI måler afvigelser i nedbør i forhold til det normale for et område og kan identificere både tørke- og våde perioder. For at beregne SPI kræves der en lang tidsserie af månedlige nedbørsmålinger, typisk mindst 30 år, for at sikre pålidelige resultater.

SPI kan beregnes for forskellige tidshorisonter, hvor nedbør akkumuleres over en valgt periode, f.eks. 1, 3 eller 12 måneder. Korte tidshorisonter (fx 1-3 måneder) giver indsigt i forhold som jordfugtighed og vandføringen i små vandløb. Længere tidshorisonter (fx 12-24 måneder) siger mere om ændringer i grundvandsreserver, åer og større vandressourcer. SPI-værdier fortolkes som standardafvigelser, hvor værdier tæt på 0 indikerer normale forhold, mens positive værdier viser våde perioder, og negative værdier viser tørkeperioder (figur 3.2.).



Figur 3.2. Fordeling af nedbørsregimer baseret på SPI-værdier. Kurven viser standardnormalfordelingen, hvor SPI-værdier er grupperet i kategorier fra "Ekstremt tørt" til "Ekstremt vådt". Hver kategori er repræsenteret med et specifikt SPI-interval og den tilhørende sandsynlighed for forekomst

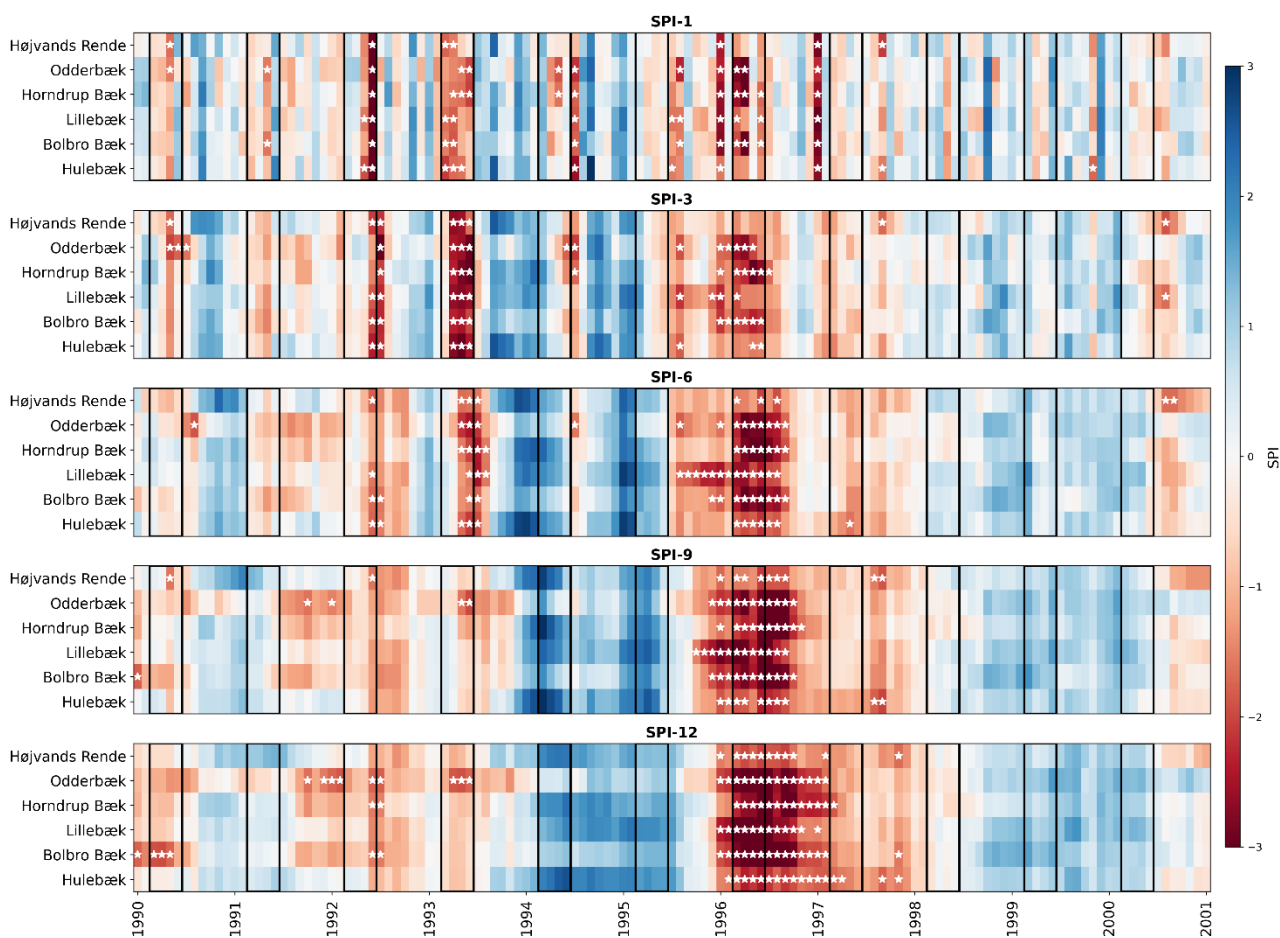
SPI beregnes ved at beskrive de månedlige akkumulerede nedbørsmængder som en gammafordeling, der egner sig til at modellere nedbørsmængder fra forskellige tidsakkumuleringer. For at gøre SPI nemmere at fortolke transformeres gammafordelingen til en standard normalfordeling. Dette opnås ved at matche gammafordelingens kumulative fordelingsfunktion (CDF) til en standard normalfordelings CDF. Resultatet er, at SPI-værdier kan fortolkes på samme måde som z-score i statistikken: Værdier over 2 indikerer ekstremt våde forhold, og værdier under -2 indikerer ekstrem tørke.

SPI er enkel at beregne, da det kun kræver nedbørsdata og ikke afhænger af komplekse modeller. Dette gør indekset tilgængeligt og anvendeligt i mange sammenhænge. Dog har SPI visse begrænsninger, idet det kun fokuserer på nedbørsmængder og ikke inkluderer faktorer som temperatur og evapotranspiration (planternes fordampning) der også påvirker tørkeforhold. For at tage højde for disse faktorer kan et alternativ som Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) anvendes.

Vi har valgt at vise beregnet SPI for de syv LOOP-oplande, da deres placering i henholdsvis Himmerland, Østjylland, Syddjylland, Syd fyn, Midtsjælland og Lolland gør det muligt nogenlunde at belyse gradienter i landets klima og jordbundsforhold.

SPI for LOOP oplande

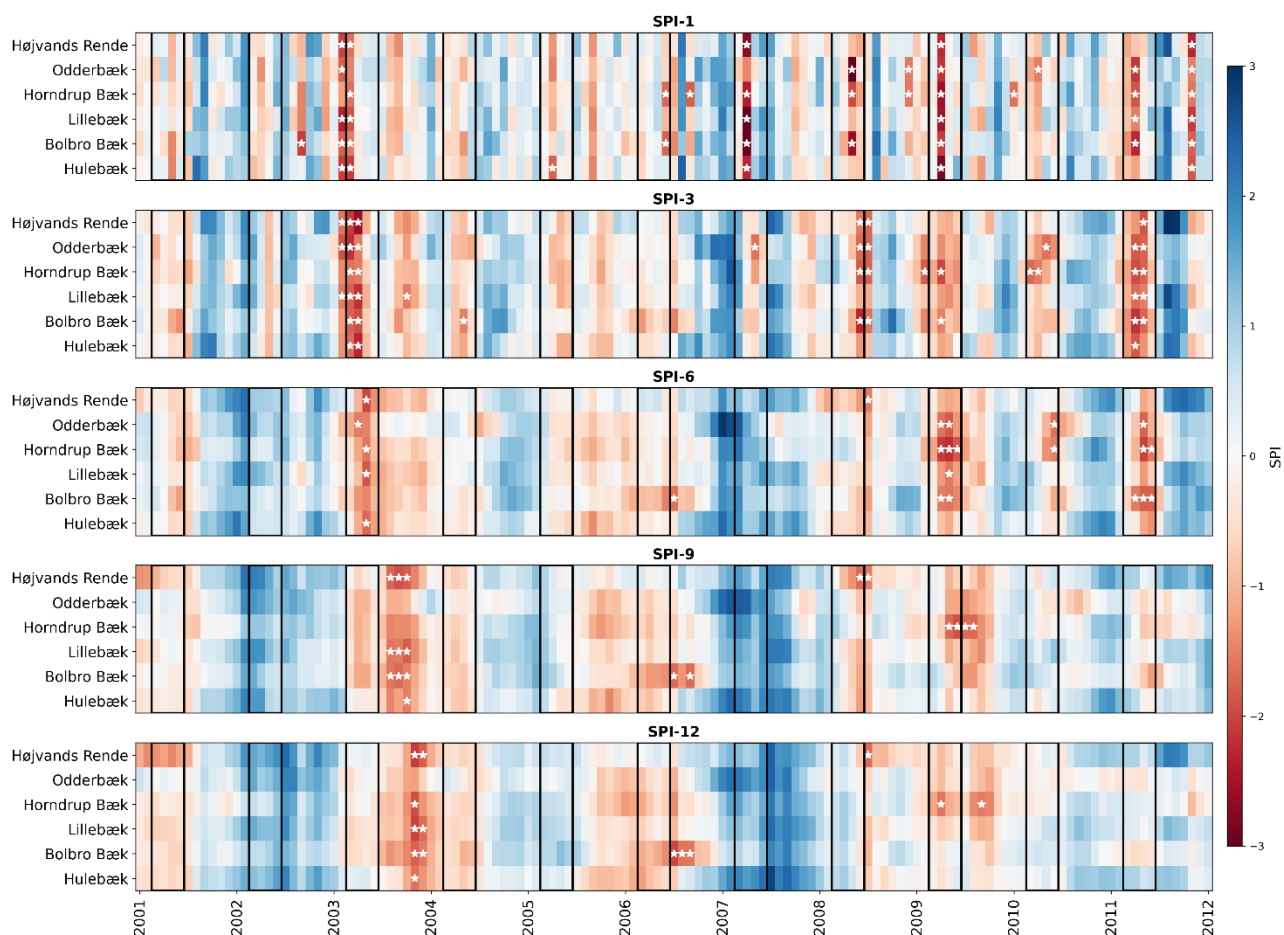
SPI er som beskrevet ovenfor beregnet som akkumuleret nedbør for henholdsvis 1, 3, 6, 9 og 12 måneder for de syv LOOP-oplande i figur 3.3-3.5. Kort med placering af LOOP-oplande er vist i figur 2.1. Generelt optræder tørke i flere måneder, i takt med at nedbøren summeres over flere måneder. Som ovenfor nævnt kan en SPI beregnet som akkumuleret nedbør for én måned, anvendes til at vurdere jordfugtighed, der er relevant for afgrøders vækst, og dermed høstudbyttet (figur 3.2 øverst). Af figur 3.3 ses det, at i alle syv LOOP-oplande blev SPI akkumuleret for en måned for 1992 gradvist mere kritisk i løbet af afgrødernes vækstsæson marts-juni, hvilket er (markeret med lodrette streger på figuren). Desuden ses det, at også månederne før vækstsæsonen i 1992 er forholdsvis tørre. Netop denne kombination giver vandmangel i både grundvandsmagasinerne før og i selve vækstsæsonen i 1992. Også for vækstmånederne året efter, 1993, ses vandmangel, men da månederne før vækstsæsonen er mere fugtige end i 1992, bliver udbyttet ikke presset i samme omfang. Også i juli samt i marts-juli er der lav nedbør, dog ikke helt så ekstremt i Højvads Rende, som i de øvrige LOOP-oplande.



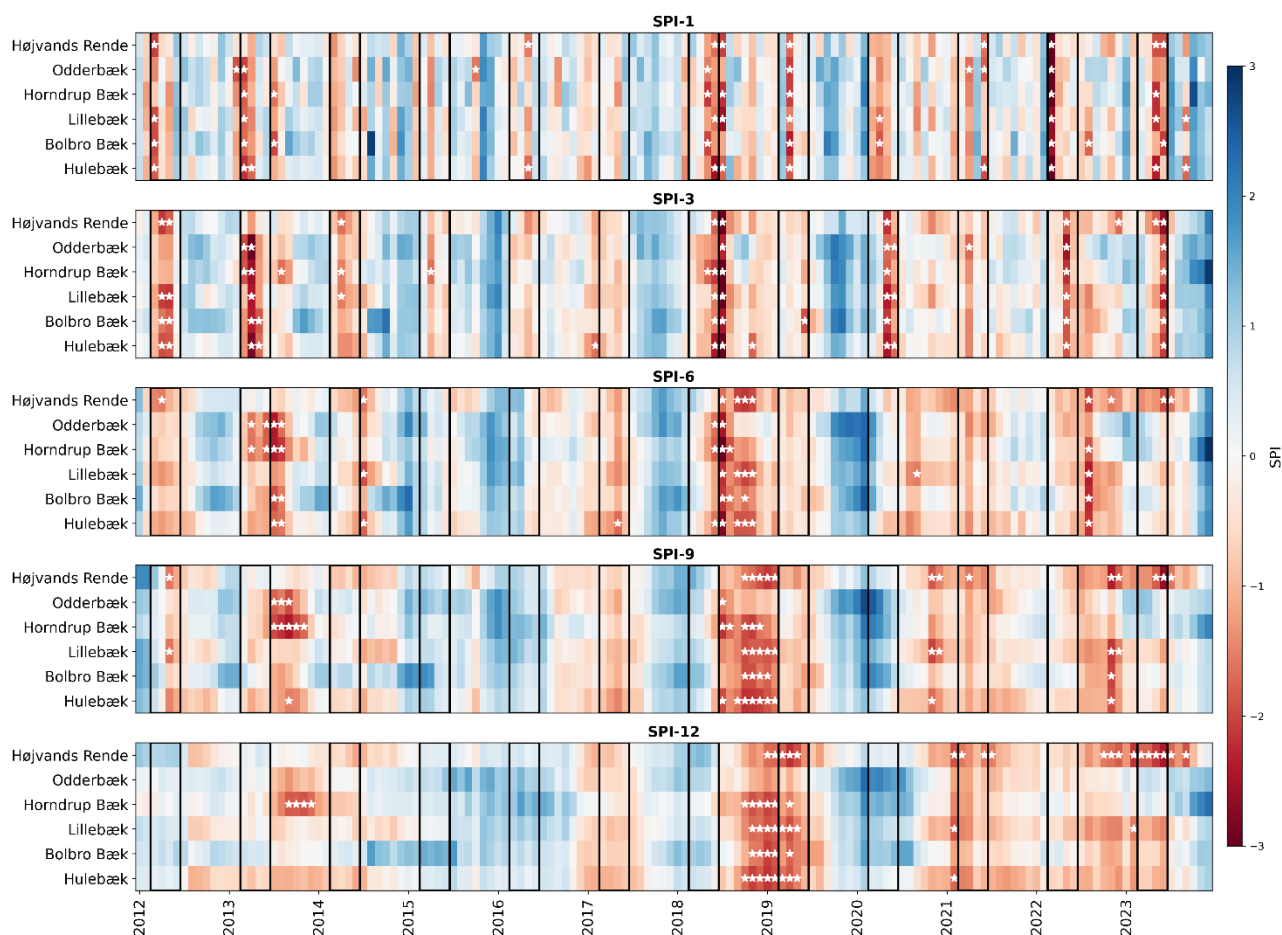
Figur 3.3. Standardized Precipitation Indeks for syv LOOP-oplande akkumuleret for henholdsvis 1, 3, 6, 9 og 12 måneder og for perioden 1990-2001. Meget rød farve indikerer meget tørke og meget blå farve indikerer meget nedbør. Stjerner markerer en SPI på under -1.5, hvilket svarer til meget tørt. Lodrette streger angiver månederne 1. marts og 1. juni og afgrænser afgrødernes primært vækstmåneder.

I perioden 2001-2012 er der lav nedbør i juni og juli i 2003, men her har afgrøderne angiveligt nået at optage tilstrækkeligt vand i månederne forud (figur 3.4). Ellers er det kun sporadisk lav nedbør, der ikke har stor betydning for afgrødevæksten.

I perioden 2012-2023 er der udpræget lav nedbør i april 2012, marts-april 2013, maj-juli 2018, april 2019, marts 2022 og maj-juni 2023, som rammer lidt



Figur 3.4. Standardized Precipitation Indeks for syv LOOP-områder og SPI beregnet som summeret nedbør for henholdsvis 1, 3, 6, 9 og 12 måneder og for perioden 2001-2012. Meget rød farve indikerer meget tørke og meget blå farve indikerer meget nedbør. Stjerner markerer en SPI på under -1.5, hvilket svarer til meget tørt. Lodrette streger angiver månederne 1. marts og 1. juni og afgrænser afgrødernes primært vækstmåned.



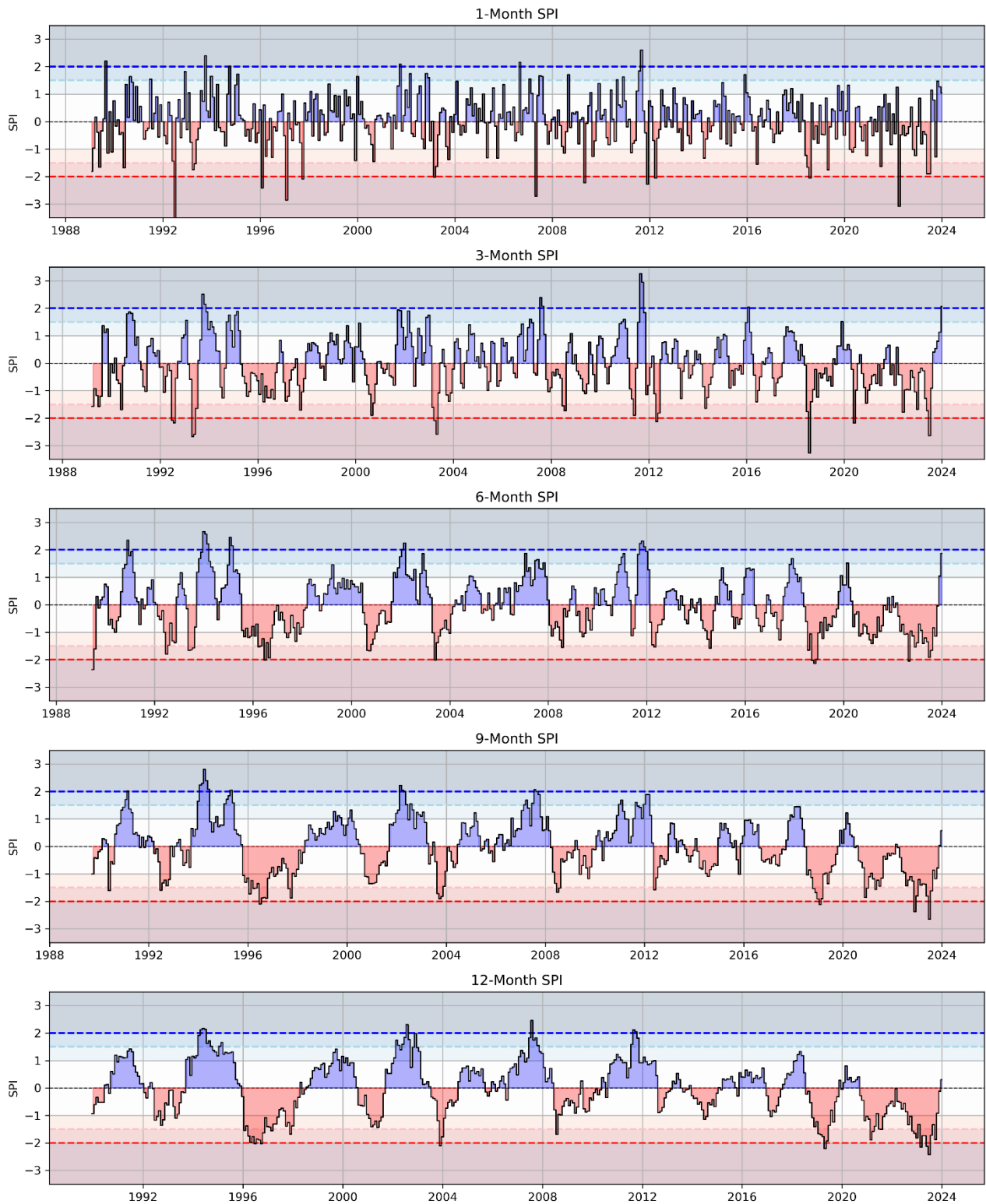
Figur 3.5. Standardized Precipitation Indeks for syv LOOP-område for perioden 2012-2023 og SPI beregnet som summeret nedbør for henholdsvis 1, 3, 6, 9 og 12 måneder og for perioden 2012-2023. Meget rød farve indikerer meget tørke og meget blå farve indikerer meget nedbør. Stjerner markerer en SPI på under -1.5, hvilket svarer til meget tørt. Lodrette streger angiver månederne 1. marts og 1. juni og afgrænser afgrødernes primært vækstmåned.

Forskelligt imellem oplandene. Højvands Rende har lav nedbør i både maj og juni 2023, mens Bolbro Bæk kun har lav nedbør i juni og i de øvrige oplande kun i maj 2023. Også for 2023 ses lave nedbørsforhold i månederne før vækstsæsonen.

I figur 3.6-3.12 er SPI plottet for hvert af de syv LOOP-område. For Højvands Rende er SPI opgjort som den akkumulerede nedbør pr måned under -3, altså ekstremt tørt, i marts 1992 og marts 2018. Desuden ses en udpræget tørkepåvirkning af grundvandsmagasinerne i årene 2019-2023 (se SPI akkumuleret for 12 måneder, figur 3.5 nederst).

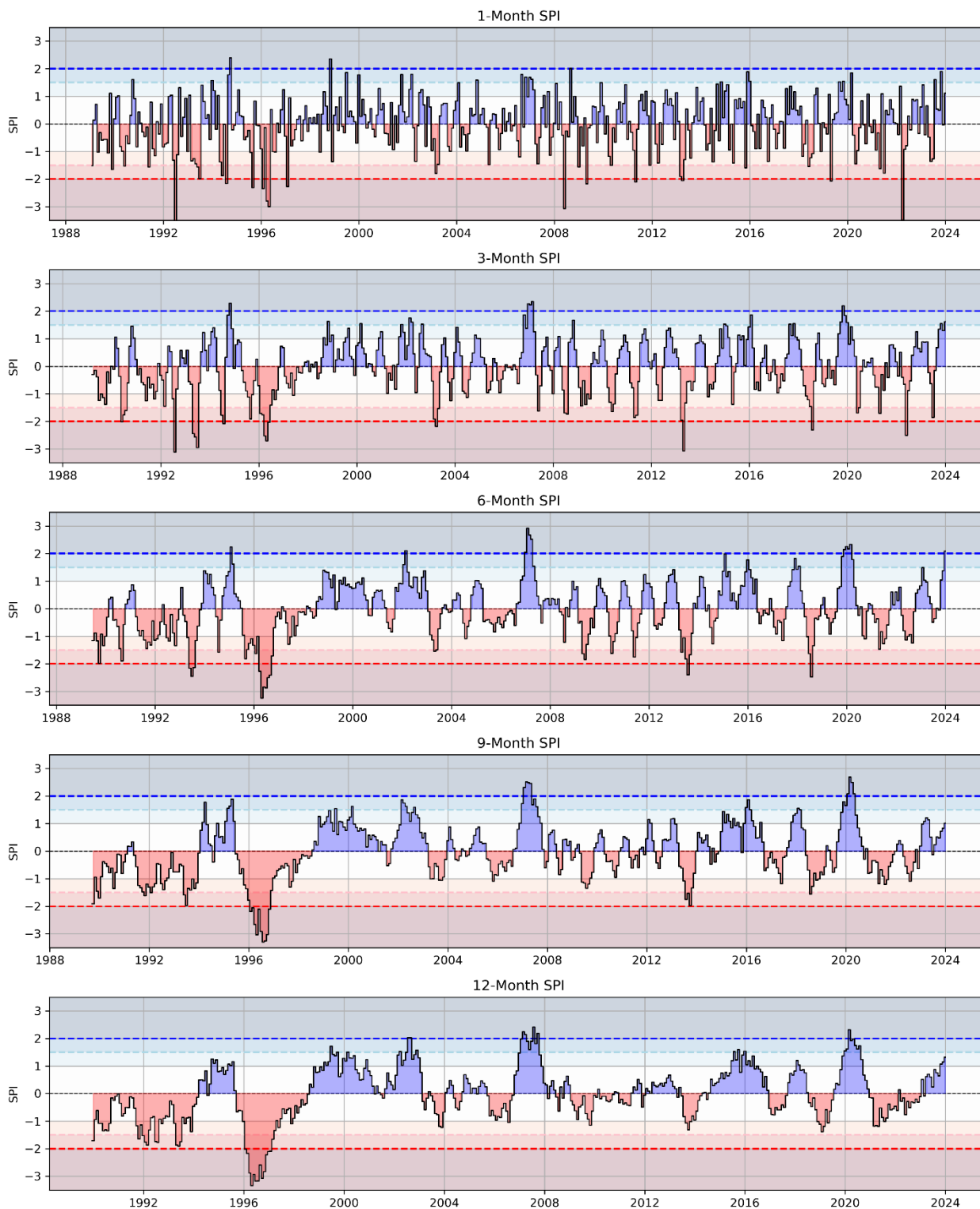
Samme ekstremt lave SPI (> -3) opgjort som den akkumulerede nedbør per måned ses for Oddebæk i Himmerland for marts 1992 samt marts 2023 (figur 3.6,) men ikke for marts 2018.

Højvands Rende (Lolland)



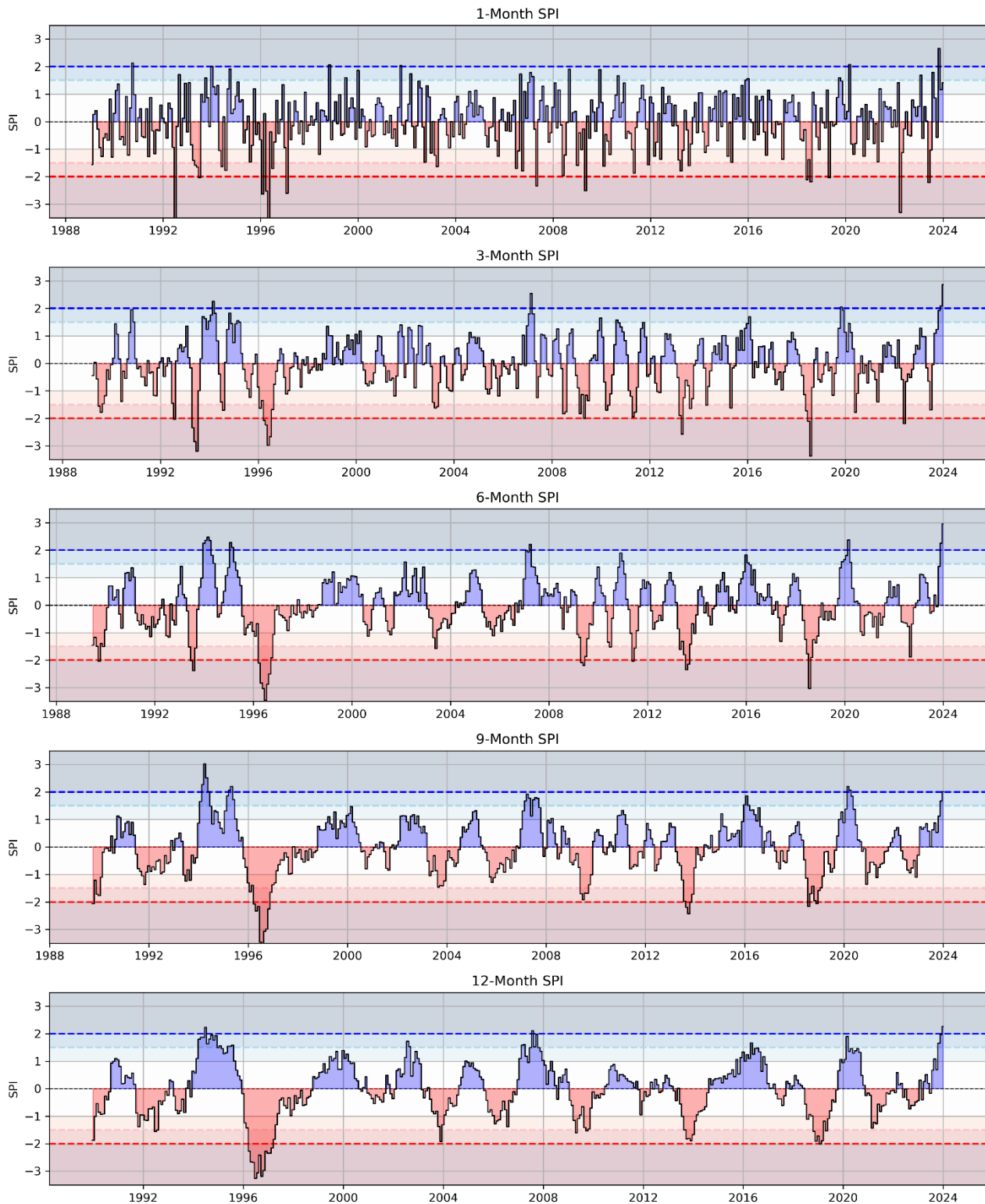
Figur 3.6. Standardized Precipitation Index for Højvands Rende på Lolland, og SPI beregnet som summeret nedbør for henholdsvis 1, 3, 6, 9 og 12 måneder og for perioden 1990-2023.

