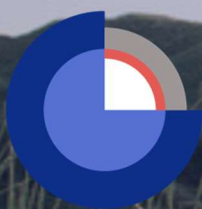




Klimadatastyrelsen



GEUS



Danmarks
Meteorologiske
Institut

Tørkeindsats 2024

INDHOLD

INDLEDNING	3
RESULTATER	4
TØRKEORDBOG	5
 <u>SPOR 1: METEOROLOGISK TØRKE</u>	
Indsats I: Bedre grundlag for håndtering af historiske nedbørsdata	7
Indsats I: Håndtering af diskontinuitet i nedbørdatasæt	9
Indsats II: Tørkerisiko og klimaændringer i Danmark	11
Indsats II: Forbedret DMI's offentlige tørkeindeks	13
 <u>SPOR 2: HYDROLOGISK TØRKE</u>	
Indsats I: Analyser af hydrologisk tørke	14
Indsats II: Validering af modelsimuleringer for tørke	16
Indsats III: Nye datamuligheder til overvågning og monitorering af tørke	18
Indsats IV: Værktøjer til planlægning og link mellem modelsimuleringer (eller måledata) og konsekvenser af tørke	20
 <u>SPOR 3: KONSEKVENSER OG DATABASEHOV</u>	
Indsats I: Kortlægning af aktører, opgaver og datagrundlag i relation til tørkehændelser i Danmark – inspiration til videre arbejde	22
Indsats II: LAR-data til vandingsplanlægning	24
Indsats III: Satellitdata om tørke – potentiale til at forebygge konsekvenser	27
Indsats IV: Tørkes betydning for kvælstofsudledning samt vandføring	30
Indsats V: Økonomiske konsekvenser ved tørke i landbruget	33
 VIDERE PROCES OG KONKLUSION	36
NOTER OG KILDER	37

INDLEDNING

Tørke er en kompleks og mindre belyst vejrhændelse i dansk kontekst, der kan have vidtrækkende konsekvenser for samfundet. Tørken i sommeren 2018 og igen i forsommeren 2023 viste, hvordan langvarig nedbørmangel kan påvirke landbrug, vandressourcer og økosystemer. Vejrhændelser som disse har understreget behovet for en bedre forståelse af tørke i Danmark – hvordan den opstår, udvikler sig og påvirker samfundet.

Hidtil har der ikke eksisteret en samlet, systematisk viden om tørke i Danmark. Data om tørke har været fragmenterede, og der har manglet en fælles definition og en helhedsorienteret tilgang til at forstå dens dynamik og påvirkning af samfundet. For at styrke vidensgrundlaget er der derfor gennem Forskningsreserven for 2024 (FR24) afsat 14 mio. kr. til en målrettet vidensindsats med det formål at kortlægge tørkens forekomst og konsekvenser, samt opbygge et solidt datagrundlag, der kan understøtte fremtidig planlægning, forebyggelse og afbødning af tørkens konsekvenser for samfundet. Med den styrkede tørkeindsats er der for første gang taget et afgørende skridt i retning af at opbygge en systematisk forståelse af tørke i Danmark.

Den styrkede tørkeindsats er et fælles projekt mellem Danmarks Meteorologiske Institut (DMI), De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) og Klimadatastyrelsen (KDS). Derudover er projektet blevet koordineret med Københavns Universitet (IFRO) og Aarhus Universitet (DCE, DCA). Samarbejdet mellem disse tre myndigheder og universiteterne har muliggjort, at tørke er blevet belyst fra flere vinkler – fra meteorologiske og hydrologiske forhold til samfundsmæssige konsekvenser og datamuligheder for at håndtere disse. En vigtig del af indsatsen har været at etablere en fælles forståelse og terminologi, så viden kan deles på tværs af sektorer og bruges operativt i klimatilpasning og beredskabsplanlægning.

Forståelsen af tørke i Danmark er blevet styrket gennem en systematisk analyse, struktureret i tre tematiske spor: meteorologisk tørke, hydrologisk tørke og de samfundsmæssige konsekvenser. Meteorologiske forhold skaber grundlaget for hydrologiske ændringer, som i sidste ende påvirker samfundet og understreger behovet for robuste data til overvågning og beslutningstagning. Denne opdeling gør det muligt at belyse tørkes udvikling fra dens vejrsmæssige oprindelse over i dens effekt på vandressourcer til de konkrete konsekvenser for landbrug, miljø og vandforvaltning. Ved at analysere tørken ud fra disse tre perspektiver, kan vi bedre forstå sammenhænge og dermed styrke samfundets evne til at forudsige, håndtere og afbøde tørke i fremtiden. Afrapporteringen i denne rapport præsenterer de væsentligste resultater af projektet, herunder forbedring af datagrundlag, tørkes udbredelse og udvikling samt konsekvenser for samfundet. Mens den mere dybdegående afrapportering af de forskellige temaer forefindes i de temarapporterne.

Gennem denne første fælles indsats er der skabt en større viden om tørke i Danmark, så konsekvenserne af tørke i Danmark i højere grad kan forudsiges, håndteres og afbødes. Indsatsen fortsætter i 2025 med yderligere midler fra Forskningsreserven, hvilket muliggør en videreudvikling af arbejdet, samt at den opbyggede viden kan styrkes og operationaliseres til gavn for det danske samfund.

RESULTATER

I aftaleteksten på forskningsreserven 2024 er der lagt vægt på at styrke både viden- og datagrundlaget for tørke i Danmark. Dette afsnit præsenterer nogle af de centrale resultater fra de gennemførte undersøgelser, der har bidraget til en mere systematisk forståelse af tørkens udvikling, konsekvenser og håndteringsmuligheder samt forbedret datagrundlaget for fremtidige analyser og beslutningsværktøjer.

Vidensgrundlag

For at styrke forståelsen af tørke i Danmark er der gennemført analyser af dens meteorologiske, hydrologiske og samfundsmæssige konsekvenser. En fælles ordbog for tørkerelaterede begreber er blevet udviklet for at facilitere en ensartet forståelse på tværs af myndigheder.

Meteorologiske analyser for tørkerisiko viser ikke ensrettede resultater, hvor studier på den ene side peger på, at den samlede hyppighed af tørkeperioder ikke nødvendigvis stiger med klimaforandringerne, mens andre studier viser, at ekstreme tørkeforløb kan forekomme hyppigere i takt med klimaforandringerne. Der vurderes at være behov for yderligere afdækning heraf. Studier af tørkens udvikling gennem det hydrologiske system har vist, hvordan et nedbørsunderskud påvirker jordvand, vandløb og grundvand i forskellige tidsrammer, og at udviklingen kan være forskellig hen over landet blandt andet pga. forskelle i jordtyper og geologi. Hydrologiske tørker kan vare fra uger op til flere måneder og have langsigtede effekter på vandets kredsløb og afhængige økosystemer. Derudover er der skabt et bedre overblik over, hvordan tørkehændelser håndteres på tværs af myndigheder og sektorer, hvilket kan bidrage til en mere koordineret indsats mod tørke i fremtiden. Tørke har især konsekvenser for landbrug og miljø. Resultaterne fra projektets undersøgelser viser, at tørke fører til betydelige udbyttetab, selv på dyrkningssikre jorde, hvilket øger landbrugets økonomiske usikkerhed. Behovet for kunstvanding stiger, hvilket kan presse både grundvandsmagasiner og vandløb, og tilgængeligheden af en bæredygtig vandressource er i nogle områder af Danmark allerede begrænset. Derudover kan tørke føre til en ophobning af næringsstoffer i jorden, som efterfølgende udvaskes ved kraftig nedbør, hvilket øger risikoen for kvælstof- og fosfortab til vandmiljøet.

Datagrundlag

For at sikre et mere ensartet og pålideligt datagrundlag til forskning, planlægning og værktøjer til håndtering af tørke, er der gennemført en række indsatser med fokus på data. Den nationale hydrologiske model er blevet valideret, for at sikre, at den bedre kan repræsentere tørkeudviklingen i realtid. Derudover er der udviklet på DMI's tørkeindeks, hvilket vil give mere præcise vurderinger af tørken, mens den står på. Der er derudover arbejdet med en bedre database for håndtering af historiske nedbørdata, som kan bruges til en række formål, herunder bedre forståelse af tidligere tørkehændelser. I tørkeindsatsen har satellitdata spillet en central rolle i den forbedrede overvågning af tørke. Målinger af vegetationsstress, jordfugtighed og fordampning fra satellitter giver et mere præcist billede af tørkens udvikling og udbredelse. Disse data er vigtige både for at forstå konsekvenserne af tørke i realtid og for at udvikle strategier til at afbøde negative effekter i landbrug, natur og vandforvaltning.

Med disse forbedringer i viden- og datagrundlaget er der nu et langt bedre grundlag for at analysere, overvåge og håndtere tørke i Danmark. Denne data og viden kan fremover anvendes til bedre overvågning, klimatilpasning og strategisk planlægning, så samfundet er bedre rustet til at håndtere fremtidige tørkeperioder.

Aftaletekst fra Forskningsreserven 2024

"Aftalepartierne er enige om endvidere at afsætte 14,0 mio. kr. til data- og videngrundlag for tørke til gavn for tilpasningsindsatser og eventuel fremtidig varsling af tørke. Forskningsindsatsen skal skabe bedre forståelse af tørke i forskellige jordlag (herunder meteorologisk- og grundvandstørke) og af tørkens påvirkning af det danske samfund, samt hvordan denne viden bruges af forskellige myndigheder. Denne indsats kan danne et indledende grundlag for evt. yderligere initiativer ift. håndtering af tørke."

TØRKEORDBOG

Indledning

Tørke, ofte defineret som usædvanlig mangel på nedbør over længere tid, er et komplekst vejr- og klimarelateret fænomen. Det er vigtigt både ift. vores natur, landbrug og vandressourcer, og kan påvirke forskellige sektorer og have økonomiske, sociale og miljømæssige konsekvenser [1], [2]. Tørke er en global udfordring med store konsekvenser i mange verdensdele, og hvor klimaændringer forventes at øge hyppighed, intensitet, omfang og varighed af tørke [3].

I Europa rammer tørke ikke kun Middelhavsområdet, men også resten af Europa [1], [4], [5]. Dette understreges af tørkerne som ramte Norden i 2018 og 2023 [6], [7]. Ifølge EU Kommissionen [8] har det meste af Europa indtil videre "tilstrækkelige vandressourcer, men vandknaphed og tørke bliver stadig hyppigere og mere udbredt i EU".

Den komplekse karakter af tørke har ført til en række forskellige definitioner og klassifikationer, [9], [10]. Formålet med denne ordbog er at forsøge at danne et fælles dansk begrebsgrundlag og fællessprogbrug for tørke, på tværs af fagområder og specialister. Dette er et uddrag fra Tørkeordbogen, som også indeholder udbyggede definitioner af hhv. meteorologisk, jordvands- og hydrologisk tørke, samt overblik over forskellige former for overvågning af tørke.

Overordnede definitioner og begreber

Det er vigtigt at forstå forskellen mellem tørke og vandknaphed.

- **Tørke:** Tørke er et midlertidigt fald i vandtilgængelighed, normalt på grund af utilstrækkelig nedbør, og betragtes som et naturfænomen. Tørke kan forekomme i områder med både høj og lav nedbør og i enhver sæson. Konsekvenserne af tørke forværres, hvis vandressourcer i forvejen er knappe eller vandressourcer ikke forvaltes hensigtsmæssigt [8].
- **Vandknaphed:** Vandknaphed opstår når efterspørgslen efter vand overstiger den bæredygtige forsyningskapacitet i det naturlige system, dvs. i vandoplandet. Vandknaphed kan også opstå pga. akutte problemer med vandkvaliteten, hvis forurening (diffus forurening eller punktkildeforurening) fører til reduceret adgang til rent vand [8].

Både tørke og vandknaphed er påvirket af menneskeskabte klimaforandringer.

Tørke er almindeligvis inddelt i tre grundlæggende typer [11]:

- **Meteorologisk tørke:** Generelt defineret som en længere periode (typisk på uger til måneder) med usædvanligt nedbørsunderskud i forhold til gennemsnitlige forhold for et givent område og årstid.
- **Jordvandstørke:** Opstår, når en meteorologisk tørke fører til et underskud af jordfugtighed i de øverste jordlag, der begrænser vandtilgængeligheden til naturlig vegetation og afgrøder. Jordvandstørken kan ligeledes benævnes efter de konsekvenser den afstedkommer og vil ofte betegnes som landbrugstørke eller vegetationstørke.
- **Hydrologisk tørke:** Skyldes længere perioder med nedbørsunderskud og heraf reduceret overflade- eller grundvand. Dette dækker for eksempel over reduceret vandføring i floder og åer, samt lave niveauer i søer, reservoirer og grundvand.

Andre centrale begreber inden for tørke:

- **Konsekvenser af tørke:** Tørkens konsekvenser for samfundet spænder over flere sektorer. Det kan f.eks. være landbrugsorienterede konsekvenser som afgrødetab og produktivitetsskud, eller svigtende tilgængelighed/øget efterspørgsel på kunstvanding. Dette kan føre til øgede afgrødepriser. Infrastrukturelle skader såsom jordsætning og tørkeskader på bygninger, jernbane- og vejnet kan også forekomme. Af andre konsekvenser kan nævnes naturrelaterede konsekvenser som skov- og naturbrande, økosystems-/vegetationsskader eller faldende vandkvalitet, samt vandforsyningsproblematikker i relation til grundvandet.

