

Hydrologisk Tørke

Temarapport 2 i det tværorganisatoriske samarbejde
”Styrket vidensgrundlag for tørke”
mellem KDS, GEUS og DMI

Ida Karlsson Seidenfaden, Raphael Schneider, Bertel Nilsson,
Julian Koch, Lars Trolborg, Klaus Hinsby, Mark F.T. Hansen,
Nicolas Martin, Mie Andreasen, Anker Lajer Højberg,
Maria Ondracek & Simon Stisen

Hydrologisk Tørke

Temarapport 2 i det tværorganisatoriske samarbejde
”Styrket vidensgrundlag for tørke”
mellem KDS, GEUS og DMI

Ida Karlsson Seidenfaden, Raphael Schneider, Bertel Nilsson,
Julian Koch, Lars Trolborg, Klaus Hinsby, Mark F.T. Hansen,
Nicolas Martin, Mie Andreasen, Anker Lajer Højberg,
Maria Ondracek & Simon Stisen

Indholdsfortegnelse

0.	Indsatsen om Hydrologisk Tørke	5
0.0	Tørke-Projektets overordnede rammesætning	5
0.1	Hvad er tørke?	5
0.1.1	Tørketyper og -perspektiver	6
0.1.2	Jordvandstørke og Hydrologisk tørke	7
0.2	Rapportens opbygning og indhold	9
0.3	Udmøntning og Formidling	10
1.	Indsats H1: Analyser af hydrologisk tørke	12
1.0	Indledning	12
1.1	Opsummering af litteratur-gennemgang	12
1.2	Historisk analyse af 34 års tørkekarakteristikker og -forekomster i Danmark.....	13
1.2.1	Litteraturens tørkeindekser og tørkekarakteristikker	13
1.2.2	Frengangsmåde	19
1.2.3	Nationale hydrologiske tørkeanomalier i Danmark.....	21
1.2.4	Eksempler fra historiske tørker i Danmark	23
1.2.5	Trends, korrelationer og kryds-korrelationer.....	25
1.2.6	Regionale forskelle i tørkekarakteristikker.....	29
1.3	Perspektiver for analyser af tørker og tørkekarakteristikker	31
2.	Indsats H2: Validering af modelsimuleringer for tørke	33
2.0	Indledning	33
2.1	Udvælgelse af observationsdatasæt til modelvalidering	33
2.1.1	Stor-skala jordfugtighed	34
2.1.2	Grundvandsstand data	35
2.1.3	Vandføringsdata fra vandløb	38
2.2	Valideringsanalyse af modelsimulationer	39
2.2.1	Observationer vs. modeller	39
2.2.2	Den Nationale Hydrologiske Model	39
2.2.3	Modelvalidering	40
2.3	Perspektiver for forbedringer og udfordringer relateret til tørkemodellering	41
2.3.1	Modeller for rodzonen	41
2.3.2	Alternativ fordampningsberegning med brug af klimamodeldata.....	41
3.	Indsats H3: Nye datamuligheder til overvågning og monitorering af tørke	43
3.0	Indledning - Afdækning af tilgængelige data til overvågning	43
3.1	Modeldata: DK-modellen i realtid og som prognosemodel.....	43
3.2	Observationsdata	44
3.2.1	Grundvandsstand	44
3.2.2	Sensornetværk på jordvandsindhold	45
3.2.3	Remote sensing data til overvågning	47
3.3	Perspektiver og anbefalinger	54
3.3.1	Anbefalinger til nye datamuligheder	54

3.3.2	Muligheder for ny viden om tørke og ændringer i arealanvendelse	54
4.	Indsats H4: Værktøjer til planlægning og link mellem modelsimuleringer (eller måledata) og konsekvenser af tørke	56
4.0	Indledning.....	56
4.0.1	Relevans og Planlægningsværktøjer	57
4.1	Redskab til vurdering af hydrologisk tørke.....	58
4.2	Analyse af udvalgte tørkekonsekvenser	61
4.2.1	Forundersøgelse og relevant EU-lovgivning	61
4.2.2	Landbrug: Analyse af korrelation mellem tørke og udbytter.....	65
4.2.3	Infrastruktur: Konsekvensanalyse af tørkeramte huse	74
4.2.4	Natur: Vegetation	87
4.2.5	Grundvand	91
4.3	Sekundære effekter: Vandforsyning og Vanding	99
4.3.1	Vandforsyning.....	99
4.3.2	Markvanding og grundvandsmagasiner og vandløb	100
4.4	Perspektiver og anbefalinger for mulige fremtidige planlægningsværktøjer	106
4.4.1	Landbrug.....	106
4.4.2	Infrastruktur.....	106
4.4.3	Natur.....	107
4.4.4	Grundvand og Sekundære effekter.....	107
5.	Referencer	109
5.0	Videnskabelig litteratur	109
5.1	URLS til Tabel 4-2 - Mediedækning af tørkekonsekvenser.....	117
5.2	URLS - Tørkeovervågningsprogrammer.....	118
6.	Appendiks	119
6.0	Supplerende information til Afsnit 1.2	119
6.1	Supplerende information til Afsnit 4.2	124
6.2	Program for Soil Moisture and Drought seminar.....	125
6.3	Engelsksprogede Videnskabelig Publikation - Abstrakt – Analyse H1.....	126
6.4	Engelsksprogede Videnskabelig Publikation - Abstrakt – Validering H2	127

0. Indsatsen om Hydrologisk Tørke

0.0 Tørke-Projektets overordnede rammesætning

Historisk set har Danmark oplevet flere store tørkeevents (fx 1899, 1947, 1959, 1976, 1992, 1996, 1997). Særligt indenfor de sidste par år har Danmark oplevet flere tørkesituationer (fx sommeren 2018 og 2023), der har påvirket det hydrologiske system og ført til flere samfunds- og miljøkonsekvenser

Konsekvenser af tørke i Danmark har været omfattende udbyttetab i landbruget, øget markvandingsbehov, og sætningsskader på bygninger, der i 2022 førte til en udvidelse af Naturskaderådets erstatningsordning. Tørkeforskning og viden i en dansk kontekst er generelt begrænset og der var derfor et ønske om at udvide og undersøge viden og data relateret til tørker i Danmark. Der blev derfor igangsat tørkeprojektet *"En styrket tørkeindsats"* under Forskningsreserven 2024. Projektet er et samarbejde mellem Danmarks Meteorologisk Institut (DMI), Klimadatastyrelsen (KDS) og Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelser (GEUS). Formålet med projektet beskrives i aftaleteksten (kommissorium) således, at 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."

Tørkeprojektet består af fire overordnede spor: Meteorologisk tørke (DMI); Hydrologisk tørke (GEUS); Data og konsekvenser (KDS); og Tværgående kommunikations- opsamlings- og afrapporteringsspor. Denne rapport omhandler afrapporteringen i forbindelse med sporet Hydrologisk Tørke.

0.1 Hvad er tørke?

I de seneste år har Europa oplevet flere større tørker med store konsekvenser for samfundet, industrien og økonomien. Selvom tørke traditionelt set har været mest kendt i sydeuropæiske sammenhænge, har de sidste store tørker vist at Nordeuropa og andre lande i tempererede klimazoner også rammes. Tørker i disse områder har dog en anden udmøntning og udvikling end tørker i naturlig tørre områder som fx Spanien eller Grækenland. Beskrivelsen af tørke er dermed ikke simpel og der skal tages hensyn til hvad der er normalt for det givne område [1]. Tørker er desuden både et rummeligt og tidsligt fænomen. Tørkearbejdet besværliggøres yderligere af et væld af definitioner og tilgange i litteraturen [2] [3]. I IPCC defineres tørker som *"a period of abnormally dry weather long enough to cause a serious hydrological imbalance"* [4]. I samme stil beskrives tørker i den nye hydrologiske tørke håndbog "Hydrological Drought" [5] som en mangel på vand i forhold til hvad der er normalt eller i balance i forhold til hvad det naturlige system og samfundet har tilpasset sig til.

I denne rapport følger vi en lignende definition af tørke fra Tørkeordbogen, genereret i dette projekt. Her er definitionen fastsat til:

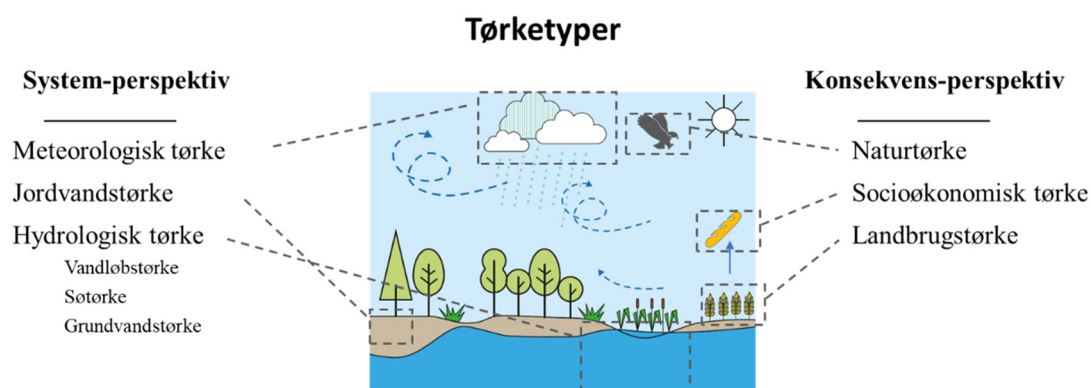
"Tørke er et midlertidigt fald i den gennemsnitlige vandtilgængelighed, f.eks. på grund af utilstrækkelig nedbør, og betragtes som et naturfænomen. Tørke kan derfor forekomme i områder med både høj og lav nedbør og i enhver sæson. Påvirkning fra tørke forværres, hvis vandressourcer i forvejen er knappe eller vandressourcen ikke forvaltes korrekt."

Det er dermed vigtigt at gøre klart at tørke her defineres som et klimastyret naturfænomen, og ikke er lig med udtørring i forbindelse med overudnyttelse af vandressourcen eller vandmangel som følge af forurening. Dette fænomen refereres i stedet ofte som vandknaphed eller generel vandmangel. Som nævnt i definitionen ovenfor kan en generel vandknaphed dog føre til en mindre robusthed overfor tørker, når de rammer. Ligeledes kan den måde, vi som samfund har indrettet os på også give mere eller mindre tørkerobusthed, for eksempel de afgrøder vi dyrker, vores vandindvinding eller den måde vandløbene reguleres på. Herudover kan u hensigtsmæssige reaktioner på tørken, her kaldet sekundære effekter, føre til en forværring af tørketilstanden, f.eks. øget vandforbrug i tørre perioder. En alternativ tørke-definition, som ikke anvendes i dette arbejde, er antropogen tørke [9]. Med den antropogene tørkedefinition udbredes tørkebegrebet til at defineres i kraft af både de naturlige, menneskeskabte og menneskelige forøgede tørker, altså både det samfundsmæssige udgangspunkt, de sekundære og naturlige effekter under samme hat.

0.1.1 Tørketyper og -perspektiver

Som nævnt i afsnittet ovenfor er der en flere generelle definitioner på hvad tørke er, desuden findes der forskellige typer af tørke og tørkeperspektiver. I litteraturen beskrives ofte tre hovedtyper indenfor tørke: Meteorologisk tørke; Jordvandstørke; og Hydrologisk tørke (*Figur 0-1*). Under disse tre typer findes desuden en række undertyper, f.eks. grundvandstørke, der er en undertype af hydrologisk tørke. Fælles for disse tre tørke kategorier er at de tager udgangspunkt i systemet, altså hvor i det naturlige system tørken opstår. Andre tørke kategorier beskrevet i litteraturen tager udgangspunkt i berørte sektorer [6–8], og krydser dermed grænsen til konsekvenssiden af tørker. Landbrugstørke (*agricultural drought*) bruges nogle steder som et direkte synonym for jordvandstørke, men i dette dokument bruger vi begrebet jordvandstørke da det dækker jordzonen generelt, ikke kun landbrugsarealer, men også f.eks. naturlige økosystemer, efter anbefalinger fra [9]. Landbrugstørke er derfor i dette dokument hørende til konsekvens-perspektiv kategorierne, hvortil også hører naturtørke og socioøkonomisk tørke.

Disse forskelle i definitioner illustrerer godt de forskellige perspektiver i tilgangen til tørke, er tørke en anomali eller er det først en tørke, når den registres i samfundet og fører til konsekvenser? Fordelen ved de konsekvens-perspektiv orienterede tørke definitioner er at de er relaterbare for det brede samfund til gengæld er de i høj grad subjektive og underlagt stor usikkerhed i forhold til registrering, indberetning og afværgeforanstaltninger. Systemtilgangen, baseret på anomalier, er mere objektiv, til gengæld der en risiko for, at tørkebeskrivelsen kan fjerne sig fra den samfundsmæssige opfattelse af tørke.



Figur 0-1 Forskellige terminologier benyttet i litteraturen omkring tørke

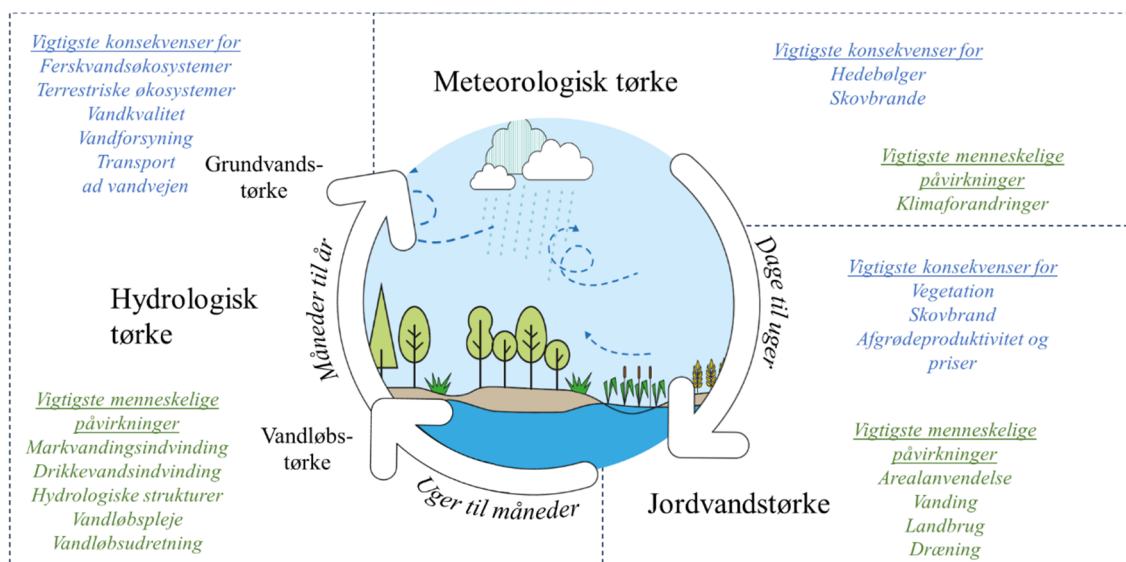
I tørkeprojektet og i denne rapport arbejdes, der med tørke ud fra system-perspektivet. Under Hydrologisk tørke, som denne rapport primært arbejder med, behandles Vandløbstørke og Grundvandstørke. Analyser relateret til Jordvandstørke er også dækket i denne rapport på grund af den tætte kobling mellem jorden og resten af det hydrologiske system.

Den meteorologiske tørke undersøges som regel ved brug af meteorologiske data som nedbørsdata eventuelt kombineret med fordamningsestimater. Jordvandstørke evalueres normalt ved hjælp af tidsserier af jordfugtighed (vandindhold i de øverste jordlag). Mens grundvandsstanden og afstrømningen i vandløb bruges til at evaluere grundvands- og vandløbstørke. For både jordvand, grundvandsstand og vandføring analyseres både målte og modelberegne tidsserier.

0.1.2 Jordvandstørke og Hydrologisk tørke

Tørker igangsættes typisk af et nedbørsunderskud, men kan også drives/forstærkes af høj temperatur/fordampning, vind, og indstråling. For jordvandstørke og hydrologisk tørke er det særligt nedbør og øget fordamning der anses for at være de vigtigste drivkræfter [4]. Et tørkeevent starter altså oftest som en meteorologisk tørke (typisk mangel på nedbør), vandunderskuddet manifesterer sig herefter normalt først i de øverste jordlag, som en jordvandstørke og efterfølgende forplanter tørken sig ned gennem det hydrologiske system til overfladevand og det øvre grundvand. Det dybere grundvand reagerer langsomt. Denne udvikling er illustreret på *Figur 0-2*.

Hydrologisk tørke udvikler sig således "langsomt" (over flere dage/uger/måneder), og kan med tiden dække flere eller alle komponenter af vandets kredsløb, den tidlige faktor er således vigtig. Undervejs vil tørken udmønte sig i forskellige miljømæssige og socioøkonomiske konsekvenser (se også afsnit 4.2.1). Komponenterne i vandets kredsløb er forbundne, responset til en tørkesituation kan derfor være afhængigt af tilstanden i andre dele af system, for eksempel kan en meget høj terrænnær grundvandsstand før tørkens begyndelse virke som en buffer under vandløbstørke, pga. de vandmængder der er opbevaret i systemet [10]. Det lange responstid for særligt det dybe grundvand betyder også at mindre og kortere tørker ofte ikke når at manifestere sig i de dybere magasiner [11].



Figur 0-2 Illustration af tørkens udvikling over tid med de vigtigste konsekvensberørte-områder og menneskelige påvirkninger. Informationen baseret på [12], [11]

Figur 0-2 indeholder også information om de vigtigste menneskelige handlinger, der påvirker det samfundsmæssige udgangspunkt eller tilstand i relation til tørker. Den måde mennesket forvalter naturen på, har nemlig også betydning for tørkens udmøntning [12], [11]. Det er alt fra menneskeskabte klimaforandringer på vejret, der direkte påvirker hvor tit og i hvilken grad, der opstår meteorologiske tørker; til den måde vi dyrker, dræner og vander vores åbne natur og landbrugsarealer, der påvirker hvordan jorden udtørres under en jordtørke. Og den udnyttelse af grundvandsressourcen i form af pumpning til vanding og drikkevand; samt vandløbsforvaltningen, grødeskæring, udretning, uddybning, og hydrologiske strukturer (bygningsværker i å-løbet som for eksempel dæmninger eller sluser). De vigtigste tørkekonsekvenser for de forskellige tørketyper er også illustreret i figuren.

I Danmark er der en række hydrologiske forhold, der er vigtige for tørkeindsatsen. For det første er der en høj grad af interaktion mellem overfladevand (åer/søer) og grundvand, det betyder at tørkeresponset i den ene sandsynligvis er stærkt korreleret til den anden. Derudover vedligeholder grundvandstilstrømning om sommeren minimumsafstrømning i åerne, grundvandet kan derfor potentielt fungere med en buffer-effekt i forhold til udtørring i vandløbene.

For grundvandsressourcen er vinternedbøren desuden afgørende for grundvandsdannelsen (genopfyldningen af grundvandsmagasinerne), hvorimod meget begrænset nedsivning sker i sommermånedene. Derfor er tørkepåvirkningen af grundvandsmagasinerne særlig høj hvis nedbørsunderskuddet rammer om vinteren. Ydermere er der store geologiske variationer i jordtyper og dybereliggende geologi i Danmark, buffereffekter, forsinkelser og tørkeresponser må dermed forventes at være forskellig på tvær af landet. Det er derfor nødvendigt at undersøge jordvandstørke og hydrologisk tørke på en integreret og regionaliseret måde, således, at interaktionen mellem de hydrologiske elementer belyses og de regionale forskelle kan identificeres. Disse ovenstående forhold og potentielle indvirkninger undersøges i denne rapport.

I forhold til det samfundsmæssige udgangspunkt, er det også relevant at nævne, at Danmark allerede har en ulige fordeling i vandbehov og ressource [13]. Det skyldes en nedbørsgradient fra vest til øst, hvor der falder betydelig mere nedbør i vest end i øst. Koblet med et højt vandbehov i øst pga. befolkningstætheden omkring hovedstadsområdet.

0.2 Rapportens opbygning og indhold

Rapporten er inddelt i fire faglige hovedkapitler, der dækker de fire indsætter under sporet Hydrologisk tørke (H1-H4), der er en del af Tørkeprojektet 2024.

1. Indsats H1: Analyser af hydrologisk tørke
2. Indsats H2: Validering af modelsimuleringer for tørke
3. Indsats H3: Nye datamuligheder til overvågning og monitorering af tørke
4. Indsats H4: Værktøjer til planlægning og link mellem modelsimuleringer (eller måledata) og konsekvenser af tørke

Den første indsats "Analyser af hydrologisk tørke" dækker over to opgaver. Først en overordnede opgave om afsøgning af relevant videnskabelig litteratur, rapporter og hjemmesider, med henblik på at danne et overblik over terminologier, tørkeindekser og europæiske tørkeovervågning (afsnit 1.1). Denne information danner baggrund for flere af de følgende indsætter og tilgange. Dernæst arbejdes der med analyser af de sidste 30 års tørkeevents (afsnit 1.2) i Danmark for jordvandstørke, vandløbstørke og grundvandstørke med udgangspunkt i hydrologiske indekser udregnet ud fra simuleringer med Den Nationale Hydrologiske Model (DK-modellen).

I indsatsen "Validering af modelsimuleringer for tørke" arbejdes der med at undersøge, hvor gode de hydrologiske modeller er til at simulere tørke, og hvordan de kan forbedres. Det indebærer først at etablere et kvalitetssikret måledatasæt (afsnit 2.1), der kan bruges til at sammenligne modelsimuleringerne med, dette datasæt skal være målinger der er primært klimastyret, og af en vis længde og kvalitet. Dernæst at lave forskellige analyser og evaluere den hydrologiske models evne til at reproducere tørker i de forskellige dele af det hydrologiske system (afsnit 2.2).

Under indsatsen "Nye datamuligheder til overvågning og monitorering af tørke" undersøges hvilke muligheder der er i at udnytte eksisterende datasæt og modeller til at overvåge og monitorer tørke. Her fokuseres både på modeldata i realtid og som prognoseværktøj (afsnit 3.1), samt realtidsmonitoring og satellitdata (afsnit 3.2).

Indsatsen "Værktøjer til planlægning og link mellem modelsimuleringer (eller måledata) og konsekvenser af tørke" fokusere på om det er muligt at korrelere model/observationsdata til faktiske konsekvenser i samfundet. Det vil altså sige at linke specifikke tørkeanomalier til tørkekonsekvensdata. I denne indsats etableres der første et framework, der beskriver arbejdsstrinene fra at identificere muligt tørkekonsekvensdata til muligheder for at etablere et link/korrelation til anomalier (afsnit 4.1). Dernæst bruges frameworket til at forsøge at lave en korrelation for udvalgte temaer (afsnit 4.2). Kapitlet indeholder også et kort afsnit om sekundære effekter i form af en evaluering af vandindvinding og drikkevandsforbruget under

tørker i Danmark (afsnit 4.3) I kapitel 4 skal det nævnes, at afsnit 4.3.2 og 4.4.4 også indgår i synopserapporten "*Tørkes betydning for kvælstofudledning, vandføring og biologi i vandløb*". Der er en videnskabelig rapport af DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi [14] bestilt er under sporet "Konsekvenser" ledet af KDS. I DCE synopserapporten er også et kort oprids af relevante resultater fra denne temarapport, nogle figurer vil derfor være at finde begge steder.

Hver af de fire kapitler slutter af med et afsnit om perspektiver og anbefalinger i forhold til det videre arbejde eller tørkeindsatsen i Danmark generelt (se afsnit 1.3, 2.3, 0, 4.4). Rapporten afsluttes med et opsamlende kapitel på tværs af de fire faglige kapitler. Tilhørende rapporten er desuden følgende appendikser:

6.0 Supplerende information til Afsnit 1.2

6.1 Supplerende information til Afsnit 4.2

6.2 Program for Soil Moisture and Drought seminar

6.3 Engelsksprogede Videnskabelig Publikation - Abstrakt – Analyse H1

6.4 Appendiks: Engelsksprogede Videnskabelig Publikation - Abstrakt – Validering H2

0.3 Udmøntning og Formidling

Projektet har gennem sit forløb udmøntet sig i analyserne beskrevet i rapporten her, samt bidraget til at øge viden om hydrologiske tørke i og udenfor projektgruppen. Under projektperioden arbejder projektdeltagere på at udforme to videnskabelige engelsksprogede artikler til publikation i internationale tidsskrifter:

- Schneider et al. 2025. Abstrakt ses i 6.3
- Seidenfaden et al. 2025. Abstrakt ses i 6.4

Derudover er der bidraget til to internationale artikler [15], [16] med tørkerelaterende perspektiver og indhold:

- Quevauviller, P., Hinsby, K., Karlsson Seidenfaden, I., Pulido Velázquez, D., Sapi-ano, M., Coelho, R., Gattinesi, P., Hohenblum, P., Jirovsky, V., Marinheiro, F., Simas, L., Teixeira, R., Ugarelli, R., Cardarilli, M., Paraskevopoulos, S., Vrachimis, S., M, F.: Review: Urban Water Security and Safety. *Acque Sotter. - Ital. J. Groundw.* 13, (2024). <https://doi.org/https://doi.org/10.7343/as-2024-803>
- Jørgensen, L.F., Trolborg, L., Ondracek, M., Seidenfaden, I.K., Kidmose, J., Vangsgaard, C. and Hinsby, K.: Groundwater resilience, security, and safety in the four largest cities in Denmark. *Acque Sotter. - Ital. J. Groundw.* 13, (2024). <https://doi.org/10.7343/as-2024-803>.(<https://www.acquesotteranee.net/acque/issue/view/59>)

I løbet af projektet er der arrangeret og faciliteret et åbent seminar om jordtørke og jordfugtighed:

- "Drought and Soil Moisture Seminar" på GEUS, d. 8/11- 2024. 65 deltagere. Programmet for dagen kan ses i 6.2.

Projektet er yderligere dissemineret gennem oplæg på nationale konferencer:

- *Tørke i Danmark – monitorering, konsekvenser og tilpasning*. Wagner-Eckert, C. (Taler), Holmgaard, T. (Taler), Seidenfaden, I.K. (Taler). Kortdage. 14. november 2024. 750 deltagere. <https://pub.geus.dk/da/publications/t%C3%B8rke-i-danmark-monitorering-konsekvenser-og-tilpasning>
- *For meget vand og for lidt vand – intensivering af det hydrologiske kredsløb*. Stisen, S (Indbudt taler), Schneider, R. J. (Medforfatter), Seidenfaden, I. K. (Medforfatter). Hydrologidagen, Odense, 5 nov. 2024. 150 deltagere. <https://pub.geus.dk/da/activities/for-meget-vand-og-for-lidt-vand-intensivering-af-det-hydrologiske>
- *Tørke og Grundvandsstand: Sammenhængen mellem tørke og grundvandsniveauer samt fremtidens vandforvaltning*. Torben Sonnenborg (Taler), Ida. K Seidenfaden (Taler), Schneider, R. J. (Medforfatter), Stisen, S. (Medforfatter). DNNK Webinar. 21. november 2024. 68 deltagere. <https://pub.geus.dk/da/activities/t%C3%B8rke-og-grundvandsstand-sammenh%C3%A6ngen-mellem-t%C3%B8rke-og-grundvandsn>
- *Hydrological (drought) indices and the National Hydrological Model*. Schneider, R. J. M. (Indbudt taler), Andreasen, M. (Medforfatter), Hansen, M. F. T. (Medforfatter), Henriksen, H. J. (Medforfatter), Højberg, A. L. (Medforfatter), Koch, J. (Medforfatter), Nilsson, B. (Medforfatter), Seidenfaden, I. K. (Medforfatter) & Stisen, S. (Medforfatter). Drought and Soil Moisture Seminar, København, 8 nov. 2024. 65 deltagere. <https://pub.geus.dk/da/activities/hydrological-drought-indices-and-the-national-hydrological-model>

1. Indsats H1: Analyser af hydrologisk tørke

1.0 Indledning

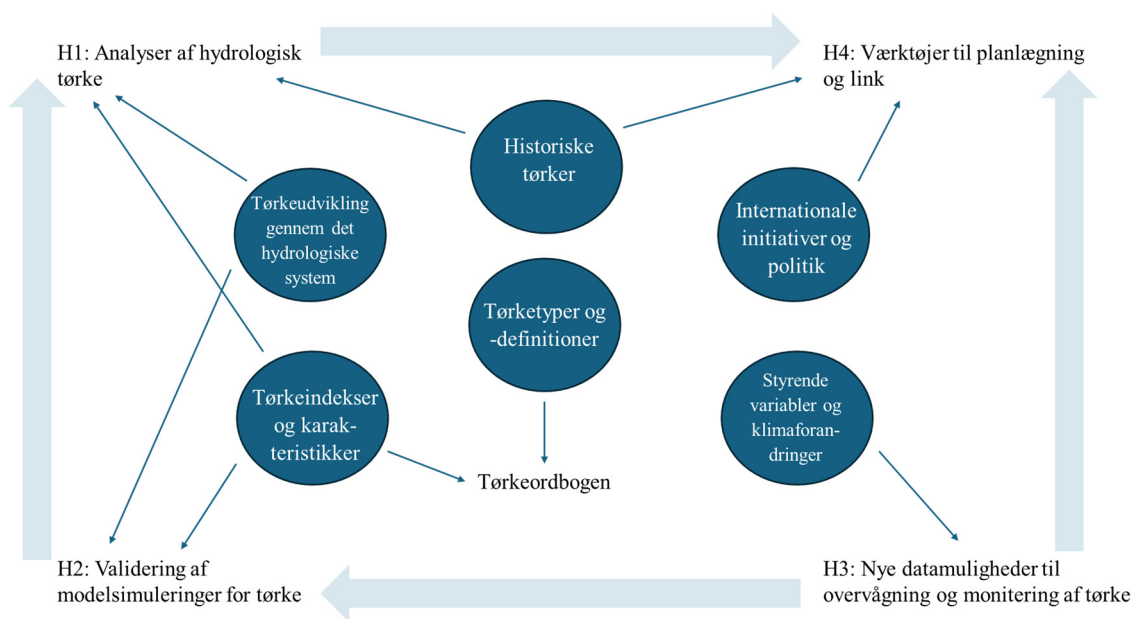
I dette kapitel opsummeres den relevante litteratur, der er gennemgået i forbindelse med projektet og det illustreres hvordan litteraturstudiet har givet information til projektets andre indsatser og tilgange. Kapitel indeholder også en opsummerende oversigt over arbejdet med at analysere de historiske tørker i Danmark for de sidste 34 år. Hvordan disse tørker er forskellige eller ens, samt hvordan tørkens egenskaber varierer hen over det danske område.

1.1 Opsummering af litteratur-gennemgang

I arbejdet med litteraturen om hydrologiske tørke er der undersøgt 85 internationale artikler, 16 rapporter og 2 bøger. Litteraturen dækker bredt flere overordnede temaer for hydrologisk tørke deriblandt:

1. Tørketyper og tørkedefinitioner
2. Tørkeudvikling gennem det hydrologiske system
3. Tørkeindekser og tørkekarakteristikker
4. Historiske tørker
5. Bagvedliggende styrende variabler og klimaforandringer
6. Internationale initiativer og politik

Litteraturstudiet af disse seks emner bidrager hver især til flere dele af arbejdet i denne rapport og i tørkeprojektet som helhed. Hvoraf de første tre alle beskæftiger sig med at beskrive tørkens væsen eller fænomenet tørke, dækker de følgende to historiske erfaringer og nuværende initiativer, mens den sidste er mere fremadskuende. I *Figur 1-1* ses en skematisk oversigt, der viser hvor de forskellige emner i litteraturgennemgangen bidrager i tørkeprojektet.