Odderbæk (Nordjylland)



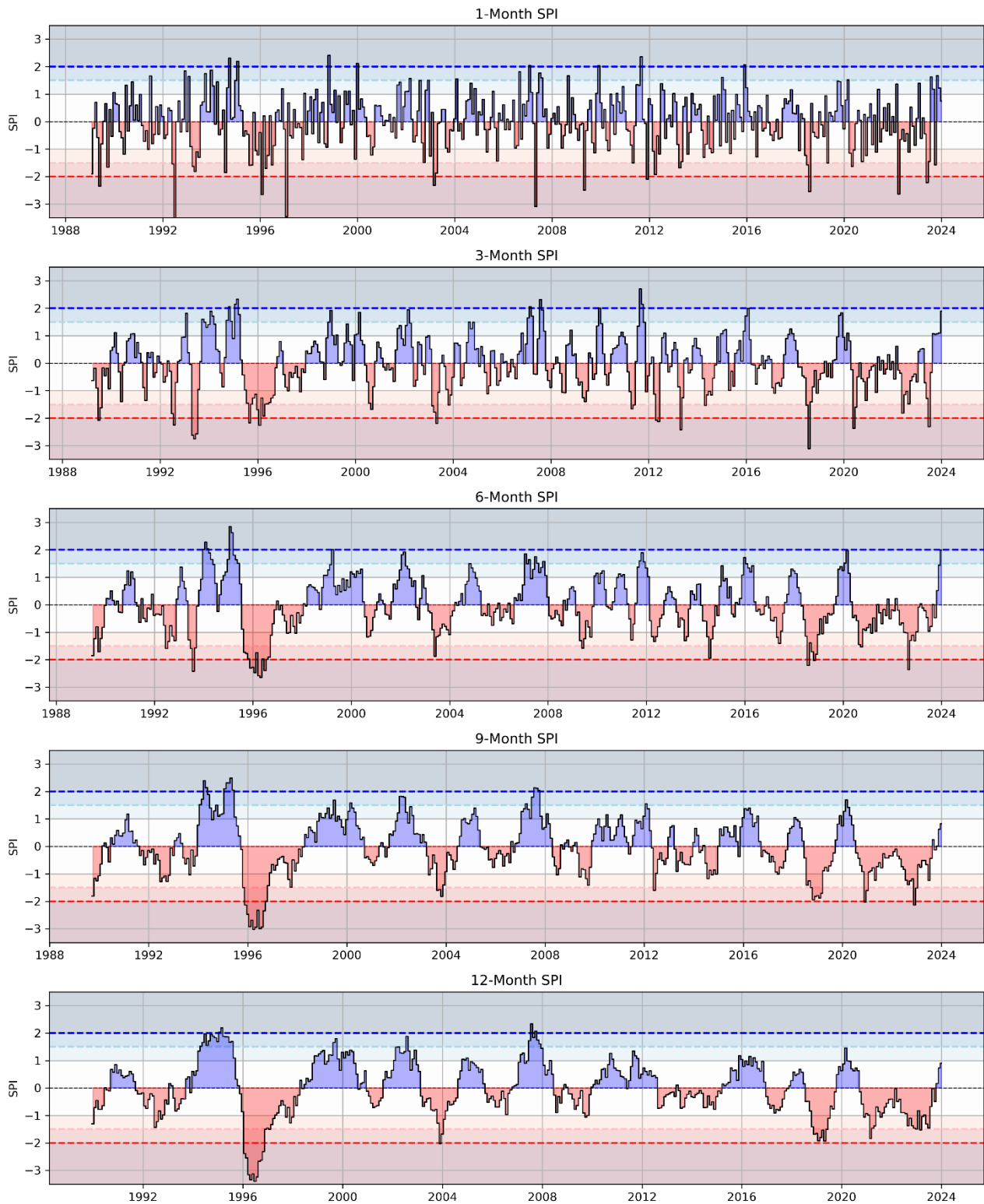
Figur 3.7. Standardized Precipitation Index for Odderbæk i Himmerland, og SPI beregnet som summeret nedbør for henholdsvis 1, 3, 6, 9 og 12 måneder og for perioden 1990-2023.

Horndrup Bæk (Østjylland)



Figur 3.8. Standardized Precipitation Index for Horndrup bæk, Østjylland, og SPI beregnet som summeret nedbør for henholdsvis 1, 3, 6, 9 og 12 måneder og for perioden 1990-2023.

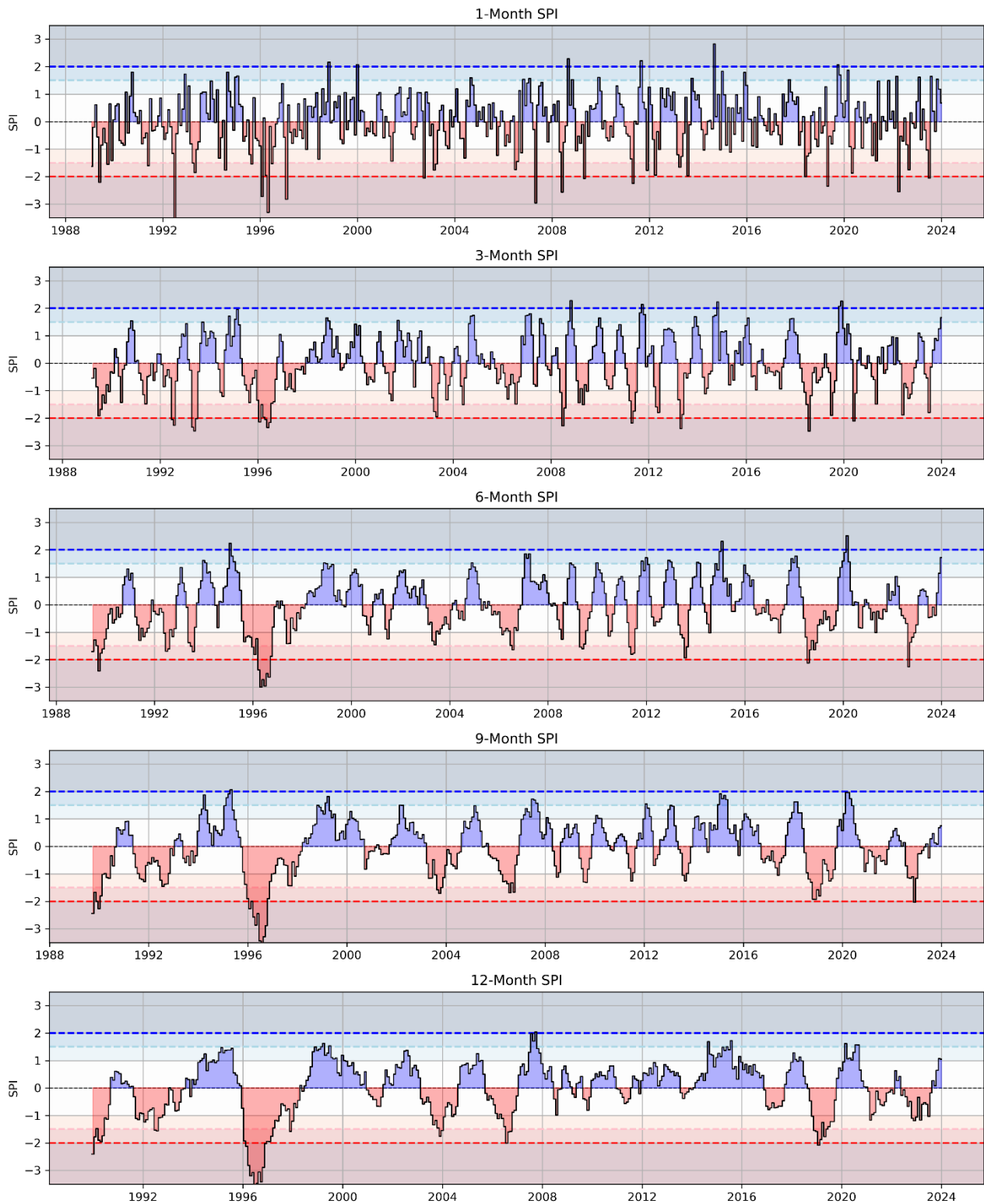
For Horndrup Bæk ses ligeledes et ekstremt lavt månedsvist akkumuleret SPI (øverste figur) på mindre end -3 for marts-april 1992 og for vintermånederne 1995/96, men ikke for 2018, men derimod igen for marts 2023 (figur 3.7).



Figur 3.9. Standardized Precipitation Index for Lillebæk på Sydfyn, og SPI beregnet som summeret nedbør for henholdsvis 1, 3, 6, 9 og 12 måneder og for perioden 1990-2023.

For Lillebæk ses ligeledes et ekstremt lavt månedsvist akkumuleret SPI (øverste figur) på mindre end -3 for marts-april 1992 og for vintermånederne 1995/96, men ikke for 2018, men derimod for marts 2023 (figur 3.8).

Bolbro Bæk (Sønderjylland)



Figur 3.9. Standardized Precipitation Index for Bolbro Bæk i Sønderjylland og SPI beregnet som summeret nedbør for henholdsvis 1, 3, 6, 9 og 12 måneder og for perioden 1990-2023.

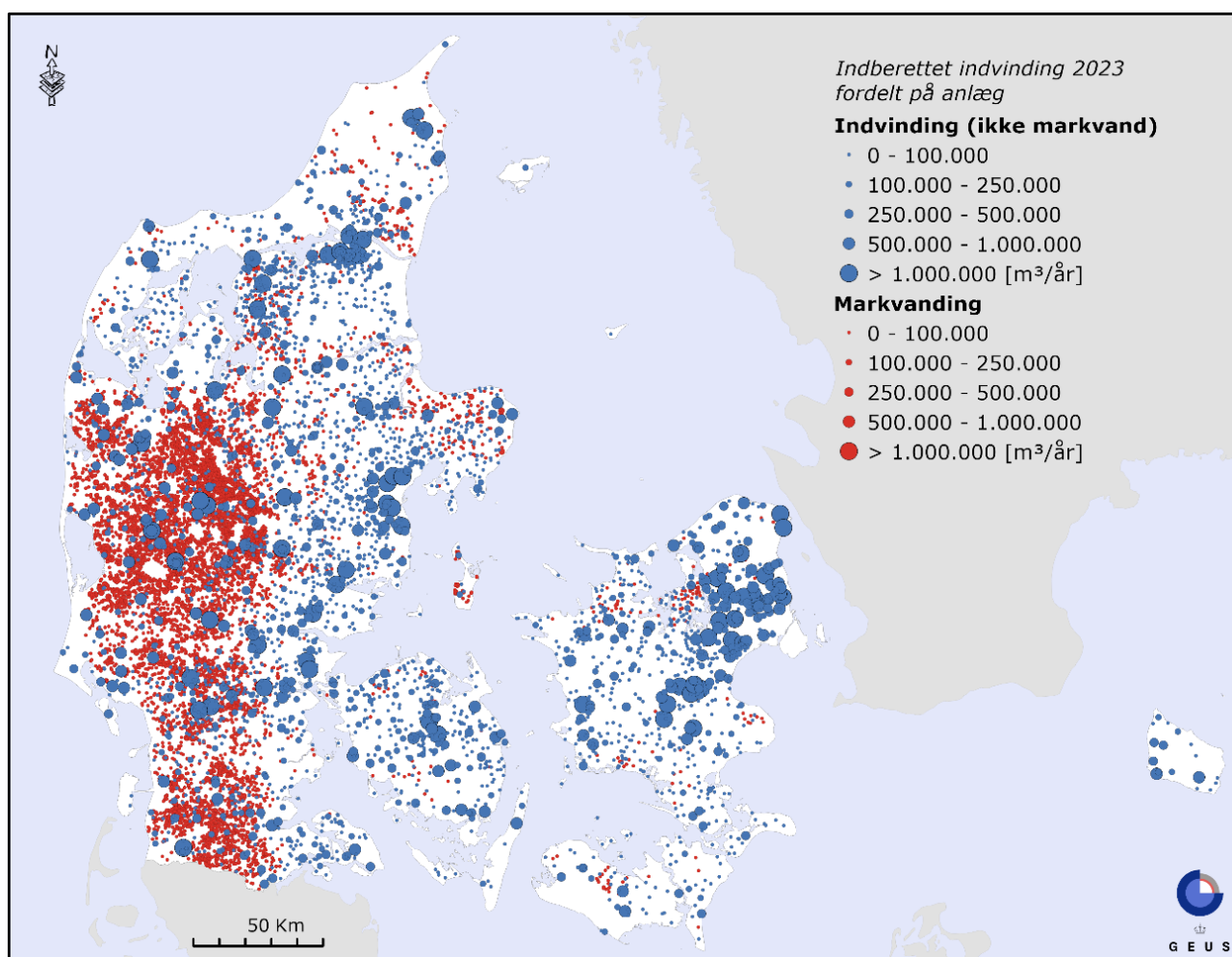
For Bolbro Bæk ses ligeledes et ekstremt lavt månedsvist akkumuleret SPI på mindre end -3 for marts-april 1992 og for vintermånederne 1995/96, men ikke for 2018, men derimod for marts 2023 (figur 3.9).

4 Hydrologisk tørke

Ida Karlsson Seidenfaden, Lars Trolldborg, Maria Ondracek, GEUS

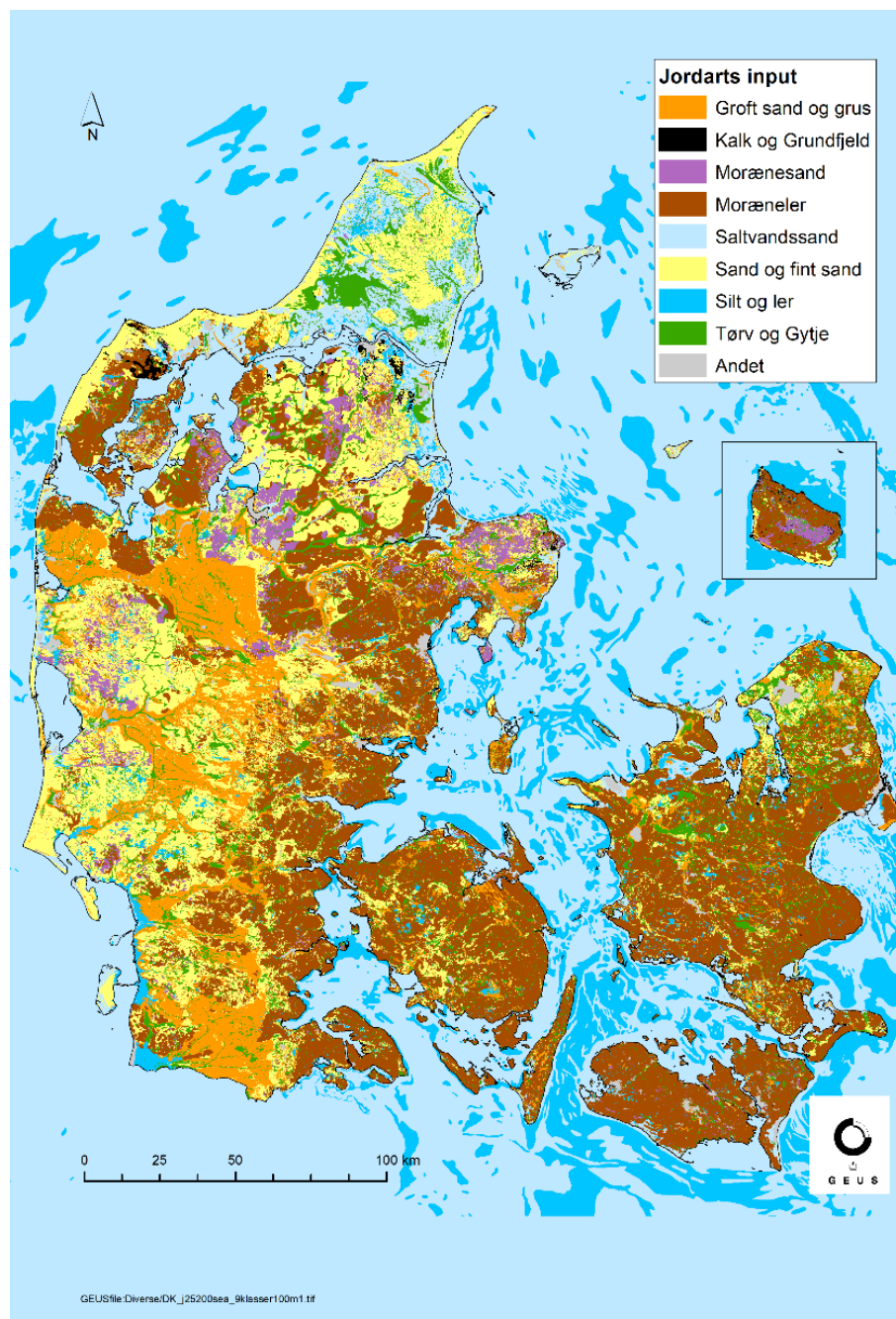
4.1 Markvanding og grundvandsmagasiner og vandløb

Markvanding i Danmark foregår hovedsageligt ved grundvandsoppumpning fra landmandens egne indvindingsboringer, og er dermed afkoblet fra det kommunale vandforsyningsnet som varetages af vandselskaberne. Markvanding er underlagt indvindingstilladelser, der udstedes af kommunerne. Tilladelser gives på baggrund af undersøgelser af vandingsbehovet, den tilgængelige ressource og vandløbspåvirkningen. I tørkeperioder er det muligt for landmændene at søge om ekstraordinære tilladelser til vanding. Disse særlige markvandindvindings korttidstilladelser gives på op til tre måneder. Ifølge vandindvindingsbekendtgørelsens § 17, skal der være tale om ekstraordinære vejr-situationer, hvor der søges om øget indvinding af grundvand fra eksisterende vandindvindingsanlæg, og vandet skal bruges til vanding af landbrugsafgrøder. Oppumpede vandingsmængder indberettes hvert år til Jupiter (GEUS, 2024) som årlige gennemsnit. Det er ikke muligt at se i Jupiter, om der ligger specielle korttidstilladelser i forhold til markvandsindvindingen.

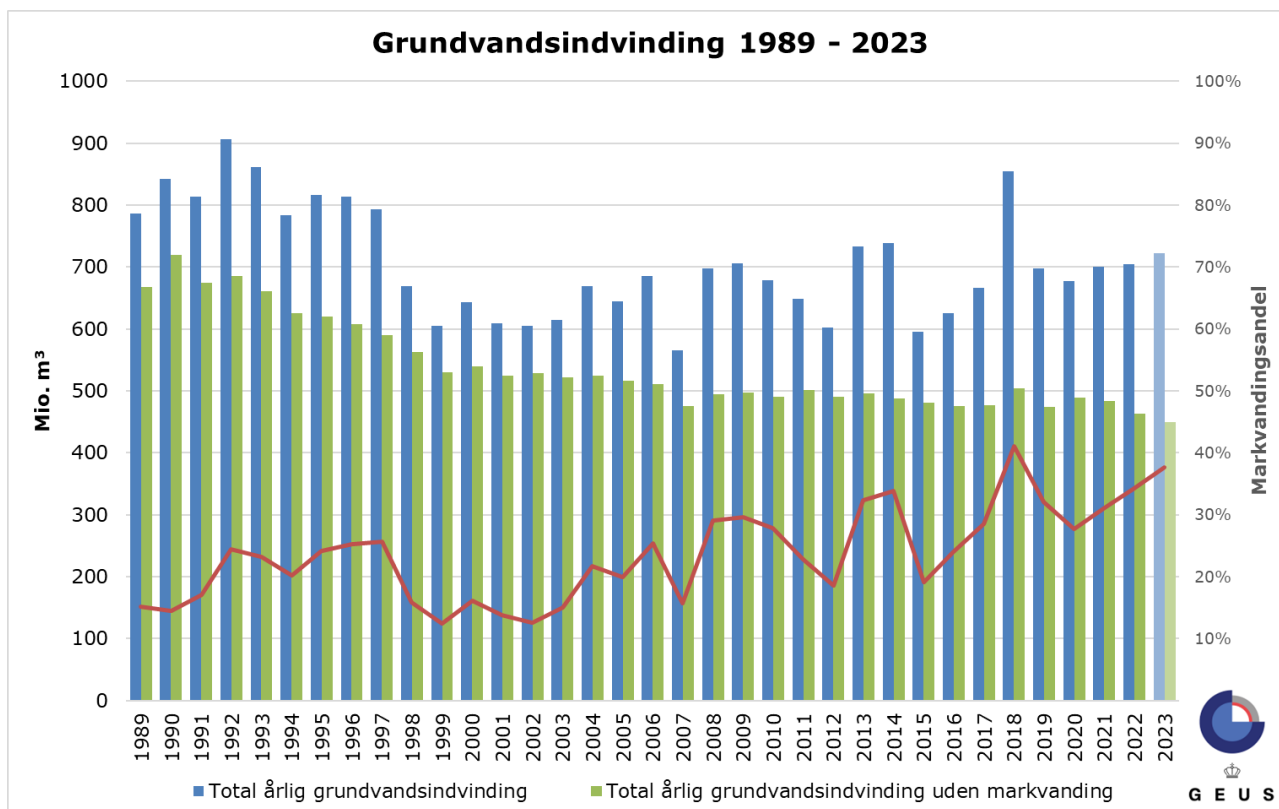


Figur 4.1. Placering af indvindingsanlæg og indvindingsstørrelse (figur hentet fra seneste GRUMO-rapport (Thorling et al., 2024). Markvandingens anlæg er typisk af mindre indvindingsstørrelse og placeret vest for hovedopholdslinjen, mens de store vandforsyningsanlæg typisk ligger rundt om de store byer.

Figur 4.2. Jordartskort over Danmark (gengivet med tilladelse fra (Henriksen et al., 2023a).



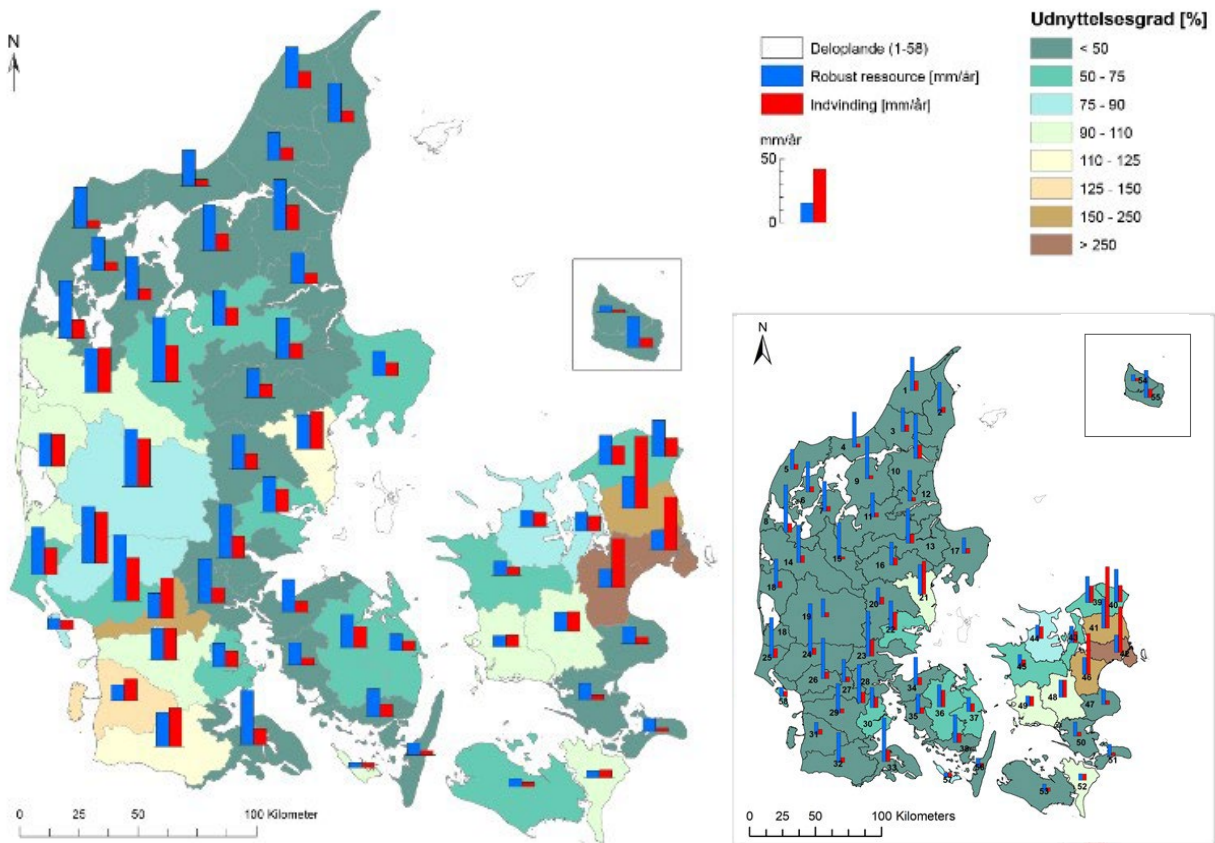
Der gives primært tilladelser til vanding i Jylland (figur 4.1), hvilket skyldes et øget behov for vanding pga. sandede jorde (figur 4.2). Der findes omkring 20.000 markvandingsboringer i Jylland, mens der på Fyn og Sjælland inkl. Øerne kun eksisterer ca. 140 og 540 markvandingsboringer.



Figur 4.3. Årgennemsnit af samlet indberettet grundvandsindvinding med og uden markvanding for perioden 1989-2023 samt opgørelse af markvandsandelen af den samlede indberettede indvinding (røde kurve), reproduktion af figur fra seneste GRUMO-rapport (Thorling et al., 2024).

Figur 4.3 viser de indrapporterede grundvandsindvindingsmængder opgjort pr. år med og uden markvanding for de seneste 34 år. Her ses tydeligt tørken i 2018, hvor der blev indvundet væsentligt mere vand til markvanding end gennemsnittet for hele perioden. Ligeledes er 2023 et år med højt markvandsforbrug, mens tørkerne i 1992, 1996 og 1997 ikke skiller sig mærkbart ud. Her skal det dog bemærkes, at vandingsmængder kan afhænge af vandingskapaciteten og -infrastrukturen hos den enkelte landmand. I forhold til de omkringliggende år, var de samlede oppumpede mængder disse år dog højere end normalt, hvilket antyder et øget behov i forhold til kapacitet på dette tidspunkt. Helt overordnet forventes det at tallene for markvanding før kommunalreformen 2007 er behæftet med større usikkerhed end i de senere år.

DK-modellen (<https://vandmodel.dk/>) bruges blandt andet til vandressourceopgørelsen, den detaljerede afrapportering kan ses i (Henriksen et al., 2023a), og mere information om DK-modellen kan findes i (Højberg et al., 2013; Stisen et al., 2019). DK-modellen simulerer også markvanding. Vandingsmodulet er her baseret på vandingsbehov således, at vanding igangsættes i modellen afhængigt af jordens vandindhold. Indrapporterede markvandsmængder fra Jupiter indgår også i kalibreringen af DK-modellen, således at det tilstræbes, at de årlige mængder rammes bedst muligt (Henriksen et al., 2021). Kalibreringsparametrene er primært start og stop kriterier for vanding, vandingslængde og et vandindvindingsloft. I DK-modellen er det kun markvanding i Jylland, der er modelleret efter behov; for resten af landet er markvandsboringer indlagt i modellen med indberettet indvinding.



Figur 4.4. Resultat af ressourceopgørelse for alle vandindvindinger (ALT) for 58 deloplande. Med farvetoner er vist udnyttelsesgrad baseret på indvindingens %-del af opgjort tilgængelig ressource. I den lille figur nederst til højre er det samme vist, blot for VF-scenariet (vandforsyning) (Henriksen et al., 2023a).