Vandstanden i søer eller vandføringen i vandløb og åer kan falde, eller de kan helt tørre ud og derved skade den tilhørende flora og fauna.

- **Overvågning af tørke:** Tørke udvikler sig langsomt, først som manglende nedbør, derefter vandmangel i de øverste jordlag og endelig mindre vand i vandløb og grundvand. Det vil sige, at årsagerne til og virkningerne af tørke afhænger af en række faktorer ud over tidsaspektet, herunder nedbør, atmosfæriske forhold (vind, fugt, osv.), vegetation og jordfugtighedsforhold, og dermed fordampning, samt nedsivning til grundvand og afstrømning i vandløb. Tørkepåvirkninger afspejles i manglen på regn, jordfugtighed, planternes sundhed, vandløb og grundvand. For at være effektiv bør tørkeovervågning baseres på flere variable og indikatorer. Overvågningens formål er at levere information både før og under tørkeperioder for at understøtte handlinger, der kan begrænse potentielle skader.

En uddybning af disse begreber kan findes i den fulde tørkeordbog, som er publiceret som en temarapport.

Spor 1: Meteorologisk tørke

Indsats I: Bedre grundlag for håndtering af historiske nedbørsdata

Indledning

Historiske nedbørsobservationer udgør et centralt datagrundlag til at forstå tidligere nedbørshændelser, forbedringen af DMI's tørkeindeks, kalibrering af andre nedbørsmålinger fx radarbaseret, validering af tørkemodeller mv. En forudsætning for dette er et robust nedbørsobservationsdatagrundlag, der understøtter historik for både observationer og historik for placering af stationer.

Det blev derfor besluttet at implementere en standardiseret og moderne datamodel i en ny database, der kan understøtte den nødvendige historik, hvorefter nedbørsobservationer og stationsplaceringer skulle konsolideres i databasen. Dertil skulle etableres et standard API, der kan give nem adgang til nedbørsobservationer.

Med indsatsen konsolideres DMI's historiske nedbørsobservationer, og der etableres bedre understøttelse af historik, så ændringer i placering af målestationer, udstyr på målestationer mv. bedre kan håndteres over tid.

Metode

Den nye stations- og observationsdatabase, og det tilhørende API, er designet med baggrund i internationale standarder. WMO's WIGOS metadatarepresentationsmodel anvendes fx til at beskrive data om stationer, mens Open Geospatial Consortium's (OGC's) Observation & Measurement Standard (O&M) anvendes til at beskrive observationer. API'er er ligeledes designet med udgangspunkt i OGC API – Features-standarden. Herudover følges almindelige IETF-standarder i forhold til fx tidsstemppler og outputdataformater.

Den nye database er således designet med fokus på let tilgængelig dataudveksling mellem databasen og relevante modtagesystemer gennem dens standardiserede API.

Databasen er designet med udgangspunkt i princippet om adskillelse af data- og servicelag. Det betyder, at servicelaget (API'et) håndterer forretningslogik, mens eksterne brugere ikke har kendskab til datalagets organisering (den egentlige database). Dette muliggør ændringer i datalaget (databasens struktur) uden konsekvenser for brugerne.

Resultater

Der er etableret en ny autoritativ database for nedbørsobservationer og -stationer med dertilhørende API'er. Dermed er grundlaget lagt for, at datastrømme mod DMI's eksternt rettede systemer, som fx DMI's Klimadataproduktion og DMI's Frie Data, kan etableres. Metadata for aktive operationelle og historiske nedbørsstationer er konsolideret i databasen og den tidligere diskrepans ift. historik for stationsplaceringer mv. er blevet tilrettet. Derudover er migrering af nedbørsobservationer i gang.

Modsat de tidligere databaser understøtter den nye database bitemporalitet/dobbelthistorik for observationer og for metadata om de enkelte målestationers karakteristika. Anvendelsen af bitemporalitet gør det nu muligt at fremsøge data baseret på både virkningstid og registreringstid:

- **Virkningstid** – Hvad var gældende på et givent tidspunkt
- **Registreringstid** – Hvornår blev det registreret, hvad der var gældende

Dette giver mulighed for en markant større sporbarhed ift. historik, således at det til enhver tid er muligt at finde frem til det historiske datagrundlag for en konkret beregning eller modelkørsel. Det vil fx altid være muligt at finde tilbage til, hvordan et givet datasæt så ud på et givet tidspunkt.

Videre proces og konklusion

Udviklingen af den nye database bidrager i høj grad til en mere ensartet håndtering af DMI's stations- og observationsdata, da data fremadrettet kun lagres og vedligeholdes i én autoritativ database, som er kilden for alle registreringer. Dette er centralt, når man skal undersøge tørke, hvor præcise og konsistente data om nedbør og stationsforhold er nødvendige for at kunne identificere og forstå tørkeforløb over tid.

Derudover er databasens bitemporalitet en afgørende tilføjelse ift. datahistorik, da det muliggør viden om, hvad vi vidste om data og ændringer i data på et hvert givent historisk tidspunkt. Dette vil altid gøre det muligt at udtrække det præcise datagrundlag for en given historisk databehandling.

Udviklingsmæssigt er databasen baseret på moderne teknologier, designprincipper og standarder, som mindsker risikoen for fejl og bl.a. muliggør nemmere vedligehold, videreudvikling og udveksling af data. Dermed skaber databasen et mere solidt fundament for undersøgelser af tørke.

Den videre proces indebærer fortsat migrering af både historiske og realtidsobservationer samt en løbende kvalitetssikring af data. Derudover vil der blive foretaget tilretning af datastrømme for at sikre, at data bliver tilgængelige i DMI's eksternt rettede systemer.

Indsats II: Håndtering af diskontinuitet i nedbørdatasæt

Indledning og baggrund

I 2011 blev DMI's nedbørmålnet omlagt, hvilket har medført en diskontinuitet i de korrigerede nedbørmålinger på cirka 6 %. Dette skift har skabt udfordringer i hydrologiske beregninger, herunder problemer med at få vandbalancen til at stemme for flere vandoplande i Danmark. For at forstå årsagerne til denne diskontinuitet og identificere potentielle løsninger er der gennemført en række undersøgelser inden for rammerne af tørkeindsatsen.

Tre centrale hypoteser er blevet testet i dette delprojekt:

- At tabet af vand fra målerne - det såkaldte wettingtab - for målerne Geonor og Pluvio2 er større end tidligere antaget.
- At der er et hidtil ikke-kvantificeret fordampningstab fra nedbørmåleren Rimco.
- At radardata kan bruges til at kompensere for det stedvist udtyndede målnet efter 2011 og dermed forbedre præcisionen af nedbørmålinger.

Metode

Undersøgelserne har involveret laboratorieeksperimenter, feltmålinger og udvikling af en prototype til beregning af nedbørsfelter baseret på radardata.

For at vurdere wettingtab er der udført laboratorieforsøg, hvor det er blevet undersøgt, hvor meget vand målerne fastholder, og hvordan det påvirker de registrerede nedbørmængder. For at belyse fordampningstab fra Rimco-måleren er der gennemført laboratorieforsøg under varierende forhold. Endelig er der udviklet en prototype til beregning af Quantitative Precipitation Estimates (QPE), som kombinerer radardata og målerdata til at skabe mere præcise nedbørsfelter.

Resultater

De første analyser viser, at wettingtabet for Pluvio2-måleren resulterer i en årlig nedbørskorrektion på cirka 1,7 %, mens wettingtabet for Geonor-måleren muligvis kan være så højt som 10 %. Der er dog betydelig usikkerhed omkring Geonor-resultatet, da målerens konstruktion kan påvirke den præcise mængde fastholdt vand. Yderligere laboratorie- og felttests er nødvendige for at fastlægge den præcise størrelse af dette tab.

Laboratorieeksperimenter har vist, at fordampningen fra Rimco-måleren er afhængig af både vindhastighed og ventilation. Under vindstille og svag vind tager det 25-27 timer at fordampe 0,1 mm vand fra måleren, men under visse forhold kan fordampningen tage op til 40 timer. Det er endnu uvist, hvor stort det årlige tab er, men et gennemsnitligt tab på 0,1 mm pr. nedbørdøgn ville resultere i en årlig nedbørkorrektion på ca. 2,2 %.

Endelig har det været delprojektets mål at udvikle en prototype til beregning af nedbørsfelter kaldet QPE (Quantitative Precipitation Estimates) vha. rå radardata. Dette kan p.t. lade sig gøre tilbage til 2009, hvilket dækker tiden før og efter diskontinuiteten. I beregningskæden genereres der: radarbilleder filtreret for støj, foretages korrektion for bias på kalibrering og radarskanningernes geoposition, beregnes 1-minuts tidsopløsning baseret på flowfelter, og beregnes QPE-felter vha. en model, der benytter nedbørmålinger fra nedbørstationer til justering af den relative radarnedbørmængde. Hvert step i beregningskæden er testet og fundet til at fungere med tilfredsstillende resultater, og prototypen er således færdigudviklet.

Videre proces og konklusion

Delprojektet har bidraget med vigtige nye indsigter i årsagerne til diskontinuiteten i DMI's nedbørmålinger, men der er stadig ubesvarede spørgsmål. De foreløbige resultater tyder på, at wetting- og fordampningstab samlet set kan forklare op til 1/3-del af den observerede diskontinuitet, hvorefter der kan forklares op mod 2/3 af de 6 %. Det næste skridt bliver at:

- Gennemføre yderligere laboratorie- og felttests for at præcist kvantificere wetting- og fordampningstabene.
- Udnytte den udviklede QPE-metode til at beregne nedbørfelter for perioden siden 2009 og undersøge, om denne metode kan bruges til at udfylde rumlige huller i hydrologiske beregninger.
- Evaluere QPE-data mod uafhængige nedbørmålinger for at vurdere metodens præcision.
- Overveje om en senere opgradering af korrektionsmodellen for Pluvio2, som ikke er en del af dette projekt, kan bidrage yderligere til at forklare diskontinuiteten.

Indsats III: Tørkerisiko og klimaændringer i Danmark

Indledning

For at yderligere belyse den nuværende forskning om tørke på globalt plan, har Nationalt Center for Klimaforskning (NCKF) på DMI udarbejdet en videnskabelig opsummering af viden fra FN's klimapanel IPCC og anden relevant forskning på emnet.

For at belyse udviklingen af tørke specifikt i Danmark er der derudover både undersøgt tendenser i nedbør, både baseret på observationer og fremskrivninger med klimamodeller. Analysen af disse historiske tørkehændelser undersøger, om der er kommet flere tørre perioder i maj-august i Danmark i de senere år. Analysen af fremtidens nedbør fokuserer på, om fremtiden vil byde på flere hændelser som sommeren 2018.

NCKF har forud for dette projekt udført en række højtopløste klimamodelberegninger af fremtidens klima i Skandinavien under forskellige udledningsscenarier. De mere detaljerede modeller beskriver særligt nedbør mere nøjagtigt end 'traditionelle' klimamodeller, og resultaterne er derfor her blevet analyseret i detalje angående den fremtidige ændring i tørkerisiko i Danmark.

Som det sidste perspektiv er der samarbejdet med Aarhus Universitet om hvordan ændringer i forekomsten af tørke relateret til klimaforandringer kan påvirke landbruget i Danmark.

Metode

Der er gjort brug af en række forskellige datasæt fra DMI og den internationale forskningsverden for at analysere forskellige aspekter relateret til tørke i fortiden, nutiden og fremtiden. Til den historiske analyse er der gjort brug af observationsdata med geografisk variation. Til analyse af fremtidens tørke er der gjort brug af klimafremskrivninger fra de regionale klimamodeller, der udgør datagrundlaget for DMI's Klimaatlas. Derudover er der foretaget analyser af nedbørsændringer i nye klimamodelberegninger på kilometer-skala udført med DMI's egen regionale klimamodel.

Resultater

I Danmark er nedbør den mest afgørende variabel for udvikling af tørke. Der er ingen signifikante tendenser til flere tørre dage, længere tørre perioder eller større afvigelser i nedbøren for maj-august i perioden fra 1914 frem til i dag.

DMI's Klimaatlas viser, at den samlede gennemsnitlige nedbør om sommeren og hyppigheden af tørre år er omtrent uforandret i et varmere klima. Men trods den uforandrede gennemsnitsnedbør er der en svag stigning i antallet af tørre dage i perioden maj-august i takt med den globale opvarmning.

Tørke svarende til sommeren i 2018 forekommer i det nuværende klima omkring tre gange på 100 år, statistisk set. Ved 3 °C global opvarmning, som med de nuværende klimapolitikker forventes frem mod år 2100, stiger sandsynligheden til ca. fem gange på 100 år – en relativ stigning på ca. 55%. Den tilsvarende analyse for temperaturen i sommeren 2018 viser, at en tilsvarende varm sommer forekommer ca. 8 gange på 100 år, hvilket stiger til ca. 28 gange ved 3 °C global opvarmning – en relativ stigning på 250 %.

Betragter man de to faktorer samlet, og altså den fremtidige sandsynlighed for at opleve en sommer der både har et tilsvarende antal tørre dage og en tilsvarende temperatur, stiger sandsynligheden fra 0,7 hændelser per 100 år i dag til ca. 2 hændelser per 100 år ved 3 °C global opvarmning. Det vil altså fortsat være en sjælden hændelse at opleve en sommer tilsvarende 2018, men det vil være dobbelt så sandsynligt end i dag.

Tabel A.1 – Antal af hhv. tørre, varme og kombinerede hændelser på 100 år. Tallet efter symbolet $\pm$ angiver usikkerhedsintervallet. Tallet i parentes angiver ændringen i procent.