Figur 1-1 Oversigt over litteraturemner og hvordan de bidrager til projektets dele

For denne rapport indgår informationen indhentet fra litteraturen angående fænomenet tørke (punkt 1, 2 og 3) særligt i afsnit 0.1, 1.2 og 2.2. Informationer indhentet under punkt 4, 5, og 6 indgår i afsnittene 4.2, og 2.2, samt europæisk lovgivning i afsnit 4.2.1 og monitoringsprogrammer i 1.2.1. Derudover er litteratur-gennemgangen også fundamentet for artiklerne i Appendix 6.3 og 6.4, samt den fælles Tørkeordbog under Indsatsen "Kommunikation og samarbejde" ledet af DMI.

1.2 Historisk analyse af 34 års tørkekarakteristikker og -forekomster i Danmark

Formålet med den historiske analyse er at opnå en bedre forståelse af hvor og hvornår en tørkesituation opstår, udbredes, herunder undersøgelse af koblingen og udviklingen af tørker fra en meteorologisk anomali ned gennem det hydrologiske system. En øget viden om tørkens væsen er et vigtigt bidrag til bedre design af et fremtidigt monitoringsystem, og udviklingen af prognoser under arbejdet med hydrologiske tørke.

Den samlede analyse af de historiske tørkekarakteristikker er under udarbejdelse som en videnskabelig artikel (se app. 6.3 og 6.40). I dette kapitel præsenteres eksempler på de overordnede tørkeeventanalyser på landsplan, samt fremgangsmåden, der er valgt for de hydrologiske indekser og beskrivelsen af tørken (karakteristikker). Sammenhængen mellem tørkeanomalier, og tørker registreret i samfundet (faktiske tørkekonsekvenser) behandles i afsnit 4.2.

Historiske analyser af tørke kan som udgangspunkt foretages på både observationsdata og modelsimuleringer. Men da der arbejdes med events som forekommer med skiftende frekvens og styrke er lange kontinuerte observationstidsserier nødvendige (se sektion 2.1). Derudover er det centralt, at så mange dele af det hydrologiske system beskrives som muligt, og her er observationsdatasættene ofte begrænset, særlig i forhold til jordtørke (se sektion 2.1.1). I dette afsnit er der derfor fokuseret på hydrologiske variabler fra 34 års modelsimuleringer til den historiske analyse. Tørke i Danmark kvantificeres ved hjælp af Den National Hydrologiske Model (DK-modellen, se sektion 2.2.2).

1.2.1 Litteraturens tørkeindekser og tørkekarakteristikker

I litteraturen findes et stort antal indikatorer eller indekser, der bruges til at kvantificere og vurdere tørke. Review artikler og rapporter anslår af flere 100 indikatorer og indekser er til rådighed, hver med forskellige antagelser og tilgange [17].

De mest benyttede indekser er bygget på en variabel med enten en tærskel (*threshold*) eller standardiseringstilgang [18]. Ved tærskeltilgangen, defineres tørke ud fra en lokationsspecifik tærskelværdi for hvad der er "normalt" (fx de laveste 20 % af en afstrømningstidsserie) eller er standardiseret, hvor tørke defineret i forhold til afvigelsen fra den statistiske normal (fx afvigelsen i forhold til standardafvigelsen).

Flere nyere indekser er meget kompliceret og kan bygge på flere variabler (fx nedbør, fordampning og afstrømning) eller datatyper (observationer, modelresultater eller *remote sensing*). Flere forsøg er også blevet gjort på at kategorisere disse typer af indekser for eksempel som gjort i WHO's *Handbook of Drought Indicators and Indices* [19], der inddeler i grupperne meteorologisk, jordvand, hydrologi, *remote sensing* og komposit/modelleret.

Eksempler på nogle af de mest benyttede indekser i litteraturen kan ses i *Tabel 1-1*, baseret på information fra [1] [18] [20] [21]. I denne rapport er indekserne kategoriseret som enten standardiseret eller tærskelbaseret, kombineret eller modelleret efter tilgangen beskrevet i [20].

Tabel 1-1 Oversigt over nogle af de mest brugte tørkeindekser

Tørke-type	Forkortelse	Navn	Reference	Tærskel	Standardiseret	Kombineret	Modelleret	Antal EU-lande
Meteorologisk tørke	SPI	Standard Precipitation Index	[22]		X			11
	SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index	[23]		X		X	8
	PDSI	Palmer Drought Severity Index	[24]				X	4
	SMRI	Standardised Snow Melt and Rain Index	[25]		X			
Jordvandstørke	SMI	soil moisture index	[26]	X			X	2
	SMDI	soil moisture Deficit index	[27]		X			1
	SSWI	Standardized Soil Wetness Index	[28]		X			
	CMI	Crop Moisture index	[29]				X	
	DTX	Agricultural Drought Index	[30]				X	
	SSMI	Standardised Soil Moisture Index	[31]		X			
	CDI	Combined Drought Indicator	[32, 33]			X	X	
	ESSMI	Empirical Standardised Soil Moisture Index	[34]					
Vandløbstørke	SSI	Standardized streamflow indices	[35]	X	X			1
	SDI	Stream flow Deficit Index	[36]					1
	SFI	Standardized Flow Index	[37, 38]		X			
	SRI	Standardised Runoff Index	[39]		X			1
Grundvandstørke	SGI/SGDI	Standardized Groundwater Index	[40], [41]		X			3
	GRI	Groundwater Ressource Index	[42]				X	
	WBDI	Water balance Derived Drought Index	[43, 44]			X	X	
	GRDI	Groundwater Recharge Deficit Index	[45]					
	SWI	Standardized Water-level Index	[41]		X			
Andre	USDM	US Drought Monitor	[46]			X		
	NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	-				X	
	Deficits	Direkte afvigelser fra et periode-gennemsnit eller <i>threshold</i>	-	X				7
	Lokalt	Lokalt udviklede indeks	-	-	-	-	-	5

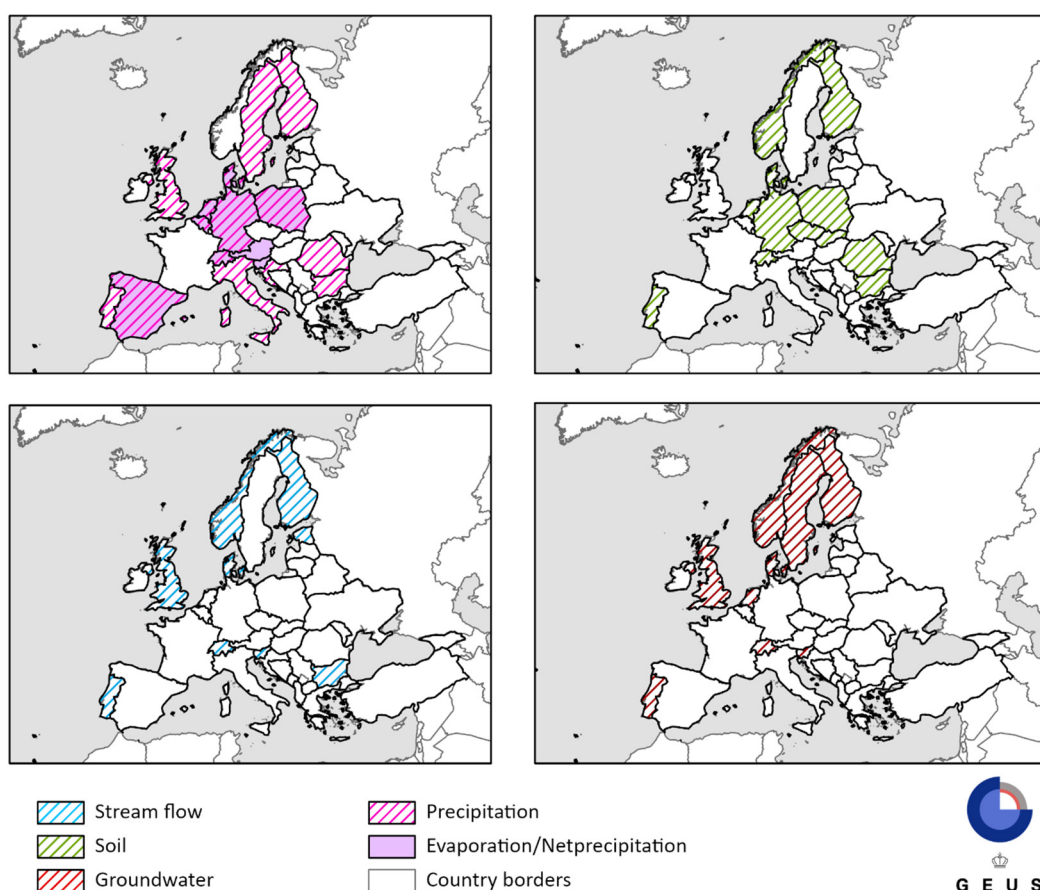
1.2.1.1 Europæiske monitoringsprogrammer

Ud fra besøg på websites for førende meteorologiske, geologiske og agronomiske institutioner og statsmyndigheder for europæiske lande er 27 tørkemoniteringsprogrammer i Europa blevet identificeret (Tabel 5-1). For nogle lande er der mere end en institution, der tilbyder et tørkerelateret produkt. Derudover er to Europæiske produkter evalueret, nemlig *European*

Drought Observatory (EDO) og *Copernicus CCS*. Undersøgelsen har været besværliggjort af at materialet ofte kun er tilgængeligt på lokalsprog, så informationen er indsamlet så vidt muligt, og kan være underlagt usikkerheder. For hvert af monitoringsprogrammer er følgende gennemgået:

1. Undersøgte variabler (f.eks. nedbør, afstrømning, grundvand, jordvand)
2. Datagrundlag (observationer, modeller, satellitdata)
3. Tidsperspektiv (vejr- eller sæsonprognoser, realtid)
4. Tørkeindekstyper (standardiseret indekser, deficits eller andre)
5. Inddragelse af borger/aktører (*Citizen science*)

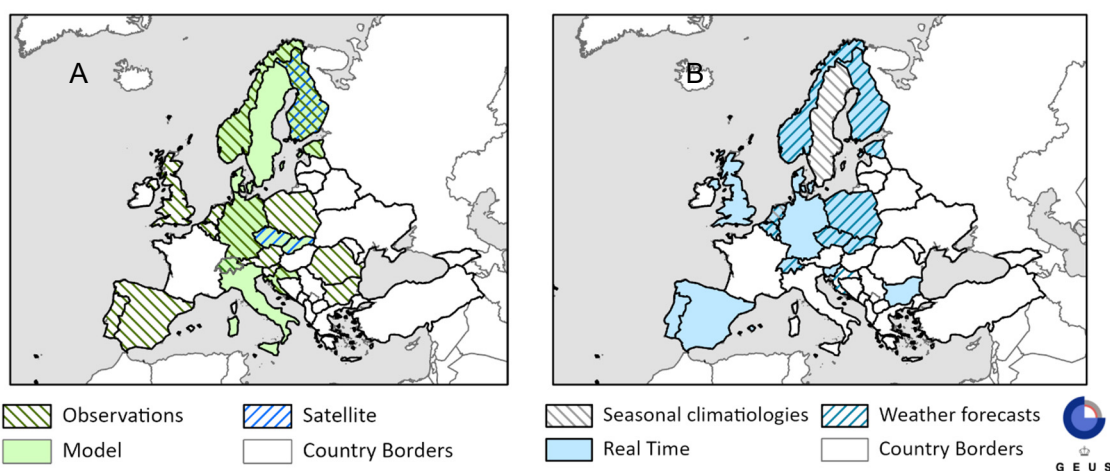
I Tabel 1-1 er der yderste til højre angivet hvor mange lande i Europa, der har tørkemonitoringsprogrammer som bygger på indekser. I flere lande findes der desuden udregnede tørkeindekser for historiske periode, som fx for Frankrig¹. Men da disse produkter ikke er opdateret til nær nutid eller realtid og derfor ikke kan indgå som en monitoringstjeneste, er de ikke inkluderet i denne sammenhæng. Fra denne kolonne ses det at det mest benyttede indeks er SPI, efterfulgt af SPEI og en ikke-indeksbaseret tilgang, hvor afvigelserne i en målt eller simuleret variable direkte sammenlignes med et periodegennemsnit (altså uden nogen standardisering).



Figur 1-2 Europakort over undersøgte variabler i Europæiske landes tørkemonitering

¹ <https://appgeodb.nancy.inra.fr/biljou/en/carte>

På *Figur 1-2* ses de forskellige landes valg af variabler i deres tørkemonitering. Den mest brugte variable er nedbør, efterfulgt af information om jorden, mens afstrømning og grundvandsdelen er mindre dækket. Der er generelt et særligt fokus på tørker i forbindelse med landbrug/vegetation i form af jordvandsindhold, og vegetation. Mange steder er denne tørkeovervågning også koblet sammen med brandfare (f.eks. i det svenske og tjekkiske overvågningsprogram), brandfare er dog ikke dækket i denne rapport, da det hører under meteorologisk tørke. I forhold til grundvandet er det særligt det nordlige Europa, der har implementeret tørkeovervågning. Der er flere eksempler på at overvågningen for grundvand og vandløb, dækker begge ekstremer, altså både illustrerede de meget våde og tørre events, som f.eks. den hollandske *droogteportaal*. Kun et eksempel på *Citizen science* er blevet fundet nemlig i det norske *SeNorge*, hvor man med appen *Varsom Regobs* kan følge og uploade information om tørke, sneskred, oversvømmelser og sne.



Figur 1-3 Europakort over hvilken slags data, der bliver brugt i de Europæiske landes tørkemonitering (A), samt hvorvidt der laves realtid eller prognoser (B).

De forskellige tørkeovervågningsprogrammer i Europe bygger på mange forskellige slags data, både observationer, modeller og satellit produkter indgår. I *Figur 1-3A* ses en oversigt over de mest brugte datatyper, bemærk at i nogle lande indgår mere end en datatype, det kan dække over forskellige indekser eller indekser der kombinerer datatyper som beskrevet i overstående afsnit. Det hyppigst forekommende data, der benyttes, er observationsdata, ofte processeret, tolket og vist i realtid, som f.eks. i Portugal, Spanien og England (*Figur 1-3B*). Mens satellitdata generelt kun indgår i mindre grad.

1.2.1.2 Tørkekarakteristikker

Da tørke er et begivenheds- eller event-baseret fænomen med en start og stop dato, kan tørkeeventet også defineres ved en lang række beskrivende karakteristikker. Karakteristikkerne omhandler både tidlige lokalisering (dato-specifikke), tidlige udvikling (tidsrelateret), og deres styrke eller kategori. En oversigt over de mest almindelig brugte karakteristikker kan ses i *Tabel 1-2*. Mere information om tørkekarakteristikker kan findes i [11, 47, 48].

Tabel 1-2 Oversigt over brugte tørkekarakteristikker i analysen. De engelske termer er angivet til højre.

Tørkekarakteristikker			Forklaring	Engelsk term
Event relaterede information	Dato-specifikke	Tørkestart	Dato hvor tørke begynder (falder under tærskelværdien)	<i>Start time of drought</i>
		Tørkeslut	Dato hvor tørke slutter (kommer over tærskelværdien)	<i>End time of drought or termination date</i>
		Makstid	Dato hvor tørkeindekset er på sit laveste	<i>Maximum/peak drought</i>
	Tidsrelateret	Udviklingsperiode	Tiden mellem tørkestart og tørkens makstid	<i>Drought development</i>
		Genopretningsperiode	Tiden mellem tørkens makstid og tørkeslut. Her kan også udregnes en genopretningsrate f.eks. genopretning i indeksværdi over tid.	<i>Recovery period/drought recovery</i>
		Varighed	Den mængde tid, hvor systemet er i tørketilstand.	<i>Duration</i>
	Styrke og udbredelse	Maks indeks	Tørkeindeksets laveste værdi (på tørkens makstid)	<i>Peak intensity</i>
		Alvorlighed	Alvorligheden beskriver den akkumuleret mængde vand, der er i underskud mens tørken foregår. I tilfældet med standardiserede indekser er der således et mål for arealet mellem indeks-kurven og tærskelværdien.	<i>Severity. Også kaldet accumulation deficit eller cumulative deficit volume.</i>
		Intensitet	Intensiteten er det gennemsnitlige underskud af vand under tørkeperioden. Det er således givet som: Alvorlighed /længde	<i>Intensity</i>
		Rumlig udbredelse	Tørkens udbredelse hen over landet f.eks. udregnet som antal grid-celler eller km ² under tørke	<i>spatial extent</i>
På tværs af tørketyper		Responstid	Den mængde tid det tager for en tørke at udbrede sig fra en del af systems (fx nedbør) til en anden (fx grundvand).	<i>Propagation/Response time</i>
		Tørkekorrelation	Korrelationen mellem tørker i forskellige dele af systemet	<i>Drought Correlation</i>

1.2.2 Fremgangsmåde

I denne undersøgelse har vi valgt at bruge standardiserede tørkeindekser. Det betyder, at indekserne er normaliseret i forhold til egen statistik. Således er hvert tidsskridt i dataserien sammenlignet med den normale situation for samme tid på året fra referenceperioden (30 år). Fordelen ved de standardiserede indekser er at de kan sammenlignes på tværs af forskellige klima og nedbørsmønstre, da de ikke forholder sig til en fast absolut værdi (fx de laveste 10% af afstrømningen), men i stedet sin egen *normal*.

Her har vi valgt at bruge *Soil Moisture Deficit Index* (SMDI) til jordtørke, *Streamflow Deficit Index* (SDI) til vandløbstørke og *Standardized Groundwater Deficit Index* (SGDI, SGDI'd for 'dyb') til grundvandstørke. Fordi indekserne er standardiseret, kan en given indeks-værdi kobles til en tærskelværdi for en tørkekategori, f.eks. er en SDI indekxsværdi under -2 kategoriseret som en ekstrem tør situation. Tærskelværdierne for de forskellige indekser kan ses i *Tabel 1-3*. Indekserne bygger på data fra Dk-modellen. Modellen køres fra 1990 til 2023, og hydrologiske indeks udregnes med referenceperioden 1991-2020. For at undersøge koblingen til nedbørsdeficit bruges også SPI og SPEI (se afsnit 3).

Tabel 1-3 Tærskelværdier for de forskellige indeks

Tørke-type	Forkortelse	Tidslig opløsning	Tør	Meget tør	Ekstrem tør
Jord	SMDI	Uge	-1 til -2	-2 til -3	<-3
Vandløb	SDI	Uge	-1 til -1,5	-1,5 til -2	<-2
Grundvand	SGDI	Uge			
	SGDI'd	Måned			

Formlen for de valgte indekser er givet neden for. Her betegner i året mens j er ugenummeret:

JORDVANDSINDEKS

hvis $SW_{i,j} \leq MSW_j$

$$SD_{i,j} = \left(\frac{SW_{i,j} - MSW_j}{MSW_j - \min SW_j} \right) * 100$$

hvis $SW_{i,j} > MSW_j$

$$SD_{i,j} = \left(\frac{SW_{i,j} - MSW_j}{\max SW_j - MSW_j} \right) * 100$$

$$SMDI_{i,j} = \frac{1}{2} SMDI_{j-1} + \frac{SD_j}{50}$$

Hvor SD er jordvandsdeficitet (*Soil Moisture Deficit*) givet i %, og SW er jordvand, der er til rådighed (*Available soil water*).

VANDLØBS-INDEKS

$$Y_{i,j} = \ln(Q_{i,j})$$

$$SDI = \frac{Y_{i,j} - \bar{Y}_j}{std_{Y,j}}$$

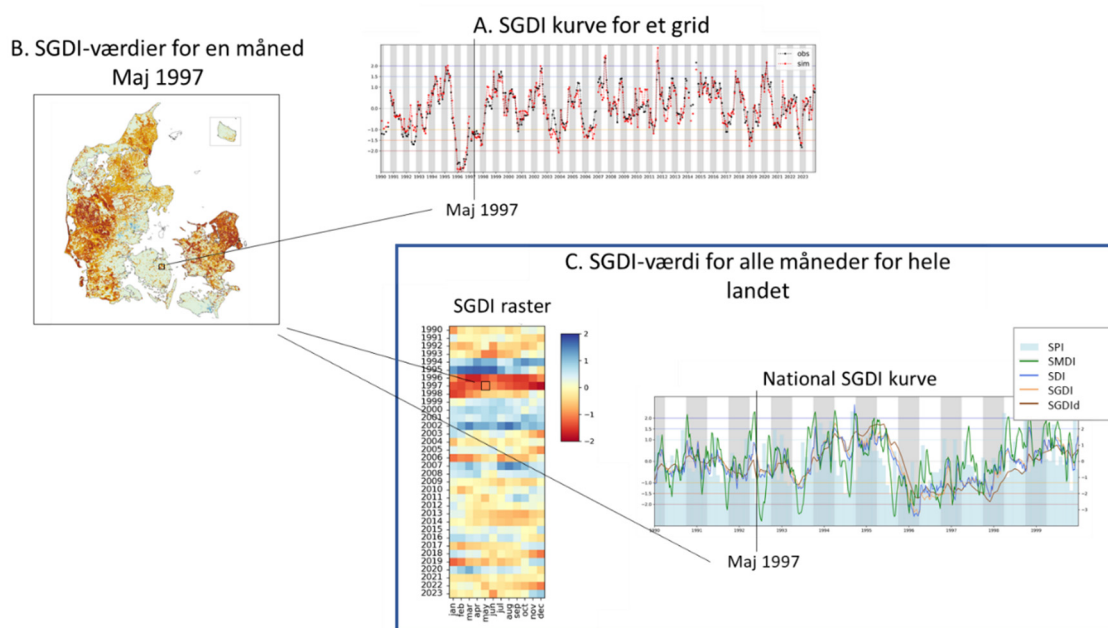
Hvor Q er afstrømningen, og Y er den log-transformede afstrømning.

GRUNDVANDS-INDEKS

$$SGDI_{i,j} = \frac{D_{i,j} - \bar{D}_j}{std_{D,j}}$$

Her er D enten dybde til grundvandsspejlet (for det terrænnære indeks) eller trykniveauet i grundvandsmagasinet (det dybe grundvandsindeks). Bemærk at SGDId (SGDI dyb) beregnes på månedsbasis, her vil j således være måned og i året.

Indekserne udregnes for hvert gridcelle i DK-modellen, men kan også aggregeres på national basis og visualiseres. Disse visualiseringer kan produceres for alle tørkeindekserne.



Figur 1-4 Illustration af visualiseringen af tørkeindekserne

I Figur 1-4 vises de visualiseringer, der er brugt i denne rapport. I første skridt udregnes indekset for hver gridcelle i DK-modellen (A). For alle tidsskridt kan der derefter genereres et landsdækkende kort (B) med indeksværdierne for de enkelte gridceller (A). Disse kort kan aggregeres på nationalt niveau (C) til enten i) raster-baseret visualiseringer, hvor hvert enkelt raster-celle er aggregeringen af kortet fra B eller ii) til en landsdækkende kurve, hvor et punkt på kurven er aggregeringen på landsplan af kortet fra B.

De identificerede tørker analyseres derudover for forskellige karakteristikker, i forhold til:

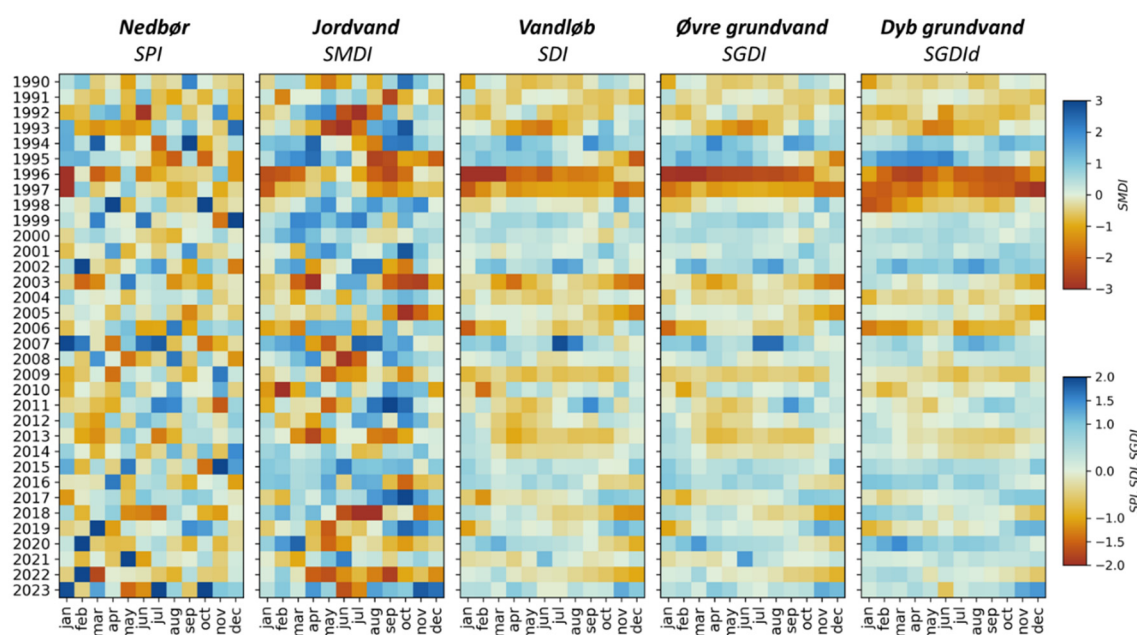
- Tørkens kategori og styrke
- Varighed og udbredelse i rum og tid (jordtyper og geologi)
- Genopretning, hvordan kvantificeres systemets evne til at returnere til en normal tilstand efter tørke
- Koblinger mellem events og hydrologiske processer

En beskrivelse af disse, og deres engelske term, ses i Tabel 1-2.

1.2.3 Nationale hydrologiske tørkeanomali i Danmark

På tværs af hele Danmark er der udregnet et nationalt tørkeindeks for de forskellige dele af det hydrologiske system, og illustreres her ved hjælp af *Figur 1-5*. Fra raster figuren ses de forskellige systemreaktioner. Nedbøren er generelt meget svingende med begrænset sammenhæng fra en måneds nedbør til den næste måneds. De tørre perioder i jorden er lidt mere sammenhængende, men typisk korte. Mens der er længere sammenhængende perioder at se i vandløbene, og især i grundvandet. Her står særligt perioden i 1996 og 1997 frem.

Statistikken for alle events for de forskellige tørketyper kan ses i *Tabel 1-4*, mens alle eventenes kan ses i appendiks 6.0, i det efterfølgende afsnit vil tørkeevent blive refereret til med parentes efterfulgt af en nummeringen, der henviser til den pågældende tørke, hvis der ønskes at genfinde denne i tabellerne i appendikset, N for nedbør, J for jordvandstørke, V for vandløbstørke, GT for terrænnær grundvandstørke og GD for dybere grundvandstørke.



Figur 1-5 Raster plot af tidsserierne for de nationale hydrologiske indeks over de sidste +30år.

Resultaterne af de nationale SPI-tørkeindekser fra 1990-2023 viser at der for nedbør har været 36 tørkeperioder, heraf falder 1 under kategorien ekstremt tørt, 7 i kategorien meget tørt og 28 i kategorien tørt. I *Tabel 6-5* i appendikset kan disse events og deres tilhørende karakteristikk ses. I gennemsnit varer disse nedbørstørker 1,4 måneder, med et gennemsnitlig maks. indeks på en SPI -1,3. Den ekstreme tørke, forekom i vinteren i 1996/97 (december og januar), og har den største alvorlighed og maks. indeks. Mens den længste tørke var i foråret/sommeren 2018, der varede tre måneder (maj til juli). Den tørke med den højeste intensitet fandt sted i juni 1992. Derudover er der nogle år hvor flere tørker har efterfulgt hinanden fx i 2003, eller i 1995, hvor tre tørker efterfulgte hinanden med kun en måneds mellemrum. 1995 blev efterfulgt af 1996, hvor yderligere tre tørker opstod. 1995 og 1996 blev også årene hvor, der var tørketilstande i op til 5 måneder af året.

Går man mere i detaljen med de hydrologiske tidsserier, ses det, at for jordvandet viser de nationale SMDI-tørkeindekser, at der har været 66 perioder, hvor indekset er gået under tærskelværdien. Ud af disse er 14 i kategorien ekstremt tørt, 19 i kategorien meget tørt og 33 i kategorien tørt. I gennemsnit varer denne tørketype 5,6 uger, hvoraf mere end halvdelen dog varer 3 uger eller mindre. Den gennemsnitlige indeks værdier er -2,1 for alle de 66 jordtørker. De 66 events og deres tørkekarakteristikker kan ses i *Tabel 6-1* i appendikset.

Tørken med den største alvorlighed, maks. indeks og intensitet er 2018 tørken (J53), der varede 15 uger og nåede en indekssværdi af SMDI -3,8. I længde er to tørker dog længere end tørken i 2018, nemlig tørkerne i 1995/96 (J13) og 2003 (J25), de varede begge 18 uger. Som beskrevet overfor er jordtørke i Danmark dog særlig kritisk for landbruget, hvis den falder i løbet af foråret og tidlig sommer (April-Juni). Det er derfor værd at fremhæve de ekstreme tørker, der faldt i netop dette tidsrum (fx i 1992, 2003, 2022, 2023). I *Tabel 6-1* er disse forår/forsommer tørker markeret med grønt. Der er også mange tilfælde af flere tørker indenfor et år, og i nogle tilfælde er der tørke til stede i mere end halvdelen af året (1995, 2003 og 2022).

For det nationale SDI-tørkeindekser kan der identificeres 26 vandløbstørkeperioder (*Tabel 6-2*). I gennemsnit har disse tørker en længde af 6 uger, med en gennemsnitlig max indeks SDI-værdi på -1,4. Halvdelen af tørkerne varer dog tre uger eller mindre. Den mest fremtrædende er tørken i 1995 (V4), der har den højeste kategori (ekstrem tørke), og både den største alvorlighed, intensitet, max intensitet og længde. Denne tørke varer hele 44 uger og nærmede sig dermed næsten et helt års udstrækning (85% af året). Ud over denne er der tre tørker, der gør sig bemærket i forhold til længde: 1993 (V3), 2005 (V18) and 2018 (V24), der også har store alvorlighed. I 1997 er der 8 tørkeevents, der tilsammen dækker 52% af året.

For det terrænnære grundvand er der identificeret 18 tørkeevents (*Tabel 1-4*), hvoraf fire er meget tørre og en er ekstremt tør, mens der for det dybere grundvand kun er 7 (*Tabel 6-4*), hvoraf en er meget tør og resten er tørre. De terrænnære grundvandstørker er generelt kortere end de dybe med middellængder på 7 uger og 23 uger, henholdsvis. For de terrænnære grundvandstørker er 1995 (GT3), den mest dominerende tørke, med en længde på 48 uger, og størst alvorlighed og intensitet, samt maks. indeks. Andre lange tørker er 2018 (GT15), 1997 (GT8) og 2005 (GT11), hvor særligt 2018 har høj alvorlighed og maks. indeks, her er tale om en tørke, der ligger fra november til december. Igen gør 1997 sig bemærket ved et højt antal korte og lange tørkeevents (5 styks), spænder over mere end halvdelen af året. For de dybe grundvandstørker er 1996/1998 (GD4) særligt fremtrædende, med lang udstrækning (27 måneder), højeste alvorlighed. og intensitet, samt maks. indeks.

Tabel 1-4 Middel tørke-karakteristikker for de forskellige tørketyper.