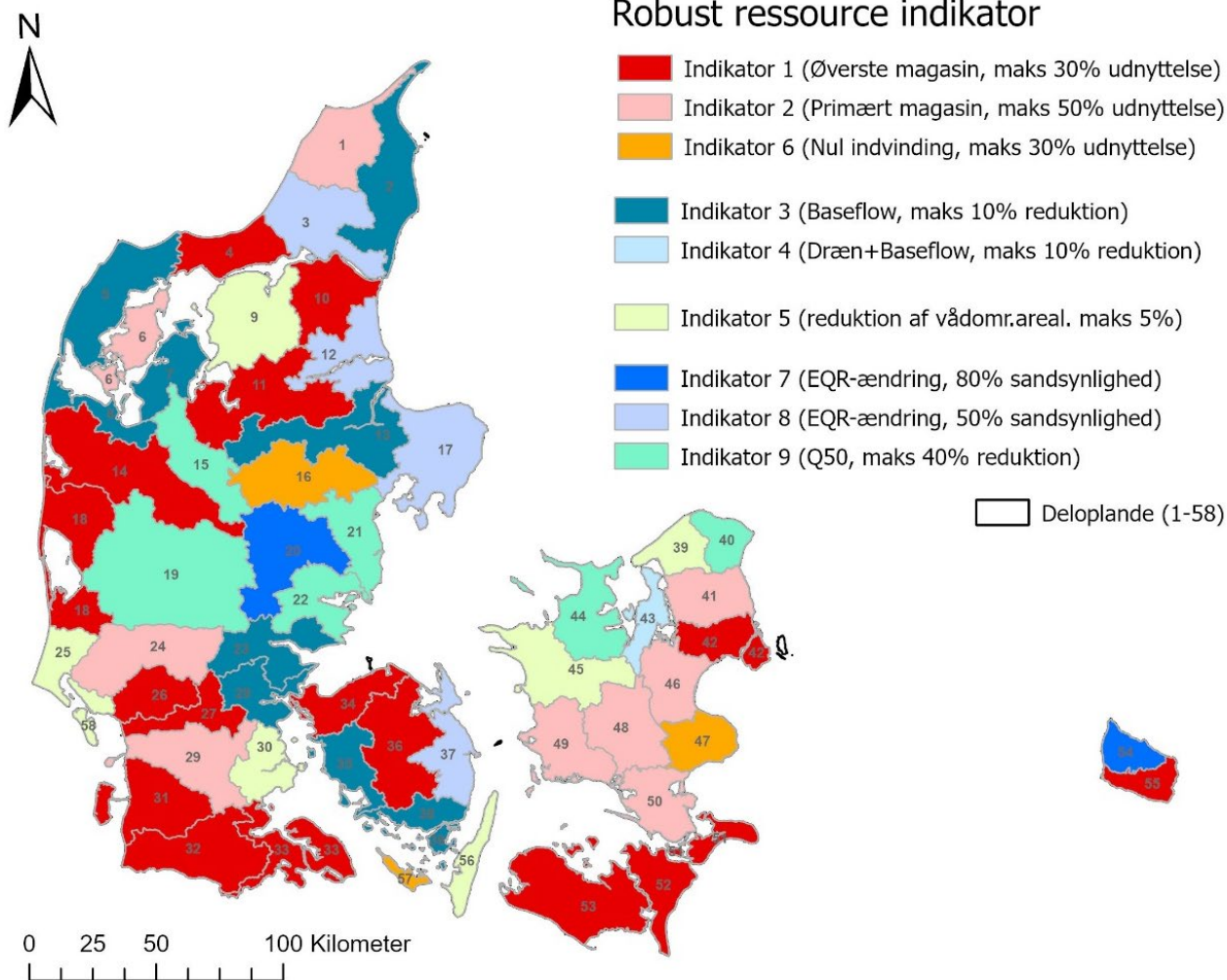
I ressourceopgørelsen er den tilgængelige grundvandsressource estimeret på baggrund af et ensemble af indikatorer samt modelberegninger med DK-modellen for scenarier, 0-50-100-150-200-300 % af den nuværende indvinding (middelværdi for perioden 2017-2021) for henholdsvis alle vandindvindinger, inkl. markvanding og industri (ALT) og almene vandindvindinger til vandforsyninger (VF). Alle de hydrologiske beregninger, og dermed også statistikken, der ligger til grund for ressourceestimatet, er gennemført med klimadata for perioden 1991-2020 (den seneste klimanormal). Beregningen af den robuste ressource tager med andre ord udgangspunkt i en normal situation, hvor de klimatiske variationer, som også påvirker vandindhold i rodzonen, afstrømning, dybde til grundvandet og grundvandsdannelse, er inkluderet. De ni indikatorer, som anvendes for at estimere den tilgængelige grundvandsressource, afspejler potentielle udfordringer relateret til magasin-bæredygtighed, naturlig forurening, og påvirkning af vandløb og vådområder. Det er i opgørelsen af den robuste ressource valgt at anvende det næstmindste ressourceestimat blandt de ni indikatorer for hvert delopland, som hver især giver ret forskellige bud på ressorens størrelse i forskellige dele af landet (figur 4.5). For en nærmere beskrivelse henvises til (Henriksen et al., 2023a).

Landsgennemsnittet for den tilgængelige vandressource er opgjort til 1,1 mia. m³/år for hele landet (Henriksen et al., 2023a), og indberettet indvinding til markvanding udgør typisk 20-30 % af den samlede indvinding (figur 4.3). Af figur 4.4A fremgår den geografiske spredning for robust ressource, indvinding og udnyttelsesgraden inden for hvert delopland. Figuren viser, hvordan den tilgængelige robuste ressource (blå søjle) er generelt større i Jylland,

særligt i Vestjylland, i forhold til ressourcens størrelse på Fyn, Sjælland og Øerne. Opgørelsen viser også, at der flere steder i Danmark er udnyttet mere end 100 % af den bæredygtige ressource, særligt omkring de store byer. Gennemsnitligt for hele landet er udnyttelsesgraden opgjort ift. udnyttelig ressource beregnet til 66 %. Ud fra den overstående analyse er det ikke umiddelbart muligt at udregne direkte, i hvilken grad markvanding har påvirket grundvandsressourcen, da påvirkningen fra markvanding indgår sammen med de andre indvindinger i scenarierne (ALT), og som nævnt er markvanding behovsbaseret i modellen.

Fra ressourceopgørelsen, hvor der udelukkende ses på almene vandforsyninger (VF) (kortudsnittet på figur 4.4B), kan det ses, at udnyttelsesgraden falder kraftigt for de markvandingstunge områder i Vestjylland, hvor den mange steder falder til under 50 %. Dette viser dels, at markvanding udgør en betydelig del af den samlede indvinding i disse områder, langt over de 25-35 % på landsgennemsnit, dels at der til trods for dette stadig er et råderum op til den robuste ressource grænse i de fleste områder. For områderne omkring storbyerne er der allerede en beregnet overudnyttelse ift. den robuste ressource, og dermed ikke umiddelbart et råderum til yderligere markvandingstilladelser. For den sydlige del af Jylland er udnyttelsesgraden opgjort til 90-150 % med markvanding (figur 4.4A), hvilket indikerer, at der i dette område er en betydelig påvirkning som følge af indvindingen. Ved nærmere gennemgang af de ni indikatorer, der fremgår af figur 4.5, ses det, at særligt indikator 1, 2 og 6, der relaterer sig til magasin-bæredygtighed (potentielle udfordringer med naturlig forurening, som fx arsen og nikkel), begrænser størrelsen af den robuste ressource. Udfordringer med naturlig forurening optræder typisk som følge af iltning af særlige geologiske enheder eller kraftig indvinding i nærheden af saltvand, og de vil som sådan være lokale, specifikke udfordringer, der skal tages stilling til i arbejdet med indvindingstilladelser.

Ud over de generelle ressource-betragtninger vil der være lokale sænkninger relateret til indvindinger, som kan påvirke vandløb, søer og vådområder eller Natura2000 områder lokalt. Disse forhold indgår sædvanligvis i arbejdet med indvindingstilladelser, men er sværere direkte at vurdere med den Nationale Hydrologiske Model, primært fordi variation i den lokale geologiske heterogenitet typisk ikke er repræsenteret i modellen, og sekundært fordi modelskalaen er sammenlignelig med de relaterede påvirkninger for små indvindingsmængder, fx et typiske markvandingsanlæg.

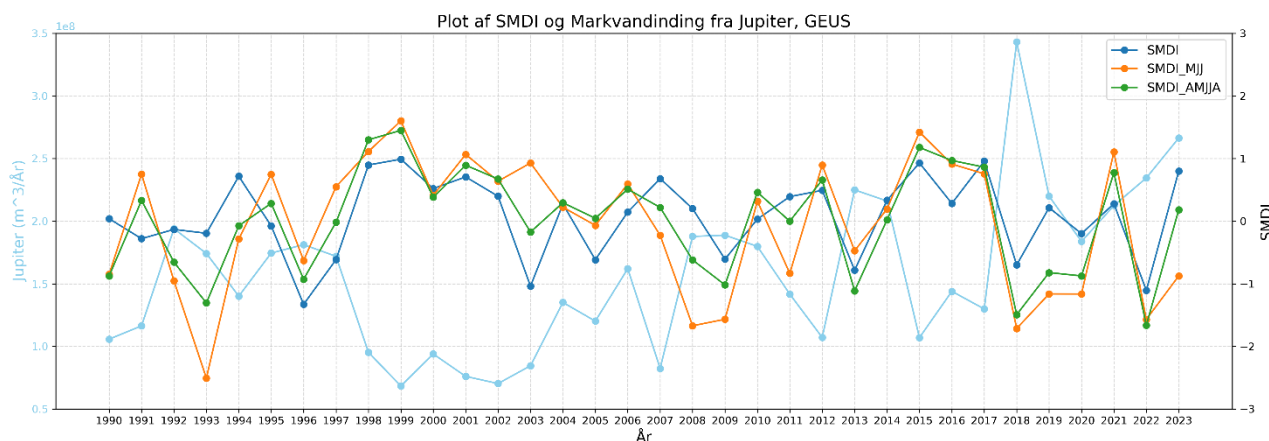


Figur 4.5. Indikator, der definerer robust ressource (næstmindste estimat af ressourcen for ALT scenariet for hvert af de 58 deloplande), gengivet med tilladelse fra (Henriksen et al., 2023a). Indikatorerne 1, 2 og 6 beskriver grundvandsmagasinet's egen bæredygtighed, 3 og 4 vandløbspåvirkningen, 5 beskriver påvirkningen af vådområder, mens 7, 8, og 9 vandløbspåvirkningen i forhold til økologisk flow.

I prognosesammenhæng kunne det være relevant at se på DK-modellens fremskrivninger af markvanding og markvandingsbehov, fx. før en kommende vækstsæson. Det kan gøres ud fra den modellerede vandingsmængde i DK-modellen kørt i prognosetilstand, men det er også muligt at bruge hydrologiske indeks. DK-modellen anvendes i tørkeprojektet til at udregne hydrologiske indeks for de forskellige dele af det hydrologiske kredsløb (Seidenfaden et al., 2024). De hydrologiske indeks beskriver den statistiske afvigelse fra normalen for årstiden, og er dermed en udregning af anomalien i de forskellige dele af det hydrologiske system (Henriksen et al., 2022). De hydrologiske indeks beregnes i realtid med DK-modellen og udstilles dagligt (<https://dennationalehydrologiskemodel.dk/dk-modellen-i-anvendelse/hydrologiske-indeks>).

Indeks for jordvandstørke (*Soil Moisture Deficit Index*, SMDI, Narasimhan and Srinivasan, 2005) antages at være det mest relevante at korrelere til vandingsmængder, se eksempel i afsnit 4.2. Indekset beskriver anomalier i jordfugtighed, og da vandingen primært finder sted i sommerhalvåret, kan korrelationen mellem SMDI i disse måneder udregnes. Her ses det, at Pearson-korrelationen for april-august (SMDI-AMJJA) giver -0,62, mens det for de mest intense vandingsmåneder maj-juli (SMDI-MJJ) giver -0.6. SMDI for hele året har en korrelationsværdi på -0.41. SMDI-værdierne for sommeråret har således

en vis prædiktiv evne for markvandsmængderne indrapporteret til Jupiter. Det er dog muligt, at andre variabler, fx varighed eller alvorlighed af jordvandtørken, udviser større korrelation til markvandsmængder. Det skal også nævnes, at vandingen implementeret i DK-modellen naturligt nok delvist udligner eller afbøder den værste tørke i flere områder, og det kan også medvirke til lavere korrelation til SMDI i denne analyse. Disse overstående emner bør undersøges nærmere i fremtidige tørkeprojekter.



Figur 4.6. Sammenholdning af SMDI og indrapporteret indvinding til markindvinding (lyseblå kurve, venstre y-akse). Negative SMDI-værdier indikerer jordvandtørke, her vil man forvente at markvanding er høj.

4.2 Effekter af tørke på vandløb og grundvand

Dette afsnit indeholder opsummerende information og figurer fra temarapporten om hydrologisk tørke (Seidenfaden et al., 2025), særligt mht. grundvandsmagasiner og påvirkning af vandløb i forbindelse med tørke. For detaljeret information om tilgangen til tørkeanalyserne henvises til denne rapport. Det er dog i denne sammenhæng vigtigt at nævne, at tørke her behandles som et klimastyret naturfænomen og ikke dækker fx en udtørring eller vandmangel som følge af overudnyttelse af vandressourcen (Stahl et al., 2020; Tallaksen and Van Lanen, 2024; Van Loon, 2015).

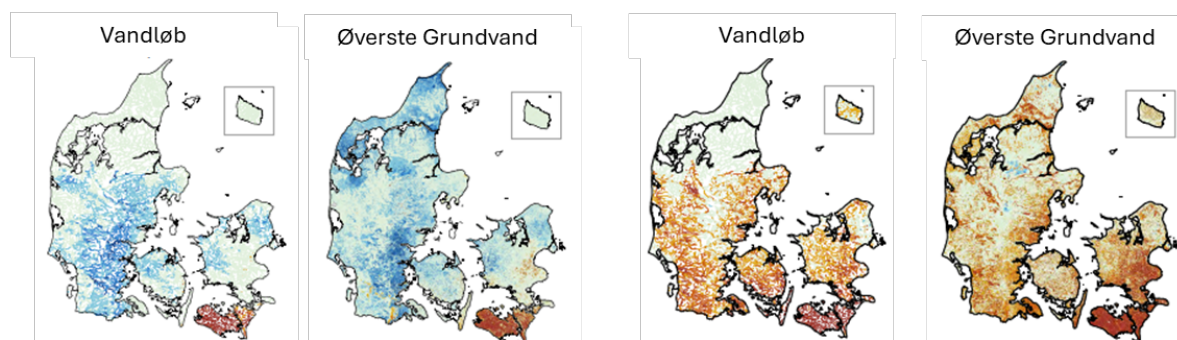
I tørkeprojektet er der, som nævnt i overstående afsnit, igennem analyserne foretaget af GEUS udregnet flere hydrologiske indeks. Disse hydrologiske indeks beskriver anomalier i en række hydrologiske variabler og kan bruges til at vise sammenhænge mellem forskellige dele af det hydrologiske system (Henriksen et al., 2022). Det er dermed et stærkt værktøj til fx at spore tørkens udbredelse i tid og rum gennem vandets kredsløb. De hydrologiske indeks, der er valgt i forbindelse med dette projekt, er alle standardiserede indeks (Mishra and Singh, 2010), hvilket betyder, at de på forskellig vis er "normaliseret" i forhold til deres egen statistik igennem årsforløbet. Afvigelser i indeks fra normalen er dermed et udtryk for afvigelse i statistikkerne med en eller flere standardafvigelser.

De relevante indeks i denne sammenhæng er *Standardized Precipitation Index* (SPI, McKee et al., 1993) for nedbør, *Streamflow Deficit Index* (SDI, Nalbantis and Tsakiris, 2009) for vandløb og *Standardized Groundwater Deficit Index* (SGDI, Bloomfield and Marchant, 2013 & Bhuiyan et al., 2006) for grundvand, hvor der skelnes mellem SGDI_{øvre} og SGDI_{dyb} for henholdsvis det øvre og nedre grundvand. Indeksene kan udregnes for både observationer og modelresultater, men er i denne sammenhæng brugt på simuleringsresultater fra DK-modellen, for at sikre et ensartet og nationalt dækkende output.

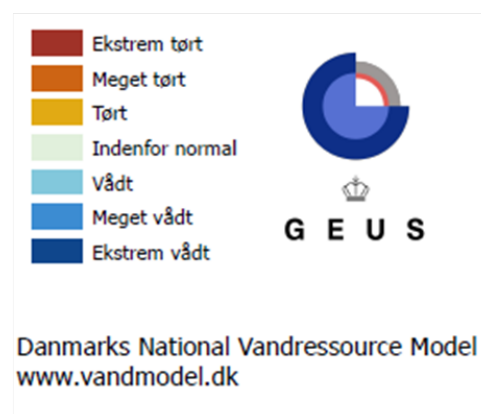
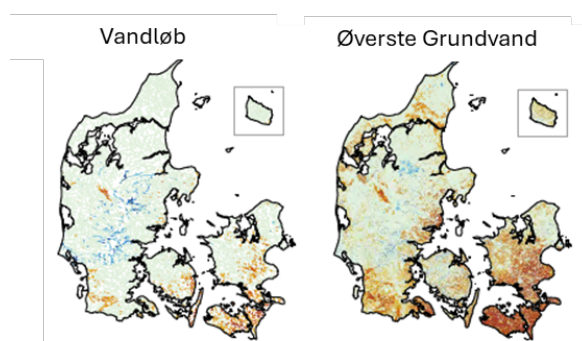
Figur 4.7. viser et eksempel på udviklingen af for-sommertørken i 2023. Som udgangspunkt gav en forholdsvis våd vinter en god buffer i forhold til tørke, og indeksene viser vådere tilstande, end 30-års normalen, før tørkens begyndelse den 15/4. Undtagelsen er Sydøstdanmark, hvor det regnede mindre end normalt om vinteren, og her var udgangspunktet således allerede tørrere end normalt i både vandløb og grundvand. Efter den længste periode uden regn omkring den 19/6 var der opstået meget tørre tilstande i flere vandløb og begyndende meget tørre tilstande i det øverste grundvand. Særligt Sydøstdanmark var meget udtørret pga. den tørre starttilstand i både grundvand og vandløb. Der var desuden tydelige sammenfald mellem områder med vandløbstørker og grundvandstørker i denne periode. Tørken i 2023 medførte også øget markvandingsbehov som nævnt i 4.1. Efter en unormalt våd juli (25/7) var de fleste vandløb tilbage til normalt tilstande, mens grundvandet stadig viste tørre tilstande i nogle områder. Dette eksempel viser, hvordan udgangspunktet før sommeren har stort indflydelse på responsen på sommertørken.

Før tørken (15/4-2023)

Under tørken (19/6) - 32 tørkedage



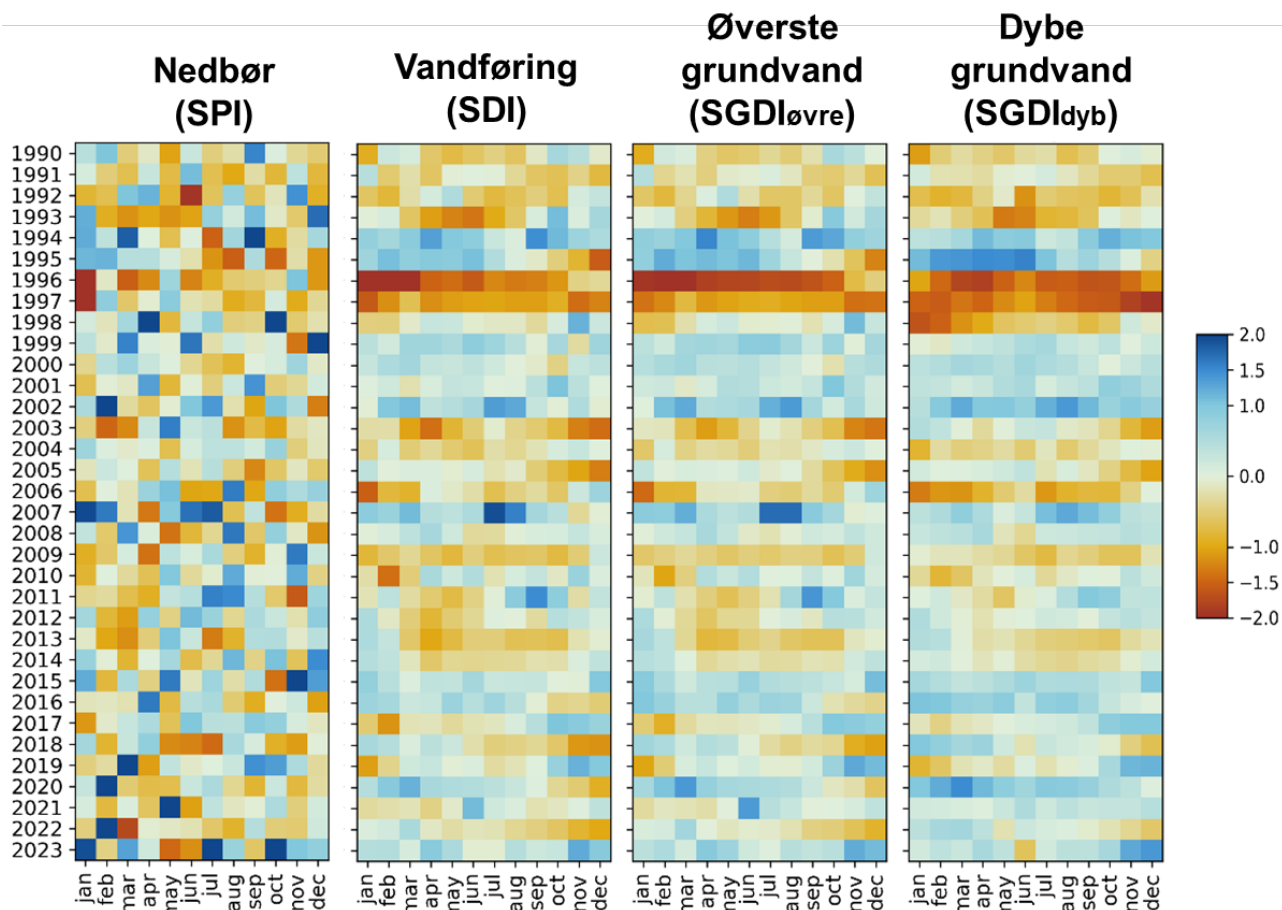
Efter meget våd juli (25/7)



Figur 4.7. Udviklingen og udgangspunktet for tørken i 2023.

Undersøges de 34 år, som DK-modellen simulerer, ses samme overordnede tendenser i det nationale gennemsnit for indeksene (figur 4.8). Her er indeksene opsummeret på månedsbasis for hele Danmark. Hver pixel repræsenterer således den nationale gennemsnitsværdi af det pågældende indeks. I gennemsnit varer en typisk vandløbstørke 6 uger, mens det for det øvre og dybe grundvand er hhv. 7 og 23 uger.

Korrelationen mellem indeksene i vandløb og grundvand er høj. Vandløbsindekset har en Pearson korrelation til øvre og dybe grundvand på henholdsvis, 0.98 og 0.82, mens det mellem det dybe- og øvre grundvand er 0.87. Undersøgelser af korrelationen til nedbøren viser, at vandføringen er mest korreleret til en SPI beregnet for et 8-måneders interval, hvilket betyder at vandløbets indekssværdier er mere styret af nedbøren i de forrige otte måneder end med nedbøren for den seneste måned pga. forsinkelse og hukommelse i systemet. For det øvre grundvand er denne akkumulationsperiode ni måneder, mens det for det dybe grundvand er 13 måneder, dog med nogle regionale variationer.

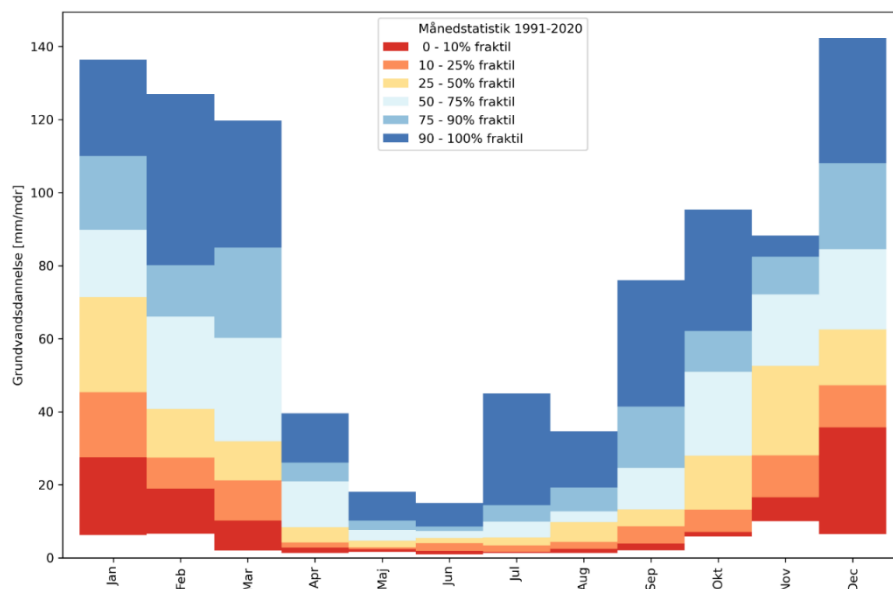


Figur 4.8. De nationale hydrologiske indeks for nedbør, vandløb og grundvand. Mellem 1 og -1 er tilstanden indenfor 30-års normalen, negative værdier indikerer tørt til ekstremt tørt.

De nationale indeks illustrerer også, hvordan vandløb og grundvandsmagasin er påvirket meget forskelligt, alt efter hvornår nedbørstyrken eller nedbørsunderskuddet forekommer. Den største vandløbs- og grundvandstørke i de 34 år fandt sted i 1995-1997, og som ses på figur 4.8. afstedkom denne tørke en voldsom og langtrukket reaktion i mange dele af det hydrologiske system. For vandløbene varede denne tørke 44 uger og i det øvre grundvand 48 uger, mens den strakte sig hele 324 uger (27 måneder) i det dybe grundvand. Denne tørke er særligt bemærkelsesværdig, fordi det er en udpræget vintertørke, der forekom to vintre i træk, med påfaldende lav nedbør, især i december og januar. Derudover var somrene også tørrere, særligt i 1996, hvilket øgede preset på ressourcen.

Grunden til den store påvirkning fra nedbørsunderskuddet om vinteren skal findes i timingen for hvornår nedsivningen (på engelsk *recharge*) finder sted i Danmark. Figur 4.9. viser de månedlige gennemsnit af nedsivningen til det øverste grundvandsspejl, som simuleret af DK-modellen. Her ses det, at den altoverskyggende del af opfyldningen af grundvandsressourcen sker i vinterhalvåret, særligt i januar og december. Derfor påvirkede 1995-1997-tørken grundvandet så markant, og som følge heraf også vandløbene pga. den tætte kobling mellem overfladevand og grundvand, specielt det øvre grundvand. Dette var også grunden til, at fx tørken i 2018 i denne sammenhæng var væsentlig mindre betydningsfuld for vandløb og grundvand, end man kunne forvente.

Figur 4.9. Middelnedsvivning for de seneste 34 år opsummeret for hele Danmark fordelt hen over månederne, fra seneste GRUMO rapport (Thorling et al., 2024).



Observationer af grundvandsstanden fra 53 boringer, der vurderes til at være primært styret af klimasignalet for disse to tørker (1995/1997 og 2018), viser, at 2018-tørken førte til en lavere sommergrundvandsstand end normalt i 60 % af boringerne. Disse boringer havde i gennemsnit en 11 cm dybere grundvandsstand end normalt registreret om sommeren. I 1997 lå 86 % af boringerne under normalen, og i gennemsnit var nedsænkningen 46 cm lavere.

De påvirkninger, der sker fra sommertørker uden foregående vintertørker, vil således stadig udøve et pres på vandløb og grundvand i form af den øgede fordampning og planteoptag. Derudover er det vigtigt at gentage, at påvirkningen fra tørker her, som tidligere nævnt, omhandler de naturlige tørker. Oveni de naturlige tørkefænomener skal tillægges presset fra samfundet i form af øget efterspørgsel på vand. Vandløb eller grundvandsmagasiner, der allerede er under pres pga. menneskelige påvirkninger, må forventes at have en lavere resiliens mod de naturlige tørkefænomener.

Der findes kun få studier, der undersøger den fremtidige effekt af tørker i Danmark. Selvom der generelt rapporteres om stigende nedbør og højere afstrømning og grundvandsstand, ses der også en tendens til øget fordampning i sommerperioden (Seidenfaden et al., 2022). Dette kan føre til udtørring i jordlagene i sommerperioden, hvilket medfører et øget behov for vanding. Derudover er der i nogle dele af landet også tegn på områder med fald i grundvandsspejlet hen over sommeren (Schneider et al., 2022). Et lokalt tørkestudie fra Skjernområdet (Chan et al., 2021) indikerer, at de mildeste tørketyper er i nedgang i

fremtiden, og at en kraftig øgning forventes i de mest ekstreme tørker for både vandløb og grundvand. De fandt, at vanding til en vis grad modvirker tørkerne i jorden, men samtidig pga. øget grundvandsindvinding medfører lavere grundvandsstand og øget grundvandstørkerisiko.

4.2.1 Tørkepåvirkning af den tilgængelige ressource

Historisk set har vi i den offentlige debat under tidligere kraftige tørkehændelser set en problematisering af indvindingens størrelse og af, i hvilken grad denne kan kobles til udtørring af vandløb og påvirkning af vådområder. Hydrologisk set er det indvindingens størrelse i forhold til grundvandsdannelsen, som traditionelt undersøges fagligt, når vandressourcen relateres til tørke. Under danske klimabetingelser er dette forhold, selv for år med længevarende tørkeperioder, ikke bestemmende for ressourcens størrelse. Som nævnt i afsnittene ovenfor, er det ofte lokale geologiske faktorer, som begrænser ressourcen i Danmark, og som kan føre til naturlig forurening af grundvandet. Det kan typisk være som følge af indvindingsrelaterede afsænkninger, eller mere permanente effekter på naturen, som er påvirket af variationer og størrelser af afstrømning eller det kan være ændring af vandbalancer for andre sårbare økosystemer. De tidligere ni nævnte indikatorer i ressourceopgørelsen er et forsøg på at sammenholde denne type af udfordringer med indvindingernes størrelse og den nuværende lokale placering.

Ressourceopgørelsen (Henriksen et al., 2023a) tager ikke tørke særskilt i betragtning, men da den er udregnet ud fra en 30-års klimatologisk periode (1991-2020), vil den i nogen grad også været påvirket af de klimatologiske udsving, der er forekommet naturligt i denne periode og dermed er tørker indirekte repræsenteret i ressourceestimatet. Som vist med anvendte hydrologiske indeks indeholder perioden flere tørkehændelser, fx i 1990'erne og senere i 2018. Det er dog sandsynligt, at forudsigelse af sjældne hændelser med meget ekstreme tørker ikke er repræsenteret i 30-års perioden, ligesom mere sjældne ekstreme nedbørshændelser heller ikke kan forventes at være repræsenteret.

Hvis man ønsker at afsøge tørkens indvirkning på vandressourcen, anbefaler Henriksen et al. (2023a) at undersøge mulighederne for at inkludere yderligere indikatorer til de ni tidligere nævnte, der særligt belyser tørkerelevante problematikker. Her nævnes specifikt indikatorer, der bedre beskriver fald i grundvandsstand og udtørring af vandløb under tørkehændelser. Her er det dog nødvendigt at overveje, hvorvidt det er relevant eller hensigtsmæssigt at tage hensyn til de meget sjældne eller mest ekstreme tilfælde af tørke, fx 100- eller 500-års hændelser. Mere relevant kunne det være at belyse effekten af langvarige vintertørker, som kan være problematiske for grundvandsressourcen. I ressourceopgørelsen (Henriksen et al., 2023a) nævnes i denne sammenhæng tidligere estimater på op mod en 20 % reduktion i den bæredygtige ressource under længere grundvandstørker. En anden tilgang kunne være at bruge de ni anvendte indikatorer til at estimere grundvandsressourcen for en kendt tørkeperiode. Det vil sige, udtrække og anvende DK-model resultater for kun bestemte perioder til en ressourceopgørelse. Det ville gøre det muligt at bestemme en slags baseline for ressourcens størrelse under eller efter tørkehændelser.