Antal hændelser på 100 år (Ændring i %)	0°C (præindustriel)	1°C	2°C	3°C	4°C
Tørre år	3,13 $\pm$ 0,19	3,62 $\pm$ 0,16 (+ 16 %)	4,2 $\pm$ 0,2 (+ 34 %)	4,85 $\pm$ 0,34 (+ 55 %)	5,61 $\pm$ 0,54 (+ 79 %)
Varme år	7,7 $\pm$ 0,28	12,17 $\pm$ 0,29 (+ 20 %)	18,7 $\pm$ 0,4 (+ 143 %)	27,63 $\pm$ 0,74 (+ 259 %)	38,78 $\pm$ 1,24 (+ 320 %)
Tørre og varme år	0,72 $\pm$ 0,09	1,02 $\pm$ 0,09 (+ 8 %)	1,44 $\pm$ 0,11 (+ 100 %)	2,04 $\pm$ 0,22 (+ 183 %)	2,87 $\pm$ 0,43 (+ 299 %)

Detaljerede klimamodelberegninger på kilometerskala kan give et mere detaljeret indblik i fremtidens nedbør og dermed tørke i Danmark. Baseret på et sæt af klimafremskrivninger med en geografisk opløsning på 3 km, viser DMI's beregninger et fald i hyppigheden af moderate tørkeperioder, men en stigning i ekstraordinære og hidtil usete tørkeperioder i fremtiden i Danmark. I vækstsæsonen forbliver antallet af moderate tørkeperioder omtrent det samme, mens antallet af de mest alvorlige tørkeperioder stiger. Dette betyder, at der forventes omtrent det samme antal tørkeperioder i løbet af vækstsæsonen, men de har en tendens til at blive mere intense i et varmere klima.

Aarhus Universitet (DCA) vurderer i tillæg til ovenstående analyser af stigende tørkerisiko, at det følger vil øge risikoen for udbyttetab, selv på de mere dyrkningssikre østdanske jorde. Tilpasning til øget forekomst af tørke handler i stort omfang om bedre at udnytte den vandmængde der er til rådighed. Det kan ske f.eks. ved at reducere fordampningspresset, hvor planterester på jordoverfladen om foråret kan være med til at holde på vandet eller læbælter opføres (evt. af solceller), eller ved at forædle for sorter af afgrøder med større tørketolerance. Vanding udgør dog stadig en af de væsentligste tilpasningsmuligheder til øget tørke, men mange steder vil det kræve adgang til den nødvendige ekstra vandmængde. En mere varieret afgrødesammensætning kan også være en delvis, om end begrænset, løsning på tørkeudfordringerne, idet det bliver mindre sandsynligt, at alle afgrøder vil blive alvorligt ramt af tørke inden for en enkelt sæson.

Videre proces og konklusion

Der er historisk ingen statistisk signifikans tendens til flere meteorologiske tørker i Danmark fra 1914 til i dag. Klimaforandringerne betyder dog, at sandsynligheden for flere, særligt mere intense tørkeperioder stiger i takt med global opvarmning. Den globale opvarmning forventes med de nuværende klimapolitikker i verdens lande at nå ca. 3 °C i år 2100. I et sådant klima vil tørkesituationer lignende sommeren 2018 fortsat være sjældne hændelser, men dog ske oftere end i dag. Mere generelt viser nye, højtopløste klimamodelberegninger at den samlede hyppighed af tørke ikke nødvendigvis stiger, men at andelen af ekstraordinære og hidtil usete tørkeperioder bliver større end i dag.

Nationalt Center for Klimaforskning arbejder fortsat på analyser af den fremtidige hyppighed af såkaldte højtryksblokeringer – vejsituationer, der oftest leder til varme og tørre perioder i løbet af sommeren. Derudover vil den detaljerede viden der er tilvejebragt blive offentliggjort som en samlet rapport, ligesom analyserne vil fungere som grundlag for udviklingen af et forbedret datagrundlag i DMI's tørkeindeks.

Konklusionerne om dansk tørke i fremtiden er helt nye og vil blive publiceret både videnskabeligt (peer-reviewed) og i en dansk, målrettet rapport. For nuværende er konklusioner derfor til internt brug.

Indsats IV: Forbedret DMI's offentlige tørkeindeks

Indledning

Traditionelt har DMI's overvågning af tørke været baseret på et simpelt tørkeindeks, der estimerer vandindholdet i topjorden. Tørkeindekset er allerede udstillet på DMI.dk. Dette indeks har dog nogle begrænsninger i forhold til at repræsentere variationer i jordbundsforhold, vegetationsdække og den hydrologiske cyklus. For at forbedre overvågningen af tørke og styrke beslutningsgrundlaget for håndtering af tørke, har denne indsats haft fokus på at udvikle og afprøve flere indices, herunder indeks med en nedbørsanomali, en hydrologisk vandbalancemodel og kvalitetssikring gennem satellitbaserede observationer.

Metode

For at forbedre overvågningen af tørke over hele Danmark er der udviklet og sammenlignet meteorologiske tørkeindikatorer, hydrologiske modeller, og satellitbaserede observationer til at brug i kombination.

- Meteorologisk tørkeindeks (SPI): Standardized Precipitation Index (SPI) er anvendt som en indikator for meteorologisk tørke baseret på nedbørsanomalier. SPI beregnes for forskellige tidsintervaller for at identificere både kortvarige og længerevarende tørkeforløb.
- Hydrologisk model (VIC): En ny national vandbalancemodel baseret på Variable Infiltration Capacity (VIC)-modellen er udviklet. Modellen kræver mere inputdata, men giver bedre indblik i flere komponenter af vandcyklus til at styre evapotranspiration og jordfugtighed sammenlignet med det nuværende tørkeindeks.
- Satellitbaserede observationer: Satellitprodukter fra bl.a. MOD16, LSA-SAF og C3S er blevet analyseret for at vurdere evapotranspiration, jordfugtighed og vegetationstilstand. Disse data er testet mod in-situ målinger.

Resultater

Indsatsens resultater til overvågning af tørke er indeks og modeller til brug i kombination. Dette giver en mere nuanceret modelbaseret tilgang med variation af jordtype og vegetation, som kan kombineres med en nedbørsanomali og satellitdata. VIC-modellen formår at simulere tørkens udvikling realistisk, især når jordbunds- og vegetationsvariationer inddrages. Satellitdata viser stærk sammenhæng med både modelestimer og in-situ målinger og kan derfor bruges til at supplere tørkeovervågningen med et udtryk om vegetationstilstand og rumlig variation, samt kan bruges til kalibrering af mønstre i den nye model.

I kombination tager den nye tørkeovervågning højde for variationer i jordbunds- og vegetationstyper, hvilket forbedrer anvendeligheden i tørkeovervågning i især landbrugs- og naturområder.

Videre proces og konklusion

For at styrke tørkeovervågningen i Danmark yderligere vil DMI i 2025 videreudvikle og operationalisere indekset og den hydrologiske model til visning på DMI.dk. Kombinationen af hydrologisk model, meteorologisk tørkeindeks og satellitdata vil give en mere præcis og detaljeret vurdering af tørkeudviklingen. Dette vil forbedre beslutningsgrundlaget for håndtering af tørke og sikre en mere effektiv overvågning, der kan anvendes til klimatilpasning, beredskabsplanlægning og vandforvaltning i Danmark.

Spor 2: Hydrologisk tørke

Hydrologisk tørke er en betegnelse for tørker, der manifesterer sig i vandløb og grundvand (vandløbs- og grundvandstørker). I dette afsnit indgår imidlertid også analyser og information om tørker i det øverste jordlag (jordvandstørker), da fugtigheden i jorden er tæt forbundet med både grundvand og overfladevand. Samlet set påvirker de hydrologiske tørker både landbrug, infrastruktur, økosystemer og samfundet generelt.

Sporet om hydrologisk tørke dækker fire indsats, der hver især bidrager til at opbygge et solidt videns- og erfaringsgrundlag til arbejdet med tørke i en dansk sammenhæng. De fire indsats er:

1. Analyser af hydrologisk tørke.
2. Validering af modelsimuleringer for tørke.
3. Nye datamuligheder til overvågning og monitorering af tørke.
4. Værktøjer til planlægning og link mellem modelsimuleringer (eller måledata) og konsekvenser af tørke.

Indsats I: Analyser af hydrologisk tørke

Indledning

Indsatsen *Analyser af hydrologisk tørke* søger at skabe en dybere forståelse af, hvordan tørke opstår og udvikler sig gennem det hydrologiske system fra jordens øverste lag til dybere grundvand. Dette er afgørende for effektivt at kunne overvåge, forudsige og afbøde tørkens konsekvenser.

Denne forståelse opbygges ved at fokusere på den historiske tørkeudvikling i Danmark over de sidste 34 år ved hjælp af observationer af forskellige dele af det hydrologiske kredsløb samt tilsvarende modelresultater fra Den Nationale Hydrologiske Model (DK-modellen i daglig tale, Faktaboks 1). Gennem en detaljeret gennemgang af tørkens karakteristika og geografiske variationer skabes et vidensgrundlag, erfaring og fundament, der gør os klogere på de danske hydrologiske tørker gennem de seneste tre årtier. Vi bliver dermed bedre til at forstå, hvordan tørken opfører og udvikler sig i Danmark og hvornår og under hvilke omstændigheder, meteorologiske tørker bliver til grundvandstørker. Herunder hvorvidt en tørke om sommeren eller vinteren påvirker vores drikkevandsressource mest. Viden om de historiske tørker medfører, at vi kan blive i stand til at besvare, hvor ofte hydrologiske tørker er forekommet i Danmark og hvilke tørker, der har været de værste. Denne erfaring bidrager med vigtig viden til gavn for bedre planlægning og fremtidige tiltag i forbindelse med tørke.

I indsatsen er der derudover undersøgt andre europæiske landes tørkemoniterings-programmer og gennemført en generel afsøgning af den internationale litteratur om tørkerelateret forskning bl.a. om forskellige indekstyper, analysemetoder og fremgangsmåder (karakteristika) til at beskrive tørken på. Derudover er der fokuseret på forskning fra områder, der arbejder med tørke i et klima, der ligner det danske.

Metode

Analysen af de historiske tørker er primært baseret på Den Nationale Hydrologiske Model (DK-modellen), der blev brugt til at simulere hydrologiske forhold for perioden 1990-2023, suppleret med observationsdata. For at identificere tørkeperioder og udregne tørkens karakteristika, bruges standardiserede tørkeindekser (Faktaboks 2), kendt fra den internationale litteratur og flere europæiske tørkemoniteringsprogrammer. Indekserne er:

- Soil Moisture Deficit Index (SMDI) til jordvandstørke.
- Streamflow Deficit Index (SDI) til vandløbstørke.

- Standardized Groundwater Deficit Index (SGDI) til terrænnær og dyb grundvandstørke.

De modellerede indeks beregnes for hele Danmark i en opløsning af 500 x 500 meter på dagsbasis. Ud fra disse indekser er tørkens karakteristika, såsom varighed, alvorlighed, udviklings- og genopretningstid, samt korrelationen mellem de forskellige tørker i hhv. jorden, vandløb og grundvand, blev udregnet og analyseret. Regionale forskelle blev vurderet ud fra geografisk variation i geologi og klima.

Resultater

Analyserne viser hvordan tørken starter som et nedbørsunderskud, der først påvirker jordvandet og derefter forplanter sig til vandløb og grundvand. Jordvandstørker er de mest hyppige og kortvarige med en gennemsnitlig varighed på 5-6 uger, mens grundvandstørker, særligt i dybere lag, varer betydeligt længere – i gennemsnit 23 uger. Disse forskelle afspejler det hydrologiske systems kompleksitet og variation i responstider. Særligt nedbørsunderskud om vinteren forplanter sig ned i grundvandet som grundvandstørker, da det typisk er på denne årstid, at grundvandet opfyldes, pga. høj nedbørsmængde og lav fordampning. Det er i kontrast til jordvandstørker, der typisk er sårbare over for sommertørker og den store fordampning på denne årstid. Analysen viste også, at tørkernes intensitet og varighed varierer betydeligt mellem regioner, pga. jordbund og geologiske forskelle samt klimavariationer.

Nogle år markerede sig som særligt tørkeramte. Tørken i 1995/96 var den mest omfattende med alvorlige, flerårige konsekvenser for både overfladevand og grundvand, mens 2018 var præget af ekstrem jordvandstørke i foråret og tidlig sommer, der især ramte landbruget hårdt.

Korrelationen mellem de hydrologiske tørker er generelt høj og særligt vandløbstørker og tørker i det øvre grundvand (grundvandet tættest på overfladen) er tæt synkroniseret. Trends over de sidste tre årtier indikerer en svag bevægelse mod vådere forhold samlet set, men ekstreme tørkeperioder forekommer stadig med alvorlige konsekvenser. Dette understreger behovet for fortsat overvågning og beredskab.

Videre proces og konklusion

Analysen viser, at hydrologisk tørke er et komplekst fænomen, der kræver en helhedsorienteret tilgang for at forstå og håndtere dens påvirkninger. De hydrologiske indekser har vist sig at være en klar og nyttig fremgangsmåde til at beskrive og isolere tørkefænomener. Den tydelige kobling mellem forskellige tørketyper og specifikke dele af det hydrologiske system viser, at integrerede modeller og en forskelligartet kombination af observationer er en central del af at kunne udvikle mere præcise værktøjer til overvågning og tidlig imødekommelse af tørke.