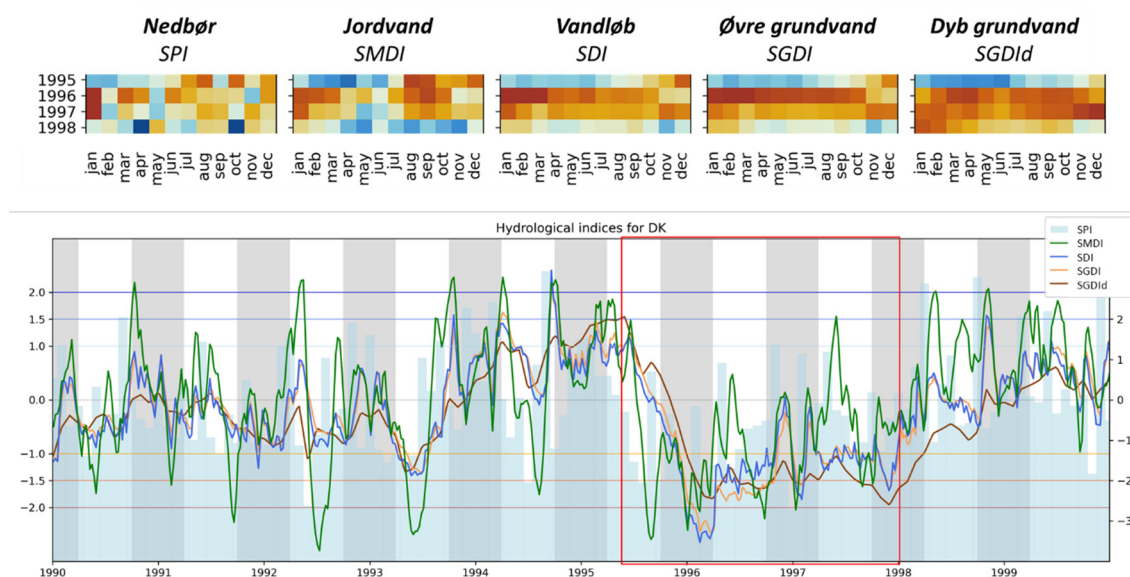
Gennemsnit for alle tørker	Længde (Udvikling/ Genopretning)	Maks indeks	Alvorlighed	Intensitet	Antal			
					Ekstrem tørt	Meget tørt	Tørt	Alle
Jord	5,6 (2,4/2,3)	-2,10	5,37	0,66	14	19	33	66
Vandløb	6 (2,6/2,5)	-1,37	2,36	0,23	1	5	20	26
Terrænnær Grundvand	7,4 (3,4/3)	-1,33	3,22	0,20	1	4	13	18
Dybe grundvand	23 (15/4)	-1,30	2,10	0,20	0	1	6	7

Fra overstående information og fra den opsummerende rasterfigur (Figur 1-5) og fra statistikken for alle events for de forskellige tørketyper (Tabel 1-4), tegner der sig et billede af tørkernes generelle opførsel. Som forventet er der tiltagende længde af tørkerne fra det overfladenære (jorden) med ca. 6 uger til det dybere grundvand med 23 uger (~5 måneder), samtidig er antallet af registrerede tørke-events faldende. Jordtørkerne er dermed korte og mange, mens de dybe grundvandstørker er sjældnere, men af længere varighed, når de indtræffer. For både jordtørken, vandløbstørke og den terrænnære grundvandstørke, er gennemsnittet af udviklingsperioden og genopretningsperioden af tilsvarende længde. For det dybere grundvand er systemet dog i gennemsnit noget hurtigere om at blive genoprettet efter en tørke end den er i udviklingsperioden, det bygger dog på få tørke events, og statistikken skyldes særligt GD4, der dominerer med en voldsom lang udviklingsperiode.

1.2.4 Eksempler fra historiske tørker i Danmark

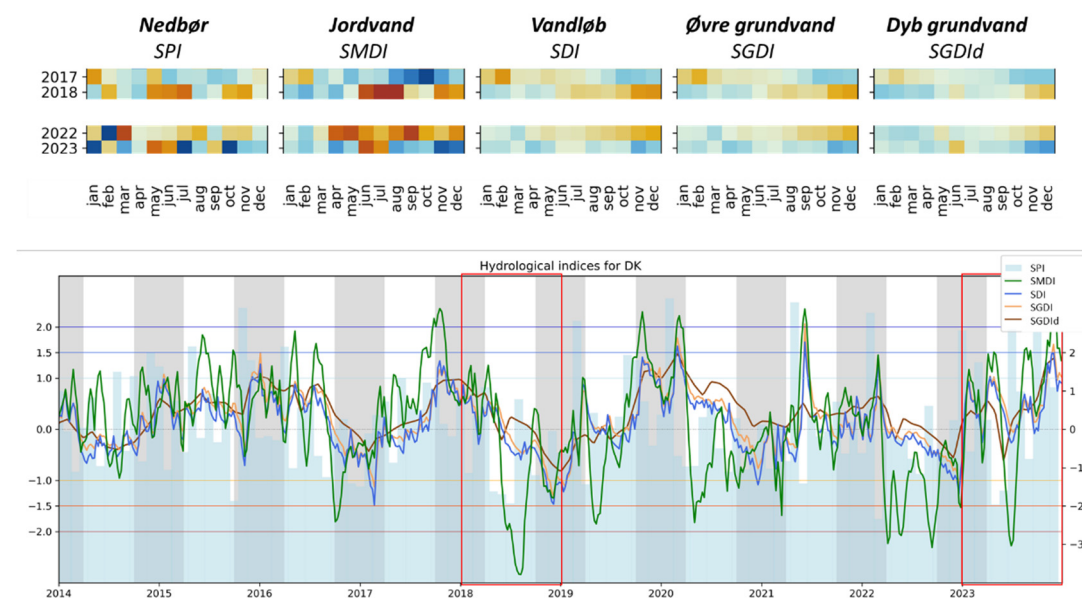
I løbet af de sidste 34 år har der været flere tilfælde af tørker, der er blevet beskrevet i pressen og i øvrige samfundsrelevante udgivelser. Vintertørker er generelt ikke beskrevet eller rapporteret, da deres konsekvenser er mere subtile. Det er derfor sommertørkerne, der er i fokus i dette afsnit. Her er det særlig sommertørkerne i 1996/97, 2018, og 2023, der huskes. Disse tørker er dog ret forskellige i deres udtryk.

Tørken i 1996/1997, var kendetegnet ved meget omfattende nedbørstørker i vinteren 95/96 og 96/97, særligt i januar og december, begge år havde også flere mindre nedbørstørker i resten af sæsonerne (Figur 1-6). Dette førte til en jordtørke (Kategori: Ekstrem tørt) i starten af 1996 (J13), og flere efterfølgende tørker (Kategori: Meget tørt og Tørt). Vandløbene og det terrænnære grundvand led også med tørketilstande i mere end halvdelen af årene (Kategori op til Ekstrem tørt), det er også i disse år at de to indekser når deres maksimale værdi i løbet af de 34 år (V4 og GT3). I januar 1996 når tørken det dybere grundvand, og rammer den værste tørkeindeks-værdi i 34 år i december 1997 og tørken slutter først i april 1998. Denne tørke havde faktisk både den største indeks-værdi for vandløb, terrænnær og dybt grundvand, samtidig var det også den tørke hvor de alle tre havde den maksimale tørkelængde, middel og alvorlighed.



Figur 1-6 Illustration af tørken 1996/97.

I 2018 startede et nedbørs-deficit i maj (Figur 1-7). Dette deficit varer hele maj, juni og juli og førte til jordtørke (Kategori: Ekstrem tør), der nåede sin højde i august. Det er her, at SMDI indekset når sin maksimale værdi i løbet af de 34 år (J56). Ligeledes er denne jordtørke også den med den maximale intensitet og alvorlighed. Selvom vandløb og terrænnære grundvand viste begyndende tegn på tørre tilstande, var det først i november og december, der sås tørke her (Kategori: Tørt), sandsynligvis relateret til et nyt nedbørsdeficit i oktober/november. Tørken nåede ikke til det dybe grundvand. Tørken i 2023 (Figur 1-7) lignede til at begynde med 2018, men blev efterfulgt af en ekstrem våd jul, og ingen af de andre indekser viser tørker. Allerede i august var SMDI indeks højere end normalt (mere våd).



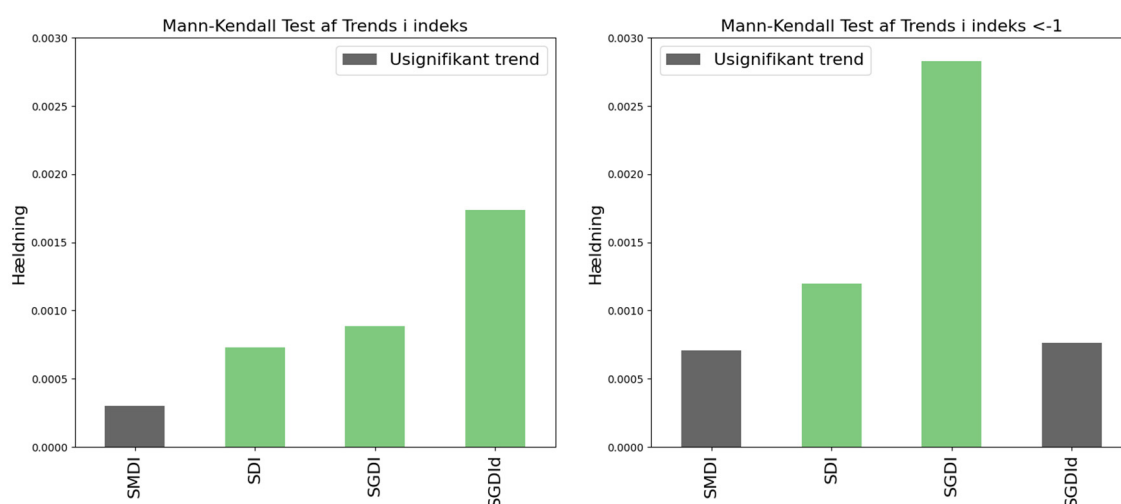
Figur 1-7 Illustration af tørken 2018 og 2023.

1.2.5 Trends, korrelationer og kryds-korrelationer

For at undersøge tendenser i tørkeindekserne kan trends og kryds-korrelationen mellem indekserne undersøges. Her præsenteres de nationale og regionale gennemsnit for månedsværdier af indekserne. Trenden i indeks-værdier kan give en umiddelbar indikation om hvorvidt der har været et skift i systemet over tid, f.eks. om der er en overvægt af høje (våde) eller lave (tørre) indekser i slutningen af tidsperioden i forhold til i starten. Det er dog vigtigt at pointere at trends i indekser ikke indikere flere individuelle tørkeevents, Det er i stedet et udtryk for om indekset generelt går mod mere våde eller tørre værdier i forhold til referenceperiodens normal.

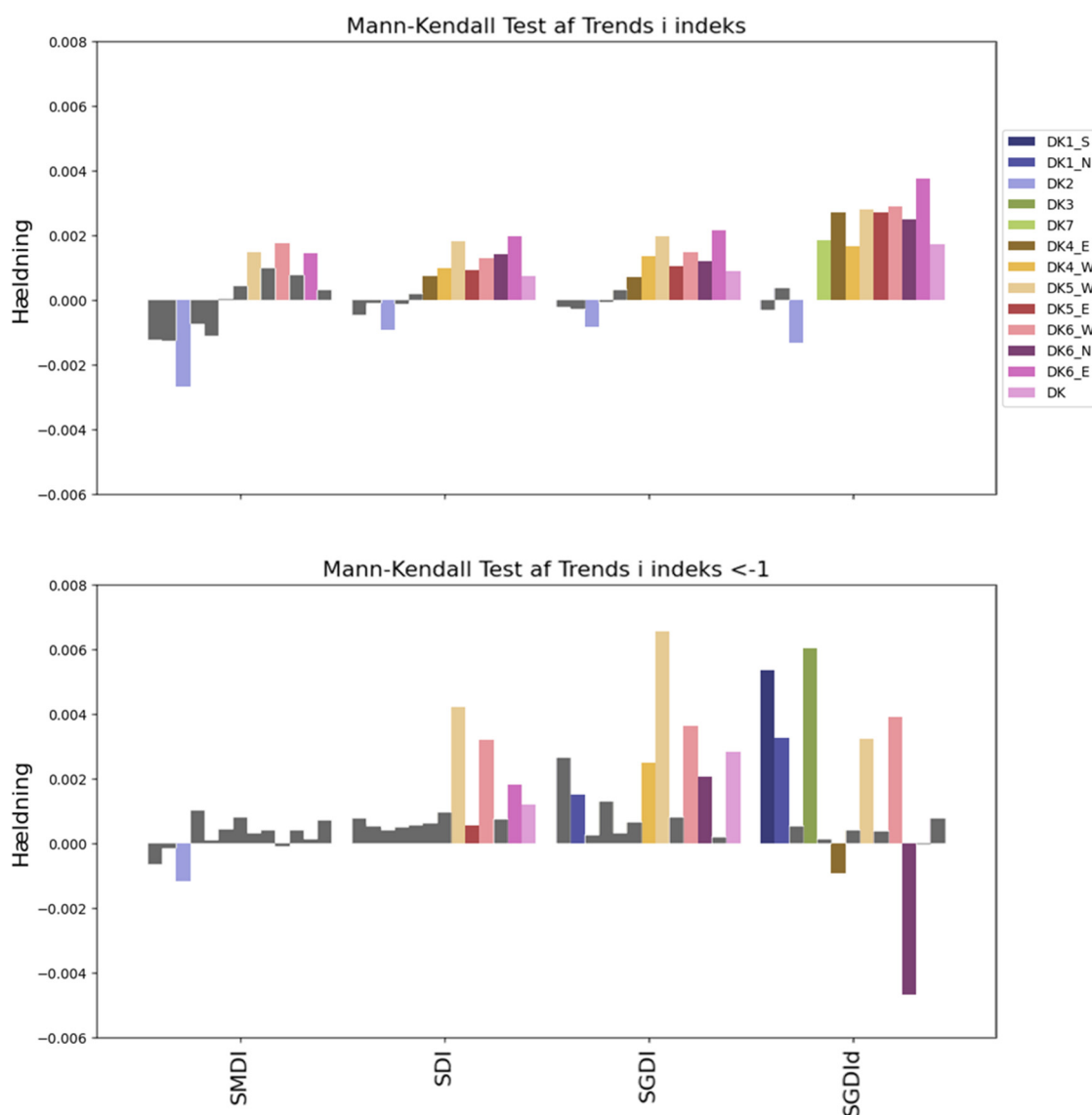
1.2.5.1 Trends

På *Figur 1-8* ses trends for det nationale gennemsnit for hele indekset (venstre) og for tørre tilstande (højre). Trendsene er udregnet med en Mann-Kendall test, der er en ikke-parametrisk metode, der analyserer tidsserier for at vurdere, om der findes en statistisk signifikant stigende eller faldende trend over tid. Testen evaluerer monotone trends i datasæt uden at kræve normalfordeling, hvilket gør den velegnet til at analysere miljødata og hydrologiske tidsserier. For de samlede indeks-værdier (både de våde og tørre) ses der en stigning mod mere positive over de 34 år, denne er dog ikke signifikant for SMDI. Disse resultater betyder at alle fire indekser peger på vådere tilstande i slutningen af de 34 år end i starten. Stigningen er særlig høj for det dybe grundvand (SGDI). En hældning på 0,0017, som for SGDI, betyder at indekset over 30 år rykker 0,05 højere op på kurven (som den på *Figur 1-6*). I betragtning af, at de fleste af indekserne har normalområdet liggende mellem -1 og 1, er denne ændring ganske lille. For de tørre værdier alene (indeksværdier under -1) ses også en øgning mod vådere tilstande i alle indekser, dog er kun ændringen i SDI og SGDI for det terrænnære signifikant. Det peger på, at stigningen i det dybe grundvand primært er drevet af en øgning i de våde indeksværdier.



Figur 1-8 Venstre: Mann Kendall test af trend for det nationale signal for de fire indekstyper for hele det hydrologiske system; Højre: Mann Kendall test af trend for det nationale signal for de fire indekstyper for indeks-værdier under -1 (tørre tilstande). Grå søjler indikerer ikke-signifikante trends.

De nationale tal dækker dog over en vis variation hen over Danmark. Derfor er trend-testene også vist for de forskellige regioner i Danmark på *Figur 1-9*. For de Sydlige øer (DK2) er en signifikant negativ trend i alle indeks. Mens Jylland oplever et stigende indeks for jordvand, vandløb og grundvand. For de tørre indeks-værdier for jordvandstørke er der stadig en nedadgående trend for de sydlige øer, mens de andre områders trends er usignifikante. For vandløb og grundvand er tendens stadig mod vådere indeks-værdier med udtagelse af Sydøerne (DK2), der er nedadgående i alle indeks. De nedadgående trends i disse områder, er dog kun at genfinde i de tørre indeks (<-1) for jordvandet. Det tyder på at for de tørre indeks-værdier er der generelt positive trends, dog er Nordjylland (DK6_N) og den østlige del af Sydjylland (DK4_E) en undtagelse for det dybe grundvand, hvor der faktisk ses tendenser til et tørre indeks-signal.



Figur 1-9 Mann-Kendall trends for de forskellige regioner i Danmark øverst er vist for alle indeks-værdier mens der nederst er vist trends kun for de tørre (<-1). Signifikante trends er markeret med grå søjler.

1.2.5.2 Korrelation og Krydskorrelation

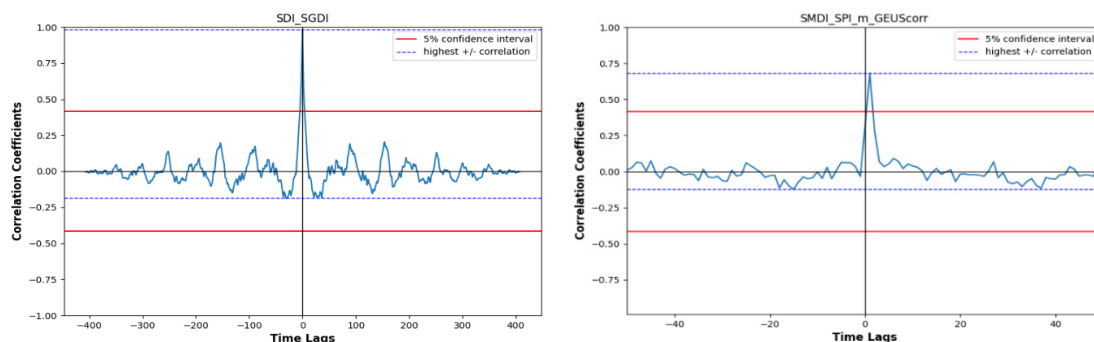
Den umiddelbare korrelation mellem de forskellige indekser på månedsbasis ses i Tabel 1-5. Korrelationen mellem de hydrologiske indekser for vandløb og grundvand er høj, særligt mellem det terrænnære (øvre) grundvand og vandløb, der i høj grad er synkroniseret og koblet, men ligeledes høj mellem disse to og den dybe grundvandstørke. Korrelationen til jordvandstørke er lavere, men stadig høj for terrænnære grundvand og vandløb, mens det dybe grundvand og jordvandstørke har en noget lavere korrelation.

Tabel 1-5 Krydskorrelation mellem de forskellige indekser uden tidsforskydning, tallene i parentes angiver den højeste korrelation opnået med tidsforskydning.

System	Forkortelse	SMDI	SDI	SGDI	SGDI _d
Nedbør	SPI	0,32 (0,68)	0,32 (0,56)	0,25 (0,54)	0,17 (0,37)
Jord	SMDI				
Vandløb	SDI	0,71			
Øvre grundvand	SGDI	0,67	0,98		
Dybe grundvand	SGDI _d	0,49	0,82	0,87	

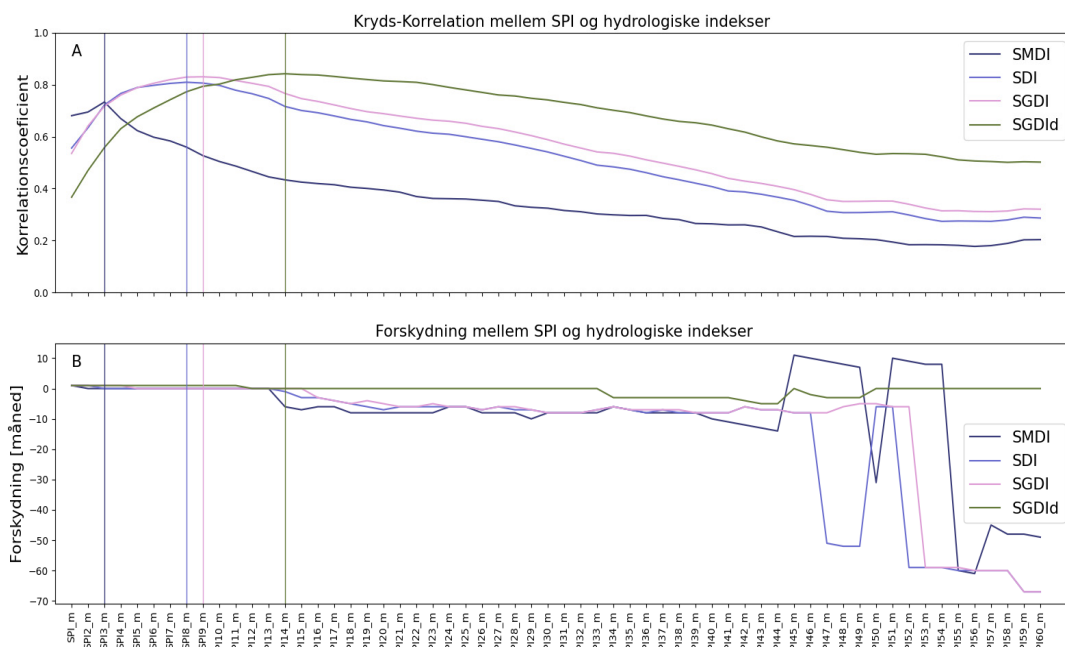
Som nævnt kan der være en forsinket korrelation mellem de forskellige indekser. Det undersøges ved en kryds-korrelation, hvor to indeks-tidsserier forskydes i tid (*lag*) og deres korrelation beregnes for hver forskydning [49]. For kombinationerne af de hydrologiske indekser i Tabel 1-5, ses det dog at den bedste lag-korrelation opnås uden forskydning mellem alle fire hydrologiske indekser (SMDI, SDI, SGDI og SGDI_d), det vil sige at de højeste korrelationer svarer til tallene i tabellen. Et eksempel på en krydskorrelation mellem SDI og SGDI ses på *Figur 1-10* (venstre). På x-aksen ses forskellige forsinkelser mens der på y-aksen ses korrelations-koefficienten. Med den høje korrelation i mente kan disse fire indekser dermed siges at have en høj grad af synkronisering.

Generelt er korrelationen til nedbøren (SPI-indekset) ikke særligt højt for nogle af de hydrologiske indekser (Tabel 1-5), dog bedst for jord og vandløb. Den lave korrelation er ikke uventet, da hukommelse og forsinkelse i de hydrologiske systemer logisk set medfører at der er en lavere sammenhæng mellem nedbør og hydrologi i samme tidsskridt. Lag-korrelationen mellem nedbør og de hydrologiske indekser viser at en forskydning på en måned er den bedste markør for alle de hydrologiske indekser, både jordtørke, vandløb, og terrænnært/dybt grundvand. Et eksempel på en krydskorrelation mellem SMDI og SPI ses på *Figur 1-10* (højre). Her ses hvor den bedste korrelation er en forsinkelse på 1 måned. Dvs. SMDI indekset er bedst korreleret til nedbørsindekset måneden før.



Figur 1-10 Eksempel på krydskorrelation mellem SDI og SGDI (venstre) og SPI og SMDI (højre)

For nærmere at undersøge sammenhængen mellem de forskellige hydrologiske indekser og nedbørs-deficittet, kan man kigge på kryds-korrelationen til nedbørsdeficittet over en længere periode (*accumulation period*) (f.eks. at en vandløbstørke kan være mere forbundet med nedbøren de sidste tre måneder i stedet for nedbør for den sidste uge). Derfor har vi korreleret de hydrologiske indekser med forskellige aggregering af SPI, kombineret med en evt. tidsforskydelse (lag) mellem disse. For kombinationen af alle SPI-akkumulationsudgaver (61) og alle hydrologiske indekser (4) kan alle forsinkelser testes (± 360). På Figur 1-11A ses de bedste korrelations-koefficienter fra denne test. Her ses det at den bedste forklarende SPI for SMDI er SPI3, for SDI er det SPI8 og SGDI er det SPI9, mens det for det dybere grundvand er SPI13. På Figur 1-11B ses hvilken tidsforskydelse (lag), der er ligger bag korrelationskoefficienten i A, her ses at undersøgelsen viser, at de højeste korrelationer opnås uden tidsforskydelse.

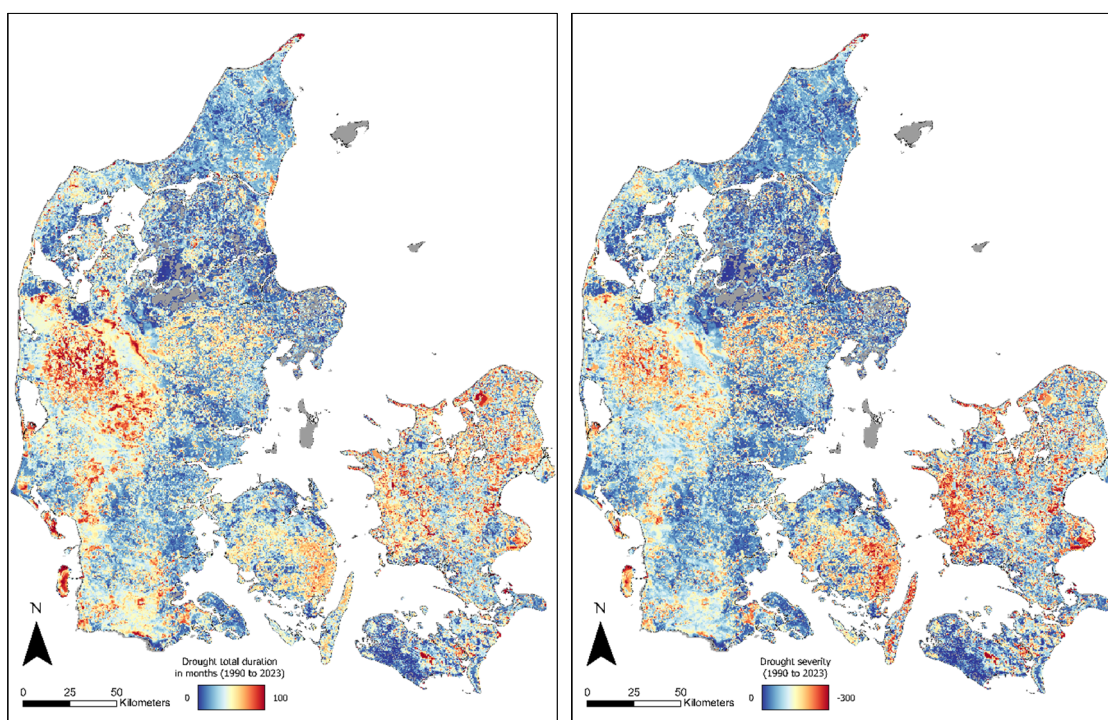


Figur 1-11 Krydskorrelation mellem hydrologiske indekser og SPI med forskellige aggregering, øverste ses de højeste korrelationskoefficienter for de forskellige SPI'er (A), nederst ses de tilsvarende tidsforskydelser for den bedste korrelation (B).

Denne analyse peger således på hvor stor hukommelsen (akkumulationsperioden) er i systemerne. Ikke overraskende er den længere jo længere henne i det hydrologiske kredsløb vi befinder os, og den dybe grundvandstørke er f.eks. således bedst korreleret til de foregående 13 månedsnedbør. Mens jordtørke omvendt har en noget kortere hukommelse på 3 måneder. Denne hukommelse er dog også forskellig på tværs af landet, og er derfor også udregnet på grid-niveau for alle de fire hydrologiske indekser. Eksempler på de nationale forskelle i hukommelsen er uddybet i 6.4. Her ses, at det særligt er for grundvandet, især det dybe, hvor akkumulationsperioderne er forskellige. Her er det især Nord- og Østjylland samt omkring hovedstadsområdet, der har meget lang hukommelse (over 36 måneder), men de andre dele af landet er betydelig lavere (10-20 måneder).

1.2.6 Regionale forskelle i tørkekarakteristikker

For at undersøge om tørkerne opfører sig anderledes i forskellige dele af landet, f.eks. relateret til jordtyper, klima eller geologi, kan de gennemsnitlige tørkekarakteristikker for hele landet udregnes. Et eksempel på denne udregning kan ses på *Figur 1-12*, hvor tørkekarakteristikkerne varighed og alvorlighed for SGDI er plottet for alle grids i DK-modellen.



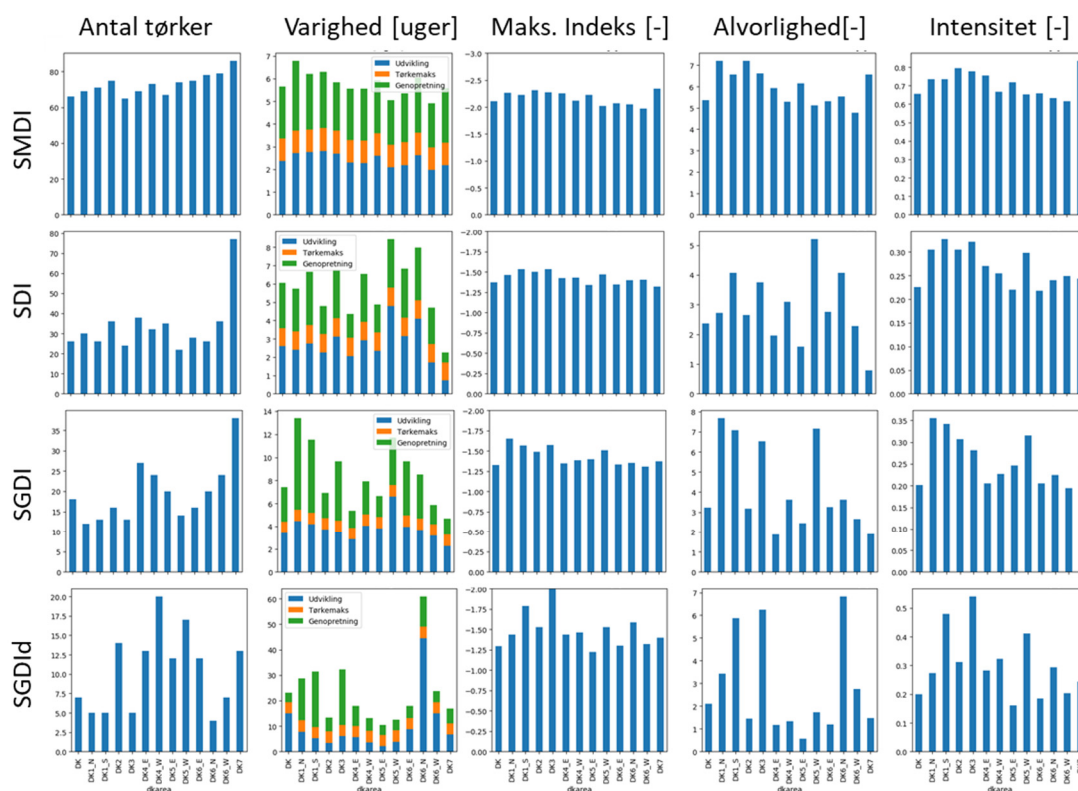
Figur 1-12 Eksempel på kort over tørkekarakteristikker i Danmark. Kortene her viser tørkevarighed (venstre) og tørke alvorlighed(højre) for terrænnært grundvand (SGDI) for perioden 1990 til 2023.

For at undersøge de regionale forskelle er tørkekarakteristikkerne for alle de hydrologiske indekser kan gennemsnit udregnes for 12 landsdele, der er samlet og plottet i *Figur 1-13*. For SMDI er forskellene mellem landsdelene generelt små. Mest nævneværdig er Bornholm (DK7), der skiller sig ud ved at have et højere antal tørker (omkring 30 mere end landsgennemsnittet). Disse tørker når i gennemsnit desuden også et mere negativt maks. indeks. De

Bornholmske jordtørker er således mere hyppige og intense i forhold til andre dele af landet. Derudover er der en tendens til at Sjælland og øerne (DK1_N, DK1_S og DK2) har længere jordtørker, og særligt de sydlige øer (DK2) har meget negative maks. indeks-værdier, der sammenlagt med relativt mange og lange tørker peger på en særlig sårbarhed.