Derudover kunne det være muligt at udbygge og videreudvikle de i denne rapport anvendte hydrologiske indeks, så de ville være brugbare til at undersøge ressourcens størrelse udover den information, de lige nu giver omkring anomalier. Det ville kræve en ændring af den måde, indekserne standardiseres og udregnes på. Til gengæld ville det kunne muliggøre løbende at følge ressourcens udvikling under tørkeperioder, da de hydrologiske indeks allerede udregnes i realtid (Henriksen et al., 2023b), og på sigt kan de inkluderes som en del af et prognoseværktøj.

5 Effekt af tørke og fluktuerende klima på hydrologi, næringsstofkredsløb og nitratudvaskning

Gitte Blicher-Mathiesen og Mette Thorsen, ECOS

5.1 Tørke og betydning for nitratudvaskning og nitratkoncentrationer i jordvand

Generelt giver lav årlig nedbør og afstrømning høje næringsstofkoncentrationer i jord, dræn og vandløb; omvendt giver meget nedbør og afstrømning lave næringsstofkoncentrationer. Til gengæld er den samlede transport af næringsstoffer lav ved mindre nedbør og afstrømning og omvendt høj ved meget nedbør og afstrømning. Kvælstofudledning øges, når sommertørke giver lave afgrødeudbytter og derfor et større overskud af kvælstof på de dyrkede jorde, der især udvaskes med nedbøren i vinterhalvåret. I dette kapitel beskrives klimatiske forhold, der har betydning for næringsstofkoncentrationer og udledning til kystvande.

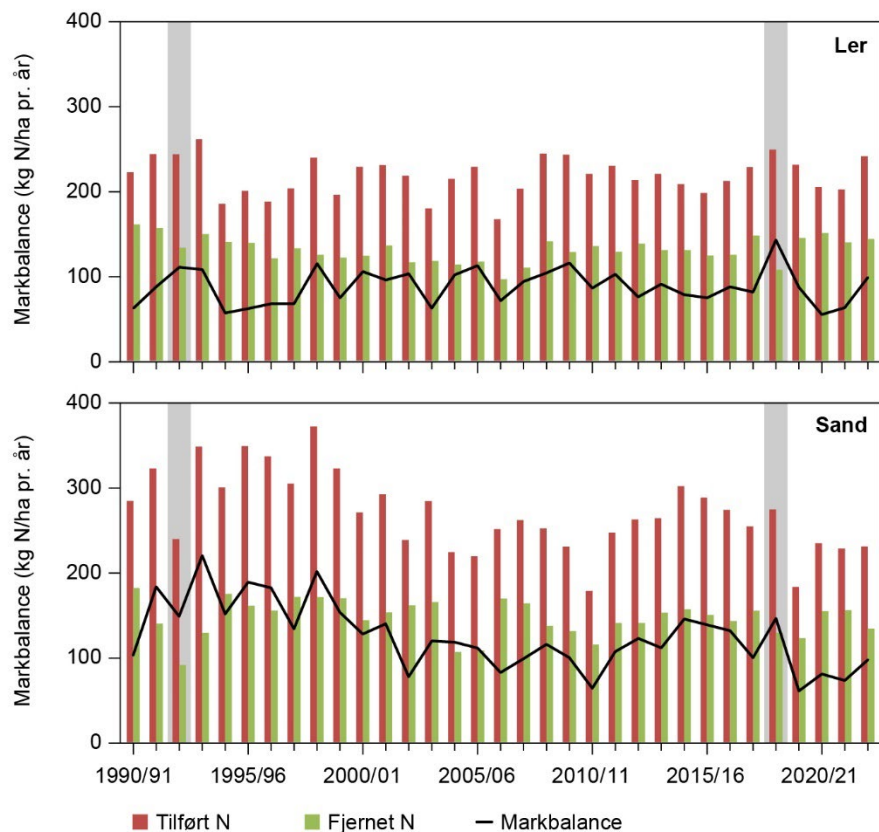
Viden fra målinger på stationsmarker i Landovervågningen

I forbindelse med Vandmiljøplanens Landovervågningsprogram (LOOP) undersøges landbrugets gødningsanvendelse samt tab af næringsstoffer til vandmiljøet i seks mindre landbrugsdominerede oplande. I alle oplande indsamles årligt dyrkningsoplysninger på markniveau fra lodsejerne, og der måles kvælstofkoncentrationer i vandløbene. Dyrkningsoplysninger indeholder blandt andet lodsejerens opgørelse af udbyttet i marken. I fem af oplandene måles herudover nitratkoncentrationer under rodzonen på 4-7 stationsmarker. Nitratudvaskningen estimeres efterfølgende ved at gange en beregnet perkolation på de målte koncentrationer. På disse stationsmarker kan sammenhængen mellem landbrugspraksis, kvælstofbalancer og kvælstofudvaskning opgøres (Blicher-Mathiesen et al., 2024).

Den årlige kvælstofbalance i marken opgøres ved at trække den høstede kvælstofmængde fra den totale mængde tilført kvælstof i form af handelsgødning, husdyrgødning, kvælstoffiksering og atmosfærisk deposition. I figur 5.1 ses markbalancer opgjort på stationsmarkerne i landovervågningen på henholdsvis lerjorde og sandjorde. Markbalancerne er opgjort per høstår og vises for det tilhørende hydrologiske år (1/6-31/5).

I de år, hvor der har været tørkeperioder med betydning for udbytterne, kan det ses som en stigning i kvælstofbalancen, fx i de hydrologiske år efter høstårene 1992 og 2018, hvor udbytterne generelt var påvirkede af tørkeperioder. Betydningen af tørkeperioder for kvælstofbalancen er størst på de marker, hvor der ikke er mulighed for kunstvanding. På markerne i landovervågningen bliver der i tørre år vandet på nogle af markerne i sandjordsoplandene, men ikke i lerjordsoplandene.

Figur 5.1. Markbalancer for jordvandsstationer opdelt på ler- og sandjordsoplände. Markbalancerne er opgjort per høstår, og vises for det tilhørende hydrologiske år (1/6-31/5). Orange søjler=tilført N, Grønne søjler=høstet N, Sort kurve=markbalance (Tilført N-høstet N). Grå skygger markerer de hydrologiske år 1992/93 og 2018/19 efter tørkeårene 1992 og 2018.

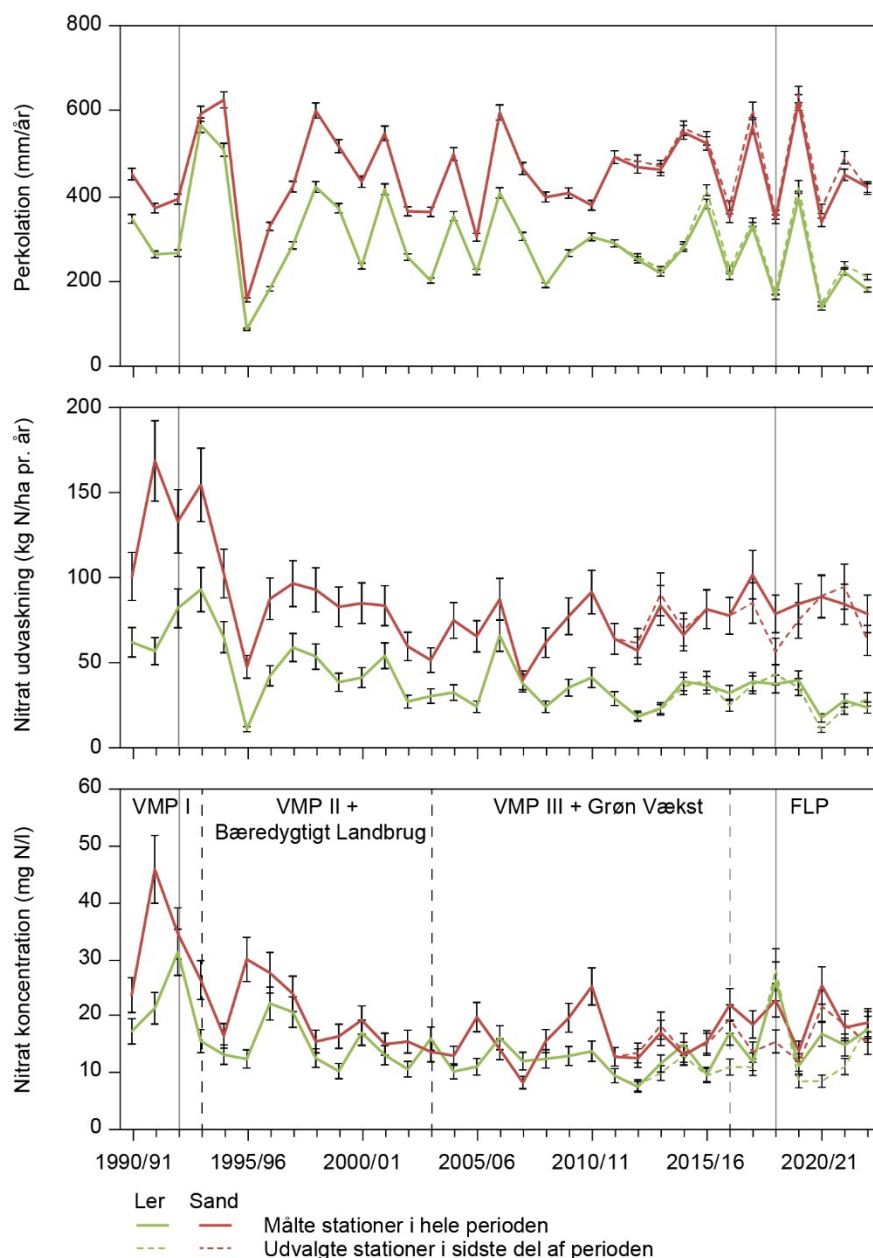


Effekten af tørre år kan også ses i de målte nitratkoncentrationer (figur 5.2), hvor der særligt på lerjordene ses højere afstrømningsvægtede koncentrationer i de hydrologiske år efter en høstsæson præget af tørkeperioder, fx 1992/93 og 2018/19.

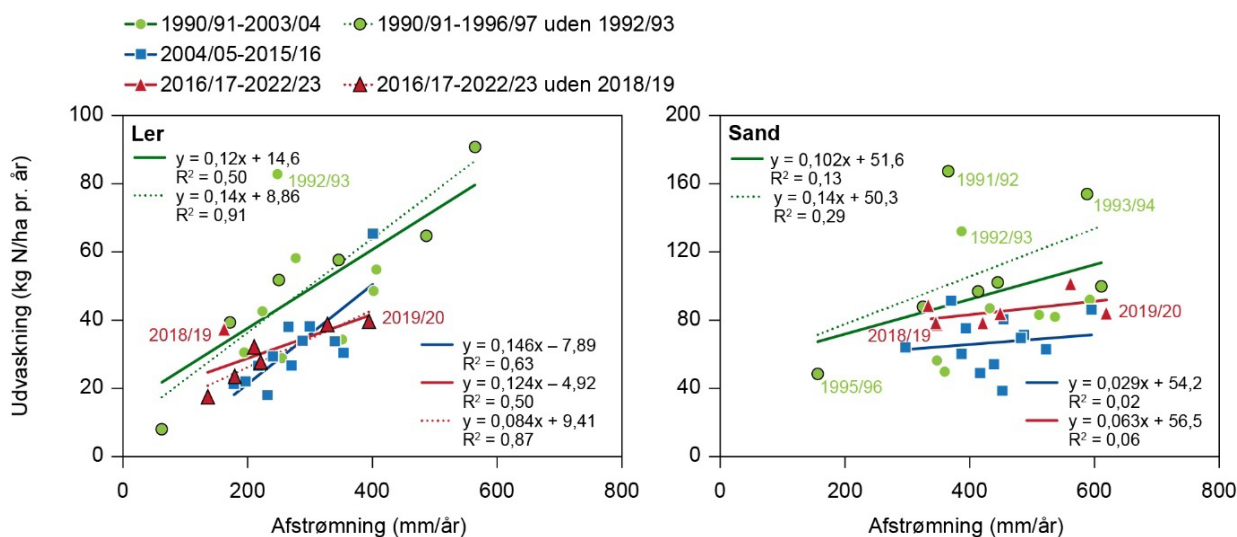
Den samlede nitratudvaskning over et hydrologisk år er påvirket af både den samlede mængde nedbør/perkolation og fordelingen hen over året. I figur 5.3 ses sammenhængen mellem beregnet årlig perkolation/afstrømning og nitratudvaskning på jordvandsstationerne i landovervågningen. Data er opgjort for henholdsvis ler- og sandjorde, og herudover er data opdelt i tre perioder baseret på vedtagne reguleringstiltag:

- 1990/91-2003/04: VMP I, Handlingsplan f. Bæredygtigt Landbrug og VMP II
- 2004/05-2015/16: VMP III, Grøn Vækst og Vandplan 1
- 2016/17-2022/23: Fødevarer- og landbrugspakken med udfasning af underoptimale gødningsnormer og implementering af målrettede efterafgrøder og Vandområdeplan 2015-21

Figur 5.2. Udvikling i beregnet perkolation samt målinger af nitratudvaskning og afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer i rodzonevandet i 1990/91-2022/23. Error bar på perkolation, udvaskning og nitratkoncentration i jordvand beskriver standardafvigelsen på årsgennemsnittene for de enkelte oplande og indeholder desuden variation i perkolation betinget af variation i nedbør inden for et DMI 10x10 km² nedbørsgrid. De fuldt optrukne kurver viser gennemsnit for jordvandsstationer på henholdsvis ler- og sandjord. De stiplede kurver i perioden 2013/14-2022/23 viser gennemsnit, hvor udvalgte stationer, som kan være påvirket af ekstraordinær trafik på markerne i de senere år, er udeladt. Fuldt optrukne lodrette streger markerer de to tørkeramte hydrologiske år 1992/93 og 2018/19.



Perioden 1990/91-2003/04 indbefatter virkemidler, som er implementeret i Handlingsplan for Bæredygtigt Landbrug (1992) og VMP II (1998). Perioden 2016/17-2022/23 dækker perioden efter vedtagelse af Fødevarer- og landbrugspakken.



Figur 5.3. Sammenhæng mellem afstrømning ud af rodzonen og nitratudvaskning for jordvandsstationer i lerjords- og sandjordsoplande i LOOP opdelt i forskellige perioder. Hver observation er et gennemsnit for 14 og 13 jordvandsstationer for henholdsvis ler- og sandjordsoplande for hvert hydrologisk år i perioden. Datapunkterne er opdelt i tre reguleringsperioder. Herudover er inkluderet lineære regressionslinjer for hver reguleringsperiode, henholdsvis med (solid linje) og uden (stiplet linje) data påvirket af de tørre høstår 1992 og 2018.

På lerjordene viser en statistisk analyse af de samlede datasæt for hele perioden 1990/91-2022/23 en signifikant sammenhæng mellem perkolations og størrelsen af nitratudvaskning på jordvandsstationerne ($P < 0,0001$). På sandjordene er sammenhængen mellem perkolations og nitratudvaskning ikke signifikant ($p = 0,17$). Denne forskel mellem ler- og sandjordsoplandene kan skyldes flere faktorer. Dels er perkolations i sandjordsoplandene i de fleste år så stor, at alt nitrat til stede i rodzonen om efteråret vaskes ud i løbet af vinterperioden, og dels er der herudover på flere af stationsmarkerne i sandjordsoplandene hyppigt flerårigt græs i sædskiftet, hvor nitratudvaskningen typisk er stor i afstrømningsperioden efter ompløjning og lille i de år, hvor græsset overvintret. Desuden er der mulighed for kunstvanding på flere af stationsmarkerne på sandjorde. Dermed vil den samlede perkolations i det enkelte år være af mindre betydning for den samlede nitratudvaskning.

Ses der på forskellene mellem de tre reguleringsperioder, viser data, at den gennemsnitlige, målte nitratudvaskning ved en given afstrømning ud af rodzonen er lavere i perioden efter VMP II, altså efter 2003/04, end før dette tidspunkt (figur 5.3). Forskellen er signifikant for både ler- og sandjordene ($P = 0,01-0,02$).

På lerjordene ses ingen signifikant forskel mellem de to perioder 2004/05-2015/16 og 2016/17-2022/23 ($P = 0,52$). På sandjordene ses en signifikant højere nitratudvaskning i den seneste periode 2016/17-2022/23 sammenholdt med perioden 2004/05-2015/15 ($P = 0,03$).

Med henblik på at vurdere effekten af tørkeår på nitratudvaskningen er figur 5.3 suppleret med lineære regressionslinjer af data med og uden de to høstår 1992 og 2018, som var præget af tørkeperioder.

Hvis det antages, at nitratudvaskningen i 1992 og 2018 havde fulgt regressionslinjerne lavet uden disse år (stiplede regressionskurver i figur 3.3), dvs. hvis ikke der havde været tørke, kan effekten af tørkeårene anslås som forskellen mellem den aktuelle nitratudvaskning 1992 og 2018 og den nitratudvaskning, som fremgår af den stiplede regressionskurve.

For lerjordene giver det en forhøjet udvaskning på 46 kg N/ha i 1992/93 og 23 kg N/ha i 2018/19, svarende til henholdsvis 78 % og 63 % højere udvaskning end den værdi, der kunne forventes ved en tilsvarende perkolation uden tørkepåvirkning i høstsæsonen.

For sandjordene giver det en forhøjet udvaskning på 28 kg N/ha i 1992/93, svarende til 26 % højere udvaskning end den værdi, der kunne forventes ved en tilsvarende perkolation uden tørkepåvirkning i høstsæsonen. I 2018/19 ses ikke en generel forhøjet nitratudvaskning på sandjordene i forhold til udvaskningsniveauet for perioden. Dette kan evt. skyldes, at afstrømningen i 2018/19 var meget lav med 162 og 345 mm på henholdsvis ler- og sandjordene mod gennemsnitlig 252 mm for ler og 478 mm for sand for de nærtstående fem afstrømningsår 2017/18, 2019/20, 2020/21, 2021/22 og 2022/23.

De anslåede effekter af tørkeårene er behæftet med meget stor usikkerhed, da effekten på de enkelte marker også vil afhænge af de enkelte afgrøders grad af følsomhed over for tørke i de her opgjorte to tørkeår 1992 og 2018, hvor der er målt afstrømning, samt af hvor mange af markerne med sugeceller der er blevet vandet. I 1992 var det kun en enkelt mark på sandjord, der blev markvandet, mens fem marker på sandjord blev vandet i 2018.

De anslåede effekter kan således kun benyttes til at illustrere de mulige effekter, hvis hyppigheden af tørkepåvirkede høstår øges som følge af klimatiske ændringer.

Vanding ved tørke og nitratudvaskning

Lorraine ten Damme og Mathias Andersen, AGRO.

Kvælstofudledning i form af nitratudvaskning er i høj grad afhængig af jordens indhold af mineralsk N og afstrømning af vand. Udvasning af nitrat fra rodzonen er generelt større på sandede jorde end på lerholdige jorde på grund af deres henholdsvis lave og høje vandholdende evne.

Forsøg på en JB1-jord (grovsandet jord) i Jyndevad viste, at nitratudvaskningen efter høst kan mindskes i særligt tørre vækstsæsoner ved at vande (ten Damme et al., 2022). I disse forsøg med vinterhvede (*Triticum aestivum*), vårbyg (*Hordeum distichum* L.) og vinterraps (*Brassica napus*) blev der vandet, når halvdelen af den plantetilgængelige vandmængde var brugt. På JB1 betyder dette, at vandindholdet i jorden var cirka 30 mm lavere end markkapacitet, og vandingen bragte vandindholdet i jorden tilbage til nær markkapacitet.

Forsøgene med vinterhvede (1987-1991), gødet i henhold til normal praksis (180 kg N/ha) viste, at tørke øgede udvaskningen fra 52 til 69 kg N ha⁻¹ i det tørre år 1989, hvor der blev vandet otte gange med i alt 221 mm (tabel 5.1.). Derimod var udvaskningen ikke forskellig mellem vandede og ikke-vandede forsøgsbehandlinger i 1988 og 1990, hvor der blev vandet fem gange om sommeren med i alt 107 eller 99 mm (gennemsnitlig udvaskning på henholdsvis 73 og 65 kg N/ha). Forsøgene med ikke-vandede og vandede parceller vårbyg (1988-1990, 150 kg N/ha) og vinterraps (1992-1993, 150 og 250 kg N/ha) bekræftede, at nitratudvaskning er højere i tørkepåvirkede afgrøder i særligt tørre vækstsæsoner ved normale og høje gødningsniveauer. I 1989 blev de vandede parceller vandet med 105 mm fordelt over fire gange i vårbyg, og i 1992 blev der vandet med 165 og 221 mm i vinterraps (fordelt over henholdsvis fem og syv gange for behandlinger med 150 og 250 kg N/ha).

Table 5.1. Nitratudvaskning i vandingsforsøg i Jyndevad, 1987-1993. Vinterhvede blev gødet i henhold til normal praksis, vårbyg blev tildelt et højt gødningsniveau, medens vinterraps blev tildelt både et normalt og et højt gødningsniveau og. Tabellen er udarbejdet iht. Ten Damme et al., 2022.

Periode	Afgrøde	Gødning, (kg N/ha)	Vandet	Antal gange vandet	Sum vanding, (mm)	Nitratudvaskning, (kg N/ha)
1987-1988	Vinterhvede	180	Ja	2	47	57 a
		180	Nej	-	-	55 a
1988-1989	Vårbyg	150	Ja	1	24	61 a
		150	Nej	-	-	64 a
1988-1989	Vinterhvede	180	Ja	5	107	71 a
		180	Nej	-	-	74 a
1989-1990	Vårbyg	150	Ja	4	105	42 b
		150	Nej	1 ¹	15	72 a
1989-1990	Vinterhvede	180	Ja	8	221	52 b
		180	Nej	-	-	69 a
1990-1991	Vinterhvede	180	Ja	4	99	60 a
		180	Nej	1 ¹	26	69 a
1992-1993	Vinterraps	150	Ja	5	165	54 b
		150	Nej	-	-	74 a
		250	Ja	7	221	85 b
		250	Nej	-	-	127 a

Signifikante forskelle i nitratudvaskning (LSD_{0.05}) mellem vandingsbehandlinger er angivet med små bogstaver efter tallet

¹Ikke-vandede behandlinger blev i nogle tilfælde vandet for at opløse mineralisk gødning.

I disse år var udvaskningen signifikant højere i de ikke-vandede, tørkestressede afgrøder: 30 kg N/ha eller +71 % i vårbyg, 20 kg N/ha eller +37 % i vinterraps, som fik 150 kg N/ha, og 42 kg N/ha eller +49 % i vinterraps, som fik 250 kg N/ha. Derimod var der ingen forskel i udvaskning mellem vandede og ikke-vandede afgrøder ved lave N-niveauer (50 kg N/ha i begge afgrøder og 100 kg N/ha for vårbyg). Dette tyder på, at der er et sammenspil mellem tørke og gødningstilførelse, som skal tages i betragtning i forhold til udvaskning af kvælstof.

En evaluering af vandingsbehovet i 1990-2015 på 10 lokationer i Danmark, fra Jyndevad (JB1) i Sydjylland til Silstrup (JB7) og Tylstrup (JB2) i Nordjylland og Flakkebjerg (JB7) på Sjælland, forklarer til dels samspillet mellem jordbund og klimaforhold i forhold til vandingsbehov og afdræning. Denne evaluering blev lavet for seks niveauer af rodzonekapaciteten for hver lokation og ikke i henhold til jordtypeklassifikation. Generelt set kan man dog sige, at rodzonekapaciteten plejer at øges med stigende lerindhold.

Analysen viste, at ved samme rodzonekapacitet var det gennemsnitlige vandingsbehov lavest i Jyndevad og højest ved Flakkebjerg, mens den øgede afdræning, der følger af vanding i sæsonen, var højest ved Jyndevad og lavest ved Flakkebjerg (ten Damme and Andersen, 2018). Dette tyder på, at planterne under tørre forhold på mere lerholdige jorde anvender en relativt større del af vandingsvandet end på de sandede jorde. Afgrøder kan med korrekt vanding (mængde og tidspunkt i forhold til afgrødernes vækstfaser) optage mere kvælstof, end de ville kunne uden vanding.

Der findes data fra mange vandingsforsøg i Danmark, der understøtter dette, fx Andersen et al. (1992), men kun fra sandjord (JB1). I det tørre år 1986 var N-optaget i vårbyg således 18 kg N/ha større under vandede end uvandede forhold. I det mere normale år 1985 var forskellen kun 1-4 kg N/ha.

Et vandingsforsøg med vinterhvede i England, Rothamsted, på en jord, som svarer til JB8, viste effekter af tørke på rodudvikling, udnyttelse af vand og udbytte af vinterhvede (Barracough et al., 1989). Vinterhveden var enten vandet efter behov eller beskyttet mod regn med et mobilt tag fra buskningsfasen indtil modenhed, hvor afgrøden derfor kun kunne udnytte det vand, der var i jorden i forvejen. Den beskyttede afgrøde havde en roddeybde på 160 cm, mens den markvandede, kun nåede til 140 cm dybde. Den ringe rodtæthed hos den beskyttede afgrøde betød dog, at vinterhvede kun kunne optage vandet i jorden effektivt ned til 80 cm dybde, mens vandoptagelsen fra dybere jordlag var begrænset. Den vandede vinterhvede optog mest vand fra de øverste 20 cm, mens mindre mængder blev optaget til en dybde af op til 80 cm. Fordampningen og rod/skud-forholdet var højere i den vandede end i den beskyttede afgrøde, og udbyttet (85 % tørvægt) var 9.7 og 7.9 tons/ha i henholdsvis den vandede og den beskyttede afgrøde.

I et vandingsforsøg med permanent græs i England og Wales på to jordtyper, som svarer til JB8 med hhv. dårlige og gode dræningsforhold, undersøgte man effekten af vanding på nitratudvaskning i fire år (Webster and Dowdell, 1984). Græsset fik blandt andet gennemsnitlig nedbør, var beskyttet fra nedbør i fire uger inden høst og gødskning eller i to uger inden og to uger efter, hvor den ekskluderende mængde vand så blev tilført over de efterfølgende to uger. På begge jorde var udvaskning af nitrat højere, hvor græsset var udsat for tørke. På de dårligt drænedes jorde var udvaskningen 2,5 og 1,8 gange så høj i de behandlinger, der blev udsat for henholdsvis 4 og 2+2 uger tørke, mens udvaskningen på den veldrænedes jord var 7,3 og 2,2 gange så høj. Dette forsøg tyder på, at N-mineralisering og udvaskning foregår hurtigere på veldrænet end på dårligt drænet JB8-jord. Webster og Dowdell (1984) argumenterede derudover for, at fordelingen af sommernedbør har en større effekt på optagelsen og udvaskningen af kvælstof, end den har på denitrifikation og immobilisering af kvælstof i organisk stof.

Mekanismer

Det er velkendt, at det meste kvælstof, som planter optager, bevæger sig frem til rødderne ved såkaldt *mass-flow*, dvs. at planternes transpiration skaber en vandbevægelse i jorden, som transporter opløst nitrat i jordvæsken frem til rodsystemet, hvor det optages i planten. I dybere jordlag, hvor der ikke er stor vandbevægelse, kan diffusion af både nitrat og ammonium dog spille en rolle. Planternes vækst har også en betydning for deres kvælstofoptag. Således fandt Yang et al. (2020), at kartofler, hvis vækst var hæmmet af lav fosfertilgængelighed, optog mindre kvælstof end planter med god fosforforsyning. Det er vanskeligt at afgøre, hvilke af de nævnte to faktorer (mindsket transport eller mindsket optag) der spiller den største rolle, men resultatet er under alle omstændigheder, at der efterlades en større mængde mineralsk kvælstof i jorden under tørke. Dette kvælstof vil være tilgængeligt for udvaskning senere i sæsonen, specielt om efteråret.

Ud over mindsket planteoptag af kvælstof under tørke er der yderligere mindst én faktor, som bidrager til øget udvaskning efter tørke. Dette er den såkaldte Birch-effekt, som forekommer, når udtørret jord genopfugtes. Dette resulterer i øget mineralisering af det organiske stof i jorden, hvilket bl.a. kan måles ved en øget CO₂-afgivelse fra jorden (e.g., Jarvis et al., 2007). Denne effekt er også målt i danske vandingsforsøg i form af større N-optagelse i afgrøder efter tørke, idet mineraliseringen af det organiske stof frigør mineralsk kvælstof. I kløvergræs blev der således fundet en signifikant forbedring af en

vækstmodel, når der i modellen blev taget hensyn til, hvor mange dage jordvandsindholdet havde været mindre end 9 mm på sandjord i det foregående slæt (Andersen, 2016). Stærk tørke bevirkede efterfølgende således en større vækst, hvilket sandsynligvis skyldes et højere indhold af mineraliseret kvælstof i jorden. Det er imidlertid uklart, hvor stor udtørringen skal være for at udløse højere mineralisering. I forsøg med en biologisk vandbesparende vandingmetode kaldet "partial rootzone drying" eller PRD, hvor rodzonen på skift udtørres på den ene og den anden side af planterne, blev der således også fundet større mineralisering af kvælstof, selvom udtørringen i dette tilfælde var moderat (Shahnazari et al., 2008; Wang et al., 2017).

Af dette afsnit fremgår det, at målte LOOP-data for nitratudvaskning viser øget nitratudvaskning i tørkeår med lave høstudbytter, men mængden af afstrømning påvirker også udvaskningen. Data fra landovervågningen viser, at nitratudvaskningen øgtes mere på lerjordene end på sandjordene i afstrømningsperioden efter de to tørkeår 1992 og 2018. Andelen af markvanding har også betydning. Ingen af markerne med jordvandsstationer på lerjord blev vandet i de to tørkeår 1992 og 2018, mens henholdsvis én og fem marker med jordvandsstationer på sandjord blev markvandet i de to år.