Det er ligeledes vigtigt at arbejde med tørker i både sommer- og vinterhalvåret, pga. den skæve sårbarhed for de overfladenære tørker og de dybe grundvandstørker i forhold til sæsoner. Det næste skridt i arbejdet vil være at undersøge, hvordan de hydrologiske tørker manifesterer sig i fremtidens klima. Det kan gøres ved at bruge integrerede modelværktøjer, såsom DK-modellen, i kombination med klimascenarier til at fremskrive tørker. Denne analyse kan give vigtige informationer om fremtidens tørker, der ikke før er genereret på nationalt niveau. En sådan analyse vil dog kræve en gennemgang af måden, hvorpå tørkeindekser og klimamodeldata bruges på for at sikre, at fremskrivningerne repræsenterer fremtidens tørker bedst muligt.

Indsats II: Validering af modelsimuleringer for tørke

Indledning

Hydrologiske modeller spiller en central rolle i forståelsen og forudsigelsen af tørkes påvirkning på det hydrologiske system. Udover historiske analyser, er modeller et uundværligt værktøj til at give realtidsinformation om hele landets øjeblikkelige hydrologiske tilstand, og det eneste værktøj til at vurdere effekterne af klimaforandringer på fremtidens tørker og afledte konsekvenser.

For at sikre, at disse modeller kan bruges som pålidelige værktøjer i beslutningstagning, er det afgørende at validere deres prediktive evner mod fysiske observationer, altså at kvalitetstjekke, om modellerne er succesfulde i gengivelsen af det hydrologiske system. I dette kapitel undersøges DK-modellens evne til at simulere hydrologiske forhold under tørke, og der lægges vægt på at identificere styrker og svagheder i modellens repræsentation af jordvand, vandløb og grundvand, og deres koblinger til hinanden.

Valideringsarbejdet er baseret på et omfattende datasæt med målinger af jordvand, grundvandsstand og vandløbsafstrømning. Datasættene er i denne sammenhæng nøje udvalgt på baggrund af deres høje kvalitet og tidsmæssige dækning. Data danner dermed et solidt grundlag for at evaluere modellens evne til at genskabe de hydrologiske forhold under klimatiske udsving, herunder tørke og andre ekstreme hændelser.

Metode

Valideringsarbejdet bygger på kvalitetssikrede observationsdatasæt for jordvand, grundvandsstand og vandløbsafstrømning, som blev sammenlignet med DK-modellens simuleringer. En stor del af arbejdet har bestået i at screene og udvælge lange, kontinuerlige og repræsentative observationsdata af høj kvalitet blandt de store nationale datasæt. Fra den betydelige liste over observationslokaliteter er der udvalgt 53 grundvandstidsserier (ud af 131.000 pejleboringer hvoraf 398 havde lange, kontinuerte tidsserier) og 153 vandføringstidsserier (ud af 597) samt 3 tidsserier for jordvand.

Fokus i modelvalideringen var på udsving i de hydrologiske forhold som resultat af klimatiske variationer, især tørkeprægede perioder, for at teste modellens prædiktionssevne under ekstreme forhold. Altså teste hvor godt modellen gengiver mere usædvanlige situationer, som den ikke er direkte trænet på. Det testes ved at evaluere sammenhængsgraden mellem hydrologiske indeks beregnet på observationsdata og de tilsvarende hydrologiske indeks beregnet med modellen (via brug af korrelationskoefficienter). De observerede og simulerede indeks sammenlignes også for ligheder i forsinkelser (hukommelse) i systemet, for at sikre at det naturlige respons og udvikling i tørkesituationer simuleres bedst muligt.

Resultater

Valideringen viser, at modellen generelt er præcis i simuleringen af hydrologiske indeks for vandløbsafstrømning og grundvandsstand, hvor resultaterne stemmer godt overens med observerede data. For både vandløbsafstrømning, terrænnært grundvand og dybt grundvand var korrelationen (R) på 0,90 eller mere, hvor en korrelation på 1 indikerer perfekt match. Dette viser, at modellen er i stand til at reproducere de hydrologiske udsving, som ses over tid, herunder tørker, på tværs af både den terrænnære og dybere hydrologi.

For jordvand er der dog større usikkerhed ($R=0,52$), særligt i tørkeprægede perioder, hvor vandindholdet i jordens øverste lag reduceres hurtigt. Jordvand i rodzonen er vanskelig at modellere på grund af de komplekse interaktioner mellem klima, vegetation og jordtyper og stor følsomhed overfor helt stedsspecifikke forhold. Det skal også pointeres, at på trods af nye høj kvalitetsmålinger baseret på kosmisk stråling (jordbaserede CRN sensorer), er observationsdatagrundlaget for validering af jordvand betydeligt mindre end for vandløb og grundvand.

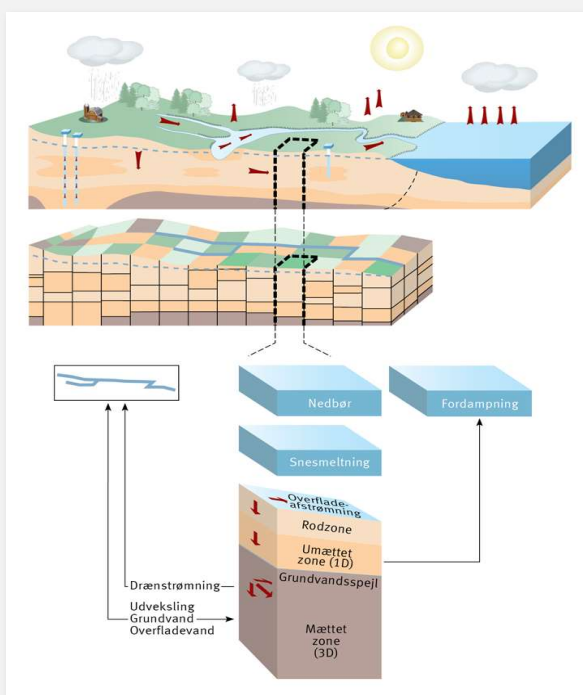
Generelt genskaber modellen i høj grad den tydelige forsinkelse af en ekstremsituation, f.eks. en tørkehændelse, ned igennem det hydrologiske system fra nedbør, over jordvand til vandløb og sidst til grundvandet. Særligt grundvandets langsomme respons på tørke simuleres tydeligt med modellen. Dybtliggende grundvand reagerer først efter længere tids tørke, og mest på lav vinternedbør, hvilket afspejler observationerne.

Videre proces og konklusion

Kapitel 2 fremhæver vigtigheden af modelvalidering for at sikre præcise og pålidelige resultater, der kan bruges til at understøtte planlægning og tørkeberedskab. Dette inkluderer at sikre fortsættelsen og udvidelse af det observationsnetværk, som indgår i valideringen. Særligt flere lange tidsserier fra samme lokalitet er helt afgørende for at kunne udvikle robuste modeller til realtidssimuleringer og klimafremskrivninger af tørke. Her er det særligt flere og langvarige jordvandsmålinger, der mangler.

For at forbedre DK-modellen anbefales det herudover at udvikle mere avancerede metoder til modellering af rodzonen og dermed bedre sammenspil med det øverste grundvand. Integration af satellitdata og lokale målinger i realtid vil desuden kunne styrke overvågning og prognoser for tørke overordnet set.

Det er derudover afgørende at videreudvikle metoder til bedre beregning af fordampning under fremtidige klimaforhold, så klimamodeller og hydrologiske modeller i fællesskab kan levere mere robuste forudsigelser, særligt i forhold til tørke hvor fordampning er vigtig. Disse forbedringer vil sikre, at hydrologiske modeller ikke blot kan beskrive tørkers omfang og varighed under nuværende klimatiske forhold, men også under et fremtidigt klima. På den måde kan vi bidrage til vurdering af tørkens fremtidige potentielle konsekvenser for samfund og miljø.



Faktaboks 1: Den Nationale Hydrologiske Model

Den Nationale Hydrologiske Model (DK-modellen) er udviklet hos GEUS siden 1996. DK-modellen dækker hele landet i 100x100m rumlig opløsning og beskriver både det naturlige hydrologiske kredsløb og menneskelige påvirkninger, såsom markvanding, drikkevandsindvindinger og spildevand.

DK-modellen er en fuldt integreret model, hvilket betyder, at modelsystemet beskriver de hydrologiske processer i sammenhæng med hinanden fremfor isolerede fænomener. Det er særligt vigtigt i Danmark, hvor overfladevand (søer og vandløb) og grundvand er tæt forbundne.

Modellen anvendes både til historiske analyser og til at overvåge den øjeblikkelige tilstand i det hydrologiske system. Den køres pt i nær-realtid, dvs. at der genereres nye resultater hver dag med 8 timers forsinkelse. Modellens beregninger bruges bl.a. indenfor vandforvaltning på områder som:

- Drikkevandsressourcen
- Kvælstofbelastningen
- Tørke eller oversvømmelser
- Klimatilpasning
- Grøn omstilling (CO₂ emissioner fra lavbundsgrunde)

Indsats III: Nye datamuligheder til overvågning og monitorering af tørke

Indledning

Dette afsnit evaluerer nye muligheder for at anvende data til kontinuerlig overvågning og håndtering af tørke i Danmark.

En kombineret anvendelse af observationer og hydrologiske modeller anses generelt for optimal, da observationer ganske vist er karakteriseret ved høj præcision, men samtidig har en begrænset rumlig og tidslig dækning. Den begrænsning kan imidlertid kompenseres ved hjælp af Den Nationale Hydrologiske Model (DK-modellen), som tilbyder fuldstændig rumlig og tidslig dækning samt evnen til at generere prognoser og scenarieberegninger.

I Danmark findes der flere nationale overvågningsnetværk, hvor tidsserier af vandbalance-komponenter og hydrologiske tilstandsvariable indsamles og stilles til rådighed i realtid. Tidsserier af blandt andet grundvandsstand og vandføring anvendes til at kalibrere og validere DK-modellen for at sikre modellens evne til at simulere det hydrologiske system med tilstrækkelig nøjagtighed. Denne operative model, som hver dag opdateres med de nyeste meteorologiske målinger, overvåger det hydrologiske system i realtid og udregner hydrologiske indeks, som offentliggøres dagligt på GEUS' hjemmeside og snart også på den Hydrologiske Informations Platform (HIP).

Terrænnært og dybt grundvand

Historisk set har overvågningen fokuseret på de dybere grundvandsmagasiner, hvor mange tidsserier derfor stammer fra borerer mere end 40 meter under terræn. Disse data er vigtige for indvinding af vand til husholdning, industri og landbrug, og derfor har det dybe grundvand tiltrukket mest opmærksomhed. Imidlertid er overvågningen af det øverste frie grundvand, kendt som det terrænnære grundvand, relativt begrænset. Dette er problematisk, da det terrænnære grundvand er direkte forbundet med overfladevand som søer, åer og vådområder, hvormed tørke i det terrænnære grundvand kan have alvorlige økologiske konsekvenser. Det er også det terrænnære grundvand, der bidrager til oversvømmelser af kældre og områder, hvor grundvandet står tæt på terræn.

For at adressere denne udfordring har GEUS etableret et system til realtidsmålinger af grundvandsstanden i både terrænnære og dybe magasiner (www.grundvandsstanden.dk). Dette netværk omfatter i øjeblikket cirka 75 terrænnære og 50 dybe målestationer fordelt rundt i landet, men planen er at udvide til 300 stationer for hver type. Denne udvidelse vil muliggøre mere detaljeret overvågning og bedre håndteringsmuligheder under tørkesituationer.

Betydningen af jordfugtighedsmålinger

Jordfugtighed (jordvand) er en afgørende faktor i tørkeovervågning, da den direkte afspejler, hvor meget vand, der er tilgængeligt for planter og økosystemer. For øjeblikket findes der ingen systematisk overvågning af jordfugtighed i et nationalt monitoringsnetværk, hvilket begrænser mulighederne for at validere og optimere tørkeindekser og relevante satellitdatasæt. Jordfugtighed varierer betydeligt over korte afstande afhængigt af jordstruktur, jordsammensætning og vegetation. Det er derfor udfordrende at repræsentere jordfugtighedens dynamik på mark- eller skovniveau ved hjælp af konventionelle punkt-skala målestationer. For at forbedre overvågningen af tørke er det afgørende, at der indsamles tidsserier af jordfugtighed i rodzonen, som integrerer disse lokale småskala-variationer og er repræsentative for den rumlig opløsning, som anvendes i hydrologiske modeller og satellitprodukter.

For at forbedre overvågningen af jordfugtighed anvendes innovative metoder med jordbaserede sensorer baseret på målinger af kosmisk stråling (*Cosmic-Ray Neutron*, CRN) intensiteten og gamma-stråle spektrometri (*Gamma-Ray Spectrometry*, GRS). Metoderne integrerer et større område og giver målinger fra rodzonen med høj tidslig opløsning. CRN-metoden måler primært i de første par hundrede meter omkring sensoren, mens GRS-metoden integrerer over et areal af cirka 25 m i radius omkring måleinstrumentet. GRS-metoden er særligt egnet til skovområder da målingerne i langt mindre grad er påvirket af vegetationen.