Som for jordtørken, skiller Bornholm (DK7) sig også ud i forhold til vandløbstørker, med over dobbelt så mange tørkeforekomster som på nationalt niveau, dog er disse samtidig betydelige kortere end i resten af landet og maks. indeksværdierne ikke højere. De længste tørker ses overordnet set mest i Vestjylland og Nordjylland. Mens udsvingene i maks. indeks-værdi ikke adskiller sig væsentligt fra hinanden på tværs af regionerne.

For det terrænnære grundvand er indeksværdierne også meget ens på tværs af landet. Mens der er længere tørke på Sjælland, Midt-Vestjylland, og i nogen grad på Fyn (*Figur 1-12*). Igen har Bornholm mange, men korte tørkeevents.



Figur 1-13 Antal tørker, tørkelængde og maks. indeks for alle fire typer af tørker på tværs af det danske område.

For det dybere grundvand (SGDIId) er der noget større regionale forskelle. Der er betydelig flere tørke-events i Vestjylland (DK4_W og DK5_W) i forhold til landsgennemsnittet (DK), efterfulgt af de sydlige øer (DK2), det østlige Jylland og Bornholm. Tørker i disse områder er til gengæld noget kortere. Mens tørkerne på Sjælland (DK1_N og DK1_S) er mindre hyppige men op til dobbelt så lange. Hvorimod Nordjylland (DK6_N) har en meget lang tørkelængde.

1.3 Perspektiver for analyser af tørker og tørkekarakteristikker

Den historiske analyse af tørketyperne og deres karakteristikker hen over Danmark, har vist hvordan de forskellige tørker migrerer gennem det hydrologiske system på forskellige tids-skalaer, og hvordan den sæsonmæssige timing af nedbørsdeficitet har stor betydning for hvordan tørken manifesteres. Analysen har også understreget at det, særlig for grundvand, er vigtigt at tage forsinkelser i systemet, og dermed også udgangspunktet før tørken, med i betragtningen. De hydrologiske indekser har klare fordele, de er intuitiv simple at formidle og vise, og den måde de udregnes på, gør at de kan sammenlignes på tværs af klimazoner og klimatologier. Ulemperne er primært relateret til at de ikke kan oversættes direkte til et vand-deficit, da de altid er udregnet relativ til sig selv og standardiseret. Det gør indekserne svære at relatere til absolutte værdier.

Det næste skridt ville være at udvide analysen af tørke i Danmark med vurderinger af det fremtidige tørkesignal. Her er den Nationale Hydrologiske Model et oplagt og egnet værktøj, da den tidligere har været benyttet til klimafremskrivninger f.eks. i regi af HIP-projektet [50]. De hydrologiske indekser ville kunne bruges i en fremtidig sammenhæng, og vil dermed kunne benyttes til at evaluere antallet af fremtidige tørker for de forskellige dele af det hydrologiske system. En sådan analyse er ikke foretaget i Danmark før på nationalt niveau. Men for oplandsstudier har der tidligere været undersøgt tørkeudviklingen med de samme type indekser [51, 52].

[51] undersøgte tørkefremskrivninger for Skjern oplandet med et særligt fokus på landbrugs-områder, og afvejningen mellem jordvandstørker og grundvandstørker i forbindelse med øget vandingsbehov. De fandt at de mest forekommende sommertørker (mild) var faldende for både jordvand, vandløb og grundvand i fremtiden (slut 2100) men at antallet af ekstreme tørker steg markant (*Tabel 1-6*). For eksempel var der i den historiske periode 0,1 uge om året hvor der var ekstrem jordvandstørke, i fremtiden steg denne forekomst med 0,1 uge altså en fordobling af tid under ekstrem tørke.

Tabel 1-6 Ændringen og udgangspunkt i antal tørkeuger pr år i vækstsæsonen fra studiet af tørkeforekomster i Skjern fra 1981-2010 til 2071-2100. Gengivet med tilladelse fra [51].

Tørke	Jordvandstørke (SMDI)		Vandløbstørke (SDI)		Grundvandstørke (SGDI)	
	1981-2010	Ændring	1981-2010	Ændring	1981-2010	Ændring
Ekstrem	0,1	+0,1	0,4	+0,8	0,4	+0,5
Hård	0,5	+0,3	0,9	+0,5	0,9	+0,2
Moderat	2,2	+0,2	1,9	+0,2	1,9	-0,1
Mild	4,3	-0,3	7,3	-1,1	7,3	-1,7

Derudover så de, at selvom markvandingen til en vis grad imødekom mange af fremtidens jordvandstørker på landbrugsjorden, eskalerede den samtidig også tørkerne i grundvandet, og helt generelt medførte det samlede signal af vanding, nedbør og grundvand et betydeligt ændret afstrømningsregime i vækstsæsonen.

Studiet af [51] viste også at det er vigtigt med skarpe overvejelse af metoden for udregning af tørkeindekserne, når man bruger standardiserede indeks tilgange. Særligt i områder hvor

der vandes vil jordvandet være unaturligt højt pga. vanding. Statistikken, der udregnes anomalier ud fra, vil derfor være betydelig anderledes i vandede- end i ikke-vandede områder. Det skal der tages højde for når modellerne bruges til at fremskrive udviklingen. Det kunne f.eks. være relevant at gruppere bestemte områder i modellen med lignende arealanvendelse, jordtype eller klimatologi for at styrke robustheden under udregningen af statistikken. Derudover er det vigtigt at overveje hvilken reference (tidsperiode) som indekserne skal bruge som normalperiode, altså som basis for udregning af statistikken, da det er afgørende for det resulterende tørkesignal [53]. I en fremtidig analyse af hydrologiske tørker i Danmark vil det derfor være vigtigt at genbesøge og konsolideres standardiseringsmetoderne og udregningen af statistikken i et klima under forandring.

2. Indsats H2: Validering af modelsimuleringer for tørke

2.0 Indledning

For at forstå og afbøde fremtidige tørkekonsekvenser og iværksætte forholdsregler er der behov for relevante og troværdige modelsimuleringer af danske forhold med fokus på tørke, bl.a. fordi ikke alle dele af det hydrologiske kredsløb er dækket af observationer med tilstrækkelig opløsning i rum og tid til en monitorerings- og prognoseindsats. Denne forståelse og kvantificering af tørke vha. data og modeller vil baseres på de seneste årtier, hvor der allerede er oplevet tørker i Danmark.

Formålet med indsatsen er at forbedre forståelsen for sammenhænge mellem et meteorologisk signal/tørke gennem de forskellige dele af jorden og det hydrologiske kredsløb, samt validere modelsimuleringer og afdække muligheder for at forbedre kvaliteten af simuleringer af tørkehændelser, herunder deres intensitet, timing etc. Dette gøres ved at undersøge tilgængelige modelværktøjers evne til at simulere hydrologiske anomalier sammenlignet med observationer. Til dette anvendes hydrologiske tørkeindikatorer og karakteristikker fra litteraturanalysen (se afsnit 1.2.1) og analyser til validering af modelsimuleringer.

Indledningsvis etableres et observationsdatasæt bestående af lange konsistente tidsserier af vandføring og grundvandsstand, samt data for jordvandsindhold. Disse observationer skal afdække klimarelaterede udsving over de sidste ca. 30 år og bidrage til vores karakterisering af tørke, samt i den anden fase validere de modelværktøjer som anvendes til at simulere det hydrologiske kredsløb samt beregne effekterne af et fremtidigt klima i forhold til tørke i Danmark.

2.1 Udvælgelse af observationsdatasæt til modelvalidering

Udvælgelsen af et observationsdatasæt til beskrivelse af hydrologisk tørke, dækker over de vigtigste komponenter af det hydrologiske system: jordfugtighed, vandløb og grundvand. Observationsdatasættet, udvælges og kvalitetssikres, for brug til en selvstændig tørke karakteristisk samt til at validere af modelsimuleringer af tørketilstande med Den Nationale Hydrologiske Model (DK-modellen). Tre slags data er behandlet her: stor-skala jordfugtighed, vandløbsafstrømning og grundvandsstand. Dokumentet indeholder 1) en kort beskrivelse de generelle krav til dataet, 2) beskrivelse af den gennemgående kvalitetssikring under udvælgelsesprocessen, der er foretaget på alt eksisterende hydrologiske data, der er til rådighed gennem offentlige databaser i Danmark; samt 3) eksempler på udvalgte tidsserier samt kort over de udvalgte stationers placering og antal.

Generelle krav til datasættet

For at datasættene kan bruges til validering af den hydrologiske model, er der flere kriterier, der skal være opfyldt. Kriterierne er her listet i generelle vendinger, men de tilpasses til hver enkelt datatype baseret på datatilgængelighed og særlige hensyn til variabel og dataformatet.

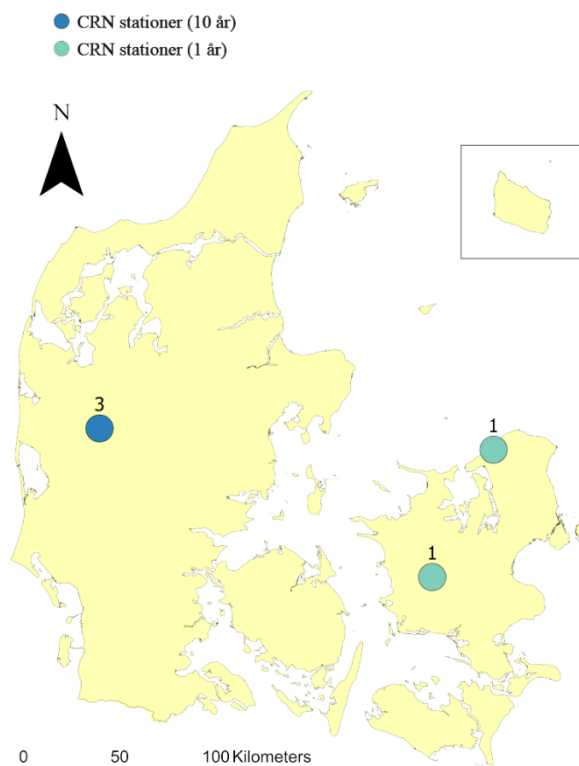
- **Længde:** for at tidsserien skal kunne bruges skal der være data tilgængelig for en længere periode. Datasættet skal dække eller delvis dække perioden 1990-2023, da det er denne periode DK-modellen og raster klimaobservationer også dækker. Optimalt skal målingerne dække mellem 20-30 år i denne periode for at give det bedst mulige reference-grundlag for indekser og decifit-beregninger relevante for at belyse tørke situationer. For stor-skala jordfugtigheds-målingerne godtages dog en kortere tidsperiode, pga. sparsomt dataudbud.
- **Kvalitet:** Datasættet skal være af uden væsentlige fejlmålinger (outliers) og skal være et udtryk for et naturligt klimasignal, og bør dermed så vidt muligt være upåvirket af menneskelig aktivitet (f.eks. grundvandsindvinding eller ændringer i indvinding over tid).
- **Tidslig Fordeling:** Da datasættet bl.a. skal bruges til at udregne tørkeanomalier hen over årstider og sæsoner, skal datasættene have en tilstrækkelig fordelingen af data hen over året, så sæsonvariationer kan afspejles, hvilket som udgangspunkt kræver data på månedsniveau.
- **Rummelig Fordeling:** Datapunkter, der ligger oven i hinanden eller i samme DK-model grid tyndes ud, således at kun den bedste observationstidsserie i gridet bruges til at validere DK-modellen.

De individuelle krav til datasættet og procedure for kvalitetssikring af hver af de tre datatyper beskrives i dataafsnittene nedenfor.

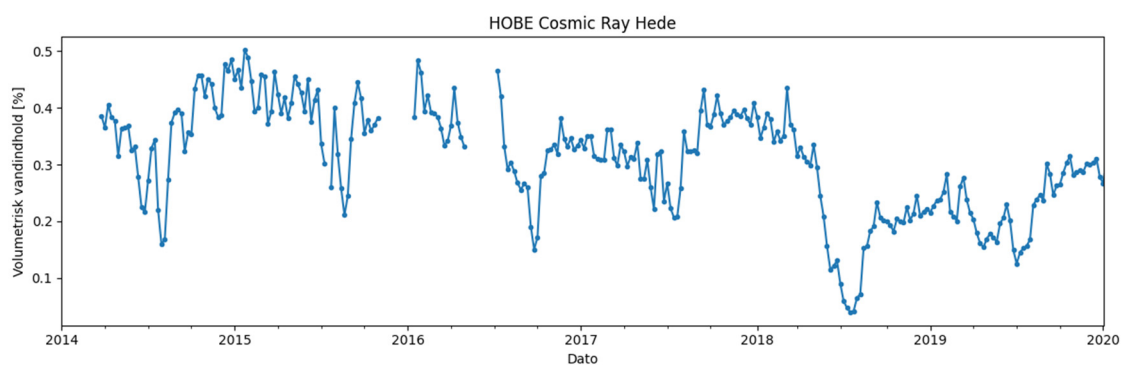
2.1.1 Stor-skala jordfugtighed

Jordfugtighed eller vandindhold i jorden måles traditionelt med små-skala prober eller jordprøver i laboratoriet. Men i dette tilfælde skal måledataet sammenholdes med modelsimuleringer fra Den Nationale Hydrologiske Model, der arbejder på 100-500 meter grid-skala. Disse små punktmålinger er derfor svære at udnytte til en validering af modellens simuleringer, pga. den store skala forskel, da modellens resultater repræsenterer et integreret jordvandsindhold over hundrede af metre mens små-skala målinger integrerer over få cm. Pga. af denne udfordring bruges kun stor-skala målinger af jordfugtighed til modelvalidering.

Stor-skala målinger er i denne sammenhæng målinger foretaget ved brug af *cosmic ray* metoden (CRN). *Cosmic ray* metoden udnytter den inverse sammenhæng mellem indholdet af vand i jorden (hydrogen) og neutronintensiteten fra kosmisk stråling [54]. CRN-målestationer integrerer jordfugtigheden over 200-300 m og er således optimale for sammenligning med modelsimulerede jordfugtighed. Da metoden er relativ ny, findes der kun fem lokaliteter i Danmark med CRN-målinger (*Figur 2-1*), og af disse kun tre steder med længerevarende tidsserier (8-10 år). Alle disse tre målepunkter ligger i Skjern opland i Vestjylland [55] og er opstillet i forbindelse med forskningsprojektet HOBE [56] ledet af Københavns Universitet. Pga. det sparsomme dataudvalg medtages alle tre målestationer til valideringsøvelsen på trods af korte tidsserier og datahuller (se et eksempel på *Figur 2-2*). Desuden er én af de fem lokaliteter påvirket af markvanding, og afspejler derfor ikke et rent klimadrevet tørkesignal. De tilgængelige jordfugtigheds data baseret på *cosmic ray* metoden er et internationalt unikt datasæt, men generelt er jordfugtighed stadig den af de tre hydrologiske variable som er vanskeligst at validere på national skala og over lang tid.



Figur 2-1 Oversigtskort over placeringen CRN-stationer i Danmark, tallet angiver antal målestationer i området.



Figur 2-2 Eksempel på et jordfugtighedsdatasæt fra cosmic ray. Den tørre sommerperiode i 2018 vises tydeligt i datasættet som kraftigt nedsat vandindhold i jorden. Data er vist som uge-middel, men er målt på timebasis.

2.1.2 Grundvandsstand data

Målinger af grundvandsstanden i borerer kaldes pejlinger og findes i stort omfang på tværs af hele Danmark (se et eksempel på Figur 2-3). I den National boringsdatabase Jupiter [57] er der for perioden 1990-2023 registreret over 2.900.000 grundvandspejlinger fordelt på ca. 130.000 borerer (Figur 2-4a). De fleste af disse borerer har dog kun få eller en enkelt måling af grundvandsstanden. Kun ca. 8.000 borerer har mere end 20 observationer, mens der

i nogle boringer måles på time eller døgn niveau resulterende i flere tusinde observationer. Målinger af grundvandsstande har svingende tidslig opløsning og kontinuitet f.eks. er nogle boringer pejlet manuelt en gang om måneden mens andre har automatiske loggere der måler hvert 5 minut. Derudover er boringerne ofte påvirket af menneskelig aktivitet i form af f.eks. vandindvinding til drikkevand og oppumpning til markvanding. Vandindvinding til både vandforsyning og markvanding indrapporteres til den Nationale Boringsdatabase typisk som års-værdier på anlægsniveau (samlet for vandværket, ikke for den enkelte indvindingsboring). Ligeledes bestemmer geologien, dybden og pumpemængderne, hvor langt væk vandindvindinger kan påvirke grundvandsstanden i andre boringer som anvendes til monitoring. Disse faktorer gør det kompliceret at identificere grundvandtidsserier, der kun er klimastyret. Ud-vælgelsen af boringer sker derfor i kombination af tre trin: datasortering, ekspertvurderinger, og analyser af observations-tidsseriernes støj baseret på et tidsserie-analyseværktøj.

Datasortering: I første skridt udvælges boringer ved hjælp af følgende kriterier:

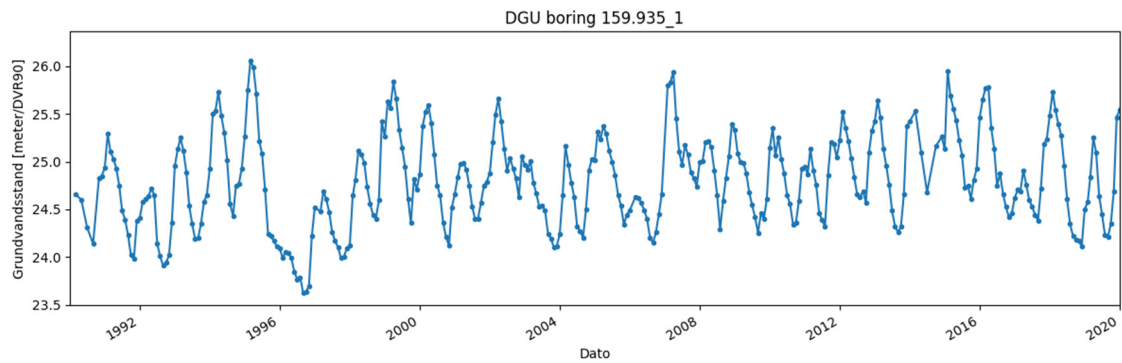
- Tidsserier med mindst 20 års data på månedsniveau i perioden 1990-2023; og hvor maksimalt 20% af månederne indenfor en 20-årig periode må være uden observationer. Dette resulterede i 389 potentielle pejletidsserier, som den videre kvalitetssikring fokuserede på.

Tidsserie-analyse: Ved hjælp af tidsserie-analyse værktøjer (*nonlinear transfer function noise models*) undersøges de 389 tidsserier for om grundvandsstanden kan beskrives ved hjælp af de klimatologiske effekter alene eller om der er udsving som tidsserie-analysen ikke kan reproducere (uforklaret støj eller udsving). Hvis forklaringsgraden (udregnet med Pearson korrelation) er høj med information fra klima alene, tyder det på at boringen ikke er indvindingspåvirket. I dette studie bruges tidsserieværktøjet Pastas [58]; og boringer med under 70% forklaringsgrad ($R^2 < 0,70$) markeres som lav forklaringsgrader, og boringer over 70% ($R^2 > 0,70$) som høj forklaringsgrad.

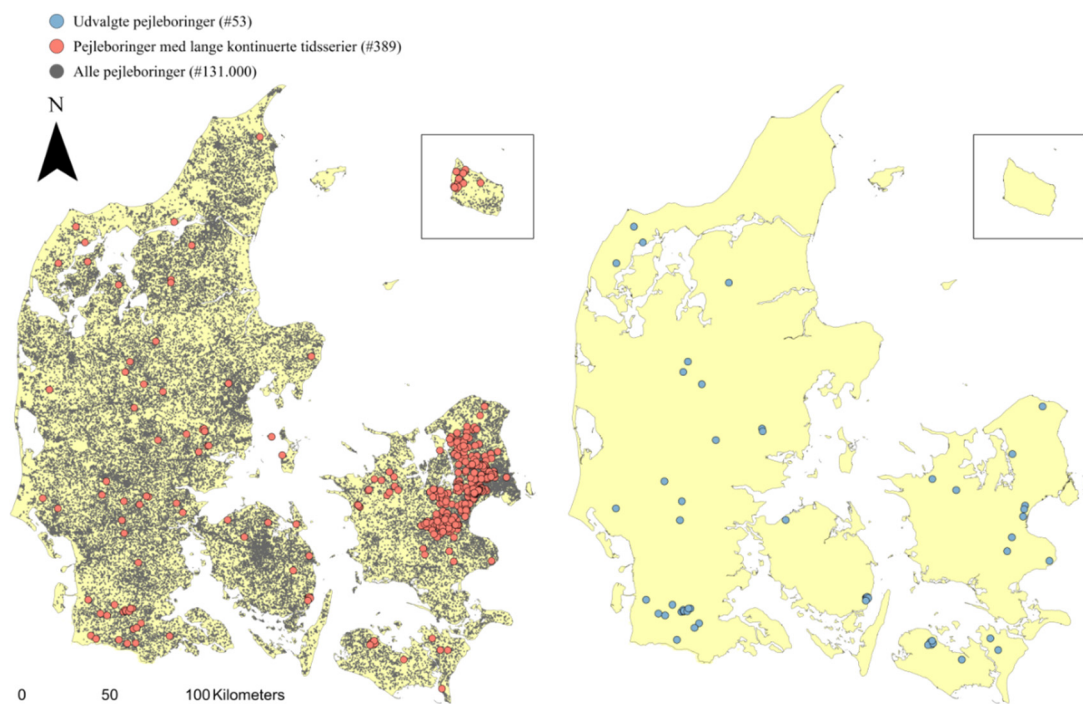
Ekspertviden: To eksperter med gennemgående viden om grundvandssystemet og de klimatologiske signaturer, der ses i grundvandet i Danmark i perioden, gennemgår uafhængig af hinanden alle de resterende tidsserier og deres korrelation til klimaudsving. Tidsserieværktøjet Pastas kan ikke stå alene til udvælgelsen af pejletidsserier, da analysen kan opnå en høj forklaringsgrad også for boringer som er påvirket af nærliggende vandindvinding og ændringer i vandindvinding, hvis disse ændringer i indvindingsmønstre foregår gradvis over tid. Derfor undersøges alle boringer i kategorien høj forklaringsgrad ($R^2 > 0,70$) og frasorteres hvis det med ekspertviden og data vises at en generel trend i grundvandsstanden følger de omkringliggende indvindingstendenser (f.eks. gradvist faldende indvinding fra 1990'erne til slut 20'erne som er typisk i de større indvindingsområder), og hvis klimaet ikke understøtter den samme trend. Der er en klar tendens til faldende vandindvinding over perioden 1990-2020, særligt i HOFORs indvindingsområder omkring København, hvor der ligeledes er mange pejletidsserier. En stor del af disse pejletidsserier viser en generel stigende grundvandsstand over perioden, som vurderes ikke at kunne være klimarelateret alene, men primært forårsaget af en faldende indvinding. Derfor er mange af tidsserierne fra dette område frasorteret (*Figur 2-4*).

Boringer i kategorien lav forklaringsgrads ($R^2 < 0,70$) undersøges ligeledes manuelt, og fra denne gruppe er enkelte tidsserier også udvalgt hvis data vurderes at være gode, men f.eks.

have enkelte *outliers*, som kan håndteres senere i analysen. Efter ekspertanalysen er de borer som er udvalgt/fravalgt gennemgået i gruppen for at skabe konsensus. Efter disse tre skridt er der 53 pejleboringer tilbage til rådighed for valideringsanalysen. Et kort over placeringen af disse ses på *Figur 2-4b*. For disse 53 udvalgte borer gælder det at afstanden til vandindvindingsboringer er mindst 500 m for indvindingsboringer med indvinding > 50.000 m³ per år (i gennemsnit over perioden for aktive år) samt at afstanden er mindst 1 km fra borer der oppumper mere end 1.000.000 m³ per år.



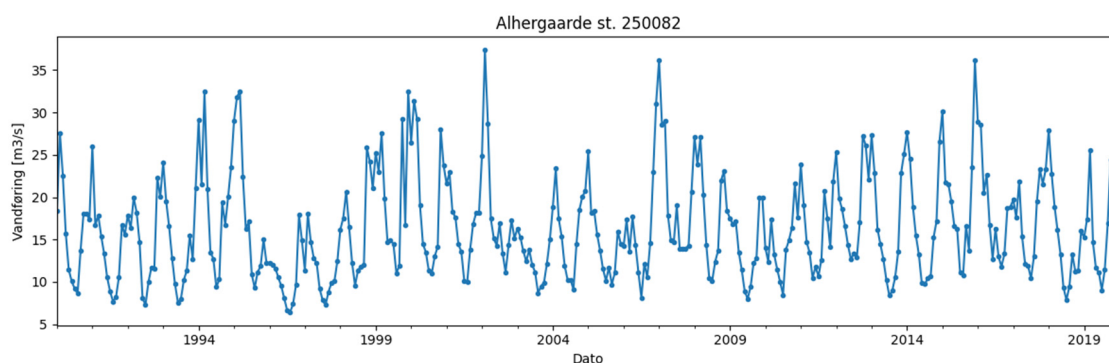
Figur 2-3 Eksempel på en målt grundvandsstands-tidsserier. Den store tørke i 1996/1997 ses tydeligt i datasættet med lav (dyb) grundvandsstand, mens det meget våde år i 2007 viser en stor stigning (tættere på terræn). Data er vist som månedsmedian, men er målt hver syvende til fjortende dag.



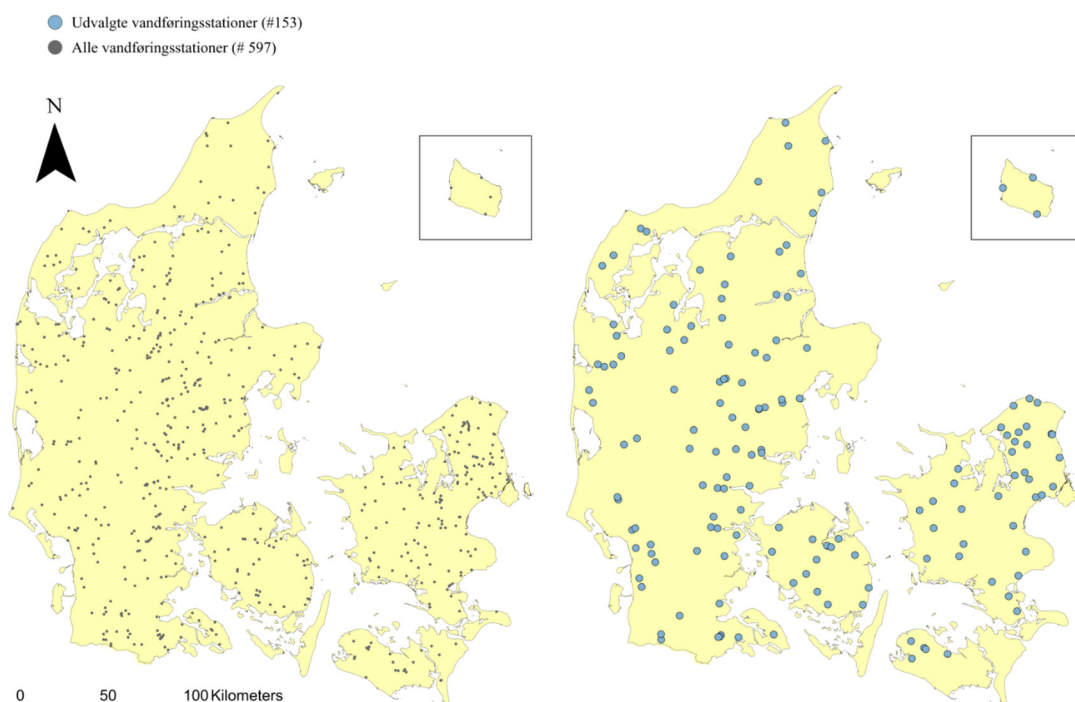
Figur 2-4 Oversigtskort over placeringen af a) alle pejleboringer med grundvandsstandsdata, samt markering af borer med tidsserier (venstre), og b) de udvalgte pejleboringer (højre)

2.1.3 Vandføringsdata fra vandløb

Vandføring i vandløb måles over hele Danmark ved over 900 placeringer. De fleste steder måles en vandstand [m] kontinuerligt med datalogger som konverteres til en vandføring [m^3/s] vha. en relation (*rating curve*) som kvantificeres ved løbende målinger af vandføring (se et eksempel på Figur 2-5). Vandføringsmålinger er generelt af god kvalitet i Danmark og ofte er tidsserier med daglige data kun i begrænset omfang plaget af huller i tidsserierne (Figur 2-6a). For at udvælge det optimale datasæt er 153 stationer med data for hele perioden 1990-2020 (>98% komplette) udvalgt til videre analyse (Figur 2-6b). Disse stationer er desuden manuelt kvalitetssikret i forbindelse med udvælgelse til kalibrering af DK-Modellen, har et opstrøms areal på mindst 15 km^2 og vurderes ikke at være styret af direkte menneskelig aktivitet som f.eks. opdæmning, pumpestationer eller sluser.



Figur 2-5 Eksempel på en målt vandføringstidsserie. Den store tørke i 1996/1997 ses tydeligt i datasættet med mindre vandføring, mens det meget våde år i 2007 viser meget høj vandføring. Data er vist som månedsmiddel, men er målt hver dag.



Figur 2-6 Oversigtskort over placeringen af a) alle vandføringsstationer i Danmark (venstre), og b) de udvalgte vandføringsstationer (højre).

2.2 Valideringsanalyse af modelsimulationer

2.2.1 Observationer vs. modeller

Observationsdata for hydrologiske variable som grundvandsstand og vandføring i vandløb er afgørende for at kunne karakterisere tørker, deres udbredelse og alvorlighed. Der er dog væsentlige svagheder ved udelukkende at anvende observationer til tørke karakteristik. Disse svagheder kan grupperes i to overordnede kategorier; kontinuitet og repræsentativitet, samt begrænsninger i forhold til øjebliksbillede og fremskrivning. Som det fremgår af data-udvælgelsen i afsnit 2.1, er det en meget begrænset del af Danmark som kan repræsenteres ved lange tidsserier af jordvandindhold og grundvandsstand. Dette skyldes at det er beko-steligt at vedligeholde observationsstationer i årtier og at andre formål og prioriteringer ofte betyder at monitoringsfokus flyttes fra sted til sted over tid. For at observationsdata kan indgå i en øjebliksvurdering af en tørkesituation, kræver det desuden at de er kvalitetssikret og statistisk sammenlignet med tidligere observationer. Dette foregår f.eks. på Grundvandsstan-den.dk, hvor den øjeblikkelige situation sammenholdes med historiske observationer. En åbenlys begrænsning ved udelukkende observationsbaseret tørke data er manglen på klima-fremskrivninger og vurdering af risikobilledet for tørke i et fremtidigt klima, samt mang-lende mulighed for at gennemføre korte (op til 15 døgn) eller sæsonprognoser.

Derfor er hydrologiske modeller en helt nødvendig og integreret del af at beskrive, forstå og fremskrive det hydrologiske system og tørke. Hydrologiske modeller er kalibreret mod en række historiske data som vandføring og grundvandsstand, men de er typisk ikke kalibreret eller valideret specifikt mod deres opførelse under hydrologiske anomalier og tørkeindeks.