Forsøgsdata fra AU, Institut for Agroøkologi, viser, at markvanding kan øge udbyttet i tørkeår og derved modvirke den øgede nitratudvaskning af lavere høst.

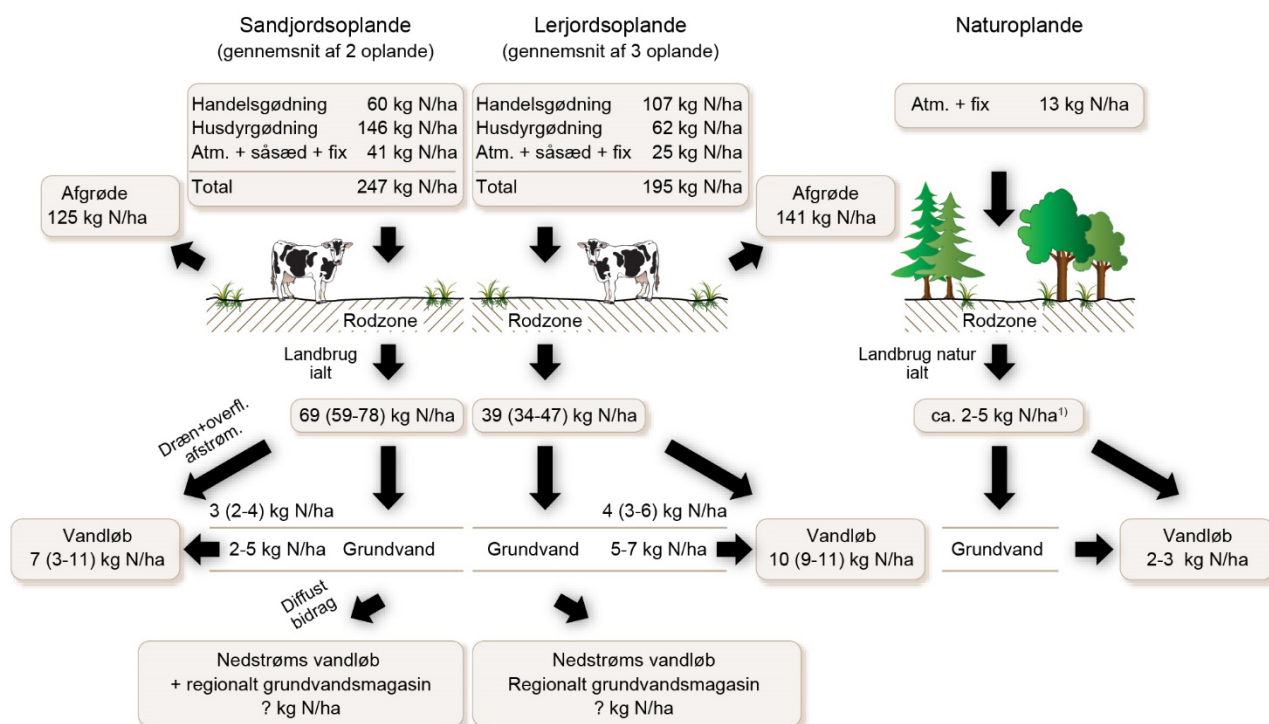
5.2 Tørke og påvirkning af kvælstofstrømme i det hydrologiske kredsløb

Det overordnede strømningmønster for vandet har betydning for, hvor meget kvælstof der strømmer af til vandløbene og dermed også for, hvordan tørke og lave kvælstofudbytter påvirker kvælstoftransporten i vandløb (figur 5.4).

I lerjordsoplandene er den gennemsnitlige årlige nettotilførsel (kvælstoftilført minus kvælstof fraført med afgrøder) til marken ca. 69 kg N ha⁻¹. Den gennemsnitlige modelberegnete udvaskning (NLES5) fra rodzonen i oplandet udgjorde i perioden ca. 39 kg N ha⁻¹ år⁻¹. Det diffuse nitrattab til vandløbene for de dyrkede arealer udgjorde ca. 10 kg N ha⁻¹ år⁻¹; dette svarer til, at der gennemsnitligt er ca. 1/4 af rodzonens nitratudvaskning, som er nået til vandløbene. Der er dog stor forskel imellem de enkelte lerjordsoplande.

I sandjordsoplandene er den årlige nettotilførsel til marken ca. 106 kg N ha⁻¹ år⁻¹. Den modelberegnete udvaskning (NLES5) fra rodzonen i oplandet er opgjort til ca. 69 kg N ha⁻¹ år⁻¹. Det diffuse nitrattab til vandløbene for de dyrkede arealer udgjorde ca. 11 kg N ha⁻¹ fra oplandet i Nordjylland (LOOP 2) og ca. 3,1 kg N ha⁻¹ fra oplandet i Sønderjylland (LOOP 6). Med en gennemsnitlig modelberegnet udvaskning på 59 kg N ha⁻¹ (LOOP 2) og 78 kg N ha⁻¹ (LOOP 6) for de to oplande svarer det til, at henholdsvis 19 og 4 % af rodzonens nitratudvaskning nåede ud til vandløbene.

Det årlige kvælstofkredsløb (2018/19 – 2022/23)



Figur 5.4. Schematisering af kvælstofkredsløbet i henholdsvis dyrkede lerjords- og sandjordsoplande samt for naturoplande for årene 2018/19-2022/23. Kvælstofbalancen er fra interviewundersøgelsen 2018-2023, mens udvaskningen er modelberegnet for alle marker i oplandene med NLES5 med et gennemsnitsklima for perioden fra 1990/91 til 2016/17. ¹ Intervalleret for naturarealer, 2-5 kg N ha⁻¹, henviser til udvaskningen fra henholdsvis gammel natur og gammel skov.

Opgørelser over, hvor stor en andel af kvælstofudvaskningen, der når ud til vandløbene, skal tages med et vist forbehold. For det første kan denitrifikationen i de øvre jordlag være betydelig i landovervågningsoplandene på grund af det relativt høje grundvandsspejl. Dernæst skal det understreges, at det langsomt tilstrømmende vand repræsenterer landbrugspraksis af ældre dato.

På grund af oplandenes beliggenhed i de øverste dele af vandløbssystemet sker der sandsynligvis yderligere afstrømning til nedstrøms liggende vandløbsstrækninger uden om målestationen. Dette vand transporterer også kvælstof, hvorfor den mængde kvælstof, der faktisk når ud til vandløbene, kan være større end angivet ved målinger i LOOP-oplandene. Dog må det antages, at der her er tale om vand, der har været længere tid undervejs, hvilket betyder, at der kan have fundet kvælstofreduktionsprocesser sted.

Tørkes betydning for kvælstoftransport i vandløb

De ovennævnte forskelle for kvælstoffets strømningsveje har betydning for, hvilke vandløb der påvirkes mest af tørke med lav afstrømning i efterårs- og vinterperioden og af tørkeramte kvælstofudbytter. I vandløbsoplande på lerjord med høj grad af dræning vil tørkeramte kvælstofudbytter alt andet lige give øget kvælstofudledning til vandløbene. Dette forstærkes af at transporten gennem reducerende områder er lille og derfor giver mindre fjernelse af nitrat gennem denitrifikation.

Tørke og påvirkning af kvælstofkoncentrationer i det hydrologiske kredsløb

I Danmark er kvælstofkoncentrationerne højere, når der er lav nedbør, og hvor strømningsveje gennem dræn og grøfter giver relativt lav nitratreduktion. Derimod er kvælstofkoncentrationerne lavere, når der er relativt høj nedbør, perkolation og vandløbsafstrømning, som i Vest- og Sydjylland. Hvordan nedbør og strømningsveje påvirker kvælstofkoncentrationer i det hydrologiske kredsløb i LOOP-oplandene, er vist i figur 5.5.

Der er et markant fald i kvælstofkoncentrationerne fra rodzonen og ned til det øvre grundvand på lerjordsoplandene. Dette skyldes denitrifikationsprocesser under stedvis reducerede forhold i jorden og i det øverste grundvand. Dybere i jorden vil der normalt være reducerende forhold, og her vil kvælstofindholdet falde til under detektionsgrænsen.

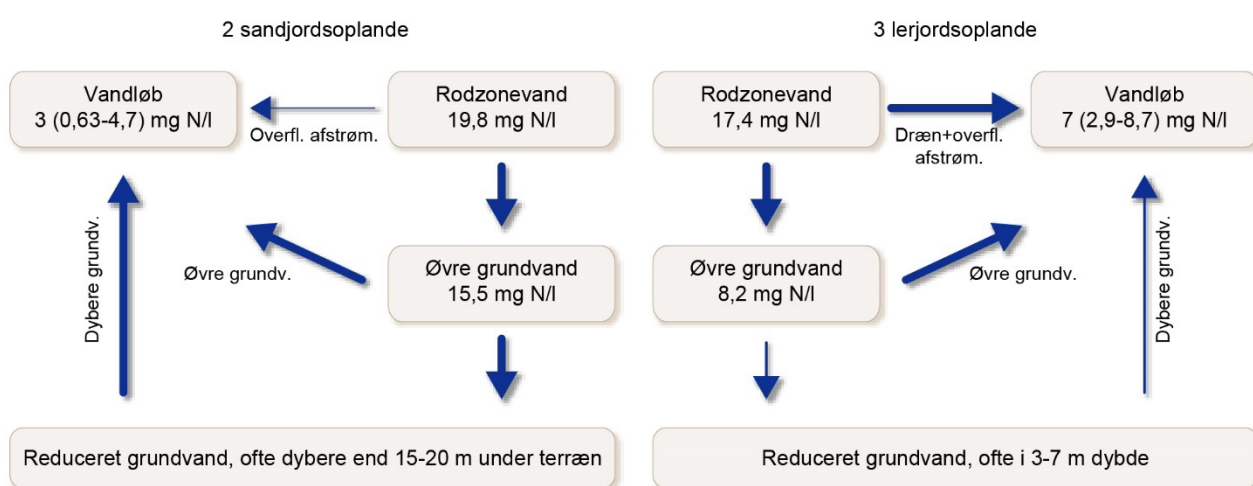
Lerjordsoplande er præget af en hurtig respons på nedbørshændelser, dvs. oplandene er karakteriseret ved overfladenær afstrømning, herunder afstrømning gennem dræn. Det vand, der strømmer ud til vandløbene, har derfor kun i ringe grad været udsat for reduktionsprocesser, og vandet har forholdsvis høje kvælstofkoncentrationer.

Sandjordsoplande er derimod præget af en mindre nitratreduktion mellem rodzone og det øvre iltede grundvand. Sandjordene er desuden præget af en forholdsvis langsom respons på nedbørshændelser og er karakteriseret ved, at en større andel af det vand, der strømmer ud til vandløbene, er fra det dybere iltfrie grundvand, hvor denitrifikation har fjernet en del af nitraten fra vandet, og kvælstofkoncentrationerne derfor er forholdsvis lave.

Ved tørke vil der afstrømme mindre vand, og hvis tørke desuden har givet lavere kvælstofhøst og dermed øget kvælstofmarkbalance, vil der ved efterfølgende nettonedbør afstrømme mere kvælstof til vandløbene.

Kvælstofkoncentrationer i det hydrologiske kredsløb (2018/19 – 2022/23)

(Pilenes tykkelse angiver vandets dominerende strømningsveje)



Figur 5.5. Gennemsnitlige målte nitratkoncentrationer i rodzonevand (1 m u.t.), målte nitratkoncentrationer i det øvre iltede grundvand (fra det øverste filter med vand i 1,5-5 m u.t.) og koncentrationer af total-N i vandløb samt interval for de viste oplande for henholdsvis tre lerjords- og to sandjordsoplande i 2018/19-2022/23.

6 Ændringer i næringsstofhøst og -balancer relateret til tørke

Gitte Blicher-Mathiesen, ECOS

Ved udpræget forårs- og sommertørke vil afgrøderne vokse mindre, udbytterne bliver lave, og der vil følgelig høstes mindre udbytte fra markerne. Herefter fjernes der færre næringsstoffer med de høstede afgrøder. Landmanden kender ikke på forhånd afgrødernes vækstbetingelser og derfor gødes markerne økonomisk optimalt ud fra forventede normudbytter opgjort ved et gennemsnitligt klima (se af afsnit 3.2).

6.1 Høstede næringsstoffer og tørke

Som beskrevet i afsnit 3.1 var det årene 1992, 2008, 2018 og 2023, der for hele landet havde flest antal tørkedøgn, henholdsvis 25, 19 og 26. Selvom der var mange tørkedøgn i forårs månederne i 2008, blev det samlede udbytte for 2008 ikke væsentligt påvirket (Dansk Landbrugsrådgivning, 2008).

I dette afsnit belyses, hvor meget kvælstof- og fosforhøsten blev påvirket af tørke for hele det dyrkede areal i landet med udgangspunkt i tørkeramte udbytter i 1992, 2018 og 2023.

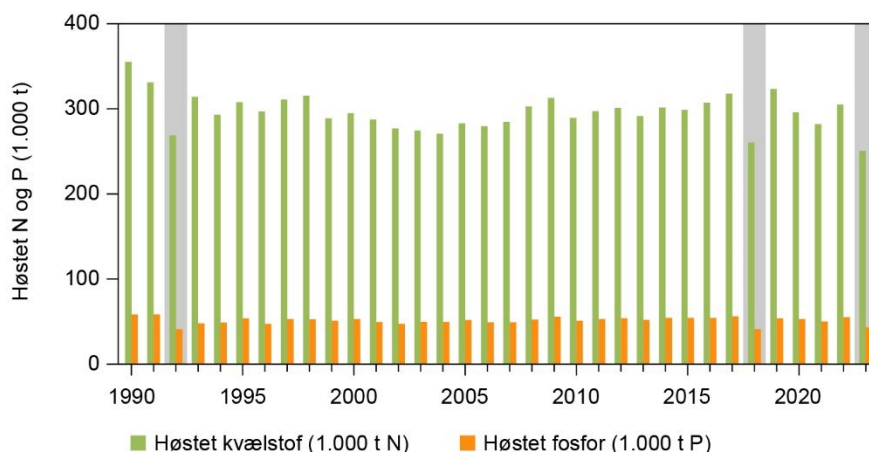
Udviklingen af den samlede høst af kvælstof og fosfor for hele landet og for perioden 1990-2023 fremgår af figur 6.1. For de tre tørkeår er der defineret fem år som reference til at sammenligne, hvor meget de lave tørkeramte høstudbytter er mindre end middel for referenceårene. For 1992 er de fem referenceår 1990, 1991, 1993, 1994 og 1995, og for både 2018 og 2023 er de 2017, 2019, 2020, 2021 og 2022.

I 1992 var høstudbyttet 52.000 ton N og 12.000 ton P mindre end middel for referenceårene, i 2018 henholdsvis 45.000 N og 13.000 P og i 2023 54.000 ton N og 11.000 ton P (tabel 6.1). De mindre estimerede udbytter i de tre tørkeår giver tilsvarende højere markbalancer for de to næringsstoffer.

Tabel 6.1. Høstet kvælstof og fosfor i de tre tørkeår 1992, 2018 og 2023 samt i referenceår og forskel i kvælstof- og fosforhøst imellem referenceår og tørkeår opgjort som summer for dyrkede arealer i hele landet.

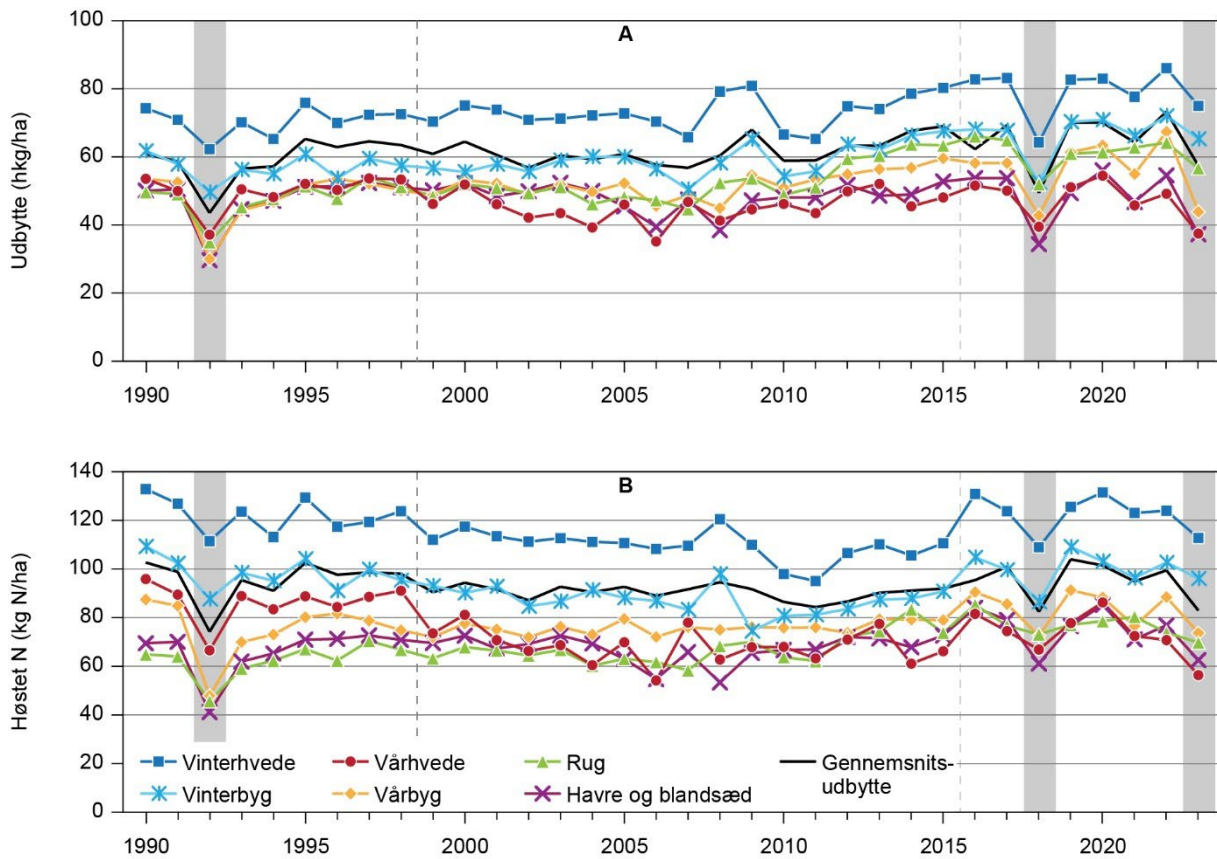
(1.0000 t N eller P)	1992	2018	2023
Høstet N	269	261	251
Høstet P	40	40	42
Referenceår	1990, 1991, 1993, 1994, 1995	2017, 2019, 2020, 2021, 2022	
Middel høstet N for reference år	321	305	305
Middel høstet P for referenceår	53	53	53
Forskel mellem middel af referenceår og tørkeår			
Forskel i høstet N	52	45	54
Forskel i høstet P	12	13	11

Figur 6.1. Udviklingen i høstet kvælstof og fosfor for hele landbrugsarealet i Danmark fra 1990 til 2023. Grå skygger angiver tørkeramte år 1992, 2018 og 2023



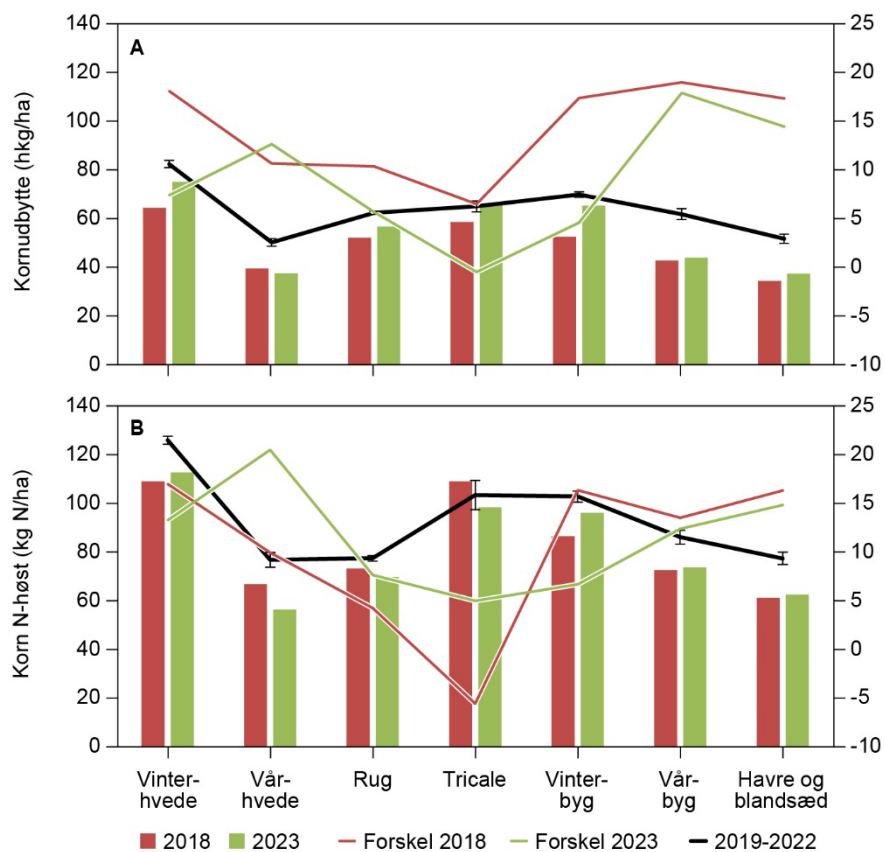
Mindre kornudbytter i de tre tørkeår 1992, 2018 og 2023

Udbyttet af især vårkorn er særligt følsomt over for tørke. I figur 6.2 ses lave udbytter for alle kornafgrøder, mens især vårbyg, havre og vårhvede har lave udbytter i de tørkeramte år 1992, 2018 og 2023. De lave tørkeramte udbytter slår desuden også igennem på kvælstofhøsten. Ses på kvælstofudbyttet har vinterhvede 17 og 14 kg N/ha mindre høst i henholdsvis 2018 og 2023 end gennemsnitligt for perioden 2019-2022, og vårbyg har en lidt mindre forskel på henholdsvis 14 og 12 kg N/ha for de samme forskelle til gennemsnittet (figur 6.3). Vinterkorn sås typisk i løbet af september og opnår herved dybere rødder i starten af foråret. Derfor klarer vinterkorn sig ofte bedre end vårkorn i tørkeperioder, men altså ikke i de to tørkeramte år 2018 og 2023. I det tørkeramte år 1992 var der netop større forskel på de to korntyper, således havde vinterhvede 9 kg N/ha mindre høst end gennemsnittet på 121 kg N/ha for de fire år 1993-1996, mens den høstede vårbyg lå 28 kg N/ha lavere end det tilsvarende gennemsnit på 78 kg N/ha.



Figur 6.2. Gennemsnitligt udbytte (A) og høstet kvælstof (B) for kornafgrøder for hele landet i perioden 1990-2023. Den lodrette streg mellem de to år 1998 og 1999 og igen mellem 2015 og 2016 angiver perioden med reducerede gødningsnormer. Grå skygger angiver tørkeramte år 1992, 2018 og 2023.

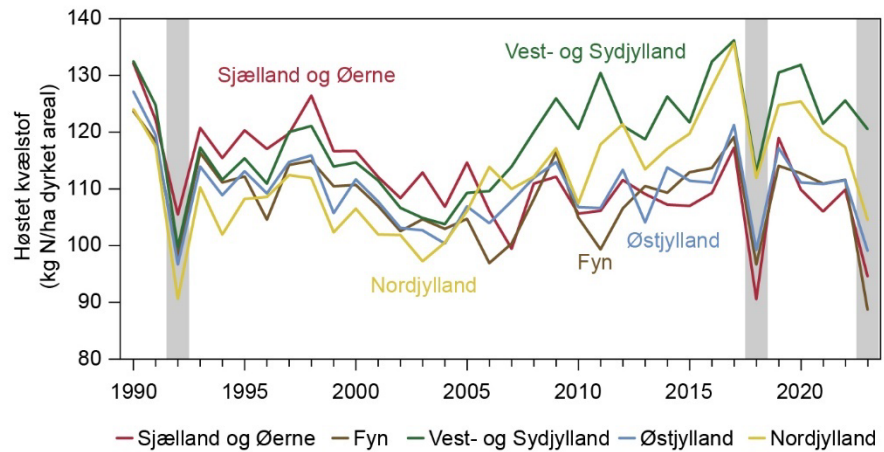
Figur 6.3. Tørstof- og kvælstofudbytter for korn typer opgjort for hele landet for år med tørkeramte udbytter, 2018 og 2023, samt gennemsnit for 2019-2022. Desuden forskel mellem 2018 og 2023 og det viste gennemsnit for 2019-2022 på 2. y-akse.



6.2 Mindre kvælstofhøst ved tørke, opgørelser for fem regioner

I figur 6.4 vises høstet kvælstof for fem regioner i landet. Høje udbytter i kg kvælstof per hektar ses i de første år af opgørelsen, 1990, 1991 og 1993. I de tre tørkeår 1992, 2018 og 2023 falder det høstede kvælstof for alle de fem viste regioner – Nord- Øst-, Vest og Sønderjylland, Fyn og Sjælland. I årene 1993 til 1998 ligger de høstede kvælstofudbytter på et forholdsvis stabilt niveau. Herefter falder kvælstofudbyttet, primært fordi der fra 1999 indføres 10 % reduktion i forhold til de økonomisk optimale mængde tilført kvælstof. Denne reduktion i normerne, som gradvis øges, fortsætter frem til og med 2015. De reducerede gødningsmængder påvirker udbyttene, og det ses, at efter de reducerede normer bliver udfaset fra 2016, stiger kvælstofudbyttet frem til 2019, på nær i det tørkeramte år 2018. Kvælstofudbytterne er lidt lavere i 2020 og 2021 og lidt højere i 2022, atter efterfulgt af tørke og klimaramte lave kvælstofudbytter i 2023.

Figur 6.4. Udvikling i høstet kvælstof for fem regioner for perioden 1990-2023. Bemærk, at afgrænsning af regionerne i Jylland skifter før og efter 2007. Grå skygger markerer de tørkeramte år 1992, 2018 og 2023.



I tabel 6.2 vises høstet kvælstof i de tre tørkeår 1992, 2018 og 2023, for de fem regioner i landet samt middel for fem valgte referenceår og forskellen hertil. De fem referenceår for 1992 udgør 1990, 1991, 1993, 1994 og 1995 og for 2018 og 2023 er referenceårene 2017, 2019, 2020, 2021 og 2022. Af opgørelsen ses det, at alle fem regioner bliver ramt af lavere kvælstofudbytter i de tre tørkeår 1992, 2018 og 2023. I 1992 er den lavere kvælstofhøst i kg kvælstof per hektar størst for de tre regioner i Jylland, 20-22 kg N/ha mindre kvælstofhøst ift. middel for referenceårene, og lidt lavere, 17 og 18 kg N/ha, for henholdsvis Fyn og Sjælland. I 2018 er der relativt lavere kvælstofudbytter på Fyn og Sjælland, henholdsvis 17 og 22 kg N/ha, mens kvælstofudbytterne er 13-16 kg N/ha lavere end middel for referenceårene i de jyske regioner.

Tabel 6.2. Høstet kvælstof i de tre tørkeår 1992, 2018 og 2023, middelhøst i fem referenceår, mindre høst i tørkeår ift. middel for referenceår (kg N/ha) for fem regioner i landet.

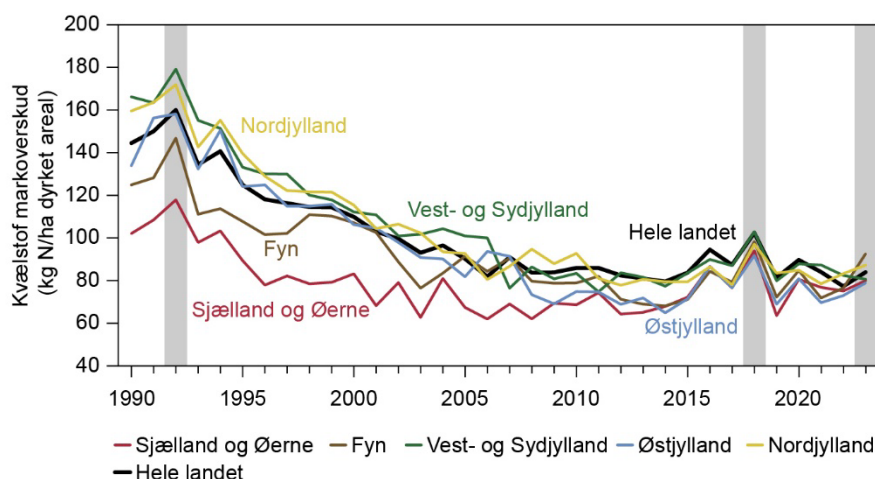
	Høstet N (kg N/ha)		
	1992	2018	2023
Sjælland	105	91	95
Fyn	98	97	89
Nordjylland	91	112	105
Vest og Syddjylland	100	113	121
Østjylland	97	99	99
Referenceår	1990, 1991, 1993, 1994, 1995	2017, 2019, 2020, 2021, 2022	
Sjælland og Øerne	122	112	112
Fyn	116	114	114
Nordjylland	112	125	125
Vest og Syddjylland	120	129	129
Østjylland	117	114	114
Mindre høstet N ift. referenceår	1992	2018	2023
Sjælland	17	22	18
Fyn	18	17	25
Nordjylland	22	13	20
Vest og Syddjylland	21	16	9
Østjylland	20	15	15

I 2023 er det Nordjylland og Fyn, der har de relativt laveste udbytter med henholdsvis 20 og 25 kg N/ha mindre udbytter end middel for referenceårene, mens Østjylland og Sjælland tilsvarende har henholdsvis 15 og 18 kg N/ha lavere kvælstofudbytte og Vest- og Sydjylland kun 9 kg N/ha lavere. Selvom alle de fem regioner rammes af lavere kvælstofudbytter, er der lidt forskellige hvilke regioner der er hårdest ramt med største regionale forskelle i 2023. Generelt vil man forventes at Vest- og Sydjylland er beder til at modvirke tørke, da denne region har flest tilladelser til markvanding (se figur 4.1 i kapitel 4). Dette ses for 2023, men ikke i 1992 og 2018. Desuden kan nogle afgrøder være mere sårbare end andre. Dette er der redegjort for i et andet projekt om økonomisk betydning af tørke i landbruget (Andersen et al., 2025 – in print).