Satellitprodukter

Potentialet for at benytte *remote sensing*-produkter, der afspejler dynamikker i vegetationsudvikling til at overvåge tørke, er her undersøgt med data fra AVHRR og MODIS satellitterne, som har enestående rumlig og tidslig dækning. AVHRR satellitsystemet har en opløsning på 10 km, der dækker perioden 1981-2013, hvor det valgte MODIS produkt har en opløsning på 1 km, der dækker perioden fra 2000 til i dag. Vegetationsindekser som *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) bruges i denne analyse til at undersøge vegetationsudvikling med fokus på at identificere plantestress og overvåge tørkens indvirkning på økosystemer. Ved hjælp af grid-baseret anomali-analyse er det muligt at identificere plantestress som konsekvens af tørkeeffekter, f.eks. som observeret under de ekstreme sommertørker i 2018 og 2023. NDVI-data viser en høj grad af overensstemmelse mellem tørkehændelser og anomali-analysen, og kan dermed anvendes som en indikator for plantestress. Dette gør dem velegnede til validering af hydrologiske modeller og optimering af tørkeovervågning.

Videre proces og konklusion

Udviklingen af et udvidet nationalt netværk af målestationer og integrationen af satellitdata som beskrevet herover vil styrke Danmarks evne til at overvåge tørke. Disse tiltag vil også samtidig bidrage til bedre varsling af oversvømmelser, da høj grundvandsstand kan indikere øget risiko for oversvømmelse. Potentialet for yderligere integration af CRN- og GRS-teknologier er stor, og Danmark kan drage fordel af det europæiske netværk *COSMOS-Europe* og det globale netværk *Global COSMOS*, som er under etablering med netop disse teknologier.

Satellitbaserede vegetationsindekser som *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) er værdifulde datasæt for at forbedre valideringen og optimeringen af hydrologiske modeller i relation til tørkeovervågning og -prognose, og til at bidrage til en mere præcis vurdering af tørkeskader på vegetation. En mere omfattende indsats inden for overvågning af jordvand, grundvand og vegetation vil desuden bidrage til bedre værktøjer til forvaltning af Danmarks vandressourcer og styrke klimatilpasningsindsatsen, som i flere henseender beror på netop de faktorer.

Faktaboks 2: De hydrologiske indeks

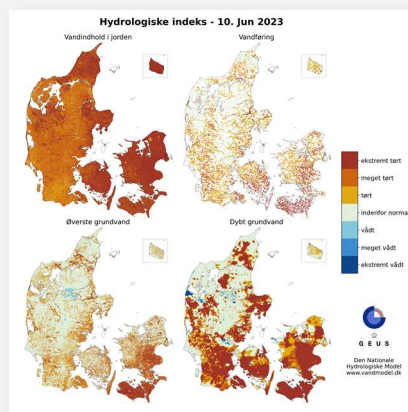
De hydrologiske indeks beregnet med Den Nationale Hydrologiske Model (DK-modellen) viser tilstanden af de forskellige dele af det hydrologiske system (vandkredsløbet) i fire forskellige landsdækkende kort for:

- Vandindhold i jorden (jordvand)
- Vandføring i vandløb
- Øvre (terrænnære) grundvand
- Dybe grundvand

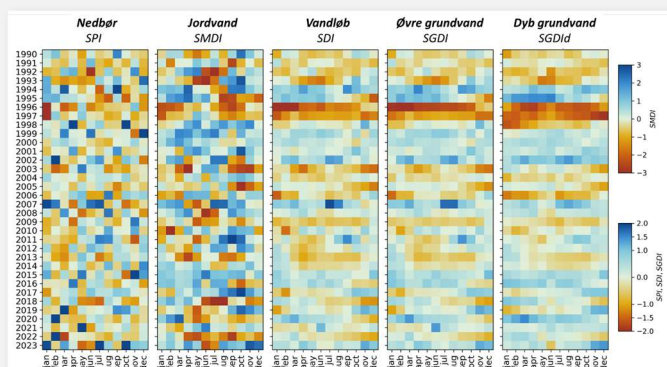
De opdateres dag-til-dag og her vises et eksempel på juni-tørken i 2023 (A). Indeksene beskriver og illustrerer, hvordan systemets tilstand afviger fra sæsonnormalen (over 30 år). Røde farver indikerer mere tørt end normalt, mens blå illustrer vådere end normalt.

De hydrologiske indeks kan også bruges til at undersøge tørkeudviklingen over længere perioder, og hvordan tørker manifesterer sig i de forskellige dele af vandkredsløbet (B). Her ses f.eks. forskellen mellem de kortere jordvandstørker og de mere langtrukne tørker i det dybe grundvand. De er frit tilgængelige online og opdateres dagligt på: <https://dennationalehydrologiskemodel.dk/>, data er ligeledes tilgængelig for alle på GEUS's offentlige database.

A



B



Indsats IV: Værktøjer til planlægning og link mellem modelsimuleringer (eller måledata) og konsekvenser af tørke

Indledning

Hydrologisk tørke kan have omfattende samfundsmæssige konsekvenser. Eksempelvis ved lavere afgrødeudbytter og deraf økonomiske tab i landbruget; sætningsskader på huse; samt negativ påvirkning på grundvandsafhængige økosystemer og grundvandsressourcer. For at håndtere disse udfordringer effektivt er det nødvendigt at udvikle værktøjer, der kan forbinde hydrologiske data med de konkrete konsekvenser, som tørken medfører i forskellige sektorer. Sådanne værktøjer skal kunne identificere risikoområder, så beslutningstagere får hjælp til at prioritere ressourcer og implementere tilpasningstiltag.

I indsatsen er det for første gang i Danmark undersøgt, om det er muligt at finde sammenhængen mellem hydrologiske observationer/indeks og samfundsmæssige konsekvenser af tørke for forskellige sektorer. Ellers sagt med andre ord, hvor godt korrelerer hydrologiske tørkehændelser med konkrete rapporterede tørkeskader? Det centrale mål er at opnå en indgående forståelse af, hvordan standardiserede tørkeindeks kan udnyttes som en anvendelsesorienteret viden, så det kan styrke samfundets robusthed over for fremtidige tørker.

Metode

Arbejdet er baseret på et framework, der systematisk forbinder hydrologiske tørkeindekser med registrerede konsekvenser. Data om tørke blev indsamlet fra modeller, målinger og statistikker, mens konsekvensdata blev hentet fra sektorer som landbrug, infrastruktur og miljø. En forbedret viden om tørkens intensitet, timing og længde blev sammenholdt med effekter som tab af afgrøder, sætningsskader på bygninger og påvirkning af vandløbs økologiske tilstand.

Derudover blev sekundære effekter af tørke, såsom øget vandindvinding og efterfølgende påvirkning af grundvandsressourcen, belyst i en indledende analyse af tørkens forstærkning af vandmangel.

Resultater

Resultaterne afslører klare sammenhænge mellem hydrologiske tørkeindekser og konsekvenser i forskellige sektorer. Inden for landbrugssektoren var der en markant korrelation mellem jordvandstørke i forårs- og sommermånederne og reduktion i afgrødeudbytter, som det blev tydeligt under tørken i 2018. For infrastruktur viste analysen, at længerevarende tørker, især i områder med lerholdige jorde, kan føre til sætningsskader på bygninger, hvilket blev dokumenteret under tørken i 2018 og 2022/23.

Natur og økosystemer blev også stærkt påvirket af tørke, hvor lav vandføring i vandløb forværrer den økologiske tilstand, mens vegetation i naturligt våde økosystemer viste tegn på stress under længerevarende perioder med lav grundvandsstand. For grundvandsressourcer blev det tydeligt, at langvarige vintertørker kan reducere opfyldningen af grundvandsressourcen, som det skete i 1995/96.

En vigtig indsigt var også, at samfundets reaktioner på tørke, såsom øget brug af vand til vanding, ofte forværrer de hydrologiske forhold. Disse sekundære effekter kan medføre yderligere belastning på allerede sårbare ressourcer og øge behovet for langsigtet planlægning. Her er flere og mere fokuserede analyser nødvendige.

Videre proces og konklusion

Analysen understreger behovet for at udvikle værktøjer, der kan etablere sammenhænge mellem hydrologiske modelresultater og observationsdata med de konkrete konsekvenser af tørke. Dette kan sikre, at beslutningstagere får adgang til pålidelige og brugbare oplysninger, som kan hjælpe med at minimere risici og planlægge mere effektive tiltag ved fremtidige tørker. Der bør også arbejdes

på at styrke integrationen af data fra forskellige kilder, så værktøjerne bliver mere præcise og anvendelige. Herunder mere systematisk indsamling af tørkekonsekvensdata fra det brede samfund.

Fremadrettet anbefales det at udvide samarbejdet mellem forskningsinstitutioner, myndigheder og sektorer, der er berørt af tørke, for at sikre en bedre forståelse af konsekvenserne og en mere robust forvaltning af vandressourcerne. Ved at fokusere på både direkte konsekvenser og sekundære effekter kan der udvikles en helhedsorienteret tilgang til at styrke Danmarks modstanddygtighed over for tørke.

Spor 3: Databehov og konsekvenser

Indsats I: Kortlægning af aktører, opgaver og datagrundlag i relation til tørkehændelser i Danmark – inspiration til videre arbejde

Indledning

Der er som led i det tværorganisatoriske tørkearbejde blevet udarbejdet en intern analyse med kortlægning af aktører, opgaver og dertilhørende datagrundlag relateret til tørkesituationer i Danmark. Kortlægningen er til internt brug, og skal derfor ikke offentliggøres efter dens færdiggørelse, men alene bruges som et indledende vidensgrundlag og en trædesten til videre arbejde i det tværorganisatoriske samarbejde og potentielt samarbejder med øvrige ministerområder.

Metode

Kortlægningen er begrænset til at omhandle udstedelse af:

- a) Korttidstilladelser for øget vandindvinding
- b) Afbrændingsforbud
- c) Vandingsforbud

Afdækningen af de tre tørkerelaterede opgavetyper er udført ved udsendelse af spørgeskemaer til hhv. kommuner for korttidstilladelser for øget vandindvinding, kommunale redningsselskaber for afbrændingsforbud og vandværker for vandingsforbud. Kommunerne til spørgeskemaet om korttidstilladelser er udvalgt med fokus på at repræsentere landbrugskommuner på tværs af landet, overlappende med områder, der har haft mange markindvindingsboringer. Spørgeskemaerne om afbrændingsforbud er udsendt ved hjælp af Danske Beredskaber til alle landets kommunale beredskaber. Spørgeskemaerne om vandingsforbud er udsendt ved hjælp fra Danske Vandværker samt DANVA.

Resultater

Korttidstilladelser:

Til korttidstilladelser for øget vandindvinding var der 16 ud af 34 responderende kommuner, der modtog ansøgninger i 2018, og 17 ud af 34 der modtog i 2023. Der ses tydelige geografiske forskelle ift. hvor mange ansøgninger kommunerne på tværs af landet modtog de to tørkeår. Kommuner vest for den jyske højderyg i Midt og Vestjylland modtog generelt mange ansøgninger med tal på omkring 70 til 175 pr. tørkeår, hvorimod kommunerne i Østjylland, Fyn og Sjælland modtog få eller ingen ansøgninger de to år. Dette stemmer godt overens med, at der generelt er sandede jorde vest for den jyske højderyg, der har en dårligere evne til at holde på vandet i jorden end jordene i øst, og der er dermed et generelt større vandingsbehov i Midt- og Vestjylland. Det har inden for rammerne af rapporten ikke været muligt at sammenholde tendenserne fra markvandingstilladelser med tørkeindeks eller mere konkrete jordforhold, men dette kan med fordel undersøges i det videre arbejde af DMI og GEUS, såfremt dette findes relevant.

18 af de 34 kommuner skriver i deres svar, at modificeret eller ny data ville kunne hjælpe deres sags gange med at behandle ansøgninger om korttidstilladelser for øget vandindvinding. Her lægges der særligt vægt på data omkring vandløb, grundvand, geologi og naturområder, samt sammenhængende modeller og systemer herom. Dette lægger op til et videre arbejde i 2025 med dels at kvalificere disse dataønsker, og dels at undersøge, hvordan konkrete værktøjer og indeks kan understøtte disse. Dog melder mange kommuner også, at en forbedring af deres sags gange i

højere grad afhænger af den gældende bekendtgørelse samt mængden af medarbejdere på området i kommunen. Dette ligger uden for scope af tørkesamarbejdet og uden for KEFM's ressort.

Afbrændingsforbud:

Til udstedelse af afbrændingsforbud, var der i både 2018 samt i 2023 en klar tendens til, at der blev indført forbud på tværs af landet. I 2018 indførte 19 ud af 23 kommunale beredskaber et afbrændingsforbud, og i 2023 var tallene 13 ud af 23. I 2018 var disse fordelt jævnt ud over landet, men i 2023 var der en højere andel af forbud i Jylland, sammenlignet med Fyn og Sjælland.

Der er ikke et udpræget ønske om mere data fra de kommunale beredskaber, hvor 80 pct. af respondenterne svarede nej til, om deres arbejdsgange kunne lettes med ny data. Dog melder de resterende 20 pct. dataønsker særligt omhandlende prognoser og brandfareindeks, hvorfor man i det fremtidige arbejde med fordel kan undersøge omfanget og relevansen herom.

Vandingsforbud:

Til udstedelse af vandingsforbud, var der hverken i år 2018 eller i år 2023 en tendens for at indføre vandingsforbud. I 2018 indførte kun tre ud af 31 vandværker et vandingsforbud, og i 2023 var tallet helt nede på en.

Som ved afbrændingsforbud er der blandt respondenterne til spørgsmål om indførsel af vandingsforbud ikke et udpræget ønske om mere data på området. Således svarede blot to ud af de 31 respondenter ja til ønsket om mere data. Et af disse var dog HOFOR, der udtrykte et ønske omkring DMI's tørkeindeks og månedsprognoser. Grundet HOFORS betydelige størrelse med forsyning af vand til mere end 1 mio. mennesker, kan dette dataønske med fordel undersøges i det videre arbejde.