2.2.2 Den Nationale Hydrologiske Model

Den Nationale Hydrologiske Model (DK-Modellen) er et integreret modelsystem som inklu-derer hele det hydrologiske kredsløb i én national model. Dvs. at modellen, baseret på kli-mainput, simulerer hydrologiske processer på overfladen som overfladisk afløb og infiltration, processer i rodzonen som evapotranspiration og nedsivningen til grundvandet, afstrømning i vandløb, og grundvandsstrømning i forskellige lag. Alle dele af modellen er koblet, dvs. vekselvirkninger mellem de forskellige dele af det hydrologiske kredsløb bliver simuleret [59]. Modellen simulerer alle hydrologiske variable på et dagligt tidsskridt i en rumlig gridskala på 500m eller 100m. Modellen har en lang række anvendelser indenfor klimatilpasning, klima-fremskrivning, vandressource opgørelser, effekt af vandindvinding, nitratudvaskning osv. Modellen kalibreres mod tusindvis af observationer i et komplekst system med *state-of-the-art* optimeringsalgoritmer [60–62]. Modellen køres også i realtid, dvs. med daglig opdaterede modelberegninger.

I takt med et øget fokus på klimarelaterede udsving i de hydrologiske forhold i Danmark med både oversvømmelser og tørker, anvendes modellen i stigende grad til at beskrive tidslige anomalier vha. hydrologiske indeks som dem beskrevet i kapitel 1. I modelkalibreringen ind-går de hydrologiske indeks ikke som specifikke kalibreringsmål, og derfor er der behov for at

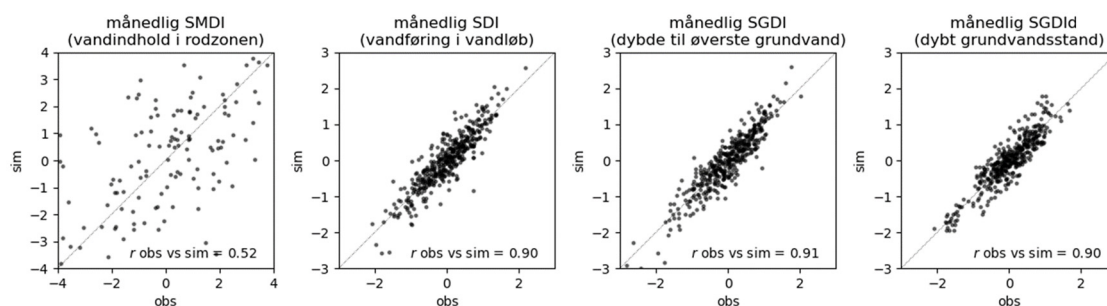
validere om modellens simulerede hydrologiske indeks harmonerer med observerede hydrologiske anomalier. Dette er formålet med det aktuelle afsnit.

2.2.3 Modelvalidering

På baggrund af de udvalgte observationer fra afsnit 2.1 beregnes de observationsbaserede hydrologiske indeks for hhv. vandindhold i rodzonen (SMDI), vandføring (SDI) samt det terrænnære (SGDI) og dybe (SGDI_d) grundvand. De hydrologiske indeks er beregnet på månedsniveau for perioden 1990-2023, og plottes i et scatterplot for hhv. simulerede og observerede indeks værdier som afspejler våde (positive anomalier) og tørre (negative anomalier) forhold.

Figur 2-7 illustrerer valideringen af de simulerede hydrologiske indeks. Det ses at der generelt er stor overensstemmelse mellem de observerede indekssværdier og de simulerede, med en korrelationskoefficient (r) på 0,52 for jordvandsindhold, 0,90 for vandføring og på hhv. 0,91 og 0,90 for terrænnært og dybt grundvand. Den samlede model validering og udbyggede analyser er under udarbejdelse som en videnskabelig artikel, som forventes indsendt til et relevant hydrologisk tidsskrift omkring årsskiftet 2024-25.

Derudover er der foretaget en yderligere sammenligning mellem DK-Modellens beregnede hydrologiske indeks for jordvandsindhold i rodzonen og vegetations data fra satellit-observationer over samme tidsperiode 1990-2023. Denne modelvalidering er beskrevet i nedenstående kapitel om "Indsats H3: Nye datamuligheder til overvågning og monitoring af tørke".



Figur 2-7 Validering af simulerede hydrologiske indeks fra Den National Hydrologiske Model i forhold til observationsbaserede hydrologiske indeks for vandindhold i rodzonen, vandføring i vandløb, øvre og dybe grundvand.

2.3 Perspektiver for forbedringer og udfordringer relateret til tørkemodellering

2.3.1 Modeller for rodzonen

Der findes en lang række forskellige hydrologiske modeller for simulering af jordvandsindholdet i rodzonen eller den umættede zone, som betegner den del af undergrunden som ikke er vandmættet og hvorfra planterne hovedsageligt får deres vandbehov dækket. I den version af Den Nationale Hydrologiske Model som er beskrevet i denne rapport anvendes en relativt simpel rodzonemodel som betragter hele rodzonen som én homogen boks, defineret ved rodtybden af vegetationen. Denne formulering er praktisk i beregningsøjemed, men giver nogle udfordringer i forhold til forståelse og kommunikation af simuleringer og sammenligning med observationer af jordfugtighed. Da rodzonens dybde varierer over året som funktion af planternes vækst, vil det simulerede vandindhold i rodzonen integrerer over en varierende dybde. Dette medfører at det absolutte simulerede vandindhold (f.eks. i volumen %) ikke på simpel vis kan sammenlignes med observerede værdier over tid. Derfor er det hydrologiske indeks bedre egnet, da dette normaliseres til årstiden og dermed til en given rodzone dybde. Ligeledes er det udfordrende at sammenligne modelsimuleret vandindhold i rodzonen med observationer fra en bestemt dybde eller med satellitdata som f.eks. estimerer vandindholdet i de øverste 5 cm af jorden.

For en mere detaljeret beskrivelse af rodzonen arbejdes der i øjeblikket på at inkorporere en ny model for rodzonen i Den Nationale Hydrologiske Model. Denne model er integreret i software systemet (MIKE SHE, [59]), og forventes at indgår i den næste version af DK-modellen, som ville være klar i starten af 2025. Med den nye rodzone model (*Gravity*), vil man kunne beregne vandindholdet for en helt specifik dybde (f.eks. 25 cm), eller integreret over en specifik dybde (f.eks. 0-100 cm). Dette vil gøre det simplere at visualisere og analysere tidsserier af absolut vandindhold og kommunikere dette via HIP platformen.

Der arbejdes ligeledes med at forbedre modellens inputdata og simuleringer med øget anvendelse af satellit data, både til at parametrisere modellen og vil at kalibrere den simulerede fordampning mod satellitbaserede estimater. I regi af Tørke projektet er der opstartet et arbejde på tværs af institutionerne omkring at tilvejebringe de bedst mulige satellitdata og satellitbaserede produkter.

2.3.2 Alternativ fordampningsberegning med brug af klimamodeldata

Fordampningen er særlig vigtig i tørkeregi, da sommertørker er tæt forbundet med sammenfaldet mellem lavere nedbør og højere fordampning i sommermånederne. Fordampning er særlig svær at måle og beregne. I flere hydrologiske, vegetations- og rodzonemodeller bruges den potentielle fordampning som basis for udregningen af aktuel (faktisk) fordampning. Det er også den fremgangsmåde, der benyttes i den Nationale Hydrologiske Model.

Den potentielle fordampning er et mål for den maksimale fordampning, der kan foregå, og er en tilnærmelse, der udregnes ved brug af meteorologiske data. Den angiver den potentielle

mængde vand, der kunne fordampes, hvis der var ubegrænset vand til rådighed. Det er således ikke en parameter, man kan måle direkte, men den potentielle fordampning kan approksimeres med forskellige formler (f.eks. Makkink, Hargreaves, Oudin, eller Penman-Monteith) af forskellig kompleksitet på baggrund af en eller flere målte klimavariabler såsom indstråling, vindhastighed, temperatur, og luftfugtighed.

Estimering af den potentielle fordampning er ret usikker og store forskelle ses ved brug af forskellige formler til udregning. Særlig problematisk bliver det, når de hydrologiske modeller bevæger sig ud i klimafremskrivninger, hvor klimavariabler fra observationer ikke længere er tilgængelige. Tidligere danske studier har brugt klimavariabler fra klimamodeller til at udregne potentiel fordampning, men usikkerheden på klimavariablerne er ukendte og svære at nedskalere til det danske område. De potentielle fordampningsudregninger for fremtiden er derfor i høj grad usikre.

Der er således et stort behov for at evaluere forskellige fordampningsestimater, særligt for fremtidige projektioner. Her kunne en mulig tilgang være at undersøge andre metoder og modelleringsværktøjer, der ikke er afhængig af en potentiel fordampningsberegning, f.eks. energibaserede fordampningsmodeller (f.eks. *Soil Vegetation Atmosphere Transfer*, SVAT), der ud fra energibalancen udregner den aktuelle fordampning direkte. Ved at bruge klimamodel-variabler i en sådan udregning er det muligt at sammenligne nuværende metoder baseret på potentielle fordampningsinput i de hydrologiske modeller. Derudover kan afvigelser eller ligheder undersøges med den type fordampning, der udregnes i klimamodellerne.

Hydrologiske modellers evne til tørkesimulering, f.eks. som funktion af deres evne til at beskrive effekten af ændringer i klima- og miljøforhold, kvantificeres (f.eks. *Differential Split Sampling Test*, DSST). Desuden anvendes der en såkaldt "*Robustness Assessment Test*" (RAT), hvor den hydrologiske models evne til at beskrive f.eks. fordampning, vandløbsafstrømning eller grundvandsstand, når miljøvariable som klima, arealanvendelse og landbrugspraksis, ændres. Vha. RAT kan modeller, som er uegnede til at håndtere ændringer i modelopsætning identificeres og forkastes.

Der er desuden behov for udvikling af metoder til vurdering af fremskrivningsusikkerhed, inkl. emissionsscenario, GCM/RCM, bias-korrektion, hydrologisk model (struktur, parameter). Der er også behov for at udvikle metoder til reduktion af usikkerhed (baseret på bl.a. match til observationer af hydrologiske variabler, i dette tilfælde fordampning).

3. Indsats H3: Nye datamuligheder til overvågning og monitorering af tørke

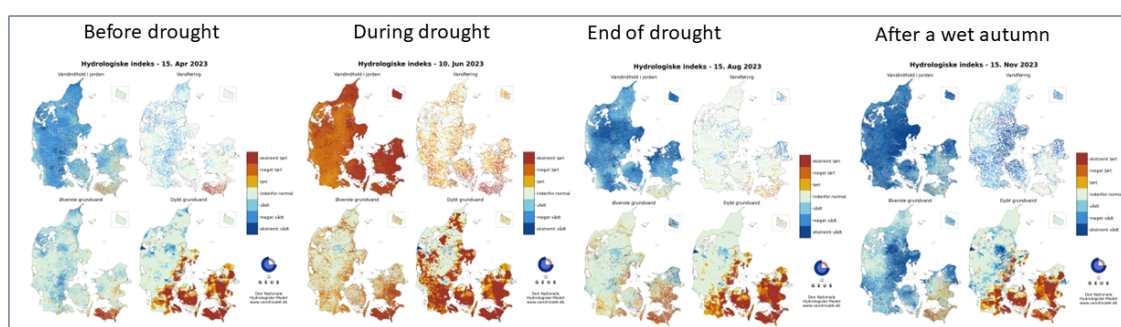
3.0 Indledning - Afdækning af tilgængelige data til overvågning

Dette afsnit har til formål at afdække nye muligheder for brug af tilgængelige data for kontinuerlig og opdateret overvågning og monitorering af hydrologisk tørke i Danmark. Disse data inddeles overordnet i modeldata og observationsdata. Som beskrevet er kombinationen af modeller og observationer optimal, da observationer har en stor præcision mens modeller har komplet rumlig og tidlig dækning, samt mulighed for prognoser.

3.1 Modeldata: DK-modellen i realtid og som prognosemodel

I dette afsnit beskrives modeldata udelukkende med udgangspunkt i Den Nationale Hydrologiske Model. Modellen har siden 2023 været en operationel model som en gang i døgnet opdateres med seneste døgns meteorologiske data og derved giver et øjebliksbillede af den hydrologiske tilstand i Danmark for hhv. vandindhold i rodzonen, vandføring, vandløb og grundvand. Der leveres dagligt modelsimuleringer i realtid og forecast til både DMI's oversvømmelsesvarsling og til KDS's HIP portal, hvor datavisualiseringen er under opbygning.

De hydrologiske indeks beregnes ligeledes hver dag og vises pt. På GEUS's hjemmeside og på sigt også i HIP. Særligt de hydrologiske indeks kan have stor værdi i forhold til overvågning af tørke, da de giver et godt øjebliksbillede af den hydrologiske tilstand og til illustration af hvordan en tørke-event strækker sig over tid og kan forplante sig i først jordvandsindholdet og siden vandløb og grundvand. Et eksempel på dette er en illustration af året 2023 udtrykt som kort over de hydrologiske indeks (*Figur 3-1*). 2023 var et usædvanligt vådt år, hvor de hydrologiske indeks var i blåt meget af året, men samtidigt havde vi en meget tør maj måned, hvor særligt den terrænnære hydrologi var præget af tørke. Som det fremgår af *Figur 3-1* bliver jordvand og vandløb hurtigt påvirket af et nedbørsunderskud i sommerperioden, mens grundvandet reagerer mindre og langsommere.



Figur 3-1 Året 2023 illustreret vha. hydrologiske indeks før, under og efter maj-juni tørken. Blå farver indikerer en tilstand som er vådere end normalt for årstiden, mens røde farver indikerer tørrere forhold end normalt.

GEUS vurderer at den operationelle Nationale Hydrologiske Model er et stærkt værktøj til at overvåge tørke i realtid og som prognoser. I forhold til prognoser, vil det særligt være længere sæsonprognoser (3-6 måneders horisont) som vil være relevante for tørke, da det hydrologiske system reagerer forskelligt på samme meteorologiske tørke afhængigt af den øjeblikkelige hydrologiske tilstand, særligt i grundvandet, som kan agere buffer for tørkeeffekter.

3.2 Observationsdata

En integreret monitoring af vandbalancekomponenter og meteorologiske variabler er afgørende for at forstå det hydrologiske system og for at køre, optimere og validere hydrologiske modeller som blandt andet bruges til at monitorere tørke. I *Tabel 3-1* ses nogle af de mest benyttede meteorologiske og hydrologiske observationer som bruges i arbejdet med hydrologiske modeller og som indsamles i nationale monitoringsnetværk.

*Tabel 3-1 Standard meteorologiske og hydrologiske variable som måles kontinuerligt ved adskillelige lokaliteter over hele landet. *Meter Under Terræn eller som kote (DVR90) i Meter Over Havniveau.*

Variable	Måleenhed
Nedbør	mm
Relativ luftfugtighed	%
Lufttryk	hPa
Lufttemperatur	grader celsius
Vindhastighed	m/s
Indkommende kortbølget stråling	W m ⁻²
Grundvandsstand	m.u.t eller kote m.o.h.*
Vandløbsafstrømning	m/s

3.2.1 Grundvandsstand

Historisk set har der været fokus på monitoring af grundvandsstanden i grundvandsmagasiner som benyttedes til vandindvinding, enten i form af indvinding til drikkevand, industri eller landbrug. Derfor findes der lange tidsserier for grundvandsstanden i dybere grundvandsmagasiner for specielt områder med drikkevandsinteresser, hvor forsyningsselskaber har overvåget tilstanden. Ca. 80 % af borerer der benyttes til drikkevand og industri i Danmark har indtag dybere end 20 m.u.t., mens 50 % har indtag fra 40 m.u.t., eller dybere. Derfor omtales grundvandsstanden, der optræder i disse grundvandsmagasinerne typisk som den dybe grundvandsstand.

I forhold til overvågning af tørke er det i midlertidigt problematisk at det øverste grundvandspejl, set fra jordoverfladen kun i ringe grad er monitoreret historisk. Det øverste frie vandspejl ligger typisk få meter under terræn og omtales ofte som det terrænnære grundvand (på engelsk *shallow groundwater*). I modelforstand benyttes begrebet *phreatic surface* til at udlede det terrænnære grundvandsspejl. Det terrænnære grundvand er vigtigt da det står i kontakt med overfladevand og dermed økosystemer (søer, åer, vådområder, våde enge, fjorde og hav) og dermed vil tørke i det terrænnære grundvand være kritisk for den økologiske funktion

af disse arealer. Under ca. to-tredjedele af det danske landareal står det terrænnære grundvand ikke i egentlige vandførende grundvandsmagasiner, men i moræneler og lign. lerede geologiske enheder med ringe hydraulisk ledningsevne (specielt horisontalt). For de lerede jorde er der derfor ringe horisontalt gennemstrømning i det terrænnære grundvand og tilstanden er derfor domineret af nedbør. Fælles for både det terrænnære og det dybe grundvand er, at der kun findes få tilgængelige observationer i realtid, som er nødvendige for at kunne evaluere, eller overvåge den aktuelle eller kommende tørkesituation i grundvandet. En modelvurdering af tørkesituationen for grundvandet bør altid valideres af reelle målinger, men disse har manglet for det danske område for at kunne lave præcis og lokal vurdering af tørkesituationen. GEUS har initieret et sådant system af realtidsmålinger (www.grundvandsstanden.dk), der ved udbygning fra de nuværende ca. 75 terrænnære og 50 dybe målestationer til de planlagte ca. 300 dybe og 300 terrænnære borer for delt jævnt over Danmark, vil kunne monitorere den danske tørke situation i grundvandet i langt højere grad. En sådan monitoring af specielt det terrænnære grundvand vil desuden være særdeles relevant for varsling af oversvømmelse.

GEUS laver med baggrund i den opstartede monitoringsindsats en statistisk vurdering af grundvandsstanden i realtid. Denne vurdering foregår dagligt ud fra målinger og stilles frit tilgængeligt i realtid på grundvandsstanden.dk. Udover at overvåge den aktuelle tørkesituation giver realtidsdata for grundvandsstanden også mulighed for månedspredninger og sæsonpredninger af grundvandsstanden, og den tilgængelige grundvandsressource. Det er særdeles relevant for tilpasning af f.eks. landbrugets vandingsbehov og den tilgængelige vandressource, der vil variere mere fra år til år end under et fremtidigt klima.

3.2.2 Sensornetværk på jordvandsindhold

En integreret monitoring af vandbalancekomponenter og meteorologiske variable (Tabel 3.1) er afgørende for at forstå det hydrologiske system og for at køre, optimere og validere hydrologiske modeller som blandt andet bruges til overvågning af tørke.

Jordfugtigheden kontrollerer fordelingen af solenergi til sensibel (opvarmning) og latent (fordampning) varme, samt fordelingen af nedbør til overfladeafstrømning og infiltration i jorden. Robuste observationer af jordfugtigheden er afgørende for at observere og overvåge tørke da jordfugtigheden direkte afspejler mængden af vand der er tilgængelig for planter/afgrøder og økosystemer. Derudover kan ændringer i jordfugtigheden give tidlige indikatorer på tørke [26] som kan hjælpe til rettidig tilpasning af landbrugspraksis og vandforvaltning.

Jordfugtigheden måles på nuværende tidspunkt ikke systematisk i et nationalt monitoringsnetværk og indgår ikke i tørkeovervågningen. Jordfugtigheden, som i høj grad er styret af terræn, jordstruktur og jordsammensætning, varierer betydeligt over korte afstande [63]. Den rummelig småskala heterogenitet i jordfugtigheden øges yderligere i beplantede områder hvor vegetationen redistribuerer nedbøren og hvor planternes optag af jordvand varierer med røddernes rummelige fordeling. Det er derfor udfordrende at repræsentere jordfugtighedens dynamik på mark- eller skovniveau ved hjælp af få konventionelle punkt-skala målestationer. For at forbedre overvågningen af tørke er det afgørende at der indsamles tidsserier af jordfugtighed i rodzonen som integrerer over disse lokale småskala variationer og er

repræsentative for den rummelig opløsning som anvendes i hydrologiske modeller. Model-
lerne som benyttes til tørkeovervågning, er typisk opstillet med en horisontal diskretisering
på 100 x 100 m eller 500 x 500 m.

Tidsserier af jordfugtighed som er repræsentative for større områder (mark og skovplot) kan
opnås ved hjælp af *cosmic-ray* neutron (CRN) metoden. Som tidligere nævnt, integrerer
CRN-metoden over et areal af nogle hundrede meter og måler i 15-55 cm dybde afhængig
af jordfugtigheden, hvor der måles dybere ned i jordsøjlen når jorden er tør [64]. Metoden
blev introduceret i 2008 [65] og baserer sig på den inverse relation mellem den kosmiske
baggrundsstråling og hydrogenindholdet i måleområdet. Metoden er siden dens introduktion
blevet udviklet og testet ved forskellige jordtyper og arealanvendelser, og er i dag en veletab-
leret metode med flere hundrede stationære målestationer på verdensplan [66]. CRN-signa-
let korrigeres for ændringer i det atmosfæriske tryk, fugtigheden i luften og intensiteten af
den indkommende kosmiske stråling. CRN-signalet påvirkes af alle puljer af hydrogen som
findes i måleområdet (vegetation, organisk materiale i jorden, blade og trænaale på jorden
kaldet litterlaget), hvilket der skal tages højde for med korrektioner eller stedsspecifikke CRN-
til-jordfugtighed konverteringsfunktioner for at sikre en tilstrækkelig præcision i jordfugtig-
hedsestimaterne.

Den nylig introducerede *gamma-ray* spektrometri (GRS) jordfugtighedsmålemetode baserer
sig på den inverse relation mellem baggrundsstrålingen der udsendes fra naturligt forekom-
mende og menneskabte radionuklider i jorden (K-40, U-238, Th-232 og Ce-137) og jordfug-
tigheden [67, 68]. Koncentrationen af de forskellige radionuklider kan udledes da de hver
især har unikke henfaldsserier. Området som GRS-signalet integrerer over afhænger af må-
lehighjden. Ved en målehighje på 2 meter repræsenterer GRS-målingerne et område på 20-
30 meter i radius fra GRS-sensoren, hvor målingerne foretaget i en highje på omkring 30
meter integrerer over et område svarerende til CRN-metoden. Måledybden varierer for de
forskellig nuklider. Cs-137 signalet er det mest overfladenære (ned til 5-10 cm), mens de
mere højeenergi nuklider er påvirket af jordfugtigheden dybere nede i jordsøjlen. For K-40
måles der ned til 19-28 cm dybde, hvor der for Th-232 signalet måles til 24-36 cm dybde [69].
GRS-metoden forventes at være særligt velegnet til estimering af jordfugtighed på mindre
landbrugsmarker samt i skovområder, da GRS-signalet bliver mindre påvirket af vegetation
og nedbør, der opsamles i trækronerne, sammenlignet med CRN-metoden.

Der er etableret et Europæisk sensornetværk (*COSMOS-Europe*) for jordfugtighed baseret
på *cosmic-ray* sensorer [70]. Særligt i Tyskland har man et betydeligt nationalt sensornetværk
af *cosmic-ray* sensorer og dette netværk anvendes til både tørkemonitering samt til løbende
forbedringer af den hydrologiske model bag den tyske "*Drought monitor*" [71] samt satellit-
baserede jordfugtighedsprodukter [72]. Der er et lignende potentiale for at udbygge det ek-
sisterende danske *cosmic-ray* netværk og inkorporere data i tørkemonitering og hydrologisk
modeludvikling.

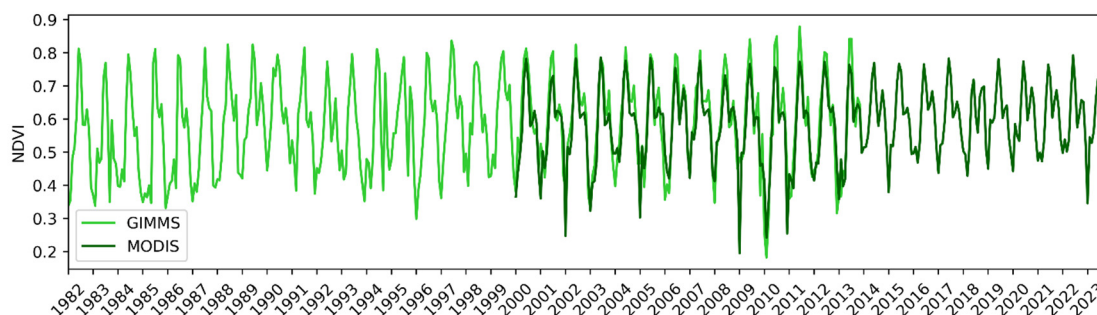
3.2.3 Remote sensing data til overvågning

Fordelen ved at anvende satellitdata til overvågning og monitorering af tørke er den gode rumlige og tidsmæssige dækning, som giver mulighed for et konsistent billede af tørkesituationen. Ulempen ved satellitdata er dog, at der ikke findes en direkte observation af relevante hydrologiske variabler. Satellitsystemer observerer refleksionen fra jordens overflade i forskellige bølgelængder. Disse bølgelængder er følsomme over for arealanvendelse og kan blandt andet bruges til at skelne mellem vand, vegetation, bar jord osv. Vi har valgt at analysere bølgelængder der er følsomme overfor vegetationen, fordi vi forventer en sammenhæng mellem tørke og vegetation. Dårlig plantevækst er en konsekvens af tørke og vil kunne observeres på tværs af alle arealanvendelser med vegetation.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) er beregnet på baggrund af røde og nær-infrarøde bølgelængder og varierer mellem -1 og 1. Værdier over 0,7 kan tilskrives god plantevækst, mens værdier under 0,4 kan forklares med plantestress. NDVI er mest udviklet til overvågning af afgrøder, men kan bruges til at analysere alle arealanvendelser med vegetation. Dog er en direkte sammenligning på tværs af arealanvendelser ikke altid mulig.

Vi sammenstiller data fra to satellitsystemer for at generere en lang tidsserie af vegetationsdynamikker for hele Danmark. Først bruger vi NASA's AVHRR (*Advanced Very-High-Resolution Radiometer*) afledt GIMMS (*Global Inventory Monitoring and Modeling System*) NDVI-data fra perioden 07/1981 til 12/2013, som er et månedligt produkt med en opløsning på cirka 10 km (1/12 grader). Derudover anvender vi NASA's MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) NDVI-data, som er tilgængelige siden 2000, også som et månedligt produkt med en opløsning på 1 km (MOD13A3 v061). Vi hentede datasættene via Google Earth Engine-platformen. Derefter ændres koordinatsystemet til EPSG:25832. Dataene renses for at fjerne celler der ikke er skyfri ved hjælp af QA (*Quality Assessment*) båndet. Billederne beskæres til Danmark, hvorefter resultaterne for NDVI beregnes og visualiseres.

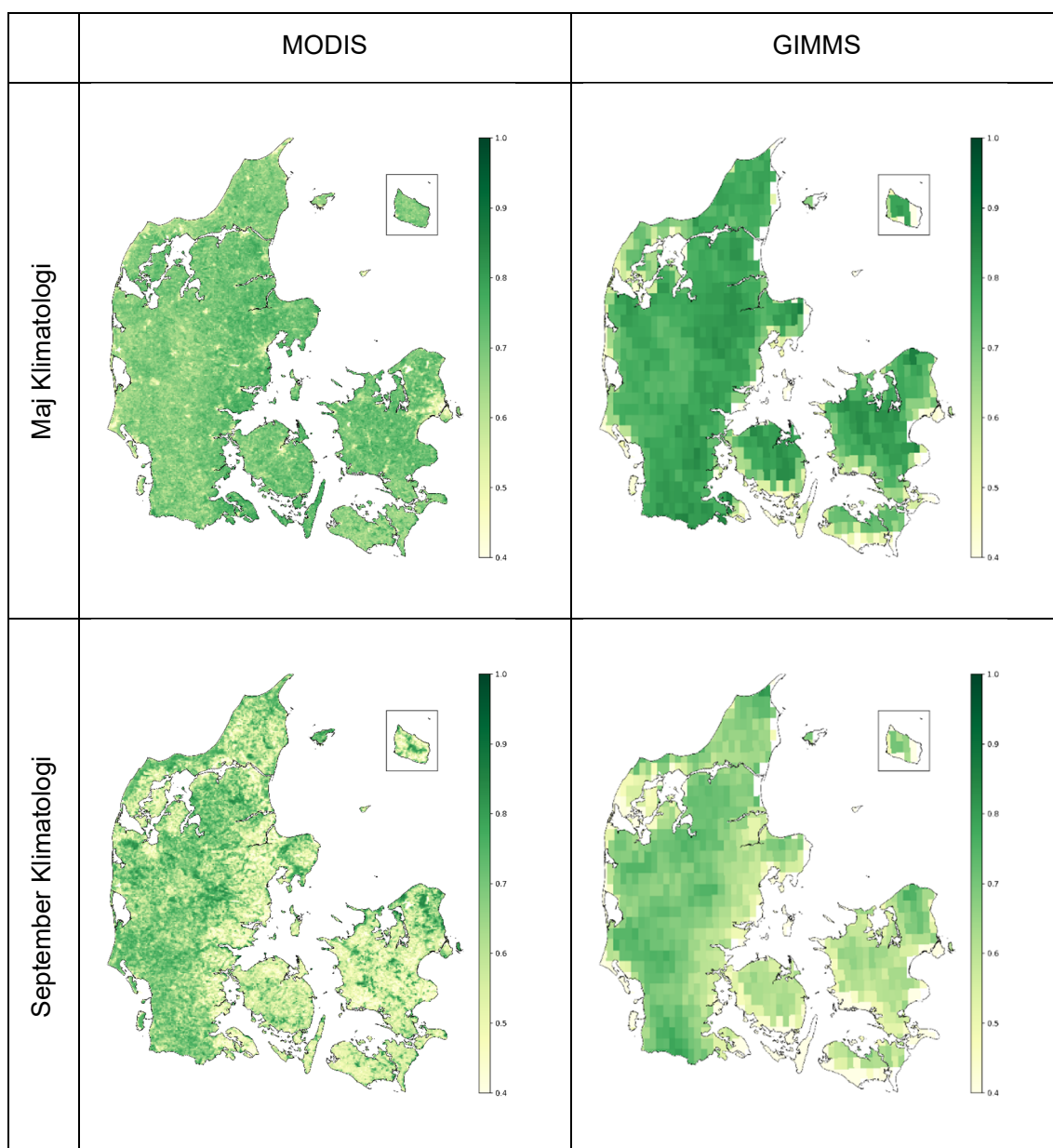
Vi beregner et vegetationsindeks på månedsbasis ved hjælp af en grid-baseret anomalianalyse. For hver måned trækkes middelværdien for den tilsvarende måned fra, og resultatet divideres med standardafvigelsen for samme måned. Denne metode følger den samme ligning, som anvendes for *Standardized Groundwater Depth Index* (SGDI), se afsnit 1.2.2. For at gøre sammenligningen af vegetationsindekset mellem GIMMS og MODIS muligt, anvendes den samme referenceperiode (2000-2013) til beregning af månedsmiddelværdier og standardafvigelser.



Figur 3-2 Tidsserier af månedlig NDVI aggregeret til national skala.

MODIS- og GIMMS-baserede NDVI-data på månedsbasis er illustreret i *Figur 3-2*. Den typiske sæsonvariation fremhæves, hvor den mest udprægede vegetation ses om sommeren (NDVI op til 0,8). Da størstedelen af arealanvendelsen i Danmark er landbrug, fører høstning af afgrøderne til et fald i NDVI i sensommeren. Den anden NDVI-peak i sensommeren relaterer sig til en to-afgrøde system nogle steder, men også efterafgrøder på markerne. Vinterværdierne er generelt lavere (NDVI omkring 0,4), men skal tolkes med forbehold, da vinterbilleder er meget påvirket af skyer. I perioden, hvor både MODIS og GIMMS er tilgængelige (2000-2013), observeres en fin overensstemmelse mellem de to satellitsystemer, når data aggregeres på landsplan med en korrelationskoefficient af 0,9.