6.3 Kvælstofmarkbalancer

I de sidste godt tre årtier har ekstrem tørke medført, at landmændene har høstet væsentligt mindre afgrøder og dermed fjernet væsentligt mindre kvælstof fra markerne i tre år, 1992, 2018 og 2023. Den mindre kvælstofhøst for disse år udgjorde henholdsvis 65.000, 41.000 og 51.000 ton N. Af figur 6.5 ses at de alle de fem regionale kvælstofbalancer steg i de tre tørkeår 1992, 2018 og 2023.

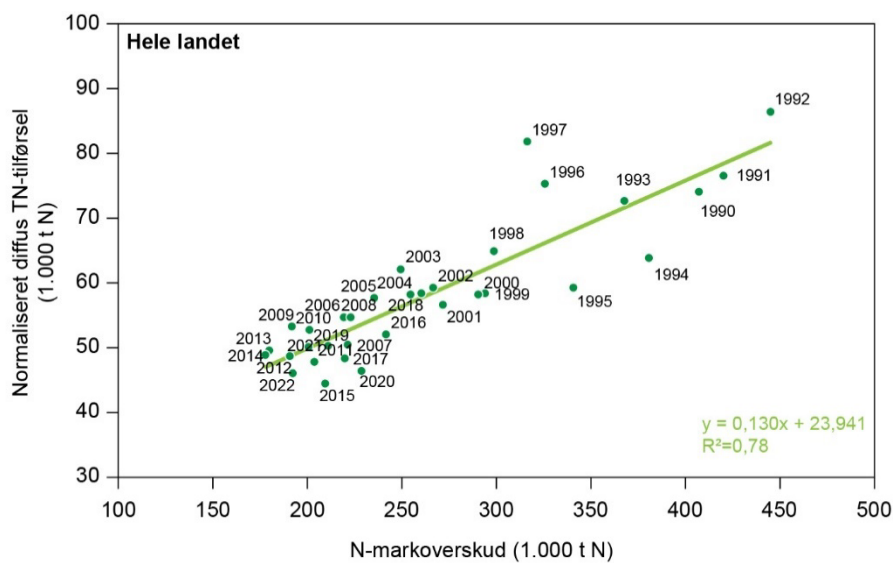
Figur 6.5. Udvikling i kvælstofmarkoverskud for fem regioner og for hele landet i perioden 1990-2023. Bemærk, at afgrænsning af regionerne i Jylland skifter før og efter 2007. Grå skygger markerer de tørkeramte år 1992, 2018 og 2023.



En lavere kvælstofhøst giver en tilsvarende højere kvælstofbalance, og en del af dette kvælstof vil blive udledt til kystvande. År med tørke og deraf lavere kvælstofhøst har derfor afgørende betydning for kvælstofudledningen til kystvande. Sammenhæng mellem kvælstofmarkbalancer og kvælstofudledning til kystvande er et vigtigt element i modellen for kvælstofudledning fra umålte vandløbsoplande (Windolf et al, 2011). Heri beregnes den diffuse totale kvælstofkoncentration pr måned ud fra månedsnedbør, årligt kvælstofmarkoverskud for det dyrkede areal, procent af sandjord i oplandet, procent drænet areal i oplandet, månedstemperatur. En sammenhæng mellem den årligt afstrømningsnormaliserede diffus kvælstofudledning og kvælstofmarkbalance er opgjort på landsplan for perioden 1990-2010 i Windolf et al., 2012a, hvor der beregnes en forklaringsgrad med R^2 på 72 %. For senere opgjorte data med nyere data er ligningen på landsplan: kvælstofudledning (i tusinde ton) = $0,130 \cdot \text{kvælstofmarkbalance} + 23.941$ med en R^2 på 0,78 (figur 6.6). Sammenhængen mellem kvælstofudledning og kvælstofmarkbalance opgjort for 10 regionale vandløbsoplande i Windolf et al, 2012b var signifikante for otte af disse. Der sås et spænd i R^2 på mellem 0,38 og 0,89, med de laveste sammenhænge for oplandene til Roskilde Fjord og Mariager Fjord. Sidstnævnte har en stor tidsforsinkelse for kvælstoftransport mellem rodzone og vandløb.

Mellemgode relationer med en R^2 på 0,49 opnået mellem kvælstofmarkbalancer og målt nitratudvaskning hvor der er opgjort et middel for perioden 1991-2010 for marker med måling af nitratudvaskning på data fra landovervågningen (Blicher-Mathiesen et al., 2014).

Figur 6.6. Relation mellem årligt kvælstofmarkoverskud og afstrømningsnormaliserede diffuse totale kvælstoftilførsel for hele landet for perioden 1990-2023 (Thodsen et al., 2024).



7 Tørkes betydning for kvælstofudledning

Gitte Blicher-Mathiesen, Søren Erik Larsen, Henrik Tornbjerg, Hans Thodsen, ECOS

Analyse af effekt af øgede kvælstofudledninger forårsaget af tørke til kystvand indeholder statistiske analyser af, hvor meget kvælstoftransporten påvirkes i år med ekstrem tørke og deraf følgende lav kvælstofhøst. Analysen er gennemført for målte kvælstoftransporter fra vandløbsoplande, der ligger i de samme fem regioner, som kvælstofmarkbalancer er opgjort for.

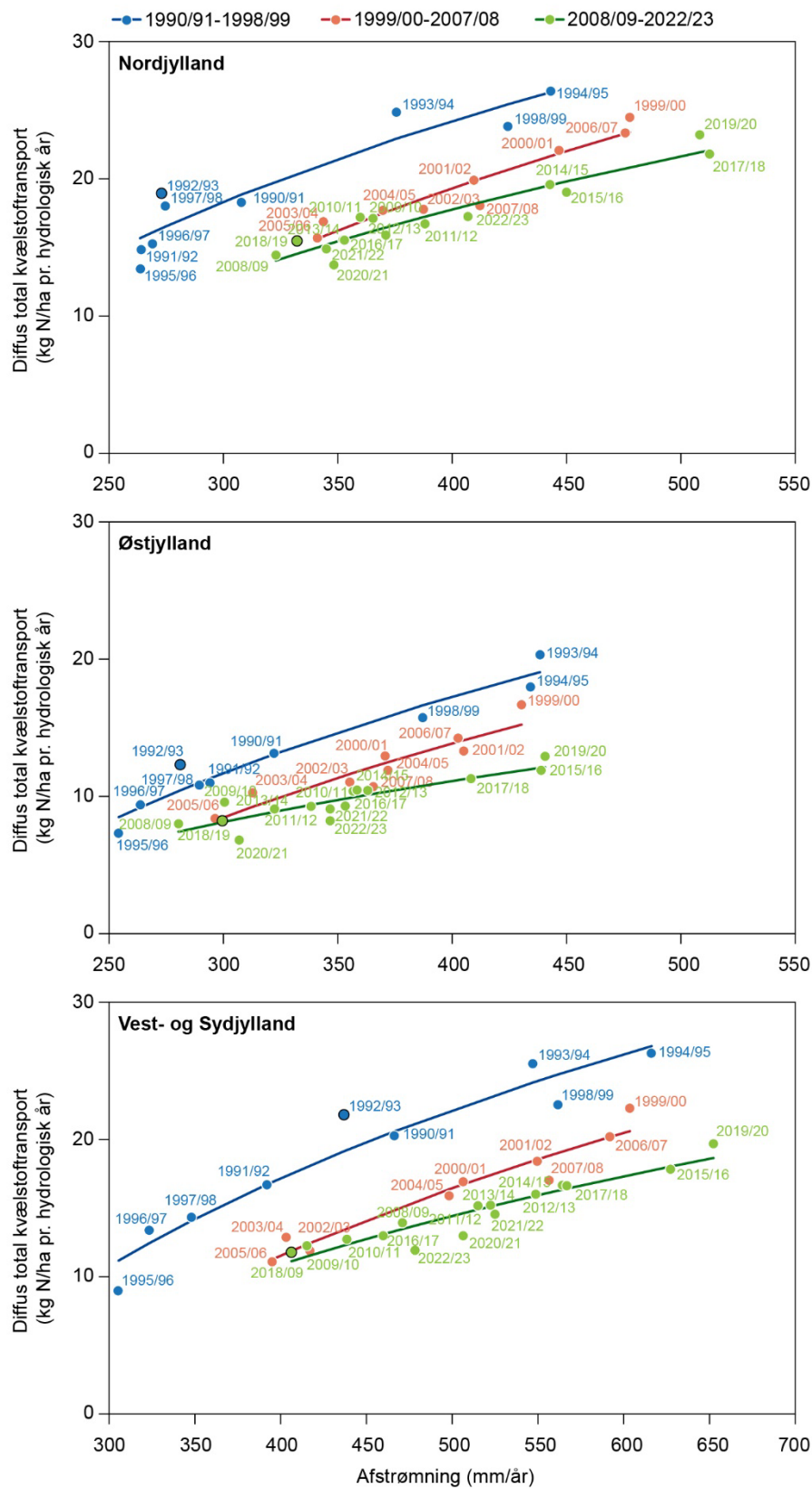
For at analysere, om tørkeramte kvælstofudbytter giver højere markbalancer og kvælstofudledning, er der først beregnet en sammenhæng mellem afstrømning og kvælstoftransport for tre perioder, periode 1=1990/91-1998/99, periode 2=1999/2000-2007/08 og periode 3=2008/09-2022/23. Sammenhæng mellem afstrømning og den diffuse kvælstoftransport er vist for hver region og periode i figur 7.1 og 7.2. Af figurerne fremgår det, at kvælstofudledningen gradvist bliver mindre ved samme afstrømning for de tre perioder, og den største ændring i kvælstoftransporten for alle de fem regioner sker mellem periode 1, 1990/91-1998/99, og periode 2, 1999/00-2007/08. Der er mellem periode 2, 1999/00-2007/08, og periode 3, 2008/09-2022/23, desuden en mindre forskel i kvælstofudledningen for region Fyn og Sjælland end for de Jyske regioner. Af figurerne fremgår desuden, at af kvælstoftransporten ligger højere i det tørkeramte år 1992 og til dels også i året efter, 1993, ift. regressionslinjen end for de øvrige år. Det vil sige, at residualerne er højere i disse to år.

Hældning og skæringspunkt for regresionsligning og R^2 er angivet for hver region og periode i tabel 7.1. Dernæst er residual for de fundne regressioner plottet for hver region og vist i figur 7.3 og 7.4. Alle regressionsligninger for relationen mellem afstrømning og kvælstoftransport har en høj R^2 på over 0,78, på nær Fyn i perioden 1999/20-2007/08 med en lidt lavere R^2 på 0,62.

Tabel 7.1. Parameterestimer af a og b og R^2 for regressionsligning mellem kvælstofmarkbalancer og diffus kvælstoftransport for fem regioner i landet og tre perioder.

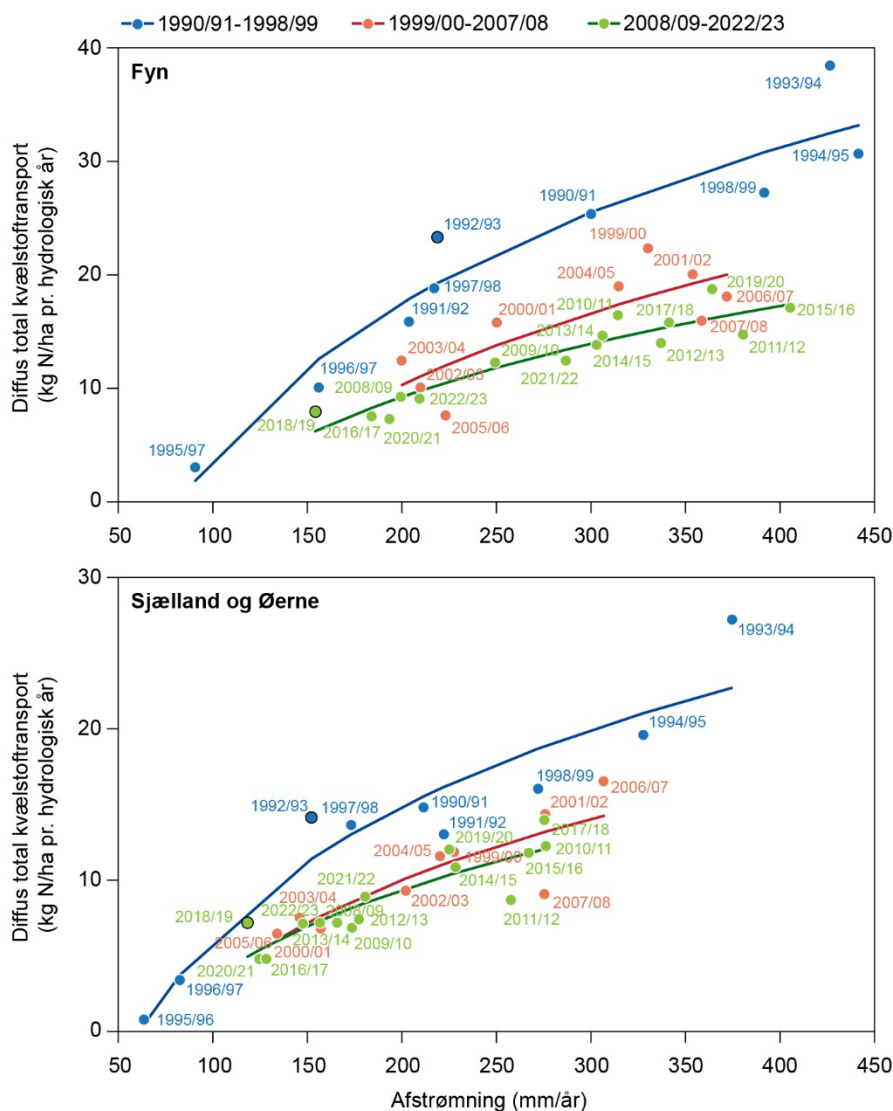
Region	Periode	a	b	R^2
Nordjylland	1990/91-1998/99	1,79879	1,00041	0,83
Nordjylland	1999/00-2007/08	-0,67604	1,16786	0,94
Nordjylland	2008/09-2022/23	2,3542	0,93841	0,89
Østjylland	1990/91-1998/99	-6,0919	1,52666	0,90
Østjylland	1999/00-2007/08	-7,69131	1,622	0,88
Østjylland	2008/09-2022/23	-0,28554	1,08667	0,92
Vest- og Sønderjylland	1990/91-1998/99	-2,78549	1,29428	0,87
Vest- og Sønderjylland	1999/00-2007/08	-2,19984	1,22812	0,85
Vest- og Sønderjylland	2008/09-2022/23	1,79879	1,00041	0,83
Fyn	1990/91-1998/99	-0,67175	1,21395	0,84
Fyn	1999/00-2007/08	0,14726	1,11876	0,62
Fyn	2008/09-2022/23	1,59321	0,99304	0,89
Sjælland	1990/91-1998/99	-7,48673	1,68325	0,86
Sjælland	1999/00-2007/08	1,71622	0,98854	0,78
Sjælland	2008/09-2022/23	2,32701	0,93822	0,80

Figur 7.1. Sammenhæng mellem afstrømning og diffus total kvælstoftransport opgjort for tre jyske regioner og tre perioder. Data er opgjort for hydrologiske år, 1. juni- 31. maj.



Af plottene og tabel 7.2 ses i det tørkeramte år 1992 en større residual, som i % af kvælstofudledningen i udgør mellem 14 og 17 % for de jyske regioner, 37 % for Fyn og 48 % for Sjælland. Disse residualprocenter ligger væsentlig over gennemsnit for de fem år, 1990, 1991, 1994, 1995 og 1996, som ligger mellem -8 og 2 % for de jyske regioner, -19 % for Fyn og -48 % for Sjælland. Dette betyder, at der er en væsentligt øget kvælstofudledning i det tørkeramte 1992, og at det især er de to regioner Sjælland og Fyn, der har en væsentligt højere kvælstofudledning i dette år.

Figur 7.2. Sammenhæng mellem afstrømning og diffus total kvælstoftransport opgjort for Fyn og Sjælland og tre perioder. Data er opgjort for hydrologiske år, 1. juni- 31. maj.



For det tørkeramte år 2018 ser det lidt anderledes ud. Da der var meget lav afstrømning i det hydrologiske år 2018/19 for Østdanmark, hvor en del af kvælstofoverskuddet først blev transporteret til vandløbene året efter i 2019/20.

For de to hydrologiske år 2018/19 og 2019/20 udgør residualprocenten mellem 3 og 5 % for de jyske regioner, henholdsvis 37 og 5 % for Fyn og henholdsvis 24 og 17 % for Sjælland. Disse residualprocenter ligger væsentlig over gennemsnittet for de fem år, 2016, 2017 og 2020-2022, på mellem -10 og -4 % for de jyske regioner, -7 % for Fyn og -3 % for Sjælland. Dette betyder, at der er en væsentlig øget kvælstofudledning i de tørkeramte år 2018 og 2019, og at det igen især er de to regioner Sjælland og Fyn, der har væsentlig højere kvælstofudledning ift. til øvrige jyske regioner. At der er større effekt af tørke på

Fyn og Sjælland, hænger netop sammen med strømningsveje, hvor en relativt større andel af kvælstofoverskuddet strømmer til vandløb på drænedede og ikke-drænedede jorde.

Det er dog således, at de højere residualer for de tørkeramte år og året efter ikke kun kan tilskrives de tørkeramte kvælstofudbytter og forhøjede kvælstofbalancer. Som det ses af figur 7a.1 -e, er der stor variation omkring regressionsligningen for sammenhænge mellem afstrømning og den diffuse totale kvælstoftransport for andre år end lige de to tørkeramte år 1992 og 2018 og de efterfølgende år, 1993 og 2019. Denne variation skyldes ikke alene høstudbytter og kvælstofbalancer, men også en lang række andre forhold som fx nedbørens fordeling over året og antal frost dage med lav nedbør om vinteren og dermed mindre afstrømning samt af, om afstrømningen evt. i højere grad sker overfladisk ved frossen jord, som tilfældet var i vinteren 2011.

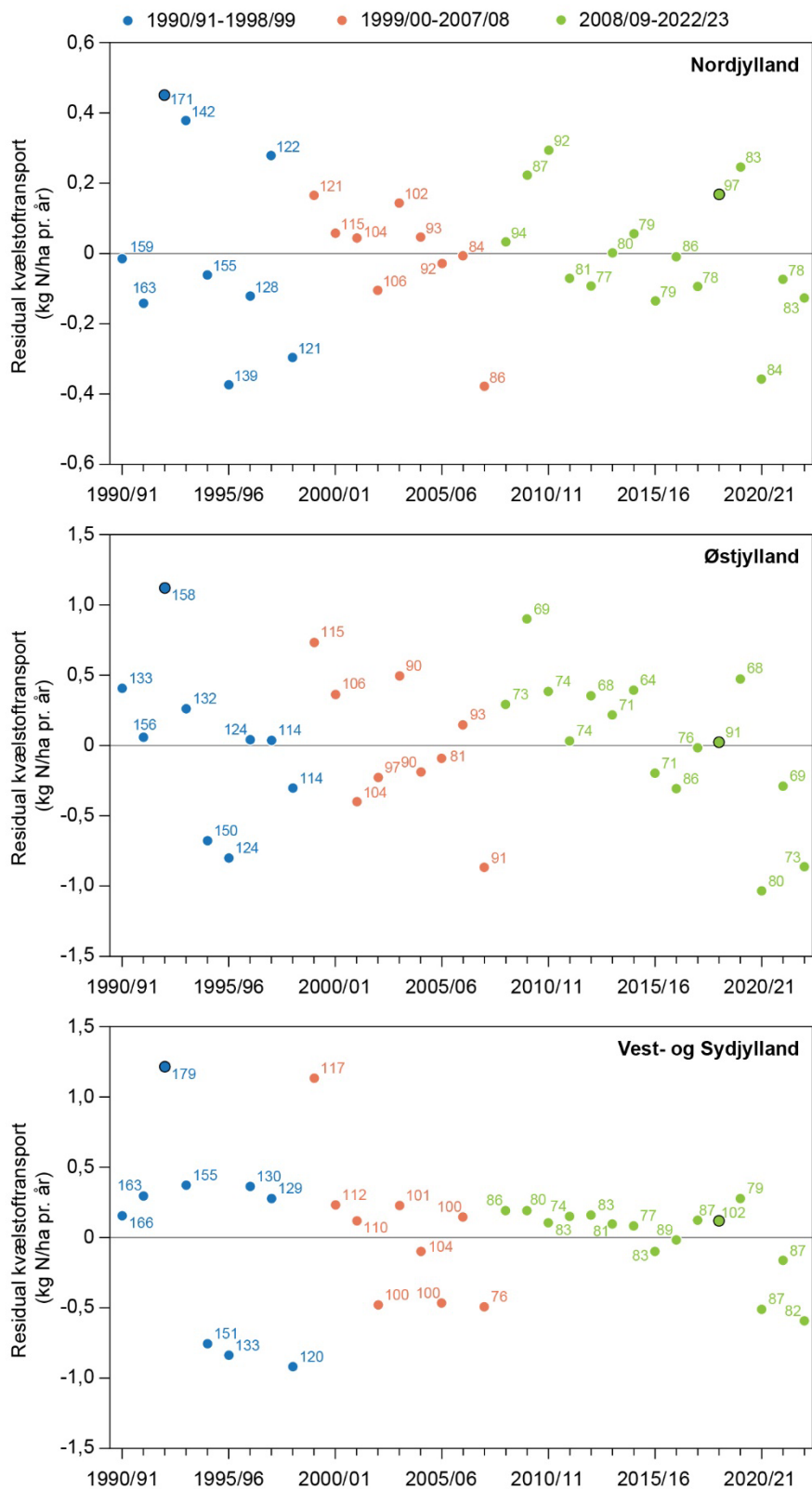
For specifikt at kunne opgøre, hvor meget tørkeramte lave kvælstofudbytter påvirker kvælstofudledningen, er det nødvendigt at udvikle en model, der inddrager alle relevante forklaringsvariable, bl.a. de ovenfor nævnte.

Resultaterne viser dog tydeligt, at der er øget kvælstofudledning efter tørkeår, men det er på nuværende grundlag ikke muligt præcist at opgøre niveauet. Alligevel peger resultaterne på, at det vil kunne være nyttigt med en ekstra målrettet indsats for at modvirke merudledning af kvælstof ved ekstrem tørke.

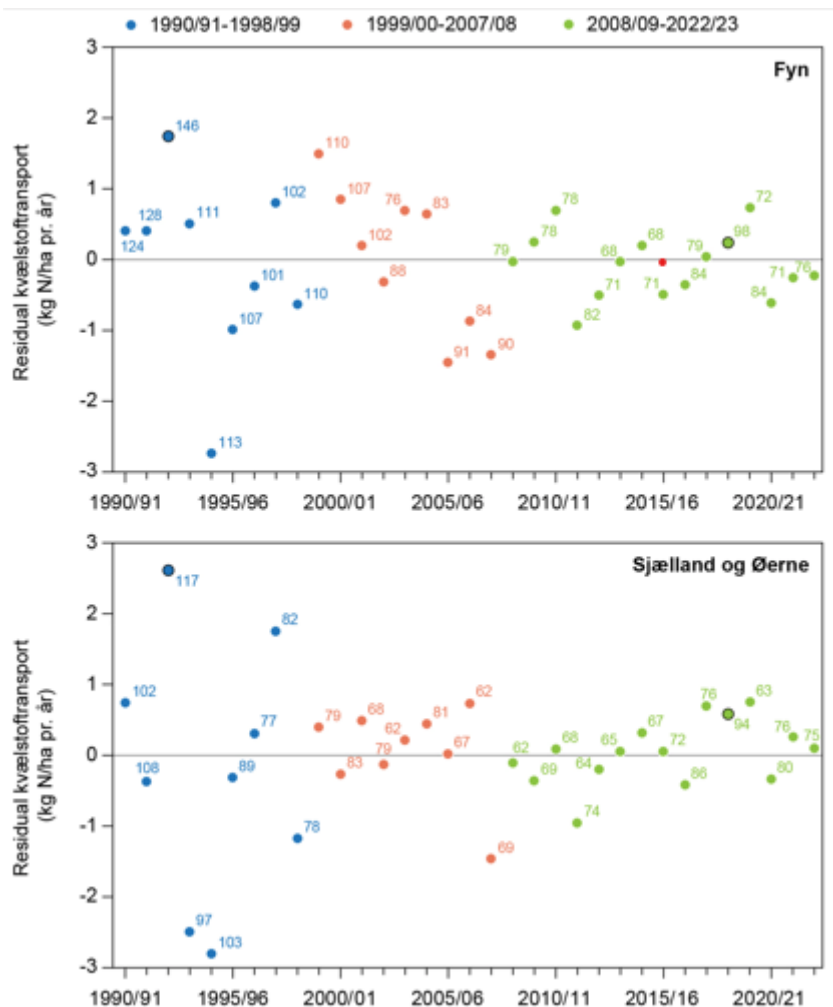
Tabel 7.2. Residual defineret som afvigelse af total kvælstoftransport ift. regressionsligning mellem afstrømning og den diffuse totale kvælstoftransport for hydrologiske år opgjort både som kg N/ha og ton N for de to tørkeår 1992 og 2018 samt året efter, henholdsvis 1993 og 2019. Desuden vises forskel i residual for kvælstoftransport i kg N/ha og tons N samt i % mellem tørkeåret og året efter ift. de fem år i referenceperioden. Værdier for markbalance er desuden vist for de samme år. Data er opgjort for fem regioner i landet.

Region	Hydrologisk år	Markbalance (kg N/ha)	Residual (kg N/ha/år)	Residual (tons N/år)	Residual (%)
Nordjylland	1992	142	0,38	3,2	14,3
Nordjylland	1993	142	0,38	4,3	9,2
Nordjylland reference år	Middel 2016, 2017, 2020, 2021, 2022	151	-0,19	3,0	-8,2
Nordjylland	Forskel 1992 og 1993 ift. middel referenceår		1,14		
Nordjylland	2018	97	0,17	2,6	5,0
Nordjylland	2019	83	0,25	4,0	4,9
Nordjylland	Middel 2016, 2017, 2020, 2021, 2022	82	-0,13	2,9	-4,0
Nordjylland reference år	Forskel 2018 og 2019 ift. middel referenceår		0,68		
Østjylland	1992	158	1,14	5,1	16,8
Østjylland	1993	132	0,41	8,5	3,6
Østjylland reference år	Middel: 1990, 1991, 1994-1996	114,6	0,06	3,3	1,7
Østjylland	Forskel 1992 og 1993 ift. middel referenceår		1,43		
Østjylland	2018	91	0,04	3,4	0,7
Østjylland	2019	68	0,49	5,4	5,3
Østjylland reference år	Middel 2016, 2017, 2020, 2021, 2022	76,8	-0,52	3,7	-9,5
Østjylland	Forskel 2018 og 2019 ift. middel referenceår		1,58		
Vest- og Sydjylland	1992	179	1,22	8,8	16,4
Vest- og Sydjylland	1993	155	0,38	10,3	4,4
Vest- og Sydjylland reference år	Middel: 1990, 1991, 1994-1996	148,6	-0,16	6,9	-4,2
Vest- og Sydjylland	Forskel 1992 og 1993 ift. middel referenceår		1,91		
Vest- og Sydjylland	2018	102	0,12	6,6	2,8
Vest- og Sydjylland	2019	79	0,28	11,1	4,1
Vest- og Sydjylland reference år	Middel 2016, 2017, 2020, 2021, 2022	86,4	-0,24	7,7	-5,5
Vest- og Sydjylland	Forskel 2018 og 2019 ift. middel referenceår		0,87		
Fyn	1992	146	1,90	1,8	37,0
Fyn	1993	111	0,63	4,8	4,6
Fyn	Middel: 1990, 1991, 1994-1996	114,6	-0,57	2,0	-18,9
Fyn	Forskel 1992 og 1993 ift. middel referenceår		3,68		
Fyn	2018	98	0,36	1,0	12,5
Fyn	2019	72	0,87	2,4	12,9
Fyn	Middel 2016, 2017, 2020, 2021, 2022	78,8	-0,18	1,3	-6,8
Fyn	Forskel 2018 og 2019 ift. middel referenceår		1,59		
Sjælland	1992	117	2,61	5,4	47,7
Sjælland	1993	97	-2,49	10,4	-23,7
Sjælland	Middel: 1990, 1991, 1994-1996	98,2	-0,61	3,7	-48,0
Sjælland	Forskel 1992 og 1993 ift. middel reference år		1,34		
Sjælland	2018	94	0,58	2,4	23,7
Sjælland	2019	63	0,75	4,3	17,1
Sjælland	Middel 2016, 2017, 2020, 2021, 2022	78,6	0,06	2,7	-2,8
Sjælland	Forskel 2018 og 2019 ift. middel referenceår		1,21		

Figur 7.3. Residualer af total kvælstoftransport (kg N/ha) opgjort for hvert hydrologisk år for sammenhængen mellem afstrømning og den diffuse kvælstoftransport for målte vandløbsoplande i tre jyske regioner. Lodrette streger angiver år med tørkeramte kvælstofudbytter i 1992 og 2018. Positiv og negativ residual angiver henholdsvis øget og mindre kvælstoftransport ift. regressionslinjen. Tal ved hver observation angiver kvælstofmarkbalancen i kg N/ha totalt oplandsareal.