Videre proces og konklusion

Overordnet set, vurderes det, at der kan være flere mulige aspekter at gå videre med på baggrund af analysen om korttidstilladelser, afbrændingsforbud og vandingsforbud. Dette dækker dels over kortlægningen af forskellige tendenser i en tørkerelation, som kan give inspiration til eller på anden måde understøtte det videre arbejde i 2025 hos DMI, GEUS og KDS. Derudover dækker det også over forskellige dataønsker, herunder særligt fra kommunerne ift. godkendelse af korttidstilladelser for øget vandindvinding, der med fordel kan blive undersøgt nærmere, både ift. relevans samt ift. i hvilken grad de er mulige at imødekomme.

Dog peger rapporten også på, at det ikke alene er data, der er afgørende for opgaveløsningen på tværs af de tre tørkerelaterede opgaver. Regler, organisering, tid hos medarbejdere og samarbejde på tværs har også stor betydning for, hvordan arbejdet håndteres under en tørkesituation, og skal tages in mente, hvis der arbejdes videre med elementer fra rapporten.

Indsats II: LAR-data til vandingsplanlægning

Indledning

Klimadatastyrelsen har under delspor 3 om konsekvenser og data i FR24 bl.a. haft til opdrag at undersøge *"hvilken betydning data om lokale anlæg til afledning af regnvand (LAR-anlæg) har for tilbageholdelse og magasinering af vand, der kan øge vandtilgængeligheden i tørkesituationer"* (Uddrag af projektbeskrivelse, D-440407).

LAR-anlæg er tekniske løsninger, der helt eller delvist afkobler regnvandet fra den traditionelle spildevandsinfrastruktur, med det formål at aflaste kloaksystemet, når det regner meget. For at kunne opstuve og forsinke regnvandet, indtil det igen er muligt at nedsive eller aflede, etableres der mange steder et forsinkelsesvolumen (f.eks. grøfter og bassiner), der gør det muligt at opsamle – og i nogle tilfælde genanvende – regnvandet. Projektet har derfor undersøgt, om LAR-anlæggenes vandmagasineringskapacitet rummer potentiale for at kunne understøtte tørkerelaterede vandingsbehov på tværs af landbruget, naturforvaltningen og drift af bynaturen, og om let adgang til LAR-data kan understøtte vandingsplanlægningen i denne forbindelse.

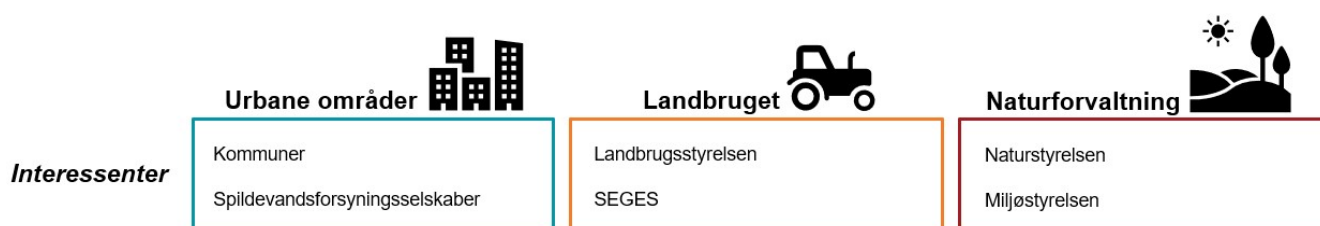
Metode

Projektet har undersøgt vandingsbehov- og strategier på tværs af landbruget, naturforvaltningen og drift af bynaturen. Der er i denne forbindelse foretaget en indledende afdækning af, om regnvand, der opsamles og magasineres i LAR-anlæg, kan bidrage til at øge vandtilgængeligheden og understøtte et her-og-nu vandingsbehov i forbindelse med tørkehændelser. Dette for at afsøge, om der er behov for let adgang til informationer om etablerede LAR-anlæg til brug for vandingsplanlægning, og om en tilpasning af Klimadatastyrelsens eksisterende LAR-prototype vil kunne imødekomme eventuelle databehov.

Projektet har taget udgangspunkt i følgende hypoteser:

- 1) At regnvand fra LAR-anlæg kan bidrage til at forbedre vandtilgængelighed i tørkeperioder og understøtte et kortsigtet, tørkerelateret vandingsbehov.
- 2) At let tilgængelige informationer om LAR-anlæg kan understøtte vandingsplanlægning i tørkeperioder.
- 3) At Klimadatastyrelsens eksisterende LAR-prototype kan tilpasses til at understøtte databehov i forbindelse med vandingsplanlægning.

Hypoteserne er afprøvet igennem dialog med udvalgte interessenter, se nedenstående figur.



Resultater

Projektets resultater, der er opsummeret i nedenstående figur, har peget på, at det formentlig primært er i landbruget og i den urbane drift, der er et tørkerelateret vandingsbehov. I landbruget er der stort behov for at tænke i løsninger, der kan bidrage til at sikre vandtilgængelighed i forbindelse med tørke, og man kigger bl.a. på mulighederne for at implementere løsninger, der kan minde om nogle af de funktioner, et LAR-anlæg kan have.

	 Urbane områder	 Landbruget	 Naturforvaltning
Vandingsbehov- og strategier	Vanding af bynaturen med regnvand giver bedre vækstbetingelser, der modvirker varmeø-effekter og giver et mere behageligt opholdsmiljø.	Stort behov for at tænke i løsninger, der kan sikre vandtilgængelighed i forbindelse med tørke. Man kigger bl.a. på mulighederne for recirkulering af dræn- og regnvand.	Arbejder bl.a. med naturgenopretningsprojekter, naturbaserede løsninger og langsom og naturlig hydrologi, der ikke i udgangspunktet vandes.
LAR som vandingsstrategi	Brug af vand fra LAR-anlæg forudsætter at det er tænkt ind i anlæggets design, og har på Frederiksberg sikret gode vækstbetingelser for vejtræer, også i tørkeperioder.	Brug af regnvand fra eksisterende LAR-anlæg i forbindelse med et her-og-nu vandingsbehov under tørkeperioder, er ikke oplagt i landbruget.	Arbejder bl.a. for at genskabe naturlige hydrologiske forhold og natur, der kræver mindre forvaltning, og brug af vand fra eksisterende LAR-anlæg er ikke oplagt.
LAR-databehov	Vandingsplanlægning hører under den kommunale drift, der i udgangspunkt har adgang til tilstrækkelige informationer. LAR-data er relevant ift. langsigtet planlægning samt projektering og dimensionering af nye anlæg.	I landbruget er det oplagt at lede efter muligheder for at lagre vand til senere brug. LAR-begrebet er imidlertid for snævert ift. landbrugets vandingsbehov. LAR-data kan muligvis være relevante ift. langsigtet planlægning og dimensionering. Dette kræver imidlertid yderligere afdækning.	LAR-begrebet er for snævert ift. at kunne bidrage til en direkte løsning af de udfordringer, man oplever i naturforvaltningen. LAR-data kan muligvis være relevante ift. langsigtet planlægning og dimensionering. Dette kræver imidlertid yderligere afdækning.
LAR-prototype	Viden om forhold, der har betydning for hvordan hydrologien opfører sig, er relevant ift. langsigtet planlægning. Videreudvikling af data og værktøjer skal koordineres med andre igangværende initiativer og med kommuner og spildevandsforsyningsselskaber.	Viden om forhold, der har betydning for hvordan hydrologien opfører sig, er relevant ift. langsigtet planlægning. Tilpasning af prototype kræver yderligere afdækning af databehov forbundet med de vandingsstrategier der anvendes i landbruget og forudsætter udvidelse af scope for prototypen.	Viden om forhold, der har betydning for hvordan hydrologien opfører sig, er relevant ift. langsigtet planlægning. Tilpasning af prototype kræver yderligere afdækning af databehov forbundet med de vandingsstrategier der anvendes i naturforvaltningen og forudsætter udvidelse af scope for prototypen.

I byerne findes eksempler på kommuner, der ved hjælp af smart city-teknologi på LAR-anlæg, har gjort sig erfaringer med at anvende opsamlet regnvand til vanding af bynaturen. Frederiksberg Kommune bruger sådanne løsninger, og her har vanding af bynaturen vist sig at give bynaturen bedre vækstbetingelser, også i tørkeperioder.

Der er imidlertid en række barrierer forbundet med at anvende opsamlet regnvand fra anlæg til vanding. F.eks. skal vandet have tilstrækkelig god kvalitet, og kravene til vandingsvandets kvalitet afhænger af den specifikke sammenhæng vandet er tiltænkt at skulle indgå. Dette gælder både for vanding af bynaturen, og for landbruget. Brug af vand fra etablerede anlæg forudsætter derfor, at brugen er tænkt ind i forbindelse med design af anlægget, der kan bidrage til at sikre, at der sker en rensning af vandet. I landbruget har man, udover sikkerhed for at vandingsvandets kvalitet er i orden, brug for sikkerhed for, at vandet er tilgængeligt i tilstrækkeligt store mængder. Dette betyder, at brug af vand fra LAR-anlæg ikke i udgangspunktet er oplagt for landbruget, da vand i LAR-anlæg som regel kun opstaves midlertidigt, fordi der skal være plads i anlægget igen, når et nyt skybrud rammer. Der er derfor behov for at kigge bredere på vandingsstrategier, der gør det muligt at sikre tilstrækkeligt store mængder vand af tilstrækkelig god kvalitet, til når behovet opstår, og man kigger i landbruget ind i mulighederne for recirkulering af dræn- og regnvand til vanding.

Videre proces og konklusion

Opsamlet regnvand fra LAR-anlæg til kortsigtet vandingsplanlægning som følge af et tørkerelateret vandingsbehov, er primært interessant ift. forvaltningen af den urbane natur og forudsætter, at der er adgang til anlæg, som er designet til dette specifikke formål. For kommunerne er let adgang til data om etablerede LAR-anlæg imidlertid ikke er den store game-changer, da kommunerne som oftest har tilstrækkelig stor viden om egne anlæg.

I det langsigtede perspektiv er der på tværs af de tre sektorer brug for pålidelige data, der kan bruges i analyser og til valg af løsninger, der kan håndtere både oversvømmelser og tørke. Her er viden om fysiske forhold i terræn, som påvirker hydrologien og som kan have betydning for virkningen af de strategier, der ønskes implementeret, vigtig. Etablerede LAR-anlæg har betydning for hvor vandet strømmer på overfladen (f.eks. i skybrudsveje) og for hvor vandets strømningsveje brydes. Det kan

f.eks. være på steder hvor vandet rammer et forsinkelsesvolumen og nedsiver i jorden. LAR-data kan derfor være vigtige ift. at understøtte langsigtet planlægning og ift. et bredere vandressourceperspektiv.

Projektet har valgt ikke at foretage justeringer til Klimadatastyrelsens LAR-prototype indenfor rammerne af FR24. En videreudvikling af prototypen til at understøtte vandingsplanlægning i forbindelse med tørke i et langsigtet perspektiv forudsætter en scope-udvidelse for arbejdet med prototypen, som Klimadatastyrelsen parallelt med dette projekt har været i dialog med potentielle LAR-dataanvendere om. Samtidig har Klimadatastyrelsen kendskab til et af KL initieret initiativ for at understøtte en lettere udveksling af LAR-data, og Klimadatastyrelsen ønsker at understøtte, at der sker en kobling til og koordination imellem igangværende LAR-projekter.

Indsats III: Satellitdata om tørke – potentiale til at forebygge konsekvenser

Indledning

Klimadatastyrelsen har under FR24 tørkeprojektets delspor 3 om databehov og konsekvenser bl.a. haft til opgave at *"afdække hvordan nye såvel som eksisterende data og værktøjer kan indgå i arbejdet med at kortlægge og afhjælpe forskellige tørkekonsekvenser"*. Opgaven er afgrænset til at fokusere på satellitdata, der kan anvendes til at kortlægge og afhjælpe tørkekonsekvenser inden for natur/økosystemer og landbrug (jf. Projektdokument D440407).

Tørke er en ny udfordring i Danmark, der forventes at forekomme hyppigere i fremtiden. Tørken i 2018 var den værste nogensinde og kostede samfundet 8,1 mia. kr. (Attrup, 2019), hvoraf der var tab på 4,1 mia. kr. i landbruget. I 2023 oplevede Danmark endnu en tørke, der medførte et tab i landbruget på 3,3 mia. kr.

Delindsatsen om "databehov" har generelt til formål at afdække behov og muligheder for at styrke et databaseret vidensgrundlag til planlægning og forebyggelse af tørke. Formålet er, at samfundet kan nå at tage de nødvendige forholdsregler for at mindske skadelige virkninger af fremtidige tørkeperioder.