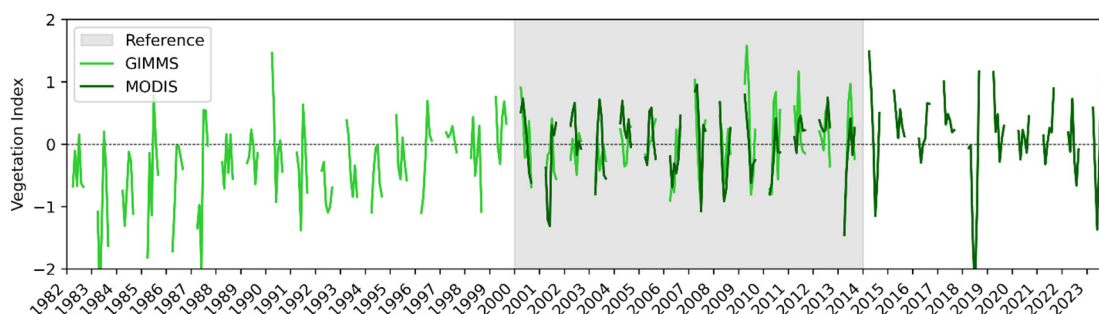
De rumlige NDVI-mønstre er illustreret i *Figur 3-3* for en maj- og september-klimatologi, beregnet som middelværdi på tværs af referenceperioden (2000-2013) for både MODIS og GIMMS. Urbane områder adskiller sig med lavere NDVI-værdier. I den tidlige vækstsæson (maj) er NDVI generelt højt over hele Danmark. Vestjylland har en tendens til at ligge lidt lavere end resten af Danmark. De sandede jorde, med en lavere markkapacitet end de mere lerede jorde i Østdanmark, har en hæmmet vegetationsvækst på grund af begrænset vandtilgængelighed. Derudover er der også forskel i afgrøderne, for eksempel majs i vest og vårbyg i øst som er med til at forklare forskellene. I september er markerne blevet høstet i Østdanmark, hvorimod afgrøderne i Vestjylland endnu ikke er høstet, hvilket afspejles i de forhøjede NDVI-værdier i vest overfor øst. Skovområder på Sjælland er dog stadig meget tydelige med høje NDVI-værdier. De beskrevne overordnede dynamikker ses i både MODIS og GIMMS, men den ringere rumlige opløsning i GIMMS udglatter detaljerne. Derudover fører de større gridceller i GIMMS til en blandingseffekt af land og hav langs kysterne, hvilket generelt giver lavere værdier og vanskeliggør tolkningen af GIMMS-data.



Figur 3-3 NDVI-klimatologikort for månederne maj (øverste række) og september (nederste række) for MODIS (venstre kolonne) og GIMMS (højre kolonne). Referencen er 2000 - 2013 (14 år).

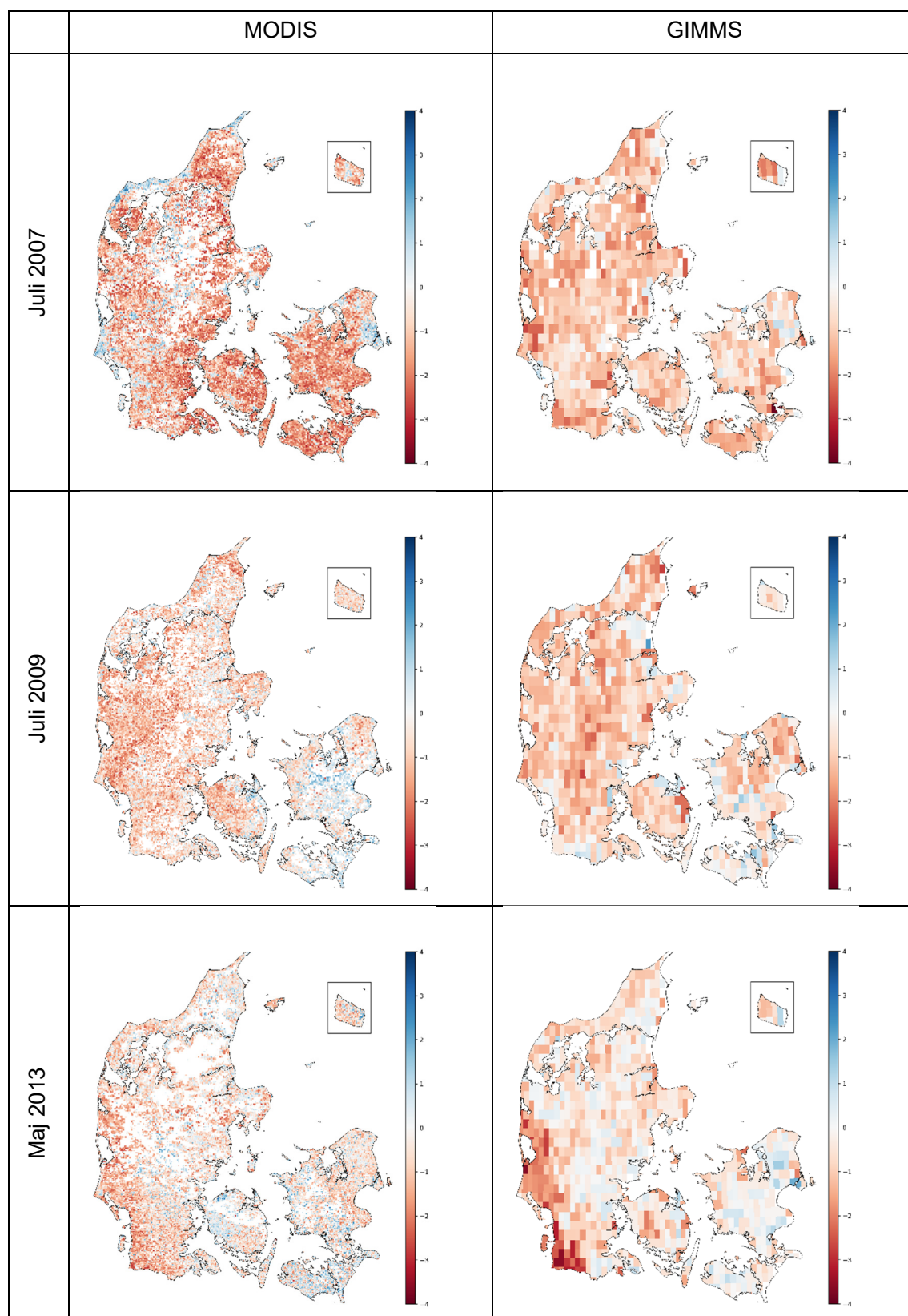
Det forventes ikke, at tørkes effekt på vegetationen opstår om vinteren, hvor manglen på energi er den begrænsende faktor for vegetationsvækst. Derfor vises det beregnede vegetationsindeks, aggregeret til hele Danmark, kun for månederne fra april til september (Figur 3-4). Negative indekser, som muligvis kan forklares med vandmangel og dermed tørke, kan enten forekomme som en enkelt måned i et år eller en hel vækstsæson kan også tilskrives med negative værdier. De seneste tørkesomre i 2018 og 2023 er tydelige i MODIS-data. GIMMS-afledte vegetationsindekser viser en stigende tendens fra 1980'erne til 2000'erne, hvilket kunne skyldes en generel stigning i NDVI. Men dette kunne også forklares med de forskellige AVHRR-satellitter, der ligger til grund for GIMMS-produktet, som muligvis ikke er interkalibreret korrekt over Danmark. Vores analyse kan ikke belyse årsagen til denne positive stigning. Vegetationsindekser afledt fra MODIS og GIMMS har en korrelationskoefficient

på 0,54 for månederne i vækstsæsonen, hvor der i flere år er god synkronisering af fald og stigninger i vegetationsindekserne, for eksempel i 2007 og 2008. I en tørkesammenhæng er de negative vegetationsindekser af størst relevans. Positive værdier kan forklares med måneder med optimale vejrforhold, dvs. tilgængelighed af både vand og energi. Klima er dog ikke den eneste styrende faktor i denne analyse, da ændringer i arealanvendelse også kan påvirke vegetationen. Da vegetationsindekset er aggregeret for hele Danmark, forventes det, at variationer i arealanvendelse vil udligne sig selv.



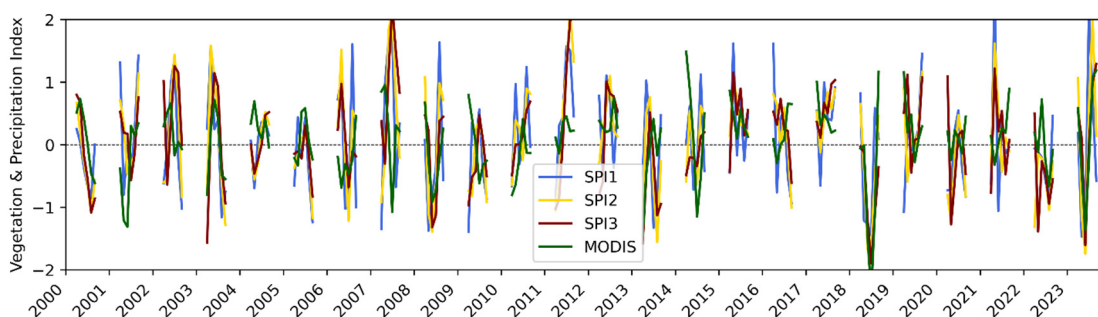
Figur 3-4 Tidsserier af månedlige vegetationsindeks aggregeret til national skala kun for sommermånederne (april - september). Referencen er 2000 - 2013 (14 år).

I modsætning til de rumligt aggregerede data vist i *Figur 3-4*, viser *Figur 3-5* de rumlige mønstre af vegetationsindekset for tre udvalgte måneder i perioden 2000-2013, hvor både MODIS- og GIMMS-data er tilgængelige. Forskellen i rumlig opløsning, hvor MODIS har 1 km og GIMMS 10 km, er meget tydelig. Kortene illustrerer, at negative vegetationsindekser, som muligvis er tegn på vandmangel og dermed tørkekonsekvenser, kan variere rumligt. De tre måneder er valgt, fordi det aggregerede indeks viser et tydeligt negativt signal, men samtidig afslører de stor rumlig variation. For eksempel er dele af Sjælland i juli 2009 ikke påvirket af vegetationsstress, mens vegetationen i maj 2013 er mest påvirket i syd- og vestlige Jylland. MODIS og GIMMS viser delvist god overensstemmelse i at identificere områder, hvor vegetationen er mere eller mindre påvirket.



Figur 3-5 Vegetationsindeks afledt af MODIS (venstre kolonne) og GIMMS (højre kolonne) for månederne: Juli 2007 (øverste række), juli 2009 (midterste række) og maj 2013 (nederste række).

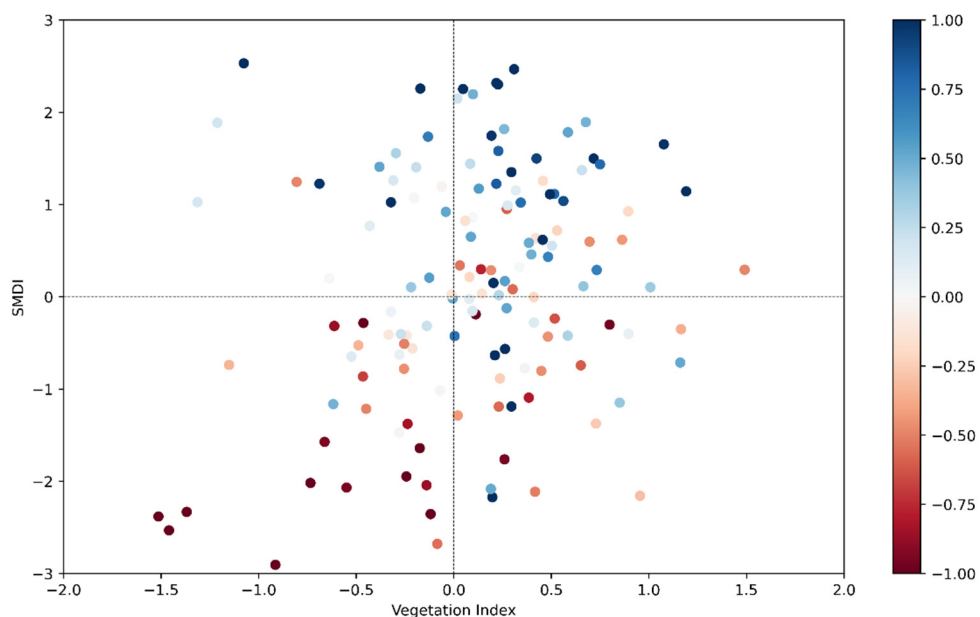
Der forventes en forsinkelseffekt mellem nedbørsdeficit og vegetationspåvirkning. Vand i rodzonen eller terrænnære grundvandsforekomster kan opretholde transpiration og plante-sundhed i perioder med nedbørsunderskud. *Figur 3-6* viser det MODIS-baserede vegetationsindeks og nedbørsindekset SPI for tre aggregeringsperioder: 1, 2 og 3 måneder. Synkroniseringen af negative vegetationsindekser og nedbørsunderskud bliver mere tydelig ved en aggregeringsperiode på 2 og 3 måneder. Korrelationskoefficienten mellem vegetationsindekset og SPI stiger fra 0,11 til 0,31 og til 0,35 for henholdsvis SPI1, SPI2 og SPI3. Dette understreger forsinkelsen mellem nedbørsunderskud og påvirkningen af vegetationen. Derudover understreger det også at en enkelt måned med nedbørsunderskud ikke er tilstrækkeligt til at påvirke vegetationen, på grund af bufferkapacitet i af jordvand og terrænnært grundvand.



Figur 3-6 Tidsserier af MODIS-afledte månedlige vegetationsindeks og standardiserede nedbørsindeks (SPI) aggregeret til national skala kun for sommermånederne (april - september). SPI er vist for tre aggregeringsperioder: 1, 2 og 3 måneder.

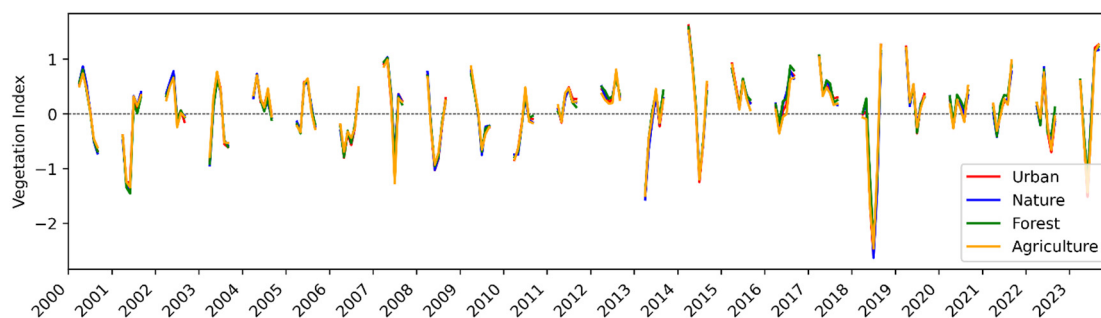
Satellitbaserede vegetationsindekser har potentiale til at udvide valideringen af DK-modellen. Det kan anses som en proxy-validering, fordi det ikke er en til en sammenligning af den samme variable, observeret og modelleret. Gennem vores analyse har vi vist, at et nedbørsdeficit påvirker vegetationen med et 2-3 måneders aggregeringsvindue. Dette indikerer, at jordfugtighed har potentiale til at kompensere kortvarige nedbørsunderskud. Koblingen mellem vegetation og jordfugtighed er naturlig, og det åbner op for en sammenligning mellem vegetationsindekset og SMDI.

Der er ingen grund til at antage, at et positivt vegetationsindeks skyldes et nedbørsoverskud, da vegetationsudviklingen i Danmark primært er energibegrænset. Derfor skal sammenligningen mellem vegetationsindekset og SMDI begrænses til måneder med et nedbørsunderskud. *Figur 3-7* sammenligner SMDI og vegetationsindekset under hensyntagen til SPI med et 3-måneders aggregeringsvindue. Hvis sammenligningen udelukkende sker for måneder med SPI lavere end -0,5, er korrelationskoefficienten 0,63 (n=56). For alle april til september måneder er korrelationskoefficienten kun 0,32.



Figur 3-7 MODIS-afledt vegetationsindeks plottet mod indeks for jordfugtighedsunderskud (SMDI). Dataene er på månedlig tidsskala og aggregeret til national skala. Farvelægningen er i forhold til det standardiserede nedbørsindeks (SPI3) for den respektive måned med en aggregeringsperiode på 3 måneder.

Figur 3-8 viser MODIS-baserede vegetationsindekser med forskellige aggregeringer i forhold til de dominerende arealanvendelser. Arealanvendelserne er kortlagt via Basemap04. Der kan ikke ses nogen tydelig forskel mellem kurverne, hvilket sandsynligvis skyldes den grove rumlige opløsning valgt for analysen (1 km).



Figur 3-8 MODIS-afledt vegetationsindeks aggregeret for forskellige arealanvendelser.

3.3 Perspektiver og anbefalinger

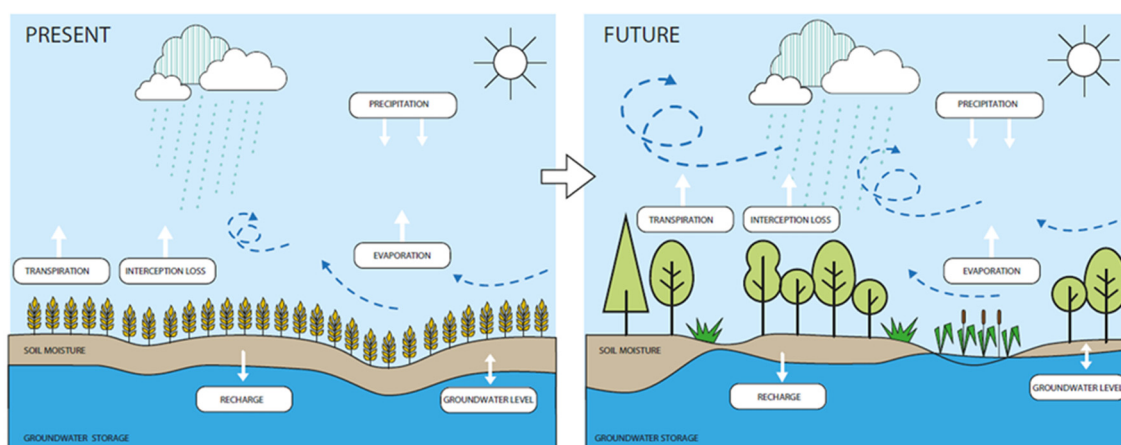
3.3.1 Anbefalinger til nye datamuligheder

- Kombinationen af modeller og observationer giver den bedste dækning via observationernes høje præcision og modellernes nationale dækning og prognosemuligheder.
- Den operationelle Nationale Hydrologiske Model kan allerede nu bruges til at indgå i tørkeovervågning i realtid og som prognoser, særligt sæsonprognoser (3-6 måneders horisont) er relevante for det hydrologiske system.
- Overvågning af grundvandsstand i realtid og beregning af statistiske normaler kan i dens nuværende form (grundvandsstanden.dk) indgå i et tørkeovervågningsprogram. For at have en landsdækkende overvågning af grundvandsstand skal antallet af monitoringspunkter øges.
- Et nationalt netværk af CRN- og GRS-målinger af jordfugtighed i realtid vil være et vigtigt værktøj til at etablere overvågningen af jordtørke, samt understøttelse af hydrologisk modellering af jordfugtighed.
- Vegetationsindekser baseret på satellitdata har stort potentiale til både at udvide valideringen af modeller, samt som overvågningsværktøj under tørkeevents. Denne analyse har været målrettet den tidslige dimension, og fremadrettet kan fokuseres mere på den rumlige dimension med satellitdata i høj rumlig opløsning. Deraf følger en udvidelse af rumlig validering mellem DK-modellen og vegetationsindekset.

3.3.2 Muligheder for ny viden om tørke og ændringer i arealanvendelse

I Naturprojekt Holmehave omdannes et stort sammenhængende område med landbrugsmarker til skov og vådområder for at beskytte grundvandet ved Danmarks største kildeplads på Fyn. De skitserede ændringer i projektområdet, fra et nuværende landbrugsdomineret landskab til et fremtidigt naturlandskab, er illustreret i *Figur 3-9*. Indenfor rammerne af dette projekt undersøges og kvantificeres effekten på det hydrologiske system af sådan en gennemgribende ændring i landskabet. Dette gøres ved hjælp af en bred vifte af meteorologiske og hydrologiske målinger som indsamles med konventionelle og innovative måleinstrumenter (*Tabel 3-2*).

Samtidige målinger af jordfugtighed, nedbør, evapotranspiration og andre variabler vil også kunne bruges til at skabe et mere komplet billede af de hydrologiske og klimatiske forhold, der definerer tørke og hvordan tørken udvikler sig ved forskellige arealanvendelser. Målinger fra Naturprojekt Holmehave vil fremhæve vigtigheden af observationsdata og præcisere, hvilke variable, der især kan forbedre tørkeovervågningen og forudsigelsen af tørkeintensiteten og -omfanget.



Figur 3-9 Meteorologiske og hydrologiske processer ved det nuværende landbrugsdominerede landskab og i fremtidens naturlandskab med en mosaik af vådområder og skov med lysåbne områder.

I Naturprojekt Holmehave er fire klimastationer under etablering indenfor <1 km afstand, hvor de samme jordbunds- og vejrforhold er gældende. De etableres alle på landbrugsmarker, hvor tre af stationerne er placeret på arealer som indenfor det næste år omlægges til hhv. vådområde, højskov og nat. urskov. Skovene vil bestå af flere forskellige træarter. I højskoven, hvor produktionen af tømmer er prioriteret, vil træerne plantes tættere end i naturskoven, hvor biodiversitet med underbevoksning og lysåbne områder er mere i fokus. Den fjerde station er placeret i et område hvor konventionel landbrugsproduktion fortsætter og stationen vil fungere som en bestandig reference til at vurdere effekten af blandt andet skovrejsning. Den terrænnære grundvandsstand måles jævnt fordelt udover det 800 ha store projektområde men også koncentreret i en transekt ved klimastationerne. Vandføringsstationer vil blive etableret i udløbene af projektområdet samt opstrøms og nedstrøms i de forskellige forgreninger af åsystemet.

Tabel 3-2 Ekstra observationsdata som måles i Naturprojekt Holmehave (udover variabler listet i Tabel 3.1). *Ved en målehøjde på 2 m.

Måleinstrument	Variable	Måleenhed	Rummelig skala
CR2000/B cosmic-ray neutron sensor system	Jordfugtighed	-	Nogle hundrede meter
MS1000 gamma-ray spektrometri sensor	Jordfugtighed	-	Omkring 25 m i radius*
CNR4 Net radiometer	Indkommende og udgående kortbølget og langbølget stråling	W m-2	Omkring 20 m i radius*
LI-710 evapotranspiration sensor	Evapotranspiration	mm	Nogle hundrede meter
	Sensibel varme flux	W m-2	
	Latent varme flux	W m-2	

4. Indsats H4: Værktøjer til planlægning og link mellem modelsimuleringer (eller måledata) og konsekvenser af tørke

4.0 Indledning

I de sidste år har Danmark været ramt af flere kraftige tørkehændelser, hvor sommertørken i 2018 er mest bemærkelsesværdig. Den forårsagede store finansielle tab i landbruget pga. svigtende udbytter, lidende natursystemer såsom søer, vandløb og vådområder, samt sætningsskader på bygninger. Tørken i 2018 var også en drivende faktor for optagelsen af heдебølge og tørke som 'hændelsestype' i Nationalt Risikobillede af Beredskabsstyrelsen, og indførelsen af tørke som en del af Naturskaderådets erstatningsordning, der vurderer, hvorvidt hændelser kan kategoriseres som en af fire naturfænomener: tørke (bygningsskader), stormflod (oversvømmelse fra havet), stormfald (orkaner, der vælter skove) og oversvømmelse fra søer og vandløb. Skader fra disse hændelser dækkes normalt ikke af private forsikringer, men dækkes af Naturskaderådet hvis skaden opfylder gældende lovkrav. Efterfølgende har mindre tørker i 2022 og 2023 ført til lignede forekomster af skader og indvirkninger på samfundet. Historisk set har Danmark oplevet langvarige tørkeperioder forårsaget af ringe mængder vinternedbør, særlig synligt i grundvandet, fx omkring året 1996. I EU's klimatilpasningsstrategi [73] fremhæves det, at ved en 3 graders global opvarmning vil tørke optræde med dobbelt så stor hyppighed som i dag med potentielt store økonomiske og naturmæssige konsekvenser.

I dette kapitel betegnes skader eller påvirkninger forårsaget af tørke som tørkekonsekvenser. Tørkekonsekvenser er dermed en betegnelse for påvirkninger (eng. *impact*) af samfund og natur, f.eks. udbyttetab under høsten, sætningsskader på huse, eller negativ påvirkning af økosystemer. Historiske tørker, som tørken i 2018, kan observeres i både monitoringsnetværk og modelberegninger af det hydrologiske system, som anomalier eller afvigelser fra det, der normalt observeres for den pågældende lokalitet, variable og årstid. Men korrelationen mellem den målte/beregnete anomali og hvornår den faktiske tørkekonsekvens manifesteres i samfundet, er ikke altid kendt, som f.eks. en sammenhæng mellem et jordvandindholdsindeks og en bygningsskade.

Dette kapitel består af to overordnede afsnit. Afsnit 4.1 består af en beskrivelse af et genereret redskab til vurdering af hydrologisk tørke. Vurderingsredskabet beskriver en systematisk arbejdsgang for opgaven med at korrelere konsekvenser af tørke, som de opleves af samfundet, med målte/beregnete hydrologisk datasæt (f.eks. jordvandindhold, eller grundvandsstand) med henblik på at afdække muligheder for udvikling af fremtidige planlægningsværktøjer. Afsnit 4.2 dækker brugen af vurderingsredskabet på udvalgte tørkekonsekvenser. Arbejdsopgaven er koordineret med KDSs indsats om "Konsekvensanalyse", der har til formål at "... kortlægge og belyse konkrete konsekvenser for tørkeberørte sektorer", hvor den konkrete information og data om historiske tørkehændelser indhentes.

4.0.1 Relevans og Planlægningsværktøjer

Hvis det er muligt at identificere en sammenhæng mellem anomalier og konsekvenser kan korrelationen give information, der er relevant på flere tidshorisonter:

1. Historisk vil en sådan kobling kunne bidrage til en forståelse for, hvornår en historisk hændelse kan kategoriseres som en betydelig tørkehændelse og ikke blot en hydrologisk anomali af en vilkårlig størrelse. For eksempel beskriver Naturskaderådet i deres bekendtgørelse at "*Ved tørke forstås kraftig udtørring af den ikke-overfladiske jordbund*", men en præcis definition af kraftig udtørring mangler. Til sammenligning er formuleringerne om vandløbsoversvømmelse langt mere håndgribelige, idet de er defineret som en 20 års hændelse af vandstanden. Der beskrives også, at "*Afgørelse af, om der har været tørke, træffes af Naturskaderådet ud fra en uvildig undersøgelse af forholdene på skadesstedet*". En mere generisk kobling mellem anomaliens størrelse og sandsynligheden for tørkekonsekvensens indtræden vil således kunne underbygge Naturskaderådets og øvrige analyser af indmeldte naturskader.
2. For realtid og nær fremtid, betyder en robust korrelation, at det med større sikkerhed er muligt at bruge modelberegninger, som *forecasts* og sæsonprognoser. Dermed om en forudsagt anomali, blot er en statistisk anomali (i forhold til en normal situation) eller om afvigelsen er tilstrækkelig til at resultere i tørkekonsekvenser. Denne viden er central for at forberede samfundet og igangsættelse af forebyggelsesinitiativer.
3. Fjern fremtid, her kan sammenhængen muliggøre, at klimafremskrivninger og en analyse af de fremskrevne anomalier, kan pege på omfanget af tørkekonsekvenser i fremtiden. Herunder assistere til en velovervejet og –informeret klimatilpasning og forebyggelsesstrategi.

Helt konkret kan en succesfuld kobling mellem anomalier og tørkekonsekvenser dermed potentielt bidrage til en øget mulighed for at planlægge og afbøde tørkekonsekvenser på kort og lang bane. Hvis information og viden tilgængeliggøres gennem egnede planlægningsværktøjer.

Et planlægningsværktøj er her defineret som et eller flere relevante datasæt, der gøres tilgængelig for offentligheden og tjener som værdifulde informationskanaler til beslutningstagere og planlæggere gennem platforme eller hjemmesider. Et eksempel på et datasæt, der kunne indgå i et planlægningsværktøj til klimatilpasning, er et risikokort for områder med stor risiko for revnedannelser på huse som følge af tørke. Et andet eksempel, er en beskrivelse/indikation af buffer-kapaciteten i det hydrologiske system ved begyndelsen af en vækstsæson, der indikerer systemets robusthed over for sommerens tørke. Robustheden kan baseres på realtidsmålinger af grundvandsstanden [74] og kombineres med modelbaserede sæsonprognoser, der giver et indblik i, vandtilgængeligheden for planterne, hvis sommeren skulle vise sig at blive unormalt tør.

På lang sigt kan det være nødvendigt yderligere at tage højde for samfundets respons til afbødning af tørkekonsekvenserne (den menneskelige påvirkning af tørken, kaldet "antropogen tørke" [75]. Eksempelvis ved at beregne stigningen i grundvandsbaseret mark- og havevanding, der afbøder konsekvenserne for landbrug og private haver, men potentielt medfører negative konsekvenser for den almene vandforsyning, og afstrømningen i vandløb samt forbundne økosystemer på grund af faldende grundvandsspejl. Faldende grundvandsspejl pga.

øget vandindvinding medfører potentielt ringe kvantitativ tilstand for vandressourcerne ifølge Vandramme- og grundvandsdirektivernes [76] påkrævede tilstandsvurderinger, som skal tage hensyn til både vandforsyning og natur.

Fordelene ved at identificere sammenhængen mellem målte/beregnete anomalier og tørkekonsekvenser, for at kunne opstille fremtidige planlægningsværktøjer er således åbenlyse. Det er imidlertid ikke trivielt at opstille en sammenhæng mellem anomali og tørkekonsekvens. Først og fremmest kræver etableringen af en kobling tilstrækkeligt med data for tørkekonsekvenserne, både i tidlig og rummelig opløsning. Derudover kan anomalier repræsenteres og udregnes på mange forskellige måder, f.eks. gennem tørkeindekser eller andre statistikker. Her må det antages, at der findes nogle anomali-beregninger, der har en bedre kobling til tørkekonsekvenser end andre under danske forhold.

Det er desuden en udfordring, at koblingen skal identificeres for hver type tørkekonsekvens og hver slags måling/beregning i det hydrologiske system. Tørkekonsekvensen kan desuden være influeret af mere end en måling/simulering (fx kan vegetationsdød potentielt både relateres til jordens vandindhold og grundvandsstanden), forsinkelser (f.eks. kan en anomali i grundvandet føre til problemer på et senere tidspunkt), lokale forhold (f.eks. er nogle jorde mere udsatte end andre ift. udtørring), mm. Arbejdsgangen under identifikationen af en mulig korrelation, og potentialet for planlægningsværktøjer, er dermed kompliceret.

Det er baggrunden for udarbejdelsen af det følgende vurderingsredskab af hydrologisk tørke i afsnit 4.1, der systematiserer arbejdsgangen af de nødvendige trin i analysen.

4.1 Redskab til vurdering af hydrologisk tørke.

Vurderingsredskabet er delt op i en forundersøgelse af litteraturen og tre hovedtrin: 1) Databelysning, 2) Korrelation mellem observerede tørkekonsekvenser og måle- og modelresultater, 3) Perspektivering.