Figur 7.4. Residualer af total kvælstoftransport (kg N/ha pr. år) opgjort for hvert hydrologisk år for sammenhængen mellem afstrømning og den diffuse kvælstoftransport for målte vandløbsoplande i Fyn og Sjælland. Lodrette streger angiver år med tørkeramte kvælstofudbytter i 1992 og 2018. Positiv og negativ residual angiver henholdsvis øget og mindre kvælstoftransport ift. regressionslinjen. Tal ved hver observation angiver kvælstofmarkbalancen i kg N/ha totalt oplandsareal. Lodrette angiver år med tørkeramte kvælstofudbytter i 1992 og 2018. Positiv og negativ residual angiver henholdsvis øget og mindre kvælstoftransport ift. regressionslinjen.



8 Mulige effekter af tørke og vandføring på økologiske kvalitetselementer i vandløb

Jes Klitten Jessen Rasmussen, ECOS

8.1 Mulige effekter af tørke og vandføring på økologiske kvalitetselementer i vandløb

Vandføring kan påvirke de økologiske kvalitetselementer i vandløb. Ekstrem vandføring kan medføre udskylning, mens en tørkeperiode kan medføre periodevis eliminering af biota, som efterfølgende kræver genindvandring af fx fisk eller makroinvertebrater. Tidligere har medianminimumsvandføring været anvendt til vurdering af en effekt på økologiske kvalitetselementer som fisk, makroinvertebrater, undervandsplanter og alger. I øjeblikket er andre vandføringsvariable og en mere stationsspecifik metode anvendt til en evt. effektvurdering på kvalitetselementerne. I dette kapitel belyses, hvorvidt hidtidig praksis omkring anvendelse af vandføringsvariable er tilstrækkelig til sikring af de økologiske kvalitetselementer i fremtidige klimascenarier med mere ekstrem nedbør og tørke.

8.2 Overvågningsprogrammet for danske vandløb

Overvågningen af den økologiske tilstand i danske vandløb gennemføres med det formål at tilvejebringe data og information til afrapportering i regi af EU's vandrammedirektiv (operationel overvågning) samt frembringe datagrundlag til udvikling af ny viden om vandløbsøkologiske udviklinger, processer og sammenhænge med relevante påvirkningsfaktorer (kontrolovervågning) (Miljøstyrelsen, 2023). Det danske overvågningsprogram for vandløb rummer således både undersøgelser af økologiske tilstandselementer (smådyr, fisk, vandplanter og bentiske alger) samt af understøttende fysiske og kemiske parametre. Der indsamles desuden oplysninger om oplandet til de enkelte målestationer vedrørende fx arealanvendelser og vandløbspærringer.

Overvågningen af økologisk tilstand gennemføres med forskellige frekvenser inden for de forskellige dele af overvågningsprogrammet i vandløb. Kontrolovervågningsprogrammet består af i alt 815 stationer, hvor langt størstedelen (ca. 800 stationer) hører til i kategorien af landsnetstationer, som primært er udvalgt med henblik på at repræsentere udvalgte påvirkningsfaktorer. Det operationelle overvågningsprogram rummer cirka 7.500 stationer, som er underopdelt i følgende tre grupper: 1) Risikostationer (hvor mindst et økologisk kvalitetselement er i risiko for ikke at opnå målopfyldelse), 2) stationer med ukendt tilstand (for mindst et økologisk kvalitetselement) og 3) effektvurderingsstationer (opfølgingsundersøgelser på målrettede indsatser). Det store antal af stationer i det operationelle overvågningsprogram gør, at de både ift. vandløbsstørrelse, geografisk beliggenhed og påvirkningsfaktorer kan opfattes som værende repræsentative for danske vandløb (Baattrup-Pedersen et al., 2023).

Generelt inddeles de danske vandløb i tre grupper baseret på deres størrelse. De store vandløb (Type 3) har typisk oplandsstørrelser > 100 km², de mellemstore vandløb (Type 2) har typisk oplandsstørrelser på 10-100 km², mens de små vandløb (Type 1) typisk har oplandsstørrelser < 10 km². Denne gruppering ift. vandløbsstørrelse er ikke baseret på vandløbstypologier defineret i EU's vandrammedirektiv, men er introduceret i dansk kontekst for at afspejle, at de biologiske samfund forventeligt vil ændre sig med stigende vandløbsstørrelse.

Metoder til at vurdere økologisk tilstand i danske vandløb

Den økologiske tilstand vurderes ud fra udviklede indikatorsystemer for organismegrupperne fisk, smådyr, vandplanter og bentiske alger. De økologiske tilstandsindikatorer klassificeres i hhv. høj, god, moderat, ringe og dårlig økologisk tilstand. EU's vandrammedirektiv definerer høj økologisk tilstand som en tilstand, hvor de biologiske samfund afspejler ingen eller meget lille påvirkning af menneskelig aktivitet. God tilstand afspejler, at der er en svag menneskelig påvirkning, mens moderat, ringe og dårlig tilstand afspejler biologiske samfund, der er stadig mere påvirkede. Miljømålet for naturlige vandløb er, uanset det økologiske tilstandselement, mindst god økologisk tilstand. Derudover gælder der ifølge EU's vandrammedirektiv et One-Out-All-Out princip, som dækker over, at alle økologiske tilstandselementer skal afspejle mindst god økologisk tilstand for at opnå samlet målopfyldelse. Med andre ord, hvis den økologiske tilstand vurderes mindre end god på baggrund af et enkelt økologisk tilstandselement, bliver den samlede økologiske tilstand tilsvarende mindre end god.

For smådyr anvendes Dansk Vandløbsfauna Indeks, DVFI (Miljøstyrelsen, 1998). DVFI beregnes under hensyntagen til de relative forekomster af taksonomiske grupper, der enten er særligt følsomme eller tolerante over for lave ilt-niveauer. For fiskene anvendes to forskellige indikatorsystemer. DFFVØ anvendes i små og mellemstore vandløb, mens DFFVa anvendes i store og til dels mellemstore vandløb (Kristensen et al., 2014). Begge DFFV-versioner afspejler især ændringer i hydromorfologiske forhold. For vandplanter anvendes Dansk Vandløbsplanteindeks, DVPI (Søndergaard et al., 2013). Indekset er ikke målrettet en særlig påvirkning af vandløbet, men giver et samlet billede af, i hvor høj grad vandplantesamfundet afviger fra det, der forventes i vandløb, som ikke, eller kun i ringe grad, er påvirket af menneskelig aktivitet. Indikatorsystemet SID_TIID for bentiske alger er nyligt udviklet af Andersen et al. (2018) med henblik på at afspejle næringsstofbelastning med især orthofosfat. Tolkninger af den økologiske tilstandsvurdering på baggrund af denne indikator er imidlertid vanskelige, da både alkalinitet og fosfor i vandløb spiller en rolle for de bentiske alger, samtidig med at betydningen af disse ikke kan adskilles (Pacheco et al., 2022). Derfor er dette økologiske tilstandselement ikke medtaget i de følgende afsnit.

Status for økologisk tilstand i danske vandløb

I den seneste rapportering af den økologiske tilstand baseret på det operationelle overvågningsprogram (2017-2021) blev der præsenteret resultater fra 4.154 type 1 vandløb, 1.503 type 2 vandløb og 83 type 3 vandløb, og disse vandløb blev vurderet til at være repræsentative for danske vandløb generelt (Baattrup-Pedersen et al., 2023). Det vil sige, at der generelt findes langt flere små vandløb end mellemstore og især store vandløb i Danmark. Data var ikke nødvendigvis tilgængelige for hvert økologisk tilstandselement fra hver operationel målestation, men samlet set opnåede 31 % og 58 % af vandløbsstationerne miljømålet, vurderet med henholdsvis DVPI og DVFI. Grundet utilstrækkelig mængde af tilgængelige fiskedata på vandløbsstationerne (ca. 100 vandløbsstationer for hhv. DFFVØ og DFFVa) er tilstandsvurderingerne baseret på landsnetstationerne i kontrolovervågningsprogrammet. Her var andelen af vandløbsstationerne, der havde minimum god økologisk tilstand, 23 % og 30 % vurderet med henholdsvis DFFVØ og DFFVa.

For de vandløbsstationer, hvor der findes data til at lave økologiske tilstandsvurderinger for både smådyr, fisk og vandplanter for hele den seneste overvågningsperiode (2017-2021), kunne det konstateres, at den samlede økologiske tilstand er god eller høj for ca. 30 % af vandløbsstationerne (Miljøstyrelsen, 2021). Det vurderes fortsat at være velkendte påvirkningsfaktorer som fysiske forhold (herunder spærringer), næringsstofbelastninger, forurening med let omsætteligt organisk stof, forurening med miljøfarlige forurenende stoffer samt en generelt intensiv fysisk vedligeholdelse af vandets transportveje (fx grødeskæring), der i varierende grad kan forklare den generelt lave andel af vandløbsstationer, der opfylder vandrammedirektivets krav om, at den økologiske tilstand som minimum skal være god. Imidlertid erkendes det også, at vandføring kan være en betydende faktor for alle økologiske tilstandselementer, men der eksisterer ikke tilstrækkelig viden til at kvantificere mulige påvirkninger af ændret vandføring på den økologiske tilstand (Baattrup-Pedersen et al., 2023).

Klimaforandringerne har imidlertid yderligere og forventeligt stigende indflydelse på den biologiske struktur og funktion i vandløb. I den sammenhæng forventes det, at det netop er de mindste vandløb, som er de mest sårbare og dermed vil udvise de stærkeste relative konsekvenser af klimaforandringerne (Kristensen et al., 2009). Mindre vandløb forventes at blive udsat for større relative temperaturstigninger og en større grad og frekvens af udtøringer eller kritisk lave vandføringer. De små vandløb udgør, som beskrevet, den klart største andel af danske vandløb. Herunder gennemgås eksisterende national og international viden om, hvorledes kritisk lave og andre typer af vandføringer kan påvirke de biologiske samfund og den økologiske tilstand i vandløb. I denne sammenhæng gennemgås desuden udvalgte nationale og internationale beslutningsstøttesystemer og metodikker til vurderinger af biologiske konsekvenser af ændret vandføringsregime. Der mangler generelt både viden og værktøjer til at identificere biologiske tålegrænser over for ekstreme vandføringshændelser, men litteraturgennemgangen skal også ses som rettesnor for at udpege forsknings- og udviklingsindsatser, der er nødvendige for at kunne fastsætte robuste tålegrænser, som kan understøtte god økologisk tilstand.

8.3 Vandføringens betydning for vandløbsorganismer og begrebet Environmental Flows

En lang række undersøgelser har vist, at variationer i vandløbenes vandføring (flow regime) har betydning for vandløbenes biologiske struktur og funktion (fx Poff et al., 1997; Bunn & Arthington, 2002; Poff & Zimmerman, 2010). Disse sammenhænge mellem vandløbenes flow regime og deres biologiske struktur og funktion udgør hjørnестenen i den principielle forvaltning af ferskvandsressourcer og dermed forståelsen for, i hvilket omfang ferskvandsressourcer kan udnyttes af det menneskelige samfund uden at påvirke vandløbenes biodiversitet negativt. Begrebet "Environmental Flows" (E-flows) sigter netop mod at identificere tålegrænser for vandløbenes biodiversitet, således at vandløbene og deres vandføring kan forvaltes bæredygtigt.

Det naturlige flow regime og hydrologiske parametre

Det naturlige flow regime blev introduceret af Poff et al. (1997) for at understøtte forståelsen af, at vandløbenes organismer er udviklet under og tilpasset til de variationer i vandføringen, som naturligt opstår som følge af vejr- og årstidsvariationer. Poff et al. (1997) gør derfor som de første op med det grundlæggende princip, at vandløbene generelt kan forvaltes efter en norm for minimumsvandføring.

Det naturlige flow regime beskriver den variation i vandføring, som forekommer i vandløb, der er upåvirkede af menneskeskabte aktiviteter (Poff et al., 1997; Sofi et al., 2020). Denne variation opstår naturligt på tværs af tidsskalaer fra timer til dage, år og årtier, og langt de fleste dele af det naturlige flow regime spiller en vigtig rolle for opretholdelsen af fysiske habitater, organismers livscyklus og vandløbsøkosystemets generelle funktion. Eksempelvis skaber kraftige vandføringer oversvømmede ådale, som er vigtige for ådalenes plantesamfund, og disse vandføringer mobiliserer samtidig aflejret fint sediment og blotlægger dermed grusbund, som er et vitalt gydehabitat for laks og ørred.

De vandføringskomponenter i det naturlige flow regime, der forventeligt er særligt relevante for vandløbenes organismer, er størrelse, hyppighed, varighed, timing og ændringsrater af især de mindste og største vandføringer (Naiman et al., 2008; Poff, 2017; Poff et al., 1997).

For at beskrive disse dele af det naturlige flow regime er der udviklet en lang række hydrologiske parametre (fx Richter et al., 1997; Olden & Poff, 2003). De hydrologiske parametre er dels baseret på hydrografer (vandføring som funktion af tid), dels på varighedskurver (kronologisk rangordning af døgnvandføringer inden for en given periode). Beregning af de hydrologiske parametre kræver et datagrundlag bestående af kontinuerte døgnvandføringer. Det primære mål med de udviklede hydrologiske parametre var altså at lave robuste kvantitative beskrivelser af vandløbenes vandføring under upåvirkede forhold, med andre ord en slags hydrologisk referencetilstand.

De hydrologiske parametre er udviklet på baggrund af lange hydrologiske tidsserier (+30 år), med målte døgnvandføringer i hydrologisk og menneskeligt upåvirkede vandløb i USA og Australien (fx Richter et al., 1997; Olden & Poff, 2003). Langt de fleste hydrologiske parametre for bestemte vandføringer (fx Q10 og Q90 [vandføringer, der repræsenterer hhv. 10 %- og 90 %-fraktilen af alle døgnvandføringer]) er normaliseret med enten medianvandføringen for hele måleperioden (+30 år) eller størrelsen af vandløbsoplandet. Hydrologiske parametre, der beskriver varigheder eller frekvenser af vandføringer af en bestemt størrelse, gengives som gennemsnit for hele måleperioden. Timingen af bestemte vandføringer er kun repræsenteret for den laveste og højeste vandføring målt som gennemsnitligt tidspunkt for hele måleperioden.

Videnskabelige anbefalinger for brugen af hydrologiske parametre

Med fortsat fokus på at optimere beskrivelserne af bestemte dele af det naturlige flow regime foreslog Olden & Poff (2003) en statistisk metode til at udvælge et mindre sæt af i alt 171 hydrologiske parametre med henblik på at udelukke hydrologiske parametre, som er stærkt interkorrelerede. Analysen blev baseret på døgnvandføringer i upåvirkede amerikanske vandløb gennem en periode på 36 år.

Kennard et al. (2010) undersøgte, hvorledes længden af de hydrologiske tidsserier kan påvirke variationen i de beregnede hydrologiske parametre på baggrund af hydrologisk upåvirkede australske vandløb. Forfatterne viste, at variationen i de hydrologiske parametre aftog med stigende længde af de hydrologiske tidsserier. Med andre ord, variationen af værdierne for de hydrologiske parametre bliver mindre, hvis de udregnes på baggrund af lange hydrologiske tidsserier. Kennard et al. (2010) konkluderede, at længden af hydrologiske tidsserier bør være på mindst 15 år (kontinuert målte døgnvandføringer) for at opnå en tilfredsstillende lille variation i værdierne for de hydrologiske parametre.

En række internationale studier understreger, at det naturlige flow regime i upåvirkede vandløb varierer i forhold til klimatiske, geologiske og topografiske forhold (fx Olden & Poff, 2003; Kennard et al., 2010; Poff et al., 2010). På baggrund af disse undersøgelser anbefales det derfor generelt, at de hydrologiske parametre først og fremmest bør anvendes til at underbygge en kategorisering af hydrologisk upåvirkede vandløb. Dette har til formål at sikre, at hydrologiske parametre fra hydrologisk påvirkede vandløb sammenlignes med hydrologiske parametre fra hydrologisk upåvirkede vandløb inden for den samme hydrologiske gruppering.

Det er vigtigt at understrege, at det overordnede formål med disse hydrologiske parametre er, at lave robuste beskrivelser af hydrologiske referenceforhold med det primære mål at kunne sammenligne hydrologiske parametre mellem hydrologiske referenceforhold og påvirkede hydrologiske forhold (fx Richter et al., 1997; Olden & Poff, 2003; Kennard et al., 2010; Poff et al., 2010). Hvis de hydrologiske referenceforhold er tilstrækkeligt stærkt beskrevet og kvantificeret, kan afvigelser fra de hydrologiske referenceforhold påvises med større sikkerhed.

Internationale rammeværk og værktøjer til arbejdet med Environmental Flows

Der findes en lang række værktøjer og rammeværk, der har til formål at understøtte forvaltningspraksis i vandløb. De internationalt mest profilerede værktøjer og rammeværk har imidlertid en ensartet grundstruktur (fx Richter et al., 1997; Poff et al., 2010). Indledningsvist anvendes de hydrologiske parametre til en hydrologisk klassificering/gruppering af vandløb med upåvirkede hydrologiske forhold. Efterfølgende sammenlignes hydrologiske parametre fra hydrologisk påvirkede og upåvirkede vandløb inden for samme hydrologiske gruppering med henblik på at kvantificere forskellen i de hydrologiske parameterværdier. For eksempel rummer værktøjet "Indicators of Hydrologic Alteration (IHA)" 32 hydrologiske parametre, som bruges til at udføre netop denne sammenligning med den ovenfor beskrevne metode (Richter et al., 1997). Værktøjet "Ecological Limits of Hydrologic Alteration (ELOHA)" rummer 171 hydrologiske parametre og bygger på samme princip som IHA (Poff et al., 2010), men her benyttes relative afvigelser fra det hydrologiske referencescenarie som parametre, der kan bruges til at analysere sammenhænge med vandløbsøkologiske parametre.

Anvendelsen af Environmental Flow-principper i EU og Danmark

Det Europæiske Miljøagentur har lavet et CIS guidance-dokument (EEA, 2015) som vejledning til, hvorledes EU-medlemslande kan arbejde med implementering af E-flow værktøjer i vandløbsforvaltningen. Det er et krav i EU's vandrammedirektiv, at medlemslandene implementerer måleprogrammer for vandføring og økologiske tilstandsværktøjer, der er målrettet (og tilstrækkeligt følsomme over for) ændringer i vandløbenes hydrologiske regime. Det anbefales af det Europæiske Miljøagentur, at medlemslandene implementerer værktøjer som IHA og ELOHA, som altså kræver robuste bestemmelser af de hydrologiske forhold i vandløb, der er hydrologisk upåvirkede af menneskelig aktivitet. Det anbefales desuden, at de 171 hydrologiske parametre (Olden & Poff, 2003) beregnes på baggrund af hydrologiske tidsserier (døgnvandføringer) med en minimumlængde på 15 år. Det anbefales endvidere, at principperne bag værktøjer som ELOHA anvendes til at etablere sammenhænge mellem vandføring og økologiske tilstandsvurderinger med henblik på at identificere tålegrænser, der kan understøtte direktivmæssige forpligtelser (fx minimum god økologisk tilstand).

Tidligere blev medianminimum- (Qmm) metoden anvendt – og bliver i et vist omfang stadig anvendt – i den danske vandløbsforvaltning (Miljøstyrelsen, 1979). Der kunne tillades vandindvinding, hvis denne ikke reducerede Qmm med mere end 5 % i vandløb, for hvilke målet var høj økologisk tilstand (svarende til målsætning A i regionplanerne). For vandløb, hvor målsætningen var god økologisk tilstand, kunne der tillades en effekt på Qmm på mellem 10-25 % (svarende til målsætningerne B1, B2 og B3 i regionplanerne).

Graeber et al. (2015) introducerede en række empiriske ligninger som alternativ til medianminimum-metoden. De empiriske ligninger er baseret på et udvalg af de 171 hydrologiske parametre (Olden & Poff, 2003), som blev beregnet på en ikke-angivet længde af den hydrologiske tidsserie. Der blev foretaget en *a priori* opdeling af vandløb i forhold til størrelseskategorier (Type 1, 2 og 3), og de hydrologiske parameterverdier blev korreleret (symbolsk regression) med de eksisterende økologiske indikatorer (DVFI, DVPI og DFFV) inden for hver størrelseskategori. På grund af utilstrækkeligt datagrundlag blev der kun opstillet empiriske ligninger for vandløb af Type 2 og 3. Det vil sige, at der fortsat mangler empiriske ligninger for de mindste vandløb (Type 1), der udgør langt størstedelen af alle danske vandløb, og som forventes at være mest udsat for kritisk lave vandføringer under tørkeperioder. Der blev ikke udført en gruppering på baggrund af hydrologiske parametre.

Generelle mangler og usikkerheder ved brugen af de hydrologiske parametre

De hydrologiske parametre er udviklet til at lave en generel karakteristik af hydrologiske regimer i hydrologisk upåvirkede vandløb og til at etablere sammenhænge mellem disse og bestemte arter eller grupper af vandløbsorganismer, hvis livscyklus er afhængig af specifikke dele af de hydrologiske regimer. Samtidig er de eksisterende internationale værktøjer (fx IHA og ELOHA) udviklet til at lave sammenligninger af de hydrologiske parametre mellem hydrologisk påvirkede og upåvirkede vandløb (inden for samme hydrologiske typologi) med henblik på at beskrive afvigelser fra hydrologiske referencescenarier med specifik relevans for bestemte arter eller grupper af vandløbsorganismer. Disse faktorer rummer en række problematikker for den direkte implementerbarhed af eksisterende E-flow værktøjer i en dansk kontekst.

For det første må det erkendes, at der formentlig ikke findes hydrologisk upåvirkede vandløb i Danmark. Det vil sige, at det ikke umiddelbart er en mulighed at anvende de eksisterende internationale værktøjer og rammeværk, som de er tiltænkt. Hvis der ikke er mulighed for at udforske sammenhænge mellem økologisk tilstand og afvigelsen fra hydrologiske referencescenarier, er den eneste reelle mulighed at udnytte eksisterende gradienter i de hydrologiske parametre på tværs af danske vandløb. I dette tilfælde må det antages, at den økologiske respons på variationer i vandføring må være størst for de mest ekstreme (både høje og lave) vandføringer. Med andre ord, at der kan etableres stress-respons sammenhænge, hvor de ekstreme hydrologiske hændelser udgør stresspåvirkningen. Men de eksisterende hydrologiske parametre angiver næsten udelukkende normaliserede gennemsnitsverdier for den hydrologiske tidsserie og altså ikke et præcist tidspunkt, varighed eller frekvens for specifikke ekstremvandføringer. Når disse værdier for de hydrologiske parametre skal sammenholdes med en enkelt punktmåling for økologisk tilstand, vil der således være tilfældig variation i den økologiske måling, ift. hvornår de enkelte ekstremvandføringer er forekommet. Hvis der skal opstilles hydrologiske tålegrænser, som kan understøtte god økologisk tilstand, fx

for kritisk lave vandføringer, må den specifikke vandføringsvolumen, varigheden af den hydrologiske hændelse og den tidlige afstand mellem hændelsen og den økologiske måling kunne inkluderes i analysen. Dette er ikke muligt med de eksisterende hydrologiske parametre.

I det nuværende danske forvaltningsgrundlag (Graeber et al., 2015) er datagrundlaget for analyserne opdelt i tre størrelseskategorier af vandløb. På den baggrund blev datagrundlaget for sparsomt til at udføre statistiske analyser for de mindste vandløb. Og netop de mindste vandløb må forventes at være mest udsatte for tørkepåvirkning og dermed kritisk lave vandføringer. Der er markante geologiske forskelle mellem det vestlige og østlige Danmark (sandede vandløbsoplande mod vest og lerede oplande mod øst), hvilket naturligt påvirker nedbørens direkte indflydelse på vandløbenes vandføringer. Det må derfor forventes, at der kan identificeres en meningsfyldt hydrologisk gruppering af danske vandløb, hvilket kan give et andet og mere hydrologisk ensartet datagrundlag. Vandløbenes størrelse vil kunne indarbejdes som betydende faktor i den statistiske analyse af sammenhænge mellem hydrologiske parametre og økologisk tilstand. Dette ville kunne inkludere de mindste vandløb i analyserne og dermed danne grundlag for at identificere hydrologiske tålegrænser, som også gælder for de mindste vandløb.

I det nuværende forvaltningsgrundlag (Graeber et al., 2015) er de implementerede økologiske tilstandsindikatorer (DVFI, DVPI og DFFV) anvendt som responsparametre i forhold til de hydrologiske parametre. Det er et krav i EU's vandrammedirektiv, at der udvælges eller udvikles økologiske indikatorer, som er tilstrækkeligt følsomme over for hydrologiske påvirkninger. Denne analyse er ikke foretaget, og de eksisterende økologiske indikatorer er primært målrettet organisk forurening, fysisk habitatkvalitet, eller belastning med næringsstoffer. Derfor kan det heller ikke uden videre undersøgelser antages, at disse økologiske indikatorer responderer på hydrologiske forandringer med tilstrækkelig følsomhed. Smådyr forventes generelt at respondere på hydrologiske forandringer, og i andre europæiske lande er der udviklet økologiske indikatorer, som netop er målrettet kritisk lave vandføringer.

Vidensbehov i forhold til at identificere tålegrænser for kritisk lave vandføringer

Som følge af ovenstående gennemgang af eksisterende hydrologiske parametre samt internationale og danske værktøjer baseret på disse kan det konkluderes, at der ikke er tilstrækkelig med viden eller værktøjer til at bestemme hydrologiske tålegrænser for især kritisk lave vandføringer i danske vandløb. Bestemmelsen af sådanne hydrologiske tålegrænser, som ville kunne anvendes til at understøtte vandløbsforvaltningen og vandrammedirektivets krav om opnåelse/vedligeholdelse af minimum god økologisk tilstand, kræver en række forsknings- og udviklingsaktiviteter. Disse bør fokuseres på: i) udvikling af nye hydrologiske parametre, som rummer kvantitative angivelser af tidspunkter, varigheder og frekvenser af konkrete vandføringshændelser i forhold til de økologiske måletidspunkter, som de skal sammenholdes med, ii) afgrænsning og hydrologisk gruppering af danske vandløb for at kunne udvikle sammenhænge mellem hydrologiske parametre og økologisk tilstand inden for grupper af vandløb med ensartede hydrologiske karakteristika, og iii) evaluering af, hvorvidt de eksisterende danske økologiske indikatorer er tilstrækkeligt følsomme til at kunne repræsentere faktiske ændringer i de biologiske samfund i danske vandløb.

9 Perspektiver for ny viden

Gitte Blicher-Mathiesen & Anastasia Katharina Kratschmer ECOS

Ovennævnte analyse af tørkes betydning for kvælstofhøst, markbalancer, udvaskning og udledning til kystvande viser, at stort set alle regioner påvirkes af lavere kvælstofhøst og dermed øget kvælstofudledning ved ekstrem tørke. Tørke rammer dog ikke altid ens inden for de fem regioner Nordjylland, Vest- og Sønderjylland, Østjylland, Fyn og Sjælland. I 2013 var Nordjylland f.eks. hårdest ramt af med lave udbytter, og i 2018 var Sjælland mest påvirket. Dette betyder, at de virkemidler, der kan sættes i spil, er regionalt forskellige, fx dyrkning af mere tolerante afgrøder, bedre styring af markvanding, hvor dette er muligt, anvendelse af metoder mod kvælstofudledning i form af drænvirkemidler som vådområder, minivådområder, intelligente bufferzoner mv.

Fælles for virkemidler gælder det, at jo bedre viden på lokal skala, jo bedre kan man målrette virkemidler, der skal forhindre merudledning af kvælstof efter tørkeperioder.

Da vi i forvejen har gode lokale oplysninger og information om gødningsinput for hver landbrugsbedrift, har opgørelse af kvælstofudbytter på finere skala end de fem regioner anvendt her et stort perspektiv. Hertil kan man udnytte den kendsgerning, at satellitdata har en geografisk meget detaljeret distribution.

9.1 Tørke og plantevækst

Afgrøders udbytterespons på forskellige klimaforhold kan reelt kun opgøres ud fra indsamlede udbyttedata. Danmarks Statistik indsamler hvert år data fra landmænd til at opgøres afgrødefordeling og udbytter mv. Disse data opgøres hvert år for 10 landsdele med start i 2007 efter kommunalreformen. Udbyttedata fra Danmarks Statistik er anvendt til at beregne kvælstofudbytter, som indgår i kvælstofmarkbalancer for fem regioner. Kort over de fem regioner ses i figur 2.2.

Ud over at indsamle data fra landmænd eller fra forsøg kan satellitdata anvendes til at beskrive udviklingen i afgrøder med en meget høj geografisk opløsning. Dette er gjort i nedenstående plots for de seks LOOP-oplande (figur 9.1 og 9.2). De anvendte satellitdata har kun været tilgængelige for perioden 2017-2023.

Der er beregnet tre indeks, som alle giver indsigt i vegetationen på markerne. De belyser forskellige aspekter af vegetationen, men der er en vis grad af korrelation mellem dem.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) er et velkendt indeks, der bruges til at vurdere sundheden og væksten af vegetation. NDVI-værdierne varierer fra -1 til 1, hvor værdier tættere på 1 indikerer sundere vegetation. En typisk værdi for en plante om sommeren kan være omkring 0,8, mens den om vinteren kan være helt nede omkring 0. Døde genstande vil have værdier under 0. Beregningen af NDVI er baseret på mængden af rødt lys og NIR (nær-infrarødt) lys, der reflekteres fra vegetationen. (<https://eos.com/make-an-analysis/ndvi/>).