Metode

Da tørke er en ny udfordring i Danmark, har projektet undersøgt:

- 1) Hvilke **muligheder og erfaringer**, der er med udstilling og brug af satellitbaserede data og værktøjer til håndtering af tørke i EU og globalt. Det er gjort med internet søgninger og deltagelser i videnskabelige konferencer, og der er holdt møder med koordinatore af aktuelle ESA- og NASA projekter om behov og nye muligheder for satellitdata til at understøtte vandforvaltning i tørre områder (ECOSTRESS, OpenET). Der har i undersøgelsen været fokus på modenhed og anvendelsesværdi af satellitbaserede dataprodukter i høj opløsning (10-30 m grid) til *forebyggelse* af tørkekonsekvenser, og det er prioriteret at se på robuste, forskningsbaserede løsninger, der kan operationaliseres. Med udgangspunkt i denne analyse er der afholdt
- 2) Interessentmøder med Landbrugsstyrelsen, Miljøstyrelsen, Naturstyrelsen, SEGES og DANVA for at høre om deres **erfaringer med brug af satellitdata**, samt for at afdække hvilke arbejdsopgaver, der påvirkes af tørke og diskutere hvordan satellitdata vil kunne afhjælpe konsekvenser af dette. Dette blev gjort med afsæt i KDS's præsentation af udvalgte satellitdataprodukter, der bruges som tørkeindikatorer internationalt.
- 3) På baggrund af analyser og interessentmøder er der udviklet satellitbaserede prototypedata for Danmark, der kan anvendes til **monitorering af tørke og tørkekonsekvenser**. De producerede satellitdataprodukter er blevet udstillet på KDS Labs for at understøtte yderligere brugerdialo om anvendelsesværdi, der skal sikre en fortsat brugerdreven udvikling i 2025. Der er gennemført analyser og tests til håndtering og processering af højopløselige satellitdata i KDS.
- 4) Det er undersøgt hvilke nye relevante satellitmissioner, der er på vej, således at der sikres forslag til fremtidssikrede løsninger, der vil blive styrket med bedre data fra **kommende satellitmissioner** til bedre monitorering og forebyggelse af tørkekonsekvenser.

Resultater

Internationale erfaringer og muligheder

Satellitdata anvendes allerede bredt internationalt og globalt til at overvåge tørkerisici, fødevarerproduktion og fødevarerikkerhed samt for at understøtte beslutningsprocesser inden for landbrug, vandforvaltning og natur. Ved hjælp af jordobservationssatellitter indsamles data om jordfugtighed, vegetationstilstand og fordampning, der integreres med data fra mange andre

internationale organisationer for at sikre god geografisk dækning til overvågning af agro- og økosystemers sundhed. Disse data behandles og integreres i internationale værktøjer i EU og globalt, der tilbyder visualiseringer, der gør det muligt for myndigheder og beslutningstagere at reagere på tørkeforhold.

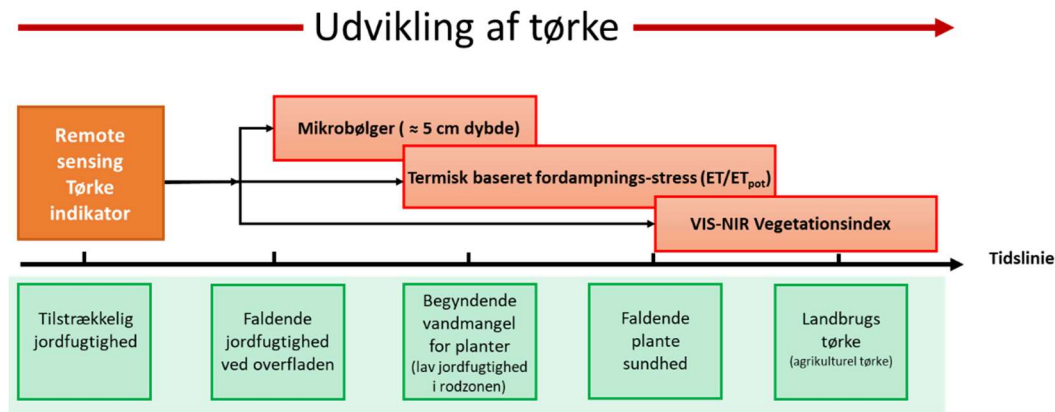
For Danmark findes derfor allerede en række interessante satellitbaserede tørkeindikatorer i internationale værktøjer, der gør det muligt at se tørkekonsekvenser på meget grov skala, men de er ikke specifikt tilpasset eller testet for anvendelse i Danmark til monitorering og forebyggelse af tørkekonsekvenser. Disse indikatorer kan også beregnes med brug af satellitdata i langt højere rumlig opløsning, hvilket er langt mere relevant til lokale anvendelser. Hertil kan fx anvendes data i 10-30 m grid fra Sentinel- og Landsat satellitter, der anvender mikrobølgeteknologi samt termisk infrarøde og optiske sensorer til kortlægning af hhv. jordfugtighed, fordampning og vegetation (se figur).

Databehov og anvendelsesmuligheder

Tørke presser ikke kun landbrug, grundvandsressourcer og natur i Danmark. Det påvirker mange arbejdsopgaver og aktiviteter. Landbrugskommunerne skal på kort tid behandle 100-vis af akutte indvindingstilladelser til markvanding, og samtidigt skal de overholde komplekse miljøkrav om påvirkning af natur, vandløb og grundvand. Både landbruget og kommuner giver udtryk for, at der mangler data til brug for akutte korttids tilladelser til markvanding. Landbruget har brug for viden om vandunderskud i jorden og ser store muligheder i brug af højopløselige satellitdata. Satellitbaseret viden om vandunderskud, fremspiring og biomasse har betydning for både markvanding, gødskning og sprøjtning, der skal tilpasses til gavn for produktion og miljø. Manglende fremspiring påvirker optag af kvælstof i planter, og har også konsekvenser for både kvælstofudvaskning, kvælstoftildeling, tilskudsadministration og indberetninger til EU. Tørke påvirker også lavbundsarealer og skovrejsning, hvilket kan reducere den klimagavnige effekt på drivhusgasudledninger, og det kan påvirke urørte skov og nationalparker, og forårsage sætningsskader af bygninger og infrastruktur. Der er således mange væsentlige grunde til at sikre en bedre vandfordeling, fx ved at skabe mere naturlig hydrologi, større nedsivning og vandmagasiner i landskabet. Vandforsyningerne udfordres også af tørke, da de skal pumpe vand andre steder hen end de plejer, hvilket kan være omkostningstungt. Der er generelt stor interesse for at høre om de nye muligheder for brug af satellitdata om tørke.

Udstilling af prototype satellitdataprodukter

KDS har arbejdet med udvikling, test og udstilling af satellitbaserede dataprodukter om fordampning, vandmangel og vegetationsindex i 10-30 m grid for Danmark med fokus på tørkeperioden i 2023. Brugen af termisk infrarøde satellitdata til kortlægning af fordampningsstress kan bruges løbende gennem tørkens udvikling til monitorering af vandmangel. Vegetationsindex viser konsekvenser af dette. Der er ikke arbejdet med mikrobølge/radar data af jordfugtighed, da de kun kan estimere denne for de øverste 5 cm af jorden, og derfor ikke alene kan levere data om den løbende udvikling af jordbundstørke (se figur). Der planlægges flere nye satellitmissioner i bl.a. ESA og NASA med termisk infrarøde data i høj opløsning til gavn for vandforvaltning, landbrug og natur, som projektet kan ses som en forberedelse til.



Videre proces og konklusion

Der vil i 2025 arbejdes videre med evaluering af datakvalitet/usikkerhed, databehov og brugerhistorier til afdækning af anvendelsespotentialer for mere detaljerede slutprodukter om vandmangel og vandingsbehov, der kan supplere de landsdækkende hydrologiske indeks i 100 m grid (jf. Spor II) med sub-grid data (10-30 m) i tørre perioder. KDS ser store anvendelsespotentialer i at anvende høopløselige termisk infrarøde satellitdata gennem tørkeperioder, hvor skydækket er signifikant mindre i Danmark, hvilket giver mulighed for langt bedre satellitdækning.

Indsats IV: Tørkes betydning for kvælstofsudledning samt vandføring

Indledning

Klimaforandringer mærkes allerede i dag i form af øget af nedbør, hyppigere oversvømmelser, stigende temperaturer og øget frekvens af ekstrem tørke. Aarhus Universitet har med bidrag fra GEUS udarbejdet rapporten "Tørkes betydning for kvælstof-høst og -udledning samt på vandføring og biologi i vandløb" [12]. Nærværende notat er en policy brief, der sammenfatter de vigtigste budskaber fra rapporten. Der henvises derfor til rapporten for uddybninger, litteraturhenvisninger mv. Heri beskrives de miljømæssige konsekvenser af tørke. Der skelnes mellem hhv. agronomisk tørke og hydrologiske tørke. Agronomisk tørke påvirker afgrødevækst og udbytter og giver øget udvaskning af nitrat fra jorden samt øget kvælstofudledning til vandløb og kystvande. Hydrologisk tørke påvirker grundvands-magasinerne samt vandføring og biologi i vandløb. 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.

Metode

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 indvinding på grundvand og vandløb. Den bæredygtige udnyttelse 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.

Resultater

Markvanding kan modvirke tørkeeffekt men påvirker grundvand og vandføring

Analysen af de ni indikatorer viser, at særligt omkring de store byer er grundvandsressourcen overudnyttet, og indikatorer peger på, at det ofte er grundvandsmagasinerne bæredygtighed, som begrænser ressourcens størrelse. 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 mark-vanding, 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. 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 dermed kunne påvirke den økologiske tilstand i vandløb.

Reduceret vandføring i vandløb kan forværre den økologiske tilstand 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 tørkeramte, 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 (forskul mellem kvælstof tilført mark og kvælstof fraført mark ved høst). Det forhøjede indhold af kvælstof i jorden, udvaskes med nedbøren til vandløb og kystvande. Anvendes en simpel sammenhæng mellem markover-skuddet af kvælstof 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 1992 og 2018. Der er i rapporten udviklet generelle sammenhænge (ligninger) mellem vandafstrømning og kvælstofudledning. Analysen viser, at der året efter tørkeårene 1992 og 2018 er en højere kvælstofudledning end forventet, og for nogle regioner, kan effekten ses to år efter tørkeåret. Kvælstofudledningen kan i regioner med lav nedbør være forhøjet året efter tørkeåret, som det ses for det hydrologiske år 2018/2019 og 2019/2020, hvor der ud over lav nedbør i vækstmånederne. 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 2019/2020.

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, minivåd-områder, intelligente bufferzoner mv.

Videre proces og konklusion

Tørke påvirker både vandløb og grundvand samt afgrødeudbytter, nitratudvaskning og kvælstofudledning. Agronomisk tørke, hvor afgrødeudbyttet er påvirket, forekom i 1992, 2018 og 2023. Hydrologisk tørke, hvor både vandføring i vandløb og grundvandsmagasiner påvirkes, sås særligt i årene 1995-1997. Hydrologisk tørke afhænger af nedbør og fordampningsforhold. 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 kvælstofudbytterne 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. 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.

Indsats V: Økonomiske konsekvenser ved tørke i landbruget

Indledning

Den stigende hyppighed af vejrekstremer øger risikoen for tab af afgrøde og animalsk produktion i dansk landbrug, hvilket har økonomiske konsekvenser for sektoren. Der er mange tilpasningsmuligheder for landbruget, herunder økonomisk afbødning, produktionsteknisk omstilling og fremtidssikring gennem investeringer i mere resistente sorter, arter og driftsanlæg.

Historisk set er disse ekstreme vejrændringer blevet imødegået med ad hoc tilpasninger af driftsreguleringen samt statsudbetalt kompensation, senest i 2023 i form af en ensartet hektarstøtte fra EU's landbrugsreserve. Det er dog velkendt, at reduktioner i udbuddet af landbrugsprodukter kan medføre en modsat rettet prisreaktion på grund af manglende mulighed for at øge produktionsmængden på kort sigt. I nogle tilfælde kan denne prisreaktion fuldt ud kompensere producenterne. Det betyder, at behovet for kompensation for at sikre indkomsten i erhvervet ikke opfylder sit formål i sin nuværende form som ensartet støtte. Dette skyldes, at en ensartet hektarbaseret støtte ikke tager højde for, at nogle produktionsgrene allerede er fuldt kompenseret af prisreaktionen.

For bedre at kunne opfylde målsætningen om indkomstsikring, hvis kompensation skal anvendes fremadrettet, kræves en bedre forståelse af de økonomiske forskelle på tværs af underliggende delsektorer og regionale områder. Der er dog også andre udfordringer forbundet med anvendelsen af denne form for redskaber, da forventningen om offentlig intervention mindsker incitamentet for landmændene til selvstændigt at anvende risikostyringsværktøjer og dermed bidrage til en omstilling af sektoren til at være mere robust over for vejrmæssige udsving. Derfor er der behov for samtidig at overveje andre handlemuligheder og politiske instrumenter, der kan fastholde incitamenterne for selvstændig handling på bedriftsniveau.

Tørkes påvirkning af produktionen på den enkelte bedrifts marker er især bestemt af jordtype, klimaforhold, herunder specielt nedbør, og hvilke afgrøder der dyrkes. Der findes ikke tilstrækkeligt disaggregerede opgørelser af udbyttepåvirkningen, til at tabene på den enkelte ejendom kan estimeres. Især kvægbedrifter og brug med højt værdiafgrøder på sandede jorde er følsomme overfor tørke, hvorfor mange af disse har investeret i vandingsanlæg.

Metode

Rapporten indeholder flere forskellige metodiske tilgange til dette emne. Både økonomiske konsekvenser af tørke, samt modellering og kortlægning af udbyttetab på mark- og bedriftsniveau baseret på data om jordbund, vej og afgrøder er inddraget i rapporten.