I forundersøgelsen afsøges litteraturen for relevante artikler, relevant EU-lovgivning, relevante interessenter og andre typer af informationer om et område af samfundet, der har oplevet påvirkninger under tørkeperioder. Her identificeres de typer af tørkekonsekvenser, der er rapporteret i litteraturen og under historiske danske tørkehændelser. Ud fra denne forundersøgelse udvælges en eller flere tørkekonsekvenser til videre analyse. Et eksempel kunne være landbruget som et område af samfundet, og en identificeret tørkekonsekvens kunne være udbyttetab. De efterfølgende tre hovedaktiviteter, som gennemføres trinvist, består af:

Trin 1) Databelysning, her undersøges hvilke tørkekonsekvensdata, der er relevante og om de er tilgængelige. Med eksemplet for udbyttetab kunne det være belysning af, på hvilken skala data for udbytter findes i tørkeåret sammenlignet med andre år uden tørke. Hvis data er til rådighed med en tilstrækkelig rumlig og tidlig opløsning (f.eks. fordi de indsamles af KDS i regi af tørkeprojektet), kan analysen fortsætte til trin to. Hvis ikke afrapporteres behov, anbefalinger eller særlige barrierer oplevet i forbindelsen med datasættet.

Trin 2) Korrelation, her analyseres korrelationen mellem de indsamlede tørkekonsekvens-data og anomalier i modeller/målinger. For udbyttetab kunne dette fx bestå i at analysere korrelationen mellem udbyttedata for et givent areal med anomalien i jordfugtighedsindhold. Anomalien kunne for eksempel være et jordfugtighedstørkeindeks (f.eks. SMDI, eng. *Soil Moisture Deficit Index*) udregnet af en simuleret værdi fra en hydrologisk model.

Denne analyse gentages for flere repræsentationer af anomalier (indikatorer). For nogen indikatorer/tørkeformer er ikke kun selve anomalien relevant, men også dens timing og varighed. Hvis der findes en korrelation mellem en tørkekonsekvens og en indikator, kan analysen fortsætte til trin tre. Hvis ikke skitseres mulige årsager til en korrelation ikke kunne etableres. Trin 3), Perspektivering, her evalueres i hvilket omfang etablerede korrelationer kan bruges i fremtidige planlægningsværktøjer, og med hvilket tidsperspektiv, også set i henhold til relevant EU-lovgivning. For udbyttetab kunne det være, at der peges på, at der med specifikke fremtidige klimasimuleringer kunne estimeres om udbyttetab er et stigende problem med tilgængende klimaforandringer.

Ved at bruge dette vurderingsredskab kan det således identificeres hvilket trin, det er muligt at nå i analysen af tørkekonsekvensen. For nogle konsekvenser vil alle tre trin kunne gennemføres. Men det er forventeligt, at nogle kun kan få identificeret et databehov eller få belyst tilgængelige data (Trin 1), men at der pga. af begrænsninger i datasættet, ikke kan laves en undersøgelse af korrelationer og koblingen mellem tørkekonsekvensdata og anomalier i observationer/modeller. Ligeledes kan det for områder, hvor der med tilgængeligt data er muligt at analysere korrelationer (Trin 2), vise sig at være umuligt at koble konsekvensdataet til anomalier og indikatorer fra modeller/målinger, og dermed kan perspektivering og planlægningsværktøjer (Trin 3) ikke gennemføres.

Det er vigtigt at understrege, at vurderingsredskabet er et udgangspunkt og hjælperedskab for analysen, men at det kan være nødvendigt med yderligere tilpasning af redskabet under brugen for at imødekomme individuelle særlige karakteristika af tørkekonsekvensen.

Tabel 4-1 Redskab til vurdering af hydrologisk tørke

0. Forundersøgelse/Litteratur review	
Undersøgelse af litteratur og teori	Hvilken type tørkekonsekvenser er der rapporteret for dette område og hvordan forholder de sig til tørkekonsekvenser i andre dele af landet og Europa (inkl. EU-lovgivning og strategier)?
	Identifikation af datatyper. Hvilken type data er der brugt? Hvilken type data er der behov for?
1. Databelysning	
Dataafsøgning (understøttet af KDSs indsats)	Er det relevante data indsamlet for Danmark?
	Er data tilgængelig (Hvem er dataejer?)
Datakrav	Er data georefereret? (OBS på GDPR)
	Er data på en tilstrækkelig rummelig og tidslig opløsning? Nationale forskelle - Hvor er tørkekonsekvensen værst? Rumlig/tidslig
Er der tilstrækkelige data og datakvalitet til at gå til Trin 2?	
Ja	Nej - Skitsering af behov, anbefalinger eller særlige barrierer.
2. Korrelationer	
Korrelation til modelsimuleringer	Kan konsekvensdatasættet korreleres til bestemte kvantitative indikatorer for tørke, f.eks. indeks, anomalier eller grænseværdier?
Korrelation til måledata	I fald at sammenfaldende måledata findes, kan konsekvensdatasættet korreleres til bestemte kvantitative indikatorer for tørke, f.eks. indeks, anomalier eller grænseværdier?
Observationer/ Modeller	Reflekterer model/observation tørken i samfundet=påvirkning? Og hvilken er mest brugbar til at beskrive den faktiske tørkekonsekvens
Er der etableret en tilstrækkelig korrelation mellem konsekvensdata og model/observationsindikatorer til at gå til Trin 3?	
Ja	Nej - Skitsering af definerbare årsager til at en korrelation ikke kunne etableres.
3. Perspektivering	
Generel perspektivering	Hvilke værktøjer/data er der behov for at kunne vurdere tørkekonsekvensen? Kvantitet og kvalitetsaspekter?
	I hvilken grad kan korrelationen mellem tørkekonsekvenser og model/observations data udmøntes i et planlægningsværktøj? Hvilke barrierer er der eventuelt og hvordan skal det relateres til EU lovgivning og strategier på klimatilpasningsområdet?
	Hvilket tidslige aspekt er centralt: Historiske perspektiver (hvornår er det tørke og hvornår er det "kritisk"?; Nær-fremtid: <i>forecast</i> /sæsonprognoser; Klimatilpasningsperspektiv?
Potentialet for tilgængiggørelse af planlægningsværktøjer	Hvilke allerede eksisterende platforme kunne bruges?
	Kan <i>forecasts</i> , sæsonprognoser eller sæson-klimatologiske datasæt give relevant information?
	Kan disse værktøjer understøtte forebyggende/afbødende initiativer såsom tilladelser (fx tilpassede varierende indvindingstilladelser) eller tiltag (fx begrænsninger på vandforbrug) baseret på systemets tilstand?

4.2 Analyse af udvalgte tørkekonsekvenser

I dette afsnit vil der gennemgås konsekvensanalyser med brug af framework-redskabet beskrevet i afsnittet ovenfor.

4.2.1 Forundersøgelse og relevant EU-lovgivning

Tørke i Europa har haft alvorlige konsekvenser for både miljøet, økonomien og samfundet som helhed og kan få stigende økonomiske og miljømæssige konsekvenser for hele Europa i fremtiden, om end omfanget er behæftet med betydelige usikkerheder og afhænger af klimascenariet [77, 78]. Flere regioner, især i Sydeuropa, har oplevet vedvarende tørke, der har reduceret vandressourcerne, påvirket landbrugsproduktionen og øget presset på grundvand og økosystemer pga. reduceret nedbør og øget indvinding til markvanding og vandforsyning generelt. Sydeuropa transporterer store mængder frugt og grønt ("*virtual water*") til hele Europa [79] og tørkerelateret reduktion af fødevarerproduktion i Sydeuropa påvirker hele Europa's fødevarerpriser og adgang til frugt og grønt. Klimaændringerne vil reducere den tilgængelige vandressource i den sydlige del af Europa markant [80], hvilket vil øge regionens udfordringer med at leve op til kravene i EU's Vandrammedirektiv om god kvantitativ og kemisk tilstand af vandressourcerne.

Tørken har presset regeringer til at indføre restriktioner på vandforbrug, herunder vandrationering i nogle områder, og der er opstået sociale spændinger omkring brugen af vandressourcer. Klimaændringer forventes at forværre problemet i fremtiden, hvilket kræver både akut handling og langsigtede løsninger for at sikre bæredygtige vandforsyninger og tilpasning i samfundet generelt. Konsekvenser for Danmark er ikke så voldsomme som i Sydeuropa [81], men kan stadig være betydelige, især for landbrug, vandforsyning og økosystemer [15, 16]². Som der f.eks. sås umiddelbart syd for grænsen i Tyskland i 2018-2023 [82]. Der kan være behov for en mere fokuseret Dansk tørkeindsats, når vi sammenligner os med andre Europæiske lande [83].

"*European Drought Risk Atlas* [78] nævner følgende områder hvor tørke kan have alvorlige økonomiske og miljømæssige konsekvenser: 1) landbrug, 2) vandforsyning, 3) energi, 4) transport på floder, og 5) terrestriske og akvatiske økosystemer. Mens en anden undersøgelse af konsekvenser af Europæiske tørkehændelser [12] definerer 15 forskellige tørkekonsekvens-kategorier. I *Tabel 4-2* er der samlet en oversigt over de typiske nævnte tørkekonsekvenser i litteraturen. Mange af disse er direkte konsekvenser såsom manglende vand i floder og åer, der fører til lavere energiproduktion i dæmninger og øvrige opstemningsværker, mens andre er mere indirekte effekter såsom mindre indstrømning til vådområder, der kan føre til et fald i klimagas-reduktionsgevinst [84],[85]. Derudover kan der også skelnes mellem målbare og ikke-målbare konsekvenser [86]. Stigende afgrødepriser er et eksempel på målbare konsekvenser mens forringelse af økosystemer eller tab af kulturarv, der blotlægges og degraderer som følge af bl.a. svigtende grundvandsstand eller vandindhold i jorden [87],[88] er vanskelige at kvantificere. Flere af disse konsekvenser forværres ved

² Bemærk! EU-analysen omfatter ikke skader på bygninger og infrastruktur forårsaget af faldende vandspejl pga. stigende fordampning og/eller øget indvinding af grundvand selvom det også kan medføre betydelige tab i forbindelse med kompaktion af undergrunden og deraf resulterende indsynkninger [95].

koblede eller sammenfaldende hændelser [89, 90], f.eks. høj vindhastighed eller temperatur, eller større regnskyl efter lang tids tørke, der kan øge udvaskningen af nitrat eller pesticider til vandløb og søer på grund af reduceret infiltration og hurtig overfladeafstrømning [91, 92].

I tabellen ses også hvilke datasæt, der i litteraturen typisk er blevet brugt til at beskrive/belyse tørkekonsekvensen. Der er dog generelt store udfordringer forbundet med at identificere tørkekonsekvensdata, både pga. de mange forskellige berørte sektorer, manglende systematisk indsamling og udfordringer med at tilskrive samfundskonsekvenser til et bestemt event, f.eks. hvorvidt en infrastrukturskade på en vej skyldes tørke eller dårligt fundament, eller en nedgang i fiskeproduktion skyldes en tør periode eller et særligt sygdomsudbrud. Et eksempel på indsamling af tørkekonsekvensdata er *European Drought Impact report Inventory* (EDII, [12], [86]), der indsamler data fra både videnskabelig litteratur, rapporter, offentlige dokumenter og medierne. Et andet eksempel er den amerikanske database *Drought Impact Reporter* (DIR), der yderligere inkorporerer brugerinformation omkring tørkerelaterede tilstande eller konsekvenser [93].

I denne analyse er der fokuseret på fire overordnede områder eller temaer, hvor tørkekonsekvenser er eller forventes at være til stede i en dansk kontekst. Der fokuseredes på områderne: 1. Landbrug, 2. Infrastruktur, 3. Natur og 4. Grundvand. Gennem litteraturundersøgelsen er der identificeret seks tørkekonsekvenser forbundet med jordtørke og 15 forbundet med vandløbs- og grundvandstørke. En oversigt over de identificerede tørkekonsekvenser og hvordan de relaterer sig til de fire overordnede emner, ses i Tabel 4-2.

Fra mediedækning under 2018 tørken i Danmark er der desuden angivet hvilke tørkekonsekvenser, der i sin tid blev rapporteret. Det er dermed muligt at yderligere tørkekonsekvenser var til stede under tørken, men gik ubemærket hen og ikke blev beskrevet i medie billedet. URLs til de markerede mediehistorier i tabellen kan ses i afsnit 5.1. Det skal også nævnes at dette ikke er tænkt som en dybdegående analyse af tørkekonsekvenser da en sådan analyse foretages i regi af KDS's indsats om "Konsekvensanalyse". På grund af at indsatserne løber parallelt, er det ikke muligt at inddrage data indsamlet fra KDS's indsats i denne analyse. Forundersøgelsen og databelysningen beskrevet her er således ikke dybdegående, men tænkt som et mål til at udpege umiddelbart tilgængelige datasæt, der kan bruges til en undersøgelse af korrelationer mellem anomalier og konsekvenser. For at afgrænse opgaven er der fokuseret på tørkekonsekvenser under de fire emner, der er markeret med blå.

Tabel 4-2 Information om tørketype og relaterede tørkekonsekvenser baseret på [12], [11], [86]. Under de forskellige tørkekonsekvenser er der angivet med blå eller gråt om konsekvenserne primært er relateret til 1. landbrug, 2. Infrastruktur, 3. Natur og 4. Grundvand eller 5 Anden. Markeringerne med blå er tørkekonsekvenser, der undersøges i dette kapitel. I den sidste kolonne er der en afkrydsning af tørkekonsekvenser under 2018 tørken. *knyttet til både overindvinding og saltvandindtrængning.

Tørke-type	Relateret Tema Impact på	Landbrug	Infrastruktur	Natur	Grundvand	Anden	Typiske datasæt brugt	Tørken 2018
Jordvandstørke	Vegetation						Satellitprodukter	X
	Afgrødeproduktivitet						Udbytte	X
	Afgrødepriser						Afgrødepriser	X
	Skov- og naturbrande						Afbrændt areal, antal	
	Kulturarv						Indrapporterede tab, rapporter	X
	Jordsætning, Tørkeskader på bygning, veje...						Indrapporterede skader, forsikringsdata, satellitdata	X
Hydrologisk tørke (grundvand og afstrømning)	Ferskvands økosystemer						Artstab, flora/fauna død (antal), tilbagegang i areal	X
	Grundvandsafhængige økosystemer							
	Terrestiske økosystemer							X
	Marine økosystemer							X
	Drivhusgasser (vådområder)						Udledningsmålinger, grundvandsstand (indirekte)	
	Land subsidence (jordsætning)*						Indrapporterede skader/satellitdata	X
	Vandkvalitet						Vandprøver	
	Saltvands-indtrængning						Vandprøver	
	Vandforsyning						Vandforbrug	X
	Vanding						Vandforbrug	X
	Grundvandsressourcen						Grundvandsstand, nedsivning	
	Hydro-power (energiproduktion)						Produktionstal, vandstand	
	Dambrug fiskeproduktion						Udbytte, priser	
	Rekreation (vandsport, badning)						Brugerundersøgelser, indtægter fra turistme	
	Transport via vandvejen						Transporteffektivitetstab, meromkostninger	X

Tilstanden af Europas vandforekomster reguleres og beskyttes primært gennem Vandrammedirektivet³ og Grundvandsdirektivet⁴ med tilhørende vejledninger. Hverken Vandrammedirektivet eller Grundvandsdirektivet nævner klimænderinger specifikt, men diverse arbejdsgrupper der er nedsat under Kommissionens fælles implementeringsstrategi (CIS) for Vandrammedirektivet producerer løbende vejledninger, der skal understøtte medlemslandenes implementering af de to direktiver. Implementeringen sker i nationale vandmiljøplaner, der også skal håndtere tørke og oversvømmelsers påvirkning af det hydrologiske kredsløb, vandressourcer og vandmiljø^{5, 6}.

Generel vejledning af EU medlemslandenes rapportering om grundvandets kemiske og kvantitative tilstand og udvikling er beskrevet i vejledning nr. 18 under Vandrammedirektivets fælles implementeringsstrategi⁷. Derudover har Europa-Kommissionen arbejdet intenst på udvikling af en EU-strategi for grøn omstilling/den europæiske grønne pagt og klimatilpasning, der hhv. arbejder på at gøre Europa til det første klimaneutrale kontinent⁸ og gøre klimatilpasningen "*smarter*", "*faster*", "*more systemic*" og "*stepping up international collaboration for climate resilience*"⁹. Alle aktiviteter der har betydning for vandforvaltning og klimatilpasning relateret til tørke [94], opnåelse af FNs verdensmål og presserende samfundsudfordringer relateret til ressourceforvaltning og klimænderinger generelt [95].

³ Europa-Kommissionen (2000). Vandrammedirektivet. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DA/TXT/PDF/?uri=CELEX:02000L0060-20140101&from=HR> – accessed 24-10-2024

⁴ Europa-Kommissionen (2006). Grundvandsdirektivet. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DA/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0118> – accessed 24-10-2024.

⁵ European Commission. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/adaptation-climate-change/eu-adaptation-strategy_en - accessed 24-10-2024.

⁶ European Commission. CIS guidance no. 24 - River basin management in a changing climate (2nd /updated version). Common implementation strategy for the Water Framework Directive and the Floods Directive. Directorate-General for Environment, Publications Office of the European Union, 2024, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/126657> - accessed 24-10-2024.

⁷ European Commission. CIS guidance document no. 18 – Groundwater Status and Trend Assessment. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/76543005-ce9e-4b3c-9191-3c3f97b90ab_1 - accessed 24-10-2024.

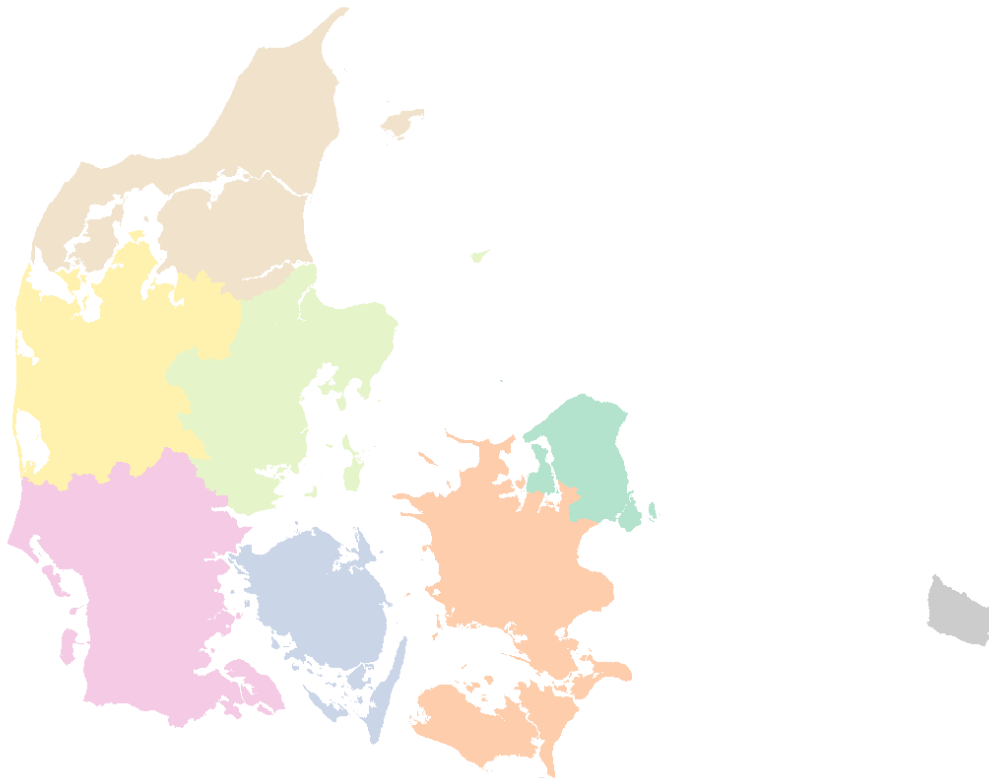
⁸ European Commission. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/adaptation-climate-change/eu-adaptation-strategy_en - accessed 24-10-2024.

⁹ European Commission. CIS guidance no. 24 - River basin management in a changing climate (2nd /updated version). Common implementation strategy for the Water Framework Directive and the Floods Directive. Directorate-General for Environment, Publications Office of the European Union, 2024, <https://data.europa.eu/doi/10.2779/126657> - accessed 24-10-2024.

4.2.2 Landbrug: Analyse af korrelation mellem tørke og udbytter

4.2.2.1 Databelysning

Der sker ikke en metodisk indsamling af udbyttetab for det danske landbrug. Ved SEGES (landbrugets videnscenter) indsamles der forsøgsvis data af udbytte for udvalgte afgrøder og marker, disse data er dog ikke offentlig tilgængelige og dækker p.t. et meget begrænset areal og få afgrøder. Danmarks Statistik indsamler data om landbruget, herunder hvilke afgrøder der dyrkes, hvor meget areal der anvendes, og – vigtigst for denne analyse – det årlige udbytte af afgrøder i hkg per hektar. Oplysninger om udbytte indsamles via stikprøvebaserede spørgeskemaer, som i gennemsnit dækker ca. 8 % af alle bedrifter [96]. Dataene opdeles desuden i otte forskellige regioner, som vist i *Figur 4-1*. Der findes potentielt data om afgrødeudbytter tilbage fra 1920, men et mere sammenhængende og konsistent datasæt er tilgængeligt fra 2010 og frem.



Figur 4-1: Områder i Danmark hvor der er blevet indsamlet afgrødeudbytte statistik, hvor turkis er Nordsjælland og hovedstaden, orange er Midtsjælland og Sydsjælland, blå er Fyn og sydhavsøerne, pink er Sydjylland, gul er Vestjylland, grøn er Østjylland, brun er Nordjylland og grå er Bornholm.

Anmeldte marker kortlægges for hvert ansøgningsår og er offentlig tilgængelig. En mark defineres som et sammenhængende areal, hvor der dyrkes én afgrøde. Disse data findes som polygoner med en rumlig opløsning på markniveau. Der er data tilgængelige fra 2008 til i dag, men først fra 2010 fremgår det, hvilke afgrøder der er blevet dyrket på en given mark i et bestemt år.

Ved at sammenholde statistikområderne i *Figur 4-1* med de kortlagte marker kan man opnå et overblik over afgrødernes arealfordeling, som vist i *Tabel 4-3*. Der er udvalgt ni afgrøder: korn, majs, permanent græs, vinterrug, vårbyg, vinterbyg, vårhvede, vinterhvede, tritcale og raps. Tabellen viser, hvor stor en procentdel af arealet i statistikområderne hver afgrøde i gennemsnit udgør fra 2010 til 2023. Det fremgår, at vinterhvede og vårbyg tilsammen udgør størstedelen af arealanvendelsen.

Den procentuelle afgrødedækning er opgivet i forhold til det samlede dyrkede areal, hvoraf ca. 60 % er dyrket på landsplan. Ved at kombinere statistikområderne fra *Figur 4-1* med det årlige kortlagte markdata kan der skabes en årlig afgrødemaske. Denne maske kan bruges til at udtrække modelresultater fra DK-modellen for præcist de områder, hvor afgrøder er blevet dyrket i et givent år.

Tabel 4-3 Gennemsnitlige arealfordeling i procent af udvalgte afgrøder indenfor de 8 områder vist i fig. 1 fra 2010 til 2023. Vi står for vinterafgrøde og Vå for vårafgrøde

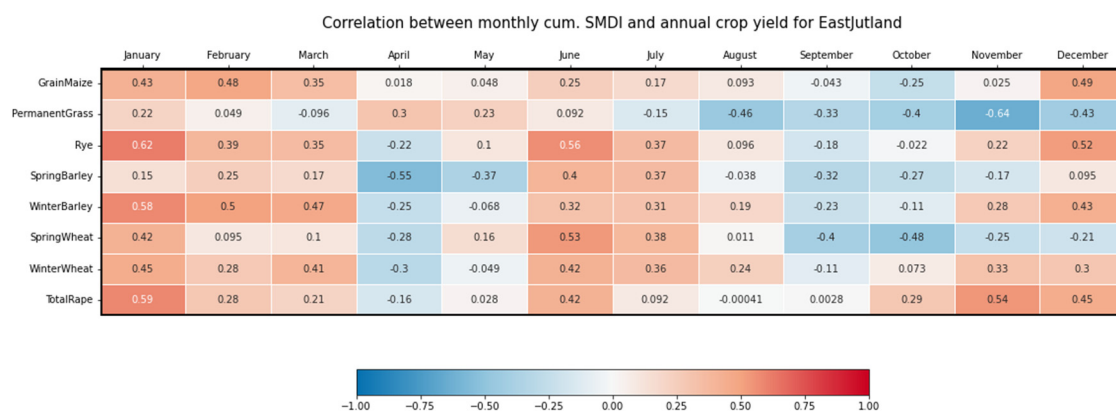
Procent afgrøde dækning [%]										
Regioner	Areal [km ²]	Korn majs	Perm. græs	Vi. rug	Vå. byg	Vi. byg	Vå. hvede	Vi. hvede	Triticale	Total raps
Bornholm	589	3,6	2,9	0,4	11,4	3,4	1,0	23,0	0,00	5,0
Hovedstad	1.982	0,4	6,1	0,5	5,6	1,0	0,3	6,4	0,01	3,0
Sjælland	7.293	1,1	2,9	0,4	0,2	1,6	0,4	18,8	0,01	6,2
Fyn	3.489	3,4	2,8	0,4	12,8	3,2	0,4	20,8	0,01	6,9
Østjylland	5.916	7,5	4,5	0,9	21,4	2,5	0,5	9,5	0,02	2,9
Vestjylland	7.229	1,8	3,1	0,5	9,6	3,7	0,3	14,0	0,02	4,3
Nordjylland	7.911	4,2	4,4	0,0	12,0	2,4	0,4	13,0	0,01	4,0
Syddjylland	8.649	9,4	4,5	0,7	14,1	2,5	0,6	9,9	0,02	3,0

4.2.2.2 Korrelation

Metode

For at undersøge hvorvidt DK-modellen kan forklare afgrødeudbytte tab som funktion af jordfugtigheds-anomalier (SMDI), bliver de to variabler sammenstillet ved at anvende årlige afgrødemasker til at udtrække jordfugtighedsanomalier (SMDI) fra DK-modellen for de udvalgte afgrøder, som fremgår af *Tabel 4-3* i perioden 2010 til 2023 samt for hver region. Dette resulterer i 72 unikke tidsserier for afgrødeudbytte og SMDI, hvor afgrødeudbyttet har et årligt og SMDI et ugentligt tidsinterval. Derefter bliver SMDI aggregeret til månedsværdier ved at summere for hver måned, hvor positive og negative værdier svarer til henholdsvis våde og tørre jordforhold.

Som en indledende analyse, bliver korrelationen herefter beregnet mellem det årlige afgrødeudbytte og den månedligt summerede SMDI-værdi. Denne beregning gentages for hver måned, så man opnår f.eks. en januar SMDI tidsserie som sammenlignes det årlig afgrødeudbytte. Det vil belyse hvordan specifikke jordforhold i forskellige måneder påvirker og korrelerer med det årlige afgrødeudbytte. Resultaterne her kan så vises som såkaldte *heatmaps*, hvor afgrøder vises på y-aksen og måneder på x-aksen og hver celle indeholder korrelationen mellem det årlige afgrødeudbytte og den akkumuleret SMDI for en given måned på tværs af år. Et eksempel af sådan *heatmap* for Østjylland er vist i *Figur 4-2* (resterende er vist i bilag).

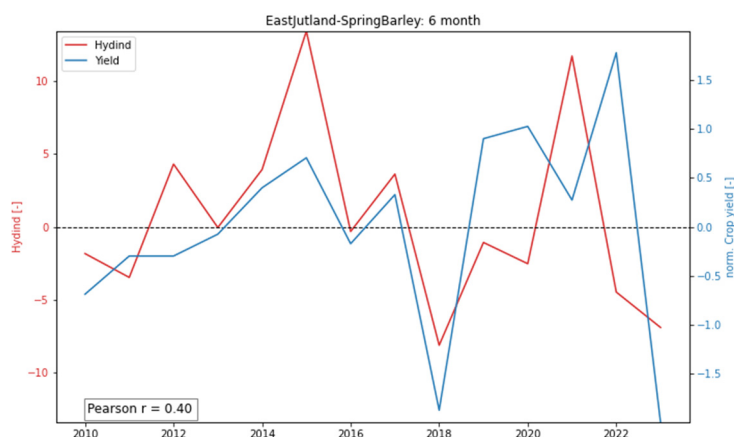


Figur 4-2: Heatmap for Østjylland, der viser korrelationen mellem det årlige afgrødeudbytte og den månedlige akkumulerede SMDI. For eksempel sammenlignes de akkumulerede SMDI-værdier for januar med årets afgrødeudbytte. Varme farver indikerer en positiv korrelation, hvilket kan svare til tørre jordforhold, mens kolde farver viser en negativ korrelation, som kan svarer til våde jordforhold. Neutrale farver repræsenterer en lav korrelation.

For bedre at kunne relatere afgrødeudbytte til jordfugtighedsanomalier standardiseres afgrødeudbyttet til sin gennemsnitsværdi og standardafvigelse ved hjælp af følgende formel:

$$z_i = \frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{\sigma_\alpha} = \frac{\alpha_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \alpha_i}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}} \text{ for hver } i = 1, 2, \dots, n$$

Hvor udbyttet α_i for en afgrøde i år i standardiseres ved at fratrække gennemsnittet $\bar{\alpha}$ for alle år i analysen og så dividere med standardafvigelsen σ_α for alle årene. Herefter svarer positive og negative afgrødeudbytte værdier til henholdsvis gevinster og tab. Som eksempel er der vist akkumuleret SMDI værdier for Vårbyg i Østjylland juni måneder på *Figur 4-3*, hvor man nu nemt kan sammenligne tørre og våde jordfugtighedsanomalier med afgrødeudbytte tab og gevinster. Denne relation mellem afgrødeudbytte og jordfugtighedsanomali er også datagrundlaget for heatmap i *Figur 4-2*, hvor vårbyg juni cellen har samme Pearson r koefficient som fremgår af *Figur 4-3*. Det betyder at der er blevet lavet 9 (afgrøder) x 12 (måneder) x 8 (regioner), altså 864 figurer i alt magen til *Figur 4-3*.