NDMI (Normalized Difference Moisture Index) er et indeks, der bruges til at vurdere, om vegetationen mangler vand. NDMI-værdierne spænder også fra -

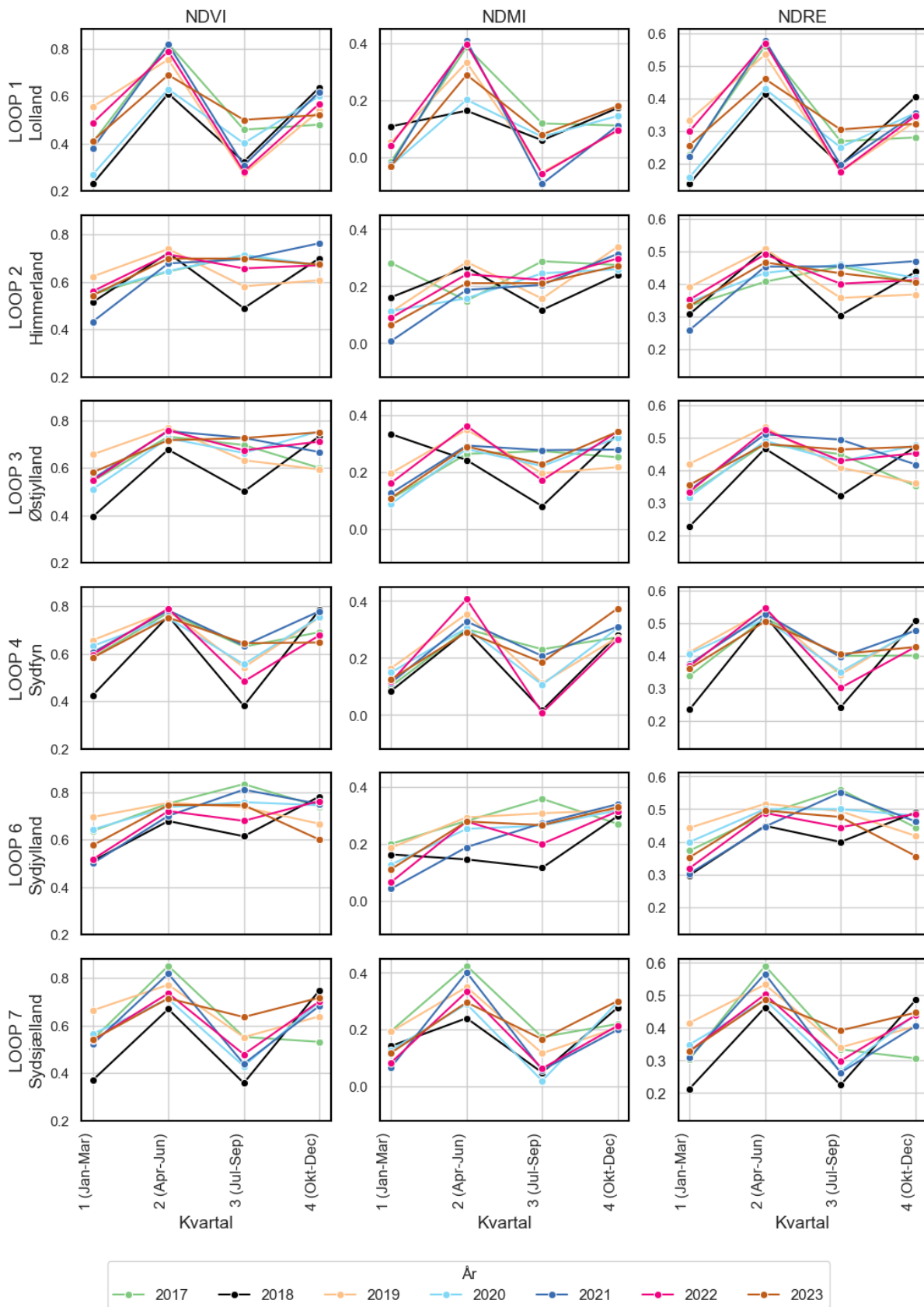
1 til 1, og positive værdier over cirka 0,2 indikerer, at planterne ikke lider af vandmangel. Lave eller negative værdier kan indikere (næsten) bar jord eller planter, der mangler vand. Beregningen af NDMI er baseret på reflekteret lys fra NIR (nær-infrarødt lys) og SWIR (kortbølget infrarødt lys). Lavt NDMI kan dog også indikere en lav grad af plantedække og er derfor mest informativt, når der er plantedække på marken. (<https://eos.com/make-an-analysis/ndmi/>)

NDRE (Normalized Difference Red Edge Index) er et indeks, der vurderer vegetationens sundhed baseret på klorofylindholdet og tørstofindholdet i planten. NDRE-værdierne varierer fra -1 til 1, hvor højere værdier indikerer et højere klorofylindhold og er et tegn på sundhed. Beregningen af NDRE er baseret på refleksionen af NIR (nær-infrarødt) lys og af refleksionen af lys i området omkring bølgelængde 700 nanometer. Lys i denne del af lysspektret kaldes på engelsk "red edge (rød kant)"-lys. (<https://eos.com/make-an-analysis/ndre/>)

Plottene er frembragt ved at kombinere alle markgrænserne fra de seks LOOP-oplande i perioden 2015-2023, så områder med en fælles dyrkningshistorik identificeres, selvom markgrænserne kan ændre sig, og markerne kan blive slået sammen eller delt mellem årene. For hver af disse områder er de tre indeks (NDVI, NDMI, NDRE) beregnet for perioden 2017-2023, hver gang et satellitbillede fra Sentinel-2-satellitterne har været tilgængeligt. I de fleste markområder har dette været omkring 30 gange om året i gennemsnit, men der er variation, fra cirka 10 gange til 50 gange årligt. Data er generelt oftere tilgængelige om sommeren på grund af bedre vejrforhold. Dage med sne eller skyet vejr er udelukket for at opnå det mest præcise billede. Ligeledes er kun markområder større end 5000 m² anvendt. For hver kombination af dato, markområde og indekstype er der beregnet en medianværdi.

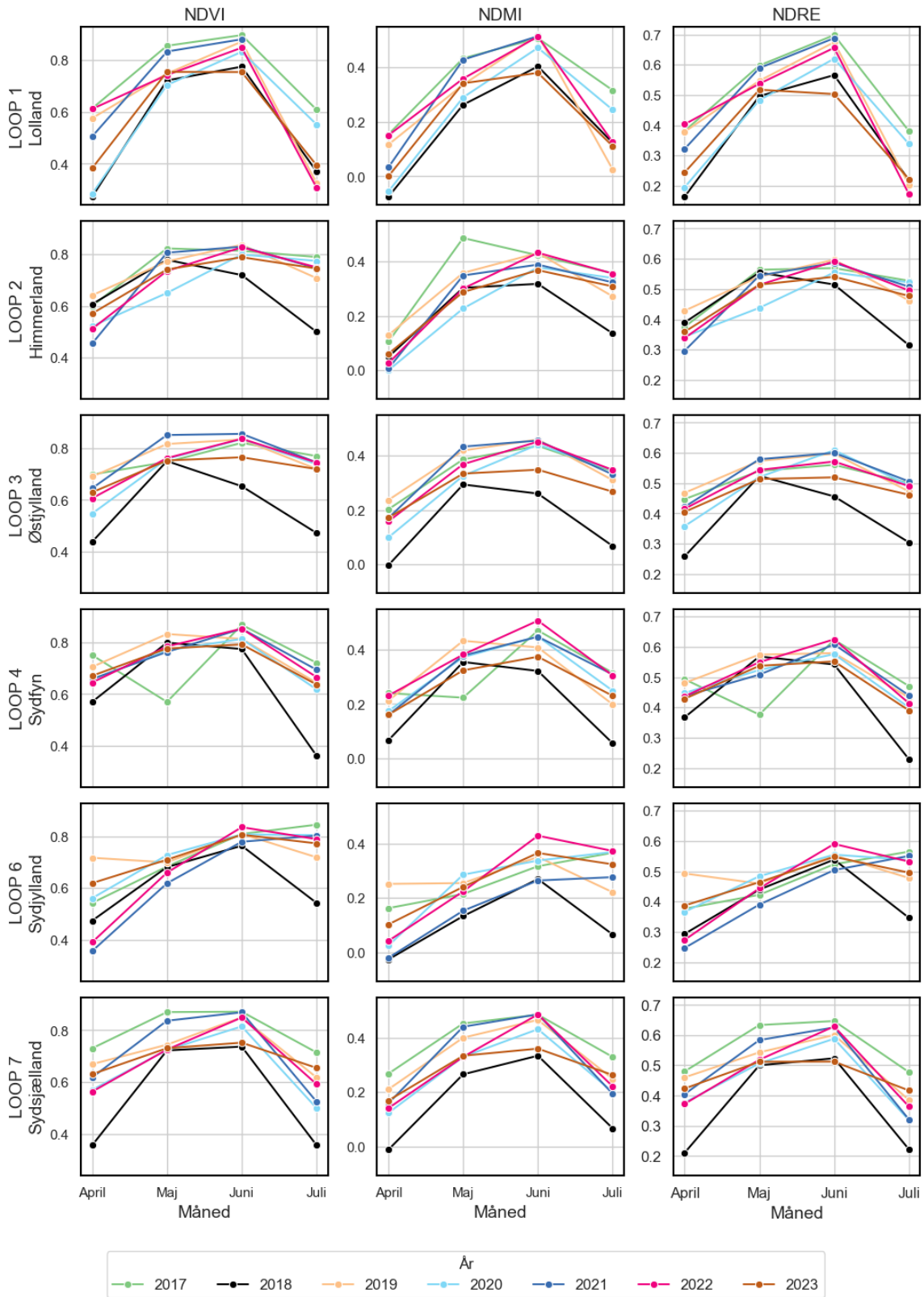
Medianerne er blevet aggregeret på to forskellige måder i plottene – først kvartalsvist og derefter på månedsbasis i forårs- og sommermånederne. Hvert LOOP-opland er blevet behandlet separat. I disse plots vises medianen af indekssværdien fra alle de inkluderede markområder i LOOP-oplandet for den aggregerede periode. Året 2018 er markeret med sort, da det skiller sig ud som et meget tørt år, hvor især NDMI-værdierne er lavere end normalt i flere oplande, hvilket indikerer, at vegetationen er mere tør end normalt.

Kvartalsvise vegetationsindexer for år og LOOP-område



Figur 9.1. Beregnede vegetationsindexer, NDVI, NDMI og NDRE, opgjort per kvartal for syv LOOP-område i perioden 2017-2023.

Månedlige vegetationsindekser (april til juli),
for år og LOOP-oplande



Figur 9.2. Beregnede vegetationsindekser, NDVI, NDMI og NDRE, opgjort per kvartal for syv LOOP-oplande i perioden 2017-2023.

Plottene for vegetationsindeksene NDVI, NDMI og NDRE viser, at særligt 2018 har et lavere afgrødedække end de øvrige år i perioden 2017-2023, mens 2023, i Danmarks Statistik har registrerede lave udbytter, ikke genfindes med lavt vegetationsindeks opgjort på satellitdata. De viste vegetationsindekser kan ikke tolkes alene ift. udbyttens niveau imellem årene.

9.2 Ny model til beregning af kvælstofudledning og effekt af tørkes

I kapitel 7 blev det gennemgået, hvordan residualer for regressionsligningen mellem afstrømning og den diffuse kvælstofudledning er højere i år med tørke, og indimellem er residualen og dermed kvælstoftransporten desuden højere året efter tørkeåret. I tørkeåret 2018 var der ud over lav nedbør og tørke i afgrødernes vækstsæson også lav nedbør og afstrømning i de følgende efterårs- og vinter måneder. Det betød, at det kvælstof, som ikke blev optaget af de mindre voksende afgrøder, i høj grad blev i jorden og først blev udvasket i det efterfølgende hydrologiske år 2019/20.

De viste sammenhænge for afstrømning og kvælstofudledning illustrerer regionale forskelle mellem de fem viste regioner.

Det anbefales, at der afsættes ressourcer til at udvikle en ny model for kvælstofudledningen, som inddrager regionale data for kvælstofbalancer, detaljerede satellitdata til beregning af kvælstofhøst, øvrige relevante dyrkningsparametre som efterafgrøder og ompløjning om efteråret, temperatur og afstrømningsdynamik.

10 Referencer

Andersen, M.N., 2016. Vanding af kløvergræs. Oversigt over Landsforsøgene, 2016, 358-360.

Andersen, M.N., Jensen, C.R. & Lösch, R., 1992. The interaction effects of potassium and drought in field-grown barley. II. Nutrient relations, tissue water content and morphological development. *Acta Agric. Scand., Sect B* 42: 45-56.

Andersen, M.N., Olesen, J.E., Holst, N., Skovgård, H., Kudsk, P., Jørgensen, L.N., Børgesen, C.D., Munkholm, L.J., Iversen, B.V., Gregersen, P.L., Holme, I., Brinch-Pedersen, H., Kongsted, A.G., Børsting, C.F., Sørensen, J.T., Henriksen, B.I.F., Callesen, H., Woyengo, T.A., Ejrnæs, R., Fløjgaard, C., Krogh, P.H., Villumsen, T.M., Adamsen, A.P.S., Rasmussen, M.D., Guldborg, L.B. & Rong, L., 2023. Vidensyntese om klimatilpasning og landbrug. DCA-rapport, nr. 214, DCA - Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Universitet. <https://dcapub.au.dk/djfpublikation/djfpdf/DCArapport214.pdf>

Andersen, M. et al. 2024, in print. Økonomiske konsekvenser ved tørke i landbruget. Rapport til Klimadatastyrelsen.

Barracough, P.B., Kuhlmann, H. & Weir, A.H., 1989. The Effects of Prolonged Drought and Nitrogen Fertilizer on Root and Shoot Growth and Water Uptake by Winter Wheat. *J. Agron. Crop Sci.* 163: 352-360. <https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.1989.tb00778.x>

Bhuiyan, C., Singh, R.P. & Kogan, F.N., 2006. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 8: 289-302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.03.002>

Blicher-Mathiesen, G., Thorsen, M. Petersen, R.J., Rolighed, J., Andersen, H.E., Larsen, S.E., Jensen, P.G., Wienke, J., Hansen, B. & Thorling, L. 2024. Landovervågningsoplande 2022. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt center for Miljø og Energi, 274 s. - Videnskabelig rapport nr. 589. https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Videnskabelige_rapporter_500-599/SR589.pdf

Blicher-Mathiesen, G. & Sørensen, P. (red). 2020. Baseline 2027 for udvalgte elementer. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 120 s. - Teknisk rapport nr. 184 <http://dce2.au.dk/pub/TR184.pdf>

Blicher-Mathiesen G., Andersen H.E. & Larsen S.E. 2014. Nitrogen field balances and suction cup-measured N leaching in Danish catchments *Agric Ecosyst. Environ.* 196: 69-75

Bloomfield, J.P., Marchant, B.P., 2013. Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17: 4769-4787. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013>.

Bunn, S.E. & Arthington, A.H. 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental Management* 30: 492-507.

Baatrup-Pedersen, A., Kjær, C. & Kjeldgaard, A., 2023. Vandløb 2021-Økologisk Tilstand. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 48 s. - Videnskabelig rapport nr. 561

Dansk Landbrugsrådgivning, 2008. Oversigt over Landsforsøgene. 426 sider. https://www.landbrugsinfo.dk/-/media/landbrugsinfo/public/9/b/d/pl_oversigten_2008.pdf

EDU, 2020. Standardized Precipitation Index (SPI). Copernicus European Drought Observatory (EDO): <https://edo.jrc.ec.europa.eu/https://drought.emergency.copernicus.eu/data/factsheet>

EEA, 2019. Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe Report No 04/2019 from Det Europæiske Miljøagentur. S112. <https://www.eea.europa.eu/publications/cc-adaptation-agriculture>

European Environment Agency (EEA), 2015. CIS Guidance Document No 31 – Ecological Flows in the implementation of the Water Framework Directive. Technical Report 2015-086.

Chan, S.S., Seidenfaden, I.K., Jensen, K.H. & Sonnenborg, T.O., 2021. Climate change impacts and uncertainty on spatiotemporal variations of drought indices for an irrigated catchment. J. Hydrol. 601, 126814. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126814>

Graeber, D., Wiberg-Larsen, P., Bøgestrand, J. & Baatrup-Pedersen, A., 2015. Vurdering af effekten af vandindvinding på vandløbs økologiske tilstand. Notat fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi. 29 pp.

GEUS, 2024. National well database JUPITER [WWW Document]. URL <https://eng.geus.dk/products-services-facilities/data-and-maps/national-well-database-jupiter>

Grant, R. (2011). Prøvetagning af drænvand i landovervågningen: intensiv prøvetagning. Teknisk anvisning. Fagdatacenter for Stofudvaskning fra dyrkede arealer, Institut for Bioscience, Aarhus Universitet.

Grant, R. (2012). Prøvetagning af drænvand i landovervågningen: Punktprøver. Teknisk anvisning. Fagdatacenter for Stofudvaskning fra dyrkede arealer, Institut for Bioscience, Aarhus Universitet.

Henriksen, H.J., Kragh, S.J., Gotfredsen, J., Ondracek, M., van Til, M., Jakobsen, A., Schneider, R.J.M., Koch, J., Troldborg, L., Rasmussen, P., Pasten-Zapata, E., & Stisen, S., 2021. Udvikling af landsdækkende modelberegninger af terrænnære hydrologiske forhold i 100m grid ved anvendelse af DK-modellen, Dokumentationsrapport vedr. modelleverancer til Hydrologisk Informations- og Prognosesystem. GEUS. <https://doi.org/https://doi.org/10.22008/gpub/38113>

Henriksen, H.J., Ondracek, M. & Troldborg, L., 2023a. Vandressourceopgørelse – datarapport. Baggrundsrapport til Miljøstyrelsens samlede afrapportering omkring forvaltning af fremtidens drikkevandsressource. Metode, resultater, usikkerheder og forventede klimapåvirkninger, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport. GEUS. <https://doi.org/10.22008/gpub/34675>

Henriksen, H.J., Ondracek, M. & Troldborg, L., 2023. Vandressourceopgørelse – datarapport. Rapport nr. 8, Danmarks og Grønlands Geologiske undersøgelser, 132 s. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2023/12/Bilag-3-1.pdf>

Henriksen, H.J., Schneider, R., Koch, J., Ondracek, M., Troldborg, L., Seidenfaden, I.K., Kragh, S.J., Bøgh, E. & Stisen, S., 2023b. A New Digital Twin for Climate Change Adaptation, Water Management, and Disaster Risk Reduction (HIP Digital Twin). *Water* 15. <https://doi.org/10.3390/w15010025>

Henriksen, H.J., Schneider, R.J.M. & Nilsson, B., 2022. Analysis of drought indicators based on a national coupled hydrological model. Identification of drought events, propagation of drought indices, aggregation level and illustration of how data from HIP realtime model can support vulnerability assessment for damages to houses, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse 2022/25. GEUS, Copenhagen. <https://doi.org/10.22008/gpub/34660>

Højberg, A.L., Troldborg, L., Stisen, S., Christensen, B.B.S., Henriksen, H.J., 2013. Stakeholder driven update and improvement of a national water resources model. *Environ. Model. Softw.* 40: 202-213. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.010>

Jarvis, P., Rey, A., Petsikos, C., Wingate, L., Rayment, M., Pereira, J., Banza, J., David, J., Miglietta, F., Borghetti, M., Manca, G. & Valentini, R., 2007. Drying and wetting of Mediterranean soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: the “Birch effect.” *Tree Physiol.* 27: 929-940. <https://doi.org/10.1093/treephys/27.7.929>

Kennard M.J., Mackay S.J., Pusey B.J., Olden J.D. & Marsh N., 2010. Quantifying uncertainty in estimation of hydrologic metrics for ecohydrological studies. *River Res. Appl.* 26: 137-156.

Kennard M.J., Pusey B.J., Olden J.D., Mackay S.J., Stein J.L. & Marsh N., 2010. Classification of natural flow regimes in Australia to support environmental flow management. *Freshwat. Biol.* 55: 171-193.

Kristensen, E.A., Kronvang, B., Thodsen, H. & Rasmussen J.J., 2009. Små og sårbare – Livet i små vandløb i et fremtidigt klima. *Vand & Jord* 4: 153-156.

Kristensen E.A., Jepsen J., Nielsen J., Pedersen S. & Koed A., 2014. Dansk Fiskeindeks for vandløb (DFFV). Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 95.

Kristensen, E., Kronvang, B., Thodsen, H. & Rasmussen, J. (2009). Små og sårbare – livet i mindre vandløb i et fremtidigt klima. *Vand og jord* 4, 153-156. <https://vand-og-jord.dk/wp-content/uploads/2021/01/vj409-vandlob.pdf>

Larsen, S.E. & Ovesen, N.B., 2021. Ekstremværdianalyser af vandføringsdata 1990 - 2019. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 15 s. – Fagligt notat nr. 2021 | 13 https://dce.au.dk/fileadmin/dce.au.dk/Udgivelser/Notater_2021/N2021_13.pdf

McKee, T.B., Doesken, N.J. & Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, in: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston, pp. 179-183.

Miljøstyrelsen, 1979. Vandforsyningsplanlægning 2. del. Planlægning af indvinding fra overfladevand (Vejledning fra Miljøstyrelsen). Miljøstyrelsen.

Miljøstyrelsen, 1998. Biologisk bedømmelse af vandløbskvalitet. Vejledning fra Miljøstyrelsen nr. 5, 1998.

Miljøstyrelsen, 2021. Tilstanden i det danske vandmiljø. Vand & Jord 3: 92-98.

Miljøstyrelsen, 2023. NOVANA – Det nationale overvågningsprogram for vandmiljø og natur 2023-27. Miljøstyrelsen.

Mishra, A.K. & Singh, V.P., 2010. A review of drought concepts. J. Hydrol. 391, 202-216.

Naiman, R.J., Latterell, J.J., Pettit, N.E. & Olden, J.D., 2008. Flow variability and the biophysical vitality of river systems. Geoscience 340: 629-643.

Nalbantis, I. & Tsakiris, G., 2009. Assessment of Hydrological Drought Revisited. Water Resour. Manag. 23: 881-897. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>

Narasimhan, B. & Srinivasan, R., 2005. Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring. Agric. For. Meteorol. 133: 69-88.

Olden, J.D. & Poff, N.L., 2003. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. River Res. Appl. 19: 101-121.

Pacheco, J.P, Larsen, S.E. & Baattrup-Pedersen, A., 2023. Alkalinity and its influence on benthic diatom assessments in Danish running waters. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 31 pp. Scientific Report No. 521.

Petersen, R.J., Blicher-Mathiesen, G., Rolighed, J., Andersen, H.E. & Kronvang, B., 2021. Three decades of regulation of agricultural nitrogen losses: Experiences from the Danish Agricultural Monitoring Program. Sci. Total Environ. 787: 147619.

Poff, N.L., 2017. Beyond the natural flow regime? Broadening the hydro-ecological foundation to meet environmental flows challenges in a non-stationary world. Freshwat. Biol. 63: 1011-1021.

Poff, N.L. & Zimmerman J.K., 2010. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. Freshwat. Biol. 55: 194-205

Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Richter, B., Sparks, R. & Stromberg, J., 1997. The natural flow regime: A new paradigm for riverine conservation and restoration. Bioscience 47: 769-784.

Poff, N.L., Richter, B.D., Arthington, A.H., Bunn, S.E., Naiman, R.J., Kendy, E., Acreman, M., Apse, C., Bledsoe, B.P., Freeman, M.C., Henriksen, J., Jacobson, R.B., Kennen, J.G., Merritt, D.M., O'Keeffe, J.H., Olden, J.D., Rogers, K., Tharme, R.E. & Warner A., 2010. The ecological limits of hydrologic alteration (ELOHA): A new framework for developing regional environmental flow standards. *Freshwat. Biol.* 55: 147-170.

Richter B.D., Baumgartner J.V., Wigington R. & Braun D.P., 1997. How much water does a river need? *Freshwat. Biol.* 37: 231-249.

Schneider, R., Koch, J., Troldborg, L., Henriksen, H.J. & Stisen, S., 2022. Machine-learning-based downscaling of modelled climate change impacts on groundwater table depth. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 26: 5859-5877. <https://doi.org/10.5194/hess-26-5859-2022>

Seidenfaden, I.K., Schneider, R., Nilsson, B., Hinsby, K., Hansen, F.L.M., Martin, N.L., Andreasen, M., Højberg, A.L., Ondrack, M. & Stisen, S., 2025. in prep. Tamarapport: Hydrologisk Tørke. Rapport udarbejdes under tørkeprojektet " "En styrket tørkeindsats". Forventes udgivelse marts 2025.

Seidenfaden, I.K., Sonnenborg, T.O., Stisen, S. & Kidmose, J., 2022. Quantification of climate change sensitivity of shallow and deep groundwater in Denmark. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 41, 101100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101100>

Shahnazari, A., Liu, F., Ahmadi, S.H., Jensen, C.R., Laerke, P.E., Plauborg F.L., Jacobsen, S.-E. & Andersen, M.N., 2008. Nitrogen dynamics in the soil-plant system under deficit and partial root zone drying irrigation strategies in potatoes. *Eu. J. Agro.* 28: 65-73.

Sofi, M.S., Bhat, S.U, Rashid, I. & Kuniyal, J.C., 2020. The natural flow regime: A master variable for maintaining river ecosystem health. *Ecohydrology* 13: e2247.

Stahl, K., Vidal, J.-P., Hannaford, J., Tijdeman, E., Laaha, G., Gauster, T. & Tallaksen, L.M., 2020. The challenges of hydrological drought definition, quantification and communication: an interdisciplinary perspective. *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci.* 383: 291-295. <https://doi.org/10.5194/piahs-383-291-2020>

Stisen, S., Ondracek, M., Troldborg, L., Schneider, R.J.M. & Til, M.J. van, 2019. National Vandressource Model. Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019. GEUS report. Geological Survey of Denmark and Greenland, Copenhagen, Denmark.

Søndergaard, M., Lauridsen, T.L., Kristensen, E.A, Baattrup-Pedersen, A., Wiberg Larsen, P., Bjerring, R. & Friberg, N., 2013. Biologiske indikatorer til vurdering af økologisk kvalitet i danske søer og vandløb. Aarhus Universitet, DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, 78 s. - Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 59.

Tallaksen, L.M., Van Lanen, H.A.J., 2024. Chapter 1 - Introduction, in: Tallaksen, L.M. & van Lanen, H.A.J. (Eds.), *Hydrological Drought (Second Edition)*. Elsevier, pp. 3-20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819082-1.00009-6>

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. Danish Centre for Food and Agriculture (DCA), Tjele, Denmark.

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 Agric. Scand. Sect. B – Soil Plant Sci.* 72: 913-922. <https://doi.org/10.1080/09064710.2022.2122864>

Thodsen, H., Tornbjerg, H., Bøgestrand, J., Larsen, S.E., Ovesen, N.B., Blicher-Mathiesen, G., Rolighed, J., Holm, H. & Kjeldgaard, A. 2021. Vandløb 2019 - Kemisk vandkvalitet og stoftransport. NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 74 s. - Videnskabelig rapport nr. 452 <http://dce2.au.dk/pub/SR452.pdf>

Thodsen, H., Tornbjerg, H., Larsen, S.E., Conradsen, A.R., Muff, E. & Blicher-Mathiesen, G., 2024. Vand- & Stoftransport 2023. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 79 s. - Videnskabelig rapport nr. 629.

Thorling, L., Albers, C.N., Ditlefsen, D., Hansen, B., Johnsen, A.R., Kazmierczak, J., Mortensen, M.H. & Trolldborg, L., 2024. Grundvand. Status og udvikling 1989-2022. Tek. Rapp. GEUS 2024.

Van Loon, A.F., 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdiscip. Rev. Water* 2: 359-392. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1085>

Wang, Y., Jensen, C.R. & Liu, F., 2017. Nutritional responses to soil drying and rewetting cycles under partial root-zone drying irrigation. *Agricultural Water Manag.* 179: 254-259.

Webster, C.P. & Dowdell, R.J., 1984. Effect of drought and irrigation on the fate of nitrogen applied to cut permanent grass swards in lysimeters: Leaching losses. *J. Sci. Food Agric.* 35, 1105-1111. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2740351009>

Windolf, J., Thodsen, H., Trolldborg, L., Larsen, S.E., Bøgestrand, J., Ovesen, N.B. & Kronvang, B., 2011. A distributed modelling system for simulation of monthly runoff and nitrogen sources, loads and sinks for ungauged catchments in Denmark. *J. Environ. Monit.* 13: 2645-2658.

Windolf, J., Blicher-Mathiesen, G. & Larsen, S. 2012a. Markbalancer og den diffuse kvælstofafstrømning. Fagligt notat fra DCE til Naturstyrelsen, 47 pp. https://pure.au.dk/portal/files/44570035/Notat_Markbalancer.pdf

Windolf, J., Blicher-Mathiesen, G., Carstensen, J. & Kronvang, B., 2012b. Changes in nitrogen loads to estuaries following implementation of governmental action plans in Denmark: A paired catchment and estuary approach for analysing regional responses. *Environ. Sci. Pollut.* 24: 24-33.

Yang, Q., Ravnskov, S. & Andersen, M.N., 2020. Nutrient uptake and growth of potato: Arbuscular mycorrhiza symbiosis interacts with quality and quantity of amended biochars. *J. Plant Nutrition Soil Sci.* 183: 220-232 . <https://doi.org/10.1002/jpln.201900205>

TØRKES BETYDNING FOR
KVÆLSTOFUDLEDNING, VANDFØRING OG
BIOLOGI I VANDLØB
- PERSPEKTIVER FOR KLIMASIKRING OG
FORVALTNING AF VORES
VANDRESSOURCER

Tørke giver mindre grundvand og lav vandføring som kan give dårlige levevilkår i vandløb. Ved tørkeramte lave høstudbytter, fjernes der mindre kvælstof fra markerne end forventet. Der vil derfor være et større kvælstofoverskud i jorden, som ved overskudsnedbør vaskes ud af jorden til vandløb og kystvande, hvor det kan bidrage til dårlige økologisk tilstand.