I relation til de økonomiske konsekvenser er der udført et litteraturstudie over de nuværende estimater for de økonomiske konsekvenser af tørkeåret 2018. Derudover er der redegjort for handlemuligheder i forhold til at afbøde konsekvenserne af vejrekstremer, baseret på både litteratur samt sektor-kendskab. Gennem korrelationsanalyse er prisreaktion forbundet med udbyttereduktioner belyst (grundet tidsomfang i form af simple antagelser, hvor hver enkelt afgrøde anskues separat). Derudover er der med analyser baseret på allerede observerede tørkehændelser (ex post analyse) med Danmarks Statistiks datasæt foretaget udregninger af omsætningsændringer indenfor vegetabiliske sektorer i forbindelse med 2018 tørken. Til disse udregninger er udbytte- og priseffekterne adskilt. Ved inddragelse af både omkostningen af udbyttereduktioner samt omsætningsstigningen fra prisreaktionen er graden af markedsdrevet kompensation illustreret. I samme sektion er ændringer i vanding- og foderomkostninger belyst, men på grund af et højt aggregeringsniveau for data har det ikke været muligt at placere dette til de relevante delsektorer (f.eks. fordele foderudgifter på besætning eller vandingsudgifter på afgrødesorter).

For at kunne disaggregere tabene på grund af tørke til f.eks. afgrødeniveau eller bedriftstyper, er der behov for en model-baseret estimering på markniveau. Inputdata til at etablere et sådant

landsdækkende system er sådan set til stede i form af databaser over jordtyper, afgrøder og klimaforhold, men mangler at blive samlet i et system. Ligeledes mangler udbytterespons-modellen at blive valideret især på de mere vandholdende lerjorde. Hvis et sådant modelsystem etableres, vil der kunne foretages ex ante analyser af udbytte effekter, som vil kunne anvendes til bedriftsspecifik optimering af afgrøder, sorter, samt beslutning om investering i vandingsanlæg. Denne mere disaggregerede data, der kan opnås ved modellering på markniveau, vil også kunne bistå i etableringen af mere målrettet kompensation.

Tværgående resultater:

- Landmændene har mange afbødningsstrategier, der kan anvendes mere effektivt for at håndtere den øgede risiko for vejrekstremer. For eksempel kan vegetabiliske producenter variere deres afgrødevalg for at mindske udbytte udsving. Animalske producenter, der står over for højere udgifter til grovfoder i år med lavt udbytte, kan drage fordel af øget lagerkapacitet for at håndtere den forventede højere udbyttevariabilitet.
- Der er en række vidensmangler i forhold til den optimale adfærd på enkeltbedrifter grundet sektor- og områdeforskelle. Afdækning af disse vil kunne bidrage til bedre rådgivning af landmænd til selvstændigt at risikostyresamt vil kunne anvendes til at målrette økonomisk kompensation. Specielt placeringen af forhøjede driftsudgifter forbundet med vanding, samt foderomkostningerne er underbelyste områder i relation til tørke. Disse påvirker fordelingen af omkostningerne mellem den vegetabiliske og animalske del af sektoren.

Resultater fra det økonomisk fagområde:

- I dansk landbrug (og EU) mødes vejrekstremer, der påvirker landbrugssektoren, med økonomiske kompensationsordninger med målet om indkomstsikring samt suppleret med ad hoc driftsreguleringsændringer. Dette mindsker incitamentet for landmændene til at anvende risikostyringsværktøjer på bedriftsniveau. Den økonomiske kompensation er ikke målrettet indkomstsikringsformålet og blev i 2023 udbetalt som en ensartet hektarstøtte bundet til ansøgning om landbrugsstøttens grundbetaling. Der tages ikke højde for de enkelte bedrifters reelle vejrrelaterede tab i udbetalingen. Driftsreguleringsændringerne kan inkludere tilpasninger af arealanvendelseskrav (f.eks. slæt på brakarealer) og mindskede krav til grovfoderandel. Begge tiltag reducerer incitamentet for animalske producenter til at etablere højere lagerkapacitet.
- Mængden af tørkerelaterede økonomiske tab afhænger af den markedsdrevne kompensation i form af højere priser. Disse kan i nogle tilfælde fuldt ud kompensere for udbyttereduktionerne og stabilisere eller øge omsætningen. Dette afhænger af graden af substituerbare alternativer, markedsandelen produceret nationalt, størrelsen af udbyttenedgangen med videre.

Resultater fra det plantevidenskabelige fagområde:

- Rapporten fremhæver den store variabilitet mellem forskellige afgrødetyper i forhold til udbyttekonsekvenserne af vejrekstremer samt forskelle mellem afgrøder på grund af variationen i jordbundsforhold; afgrødernes udviklingstrin på tidspunktet for tørken; vejrforhold på tværs af landet, hvor især nedbørsmængderne varierer fra vest til øst; og mulighederne for afbødning gennem etablering af markvanding, evt. ved opsamling af drænvand, som samtidig kan modvirke kvælstofudvaskning.
- I rapporten er der redegjort for, hvordan en model for udbyttetab forårsaget af tørke kan opbygges baseret på et eksisterende beslutningsstøtteværktøj for vanding kaldet *Markvand*. Dette er oprindeligt udviklet af Aarhus Universitet og findes i en online-version, som SEGES tilbyder deres landmænd. I rapporten vises eksempler, hvor data fra en række områder i landet er udtrukket fra de relevante databaser, sammenholdt manuelt og brugt som input til modellen. Output på markniveau for en række år viser de estimerede tab i tre forskellige afgrøder. En sådan landsdækkende estimering, der dækker en længere årrække, vil kunne bruges som grundlag for bedre at tilpasse dansk landbrug til tørkesituationer og tage de fremtidige forventninger til klimaændringer i betragtning.

Resultater fra det husdyrvidenskabelige fagområde:

- Rapporten opsummerer eksisterende viden om de særlige udfordringer og handlemuligheder i husdyrbesætningerne i forbindelse med tørke. For eksempel vises det, at i besætninger med malkekvæg med stor anvendelse af grovfoder, vil det på trods af prisstigning på grovfoder oftest være økonomisk mindre tabsgivende at indkøbe grovfoder frem for midlertidige store reduktioner i andel grovfoder i foderrationen eller store ændringer i besætningsstørrelsen.

Videre proces og konklusion:

Rapporten fremhæver de afbødningsstrategier, der er tilgængelige for den danske landbrugssektor i forbindelse med vejrekstremer. Den diskuterer, hvordan nuværende politiske interventioner ved tørke (og potentielt andre vejrekstremer) forvrider incitamenterne for landmændene til selvstændigt at anvende tilgængelige risikostyringsredskaber på bedriftsniveau. Derudover belyser rapporten de vidensmangler, der eksisterer, og som er nødvendige for bedre at kunne rådgive sektoren og målrette de økonomiske kompensations tiltag, der hidtil er blevet anvendt.

Det er vist, hvordan variabiliteten i udbytteresponserne i forhold til tørke kan modelleres på tværs af områder, afgrødetyper, jordbundsforhold mv. Disse forskelle, sammen med forskelle i prisreaktioner på tværs af afgrøder, medfører stor diversitet mellem bedrifter i forhold til de økonomiske konsekvenser af tørke samt den optimale forebyggelsesstrategi i forbindelse med tørke (eller andre vejrekstremer). En landsdækkende model er dog ikke opbygget p.t. og fordrer videre overvejelser og test mht. repræsentativitet og f.eks. brug af data fra satellitter og droner.

De økonomiske analyser i rapporten er præget af den høje aggregering af offentligt tilgængelige data, som de økonomiske omkostningsestimater er baseret på, grundet tidsomfanget for analysen. For at kunne fastlægge økonomiske konsekvenser på tværs af afgrøder, dyrearter og regioner er en højere detaljeringsgrad nødvendig. Dette kunne belyses ved at udnytte udbyttereduktionsestimaterne fra modelleringen. Derudover er de driftstekniske omstillinger på bedrifterne i forbindelse med tørke (og andre vejrekstremer) underbelyste. Dette kan belyses med mere detaljerede regnskabsdata på bedriftsniveau kombineret med en casebaseret og bedriftsbaseret tilgang, hvor man i højere grad kan kortlægge de driftsændringer, landmænd foretager i forbindelse med vejrekstremer. Derved kan spredningen i omkostningsestimaterne, baseret på antagelsesforskelle, mindskes og konsekvenser af driftstekniske omstillinger analyseres mere detaljeret.

KONKLUSION OG VIDERE PROCES

Hidtil har der ikke eksisteret en samlet, systematisk viden om tørke i Danmark, og data har været fragmenterede. Med Forskningsreserven 2024 (FR24) er der for første gang blevet afsat målrettede midler til at kortlægge tørkens forekomst og konsekvenser samt opbygge et solidt datagrundlag, der kan understøtte fremtidig planlægning, forebyggelse og afbødning af tørkens konsekvenser.

De gennemførte undersøgelser har styrket både videns- og datagrundlaget for tørke i en dansk kontekst. Der er nu en mere systematisk forståelse af tørkens udvikling og konsekvenser, samt forbedrede data til fremtidige analyser og beslutningsværktøjer. Arbejdet har muliggjort en bedre overvågning af tørke, udvikling af modeller og et øget fokus på tørkens betydning for vandressourcer, landbrug og samfundsøkonomi. Foreløbige resultater viser blandt andet, at tørkeperioder ikke nødvendigvis bliver hyppigere i et varmere klima, men at fremtidens tørke hændelser kan blive mere ekstreme. Samtidig understreger analyserne behovet for en stærkere strategisk tilgang til håndtering af tørke gennem vandforvaltning, tørkeresistente afgrøder og optimeret brug af tilgængelige vandressourcer.

Fremadrettet vil arbejdet fokusere på at operationalisere de udviklede værktøjer og modeller, så de bliver anvendelige i både klimatilpasning og beredskabsplanlægning. Der vil blive arbejdet videre med at forbedre tørkeovervågningen, herunder integration af tørkedata i eksisterende klimaværktøjer samt videreudvikling af prognoser for både kort- og langsigtet tørke. Styrket monitorering af tørke, blandt andet gennem hydrologiske modeller og satellitdata, vil give bedre beslutningsgrundlag for både myndigheder, landbrug og borgere.

Samarbejdet mellem DMI, GEUS og KDS vil blive videreført med henblik på at skabe en stærkere sammenhæng mellem tørkeforskning og praktisk anvendelse af resultaterne. Arbejdet i 2025 vil konsolidere den opbyggede viden, udbygge et større fundament for viden og facilitere, at den kan operationaliseres til gavn for samfundet.

Samlet set har tørkeindsatsen lagt et solidt fundament for bedre overvågning, klimatilpasning og strategisk planlægning i Danmark. Den opbyggede viden gør, at der kan udvikles værktøjer som et solidt fundament for fremtidig håndtering af tørke i Danmark. Med en fortsat indsats kan disse ressourcer anvendes aktivt til at styrke klimatilpasning og beredskabsplanlægning, så samfundet bliver bedre rustet til at håndtere de udfordringer, som fremtidige tørkehændelser kan medføre.

NOTER OG KILDER

- [1] Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J. V., & Barbosa, P. (2015). The biggest drought events in Europe from 1950 to 2012. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 3, 509-524.
- [2] Zaveri, Esha Dilip; Damania, Richard; Engle, Nathan Lee. Droughts and Deficits - Summary Evidence of the Global Impact on Economic Growth (English). Water Global Practice Washington, D.C. : World Bank Group.
<http://documents.worldbank.org/curated/en/099640306142317412/IDU03b9849a60d86404b600bc480bef6082a760a>
- [3] UNCCD. <https://www.unccd.int/land-and-life/drought/overview#:~:text=Forecasts%20estimate%20that%20by%202050,address%20the%20impacts%20of%20drought>.
- [4] Rossi, L., Wens, M., de Moel, H., Cotti, D., Sabino Siemons, A.S., Toreti, A., Maetens, W., Masante, D., Van Loon, A., Hagenlocher, M. and Rudari, R., 2023. European Drought Risk Atlas.
- [5] Hisdal, H., Roald, L. A., & Beldring, S. (2006). Past and future changes in flood and drought in the Nordic countries. *IAHS publication*, 308, 502.
- [6] Rousi, E., Fink, A. H., Andersen, L. S., Becker, F. N., Beobide-Arsuaga, G., Breil, M., Cozzi, G., Heinke, J., Jach, L., Niermann, D., Petrovic, D., Richling, A., Riebold, J., Steidl, S., Suarez-Gutierrez, L., Tradowsky, J. S., Coumou, D., Düsterhus, A., Ellsäßer, F., Fragkoulidis, G., Gliksman, D., Handorf, D., Haustein, K., Kornhuber, K., Kunstmann, H., Pinto, J. G., Warrach-Sagi, K., and Xoplaki, E.: The extremely hot and dry 2018 summer in central and northern Europe from a multi-faceted weather and climate perspective, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 1699–1718, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1699-2023>, 2023.
- [7] ESOTC 2023. <https://www.copernicus.eu/en/news/news/observer-esotc-2023-europe-experienced-extraordinary-year-extremes-record-breaking>
- [8] EU, https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-scarcity-and-droughts_en?prefLang=da&etrans=da
- [9] Mishra, A.K. and Singh, V.P., 2010. A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, 391(1-2), pp.202-216.
- [10] Smakhtin, V.U. and Schipper, E.L.F., 2008. Droughts: The impact of semantics and perceptions. *Water Policy*, 10(2), pp.131-143.
- [11] JRC, https://joint-research-centre.ec.europa.eu/european-and-global-drought-observatories_en
- [12] Blicher-Mathiesen, G., Larsen, S. E., Rasmussen, J. K. J.1, Thorsen, M., Seidenfaden, I. K., Trolborg, L., Ondracek, L., ten Damme, Andersen, M. N., Kratschmer, A. K., Lissner, E. S., Tornbjerg, 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, 80 s. - Videnskabelig rapport nr. 646 SR646.pdf