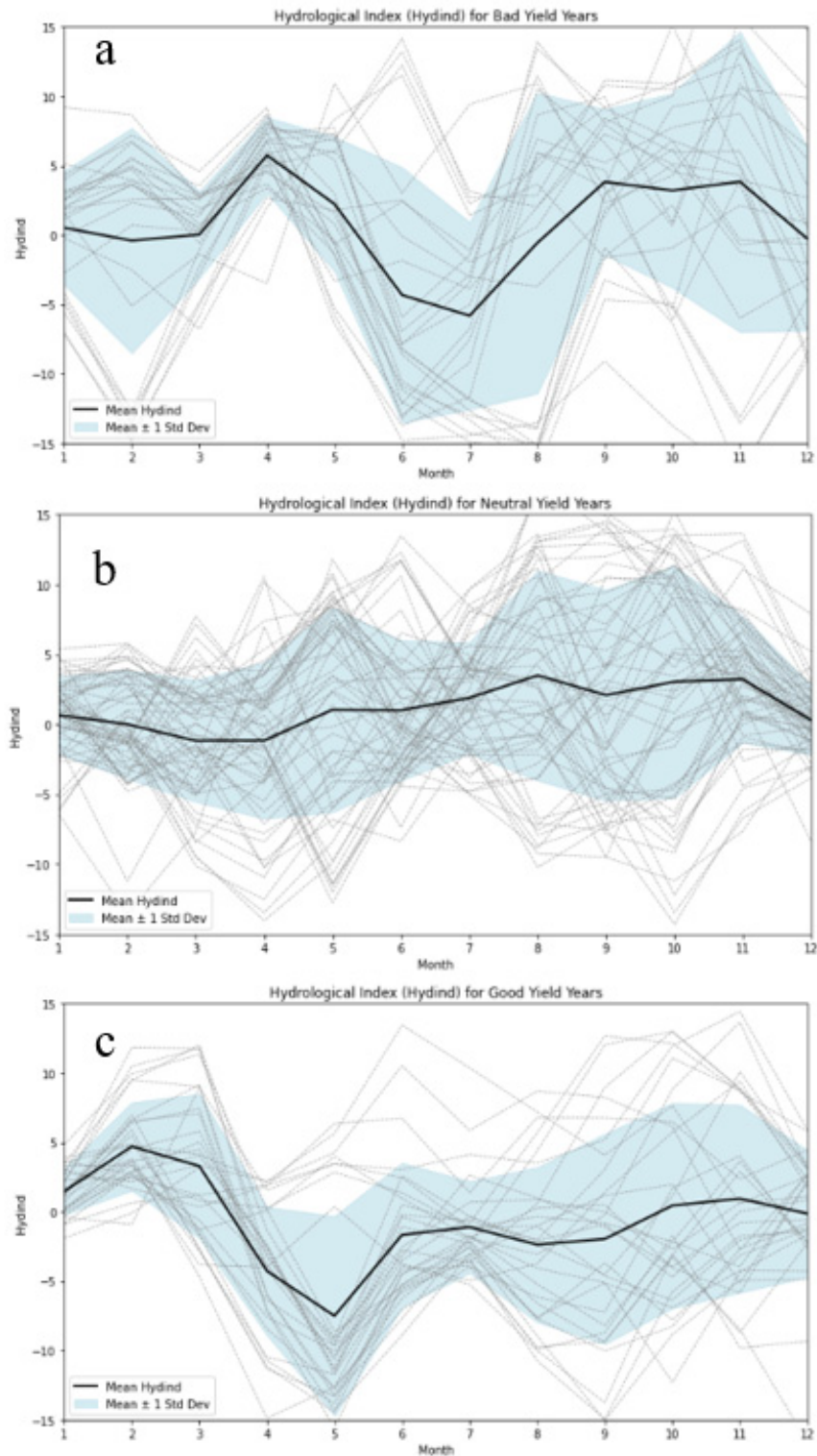
Figur 4-3: Eksempel for vårbyg i Østjylland, der viser, hvordan den månedlige akkumulerede SMDI (hydind) for juni sammenlignes med det årlige afgrødeudbytte. Udbyttet er standardiseret, så nul svarer til normale forhold, mens positive og negative værdier repræsenterer henholdsvis afgrødegevinst og -tab. Pearsons r -værdi angiver korrelationen mellem de to variable.

På baggrund af det standardiserede afgrødeudbytte defineres år med neutralt, godt og dårligt afgrødeudbytte som følger, normalt udbytte er værdier tæt på gennemsnittet og findes omkring nul, højt udbytte omfatter værdier, der ligger mellem en positiv grænseværdi og maksimumværdien, og lavt udbytte dækker ligeledes værdier mellem minimumsværdien og en negativ grænseværdi. Som et bud kan vi definere grænseværdierne mellem kategorierne som:

Tabel 4-4 Forslag til, hvordan det standardiserede afgrødeudbytte kan opdeles i kategorierne lavt, normalt og højt. De angivne nedre og øvre værdier markerer grænserne mellem de respektive kategorier.

Afgrødeudbytte	Lavt	Normalt	Højt
Øvre værdi	< -0,5	0,5	max
Nedre værdi	min	-0,5	> 0,5

Herefter kan vi plotte tidsserier for den månedlige akkumulerede SMDI for hvert enkelt år fra de forskellige regioner og opdele dem i disse tre kategorier fra Tabel 4-4. Som eksempel i Figur 4-4 ses grafer for vårbyg i hele Danmark opdelt i (a) lavt afgrødeudbytte år, (b) normalt afgrødeudbytte år og (c) højt afgrødeudbytte år.



Figur 4-4 Illustration af, hvordan SMDI-tidsserier på månedsbasis (i alt 13 år x 8 regioner) fordeles mellem de tre definerede afgrødeudbytte-kategorier for vårbyg: (a) lavt, (b) normalt og (c) højt. De tynde grå linjer repræsenterer individuelle tidsserier, de sorte tykke linjer viser gennemsnittet, og det lyseblå område angiver ± 1 standardafvigelse.

I *Figur 4-4* svarer de tynde grå linje til tidsserier med den månedlige akkumulerede SMDI for forskellige år og regioner. Den sorte tykke linje svarer til gennemsnitsværdien for tidsserierne for hver måned og det lyseblå område er ± 1 standardafvigelse omkring den månedlige gennemsnitsværdi.

På baggrund af *Figur 4-4*, kan vi skabe en statistisk drevet prædiktionsmodel for hver afgrøde ved brug af konceptet *Bayesian Inference*. Denne metode giver en probabilistisk ramme for forudsigelser ved at kombinere forudgående viden, såkaldt *priors*, med observerede data. I denne sammenhæng anvender vi *Bayesian Inference* til at udlede sandsynligheden for, om et givent år giver et lavt, normalt eller højt afgrødeudbytte, baseret på månedlige tidsserier af akkumulerede SMDI. I vores Bayesian model, definerer vi vores priors som den historiske frekvens for hver kategori. F.eks. hvis dårlige år historisk set fremkom 30 % af tiden, så ville vi definere vores prior for dårlige år som 0,3. Vi definerer priors som:

$$P(\text{kategori}) = \frac{\text{Antal observationer i kategori}}{\text{Total antal observationer}}$$

I modellen beregnes sandsynligheden for om en vilkårlig tidsserie tilhører en given kategori ved hjælp af en normalfordeling, idet det antages, at med nok datapunkter vil SMDI tilnærme sig en klokkeformet fordeling inden for hver kategori.

De månedlige gennemsnitsværdier og standardafvigelser for hver kategori, vist som eksempel for vårbyg i *Figur 4-4*, bruges som parameter til bestemmelse af normalfordelingen. Vores Bayesian model følger så disse processerings skridt.

1. Månedlige akkumulerede SMDI tidsserier bruges som input til Bayesian model.
2. Sandsynligheder beregnes for hver kategori på baggrund af hvor godt input data passer med de 3 normalfordelinger, som blev lavet med historiske/tidligere SMDI tidsserier.
3. Sandsynligheder kombineres med vores priors for at beregne såkaldt posterior sandsynlighed for hver kategori.
4. Kategorien med den største posterior sandsynlighed identificeres som den prædikterede klasse.

Til punkt 3 bruges konceptet *Bayes' theorem* som skrives:

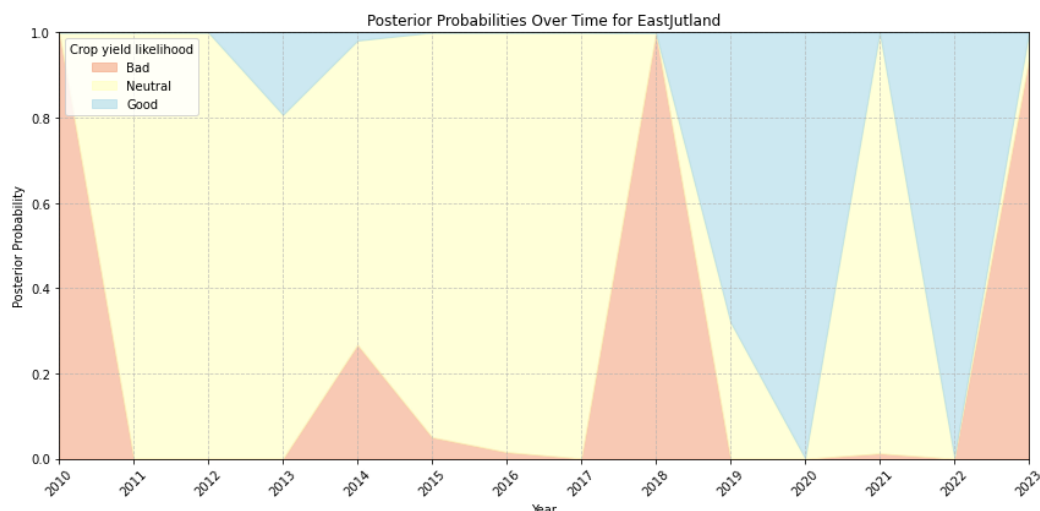
$$P(C|D) = \frac{P(D|C) \cdot P(C)}{P(D)}$$

Hvor $P(C|D)$ er vores posterior sandsynlighed for en given kategori C (*lav, normal, eller høj*) givet den observerede data D (månedlige akkumulerede SMDI), $P(D|C)$ er sandsynligheden for at observere data D givet kategori C , $P(C)$ er prior sandsynligheden for kategori C , baseret på dens historiske frekvens og $P(D)$ er den totale sandsynlighed for at observere data D , der bruges som en normaliserende konstant så posterior sandsynligheden altid summeres til 1.

Vi fortsætter med vårbyg i Østjylland som eksempel, hvor hvert års tidsserie af månedlige akkumulerede SMDI er blevet processeret med vores Bayesian model, hvilket giver os en posterior probabilitet for at SMDI tidsserien i det år vil resultere i et lavt, normalt eller højt afgrødeudbytte. Resultatet her er vist i *Figur 4-5* hvor man ser hvor sikker modellen er på de

3 kategorier for forskellige år. Posterior sandsynlighed udregnes for hver måned, som så aggregeres til én samlet probabilitet for hele året.

Det skal bemærkes at SMDI tidsserien her, også blev brugt til at opbygge vores Bayesian model (altså statistikken vist i *Figur 4-4*), og eksemplet i *Figur 4-5* her ikke benytter uafhængige data. Som *proof-of-concept* viser det dog hvordan modellen vil kunne prædiktere afgrødeudbytte forhold på baggrund af kun jordfugtighedsanomalier.



Figur 4-5: Posterior sandsynlighed for, hvilken afgrødeudbytte-kategori (højt, normalt eller højt) en given års månedlige akkumulerede SMDI-tidsserie bedst passer til. Jo større andel en kategori udgør for et år, desto højere er sandsynligheden for, at den pågældende kategori beskriver årets afgrødeudbytte. For eksempel viser modellen, at 2018 entydigt klassificeres som et år med dårligt afgrødeudbytte.

Diskussion

Hvis der tages udgangspunkt i *heatmap* i *Figur 4-2*, som viser korrelationen mellem det årlige afgrødeudbytte og den månedlige akkumulerede SMDI, så viser figuren en forskel i korrelation mellem vinter- og vårafgrøder, hvor vårafgrøder generelt er dårligere korreleret med vintermåneder, hvorimod vinterafgrøder er generelt bedre korreleret med vintermåneder. Samtidig kan man se et tydeligt signal på såning- og høstperioden, omkring april-Maj og August-September, hvor det er negativ korrelation, altså våde jordforhold som muligvis leder til lavt afgrødeudbytte. Det giver mening i forhold til hvad man ville forvente, når en vinterafgrøde sås i efteråret, så ville våde jordforhold forsinke eller forhindre såning, og afgrøden vil være i jorden over vinteren hvorimod en vårafgrøde sås i foråret og høstes i samme efterår. Man kan dog undre sig over hvorfor der overhovedet findes en betydelig korrelation i vinteren for vårafgrøder, hvilket kunne skyldes at vinteren har en betydning for hvordan vejret resten af året forløber. Sammenlignes *Figur 4-2*, til *heatmaps* for andre regioner, så ses der også regionsforskelle. F.eks. ses at Sydjylland, har en langt lavere korrelation i sommermånederne, hvilket kunne afspejle at store områder er mere sandet og derfor har en vandingstilladelse som kunne modvirke et potentielt tørkesignal.

Der er generelt observeret mange lave korrelationer (tæt på 0) mellem den månedlige akkumulerede SMDI og afgrødeudbytte, hvilket indikerer, at landbrugstørke ikke har været et

markant problem på regionsniveau i perioden 2010-2023. Dette stemmer overens med afgrødeudbyttet for vårbyg i Østjylland vist i *Figur 4-3*, hvor der kun er to større udbyttetab i henholdsvis 2018 og 2023 – med begge som velkendte sommer tørkeår (på trods af at 2023 var et historisk vådt år). De mønstre og tendenser, der fremgår af *Figur 4-2*, harmonerer dog stadig med faktiske landbrugspraksisser. For eksempel er det kritisk for vårbyg at kunne tilgå markerne med maskiner i foråret til såning og i efteråret under høsten. Hvis jorden er for våd (negativ korrelation) i disse perioder, kan både såning og høst forsinkes, hvilket kan resultere i lavere afgrødeudbytte.

Derudover er den primære vækstsæson for vårbyg i sommerperioden, hvor det er afgørende, at afgrøden har tilstrækkelig adgang til vand. Tørkeforhold (positiv korrelation) i denne periode kan derfor have en negativ indflydelse på udbyttet.

I den efterfølgende opdeling af månedlige SMDI-tidsserier for vårbyg i kategorierne (a) *lavt*, (b) *normalt* og (c) *højt* afgrødeudbytte år, som vist i *Figur 4-4*, fremstår tydelige forskelle mellem graferne. Lave afgrødeudbytte år (fig. 4a) er karakteriseret ved markant vådere jordforhold under høst og såning samt tørrere jordforhold i vækstperioden. Omvendt viser høje afgrødeudbytte år generelt vådere jordforhold i vækstperioden og tørrere forhold under høst og såning. Det skal dog bemærkes, at datasættet er begrænset i størrelse, og særligt dårlige afgrødeudbytte år repræsenteres af få observationer, hvilket muligvis ikke afspejler alle variationer og nuancer, der kan forekomme. Derudover kan det være nødvendigt at indføre underinddelinger inden for hver kategori. For eksempel kunne dårlige afgrødeudbytte år opdeles i tidsserier, der enten viser tørre somre, eller tidsserier, der primært viser våde forhold i forår og efterår, og så videre.

Prædiktionsresultaterne vist i *Figur 4-5* for vårbyg i Østjylland, baseret på vores Bayesian model, viser, at der forudsiges tre lave afgrødeudbytte år: 2010, 2018, og 2023. Dette stemmer godt overens med afgrødeudbytteanomalierne i *Figur 4-3*. Modellen har dog sværere ved at skelne mellem normale og høje år. For eksempel forventes det, at 2015, 2019, 2020 og 2022 i *Figur 4-3* bliver klassificeret som gode afgrødeudbytte år, men 2015 bliver i stedet forudsagt som et normalt år med høj sandsynlighed. Dette understreger behovet for en mere præcis definition af de tre kategorier i fremtidige analyser.

Resultaterne understøtter, at DK-modellens jordfugtighedsanomalier i vis grad kan forklare variationer i det årlige afgrødeudbytte, hvilket stemmer overens med kendte landbrugspraksisser og de forventede effekter af de hydrologiske jordforhold. Det viser også, at der kan udvikles en metode og fremgangsmåde baseret på DK-modellens resultater, som kan anvendes til vurdering af landbrugs tørkeskader.

4.2.2.3 Perspektivering

Analysen af korrelation mellem jordfugtighed og udbytter er gennemført på basis af eksisterende offentlige tilgængelige data samt den eksisterende version af den nationale hydrologiske model (DK-model). Dette medfører nogle begrænsninger for analysen og dennes resultater. De vigtigste forhold vurderes at omfatte:

- Datagrundlag for udbytter. Disse data er hentet fra Danmarks statistik og baseret på stikprøver af udbytter og regionaliseret til otte regioner. Den rumlige opløsning af

data er således meget begrænset og afspejler en middel situation inden for regionerne, der kan dække over betydelige geografiske variationer.

- Jordvandsfugtigheder beregnet med den Nationale Hydrologiske Model. Modellen anvender en forholdsvis simplificeret metode til at beskrive rodzonen og dermed jordfugtigheden, ligesom der anvendes en stationær afgrødefordeling og der således ikke tages hensyn til den aktuelle afgrødes betydning for jordfugtigheden. Desuden har modellen en geografisk opløsning på 500 x 500 m (25 ha), hvilket er større end den gennemsnitlige markstørrelse, og der kan derfor ikke etableres en direkte kobling mellem marker og den beregnede jordfugtighed.
- I analysen er der alene set på sammenhænge mellem jordfugtigheden og udbyttet, mens der ikke er inkluderet andre faktorer, der ligeledes kan have væsentlig betydning for udbyttet. Dette inkluderer eksempelvis andre klimatiske forhold som kraftige storme, hvor modnet korn blæses af akser, eller at korn bliver lagt ned pga. intensive nedbørsepisoder og derved svær at høste, eller afgrødetab forårsaget af f.eks. svampe og insekt angreb.

Til trods for ovenstående begrænsninger, er der fundet en vis korrelation mellem jordfugtigheden og udbytter, specielt når der fokuseres på år med hhv. højt og lavt udbytte, her defineret som år hvor det normaliserede udbytte varierer $\pm 0,5$ i forhold til normalen. Dog med en del støj på signalet, som i nogen grad forventes at være relateret til begrænsningerne i data og modelopløsning. Det forventes derfor også, at der vil kunne opnås et mere klart signal, specielt hvis år med dårligt udbytte forårsaget af andre forhold, f.eks. hårde storme, kan sorteres fra.

Med udgangspunkt i tidserierne af SMDI er der udviklet en prototype for en prædiktiv *Bayesian Inference* model. Denne model vil potentielt kunne anvendes til en sæsonprognose, hvor der, baseret på jordfugtighedsmålinger for vinter/forårsmånederne kan udregnes en sandsynlighed og usikkerhed for årets afgrødeudbytte fx inden for kategorierne lav, normal eller høj.

Den prædiktive model vil også kunne anvendes på jordfugtighedsanomalier generet med langtidsprognoser, såsom DK-modellen forceret med klima modeller. Herved kan der opnås et bud på hyppighed og omfang af anomalier under et fremtidigt klima, der potentielt vil kunne påvirke høstudbyttet under antagelse af at landbrugspraksis er uændret. Sådanne resultater vil kunne bidrage til en vurdering af behovet for at inddrage andre, og mere klimaresistente, afgrøder i fremtiden, samt give et bud på en tidshorisont for hvornår en sådan omlægning bør ske.

Værdien af den prædiktive model vil dog afhænge helt af hvor god modellens prædiktive evne er, dvs. hvor god den vil være til at vurdere udbyttet på basis af jordfugtighedsanomalierne. I nærværende projekt er modellen udviklet på et datamateriale med en begrænset geografisk opløsning. Første led i en videreudvikling af modellen vil derfor være at forbedre den geografiske opløsning i såvel udbytte data samt resultaterne fra DK-modellen, ligesom en forbedret beskrivelse af rodzone samt afgrødefordelingen i modellen forventes at kunne forbedre modelresultatet. Der sker en løbende udvikling af DK-modellen, og de foreslåede forbedringer forventes gennemført inden for en kortere tidshorisont. Modsat er der ikke nogen umiddelbar udsigt til en detaljeret geografisk opløsning af udbyttet. Dog har SEGES

fokus på området, og foretager indsamling af udbytte data, ligeledes med formål at korrelere udbytter med variationer i vejret de enkelte år. Det vurderes derfor formålstjenstligt at indgå et samarbejde med SEGES ved en videre analyse.

I nærværende projekt har det ikke været muligt at gennemføre en test/validering af den prædiktive model. Dette vurderes at være et vigtigt næste skridt, hvor der foretages en test på et uafhængigt datasæt, dvs. data der ikke har været anvendt under udvikling af modellen.

4.2.3 Infrastruktur: Konsekvensanalyse af tørkeramte huse

4.2.3.1 Baggrund

Det er ikke kun vand fra vandløb og søer, voldsom regn og stormfloder, som kan true dit hus, sommerhus eller grund. I særlige tørketruede områder kan tilstedeværelsen af leraflejringer med særlige plastiske egenskaber i jorden skabe problemer i tilfælde af tørke. Sommeren 2018, som var den tørreste i 99 år, bliver omtalt som "*Annus horribilis*". Tørken forårsagede skader på mange huse i Danmark, sandsynligvis på grund af jordsynkning med sænkningsskader og revnedannelser. Sådanne skader kunne ikke dækkes af private forsikringsordninger. Siden juli 2022 er Naturskaderådet (tidligere Stormrådet) officielt ansvarlig for at forvalte en ny naturtørkeskadeordning betalt med offentlige midler for tørkeskader på bygninger. Før juli 2022 var rådets fokus begrænset til stormflod og oversvømmelser fra vandløb og søer. GEUS er sagkyndig på tørkeskadeordningen for Naturskaderådet og udarbejder bedømmelser af tørkeskadesager i samarbejde med DTU Sustain.

4.2.3.2 Databelysning

Der er anmeldt 307 tørkeskadesager til Naturskaderådets Tørkeskadeordning for perioden juli 2022, hvor tørkeskadeordningen igangsattes, til september 2024. I 54 af disse sager har GEUS og DTU Sustain vurderet det sandsynligt eller overvejende sandsynligt, at der har fundet en tørkehændelse sted på skadesstedet. Formålet med sagsbehandlingen er at skabe klarhed over om det er sandsynligt at sætningsskader og revnedannelser på ejendomme kan være forårsaget af en tørkepåvirkning.

Med Den Nationale Hydrologiske Model (DK-model) er det muligt at beregne hydrologiske indeks med metoderne, der nærmere er beskrevet i Kapitel H1 og [97]. I dette afsnit er der fokuseret på beregning af tørkedelen af indekset for jordfugtighed (SMDI) og terrænnær grundvandsstand (SGDI), som supplement til Naturskaderådets sagsbehandling af tørkeanmeldelser på ejendomme der indtil nu primært er baseret på en geoteknisk og hydrogeologisk analyse af de jordbundsmæssige forhold ved ejendommen og ved laboratorieforsøg [98].

Tidsskalaen for udviklingsperioden af en tørkerelateret skade og den efterfølgende genopretningsperiode (*shrink-swelling*) hvor den lerrige jordbund igen heler op efter tørkeperioden er ikke velundersøgt (jf. Tørkeordbogen 2024). Angivelsen af skadestidspunkt kan være behæftet med en forsinkelse på op til 2 måneder i forhold til det observerede skadestidspunkt, da der kan være op til 2 måneders forskydning mellem skaden observeres, til den anmeldes

til Tørkeskadeordningen. Analysen af sammenhænge mellem klimapåvirkning og lokale hydrologiske forhold ved skadesstedet vanskeliggøres derved, men med det beregnede tørkeindeks ser vi i dette afsnit nærmere på om de modelberegnete tørkekarakteristika (intensitet, varighed, alvorlighed og maksimum) kan kvalificere sagernes bedømmelse for Naturskaderådet med en mere modelbaseret kvantitativ tilgang. Det er her tørkeindeks, fra Den Nationale Hydrologiske Model (DK-model) med landsdækkende simuleringsanomalier fra 1990 til i dag, kan styrke tørkeskadevurdering ved indarbejdelse af historisk klima og hydrologiske forhold.

4.2.3.3 Korrelation og Tørkeskadevurderingsredskab

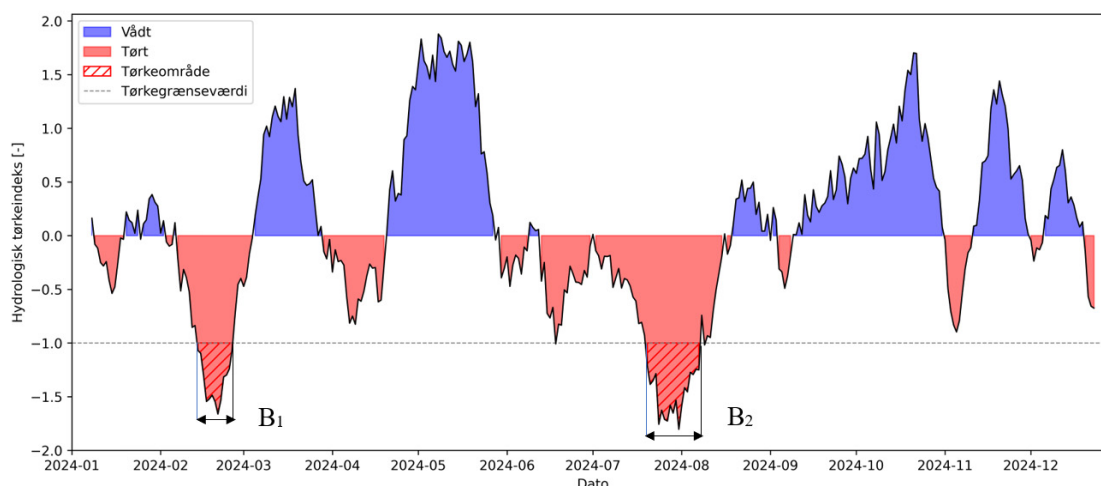
For enhver tørkeskade på ejendomme kan korrelationen til sted-specifikke tidsserier for tørkeindeksene SMDI og SGDI udregnes. Det er dog også muligt at tørkeskaderne er bedre korreleret til forskellige beskrivende tørkekarakteristika, der desuden afhænger af grænseværdien for hvornår en tørke defineres. I princippet kan historiske tørkeskader på ejendomme vurderes med tørkeindeksene tilbage til 1990. Det antages dog, at kun det seneste år til måneder er relevante for en given tørkeskade. Det er dermed også relevant at undersøge hvor længe tilbage det er nødvendigt at kigge for at fange den udslagsgivende tørke i forhold til sætningsskaderne.

Tørkekarakteristika, grænseværdi og udviklingsperiode/buffer

På baggrund af tidsserierne for SMDI og SGDI er følgende tørkekarakteristika derfor også blevet beregnet for alle tørkeskaderne:

- varighed
- alvorlighed
- intensitet
- maksimum

Varigheden beskriver længden af tørken, som i *Figur 4-6* svarer til afstanden i tid på x-aksen mellem de to skæringspunkter med tørkegrænseværdien (se næste afsnit) for hver tørkebegivenhed. *Alvorligheden* er summen af indeksværdierne (svarende til integralet) under tærskelværdien for en given begivenhed eller indenfor en angivet tidsperiode, som beskriver hvor omfattende tørken har været. I *Figur 4-6* svarer det til summen af indeksværdier under tærskelværdien for tørkeområdet B₁ og B₂. *Intensitet* beskriver den gennemsnitlige værdi af tørkeindeksene under en tærskelværdi for en specifik periode eller begivenhed, hvilket i *Figur 4-6* svarer til gennemsnittet indenfor tørkeområdet B₁ og B₂, således svarende til *alvorlighed/varighed* for hver begivenhed. *Maksimum* er den absolutte ekstreme værdi af tørkeindekset under tærskelværdien for en given begivenhed eller tidsperiode.



Figur 4-6: Viser et uspecificeret hydrologisk indeks over tid, hvor værdier under 0 angiver tørre forhold (rødt) og over 0 angiver våde forhold (blåt). En tørkegrænseværdi er her blevet defineret her som -1, hvilket resulterer i tørkeområdet/begivenhed B₁ og B₂.

En indledende analyse af de forskellige tørkekarakteristikker (intensitet, varighed, alvorlighed og maksimum) viste hurtigt at alvorlighed var bedre beskrivende end de andre karakteristika, hvilket skyldes, at der inkorporeres information om både varigheden og hvor kraftig tørkeforholdene har været. Derudover, konkluderer [99], at alvorlighed er den bedst beskrivende tørkekarakteristik til vurdering af sætningsskader på huse i Frankrig. De umiddelbare resultater i denne analyse, peger på samme konklusion og derfor er fokus på alvorlighed i nærværende analyse.

For beregning af tørkekarakteristika skal der fastsættes en grænseværdi for, hvad der defineres som tørke. Selvom alle anomalier under 0 indikerer tørrere forhold end gennemsnittet er de ikke nødvendigvis en egentlig tørke der kan føre til afledte konsekvenser såsom mulige sætninger i jordbunden. Den bedste grænseværdi for tørkedefinition i forbindelse med tørkeskader er for nuværende ukendt, derfor testes grænseværdier mellem 0 og -1,25 for SGDI og 0 og -1,5 for SMDI. En tørkebegivenhed afgrænses herefter fra begyndelsen af en tørkebegivenhed (når indekset går under grænseværdien) til dens afslutning (når indekset er højere end grænseværdien).

Tabel 4-5: viser antallet af tørkeskader sammenlignet med SMDI og SGDI indeks på tidspunktet for skadesindmeldelsen. Indeksene er klassificeret som tørre eller våde forhold baseret på en grænseværdi på 0. Tabellen inkluderer også en underkategori for tørkeskader, hvor dybden til grundvandsspejlet (dtp) er mindre end 1.5 meter. Tørkeskader er defineret som tørkeskadeanmeldelser der er klassificeret som overvejende sandsynlige (OS) eller sandsynlige (S).

Tørkeskader\Indeks	Tør (SMDI)	Våd (SMDI)	Tør (SGDI)	Våd (SGDI)
OS+S	53	0	34	19
OS+S (dtp < 1.5)	30	0	25	5

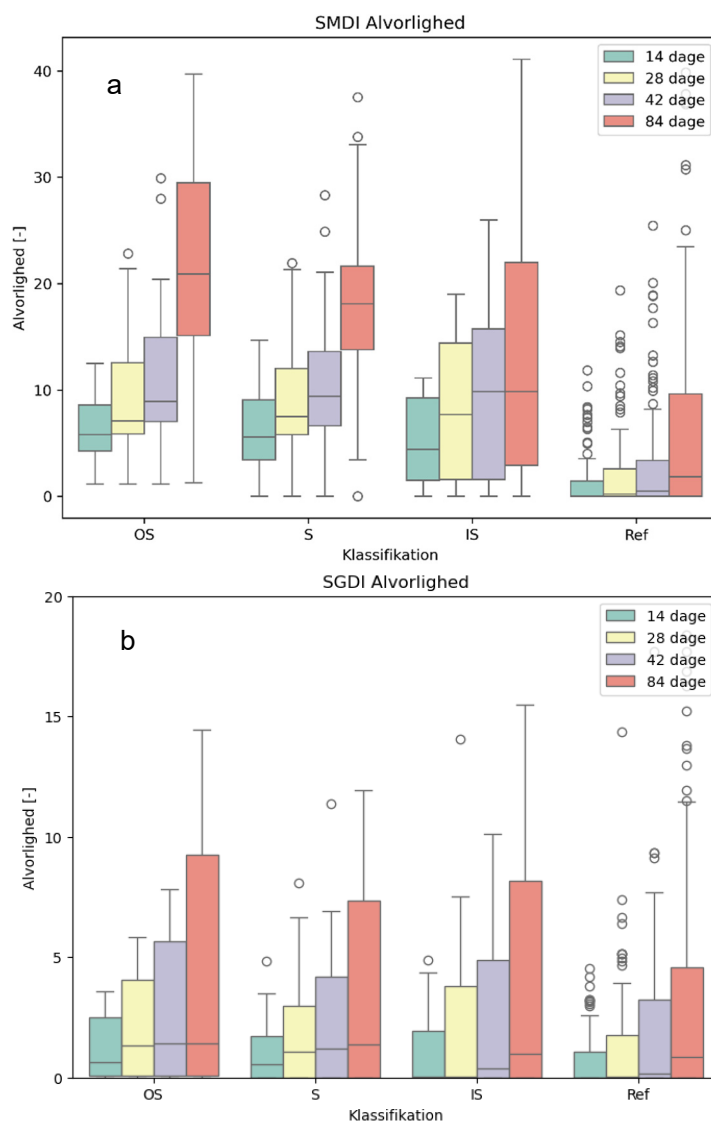
Med en grænseværdi på 0 for SMDI lå alle 53 af tørkeskadeanmeldelserne (sandsynligt eller overvejende sandsynligt), i tørre perioder. For SGDI var andelen lavere, idet kun 34 ud af 53 (64 %) af tørkeskaderne blev registreret i tørre perioder, mens de resterende 19 fandt sted under våde forhold. Disse resultater opsummeres i Tabel 4-5. En del af forklaringen for det dårligere sammenfald med SGDI kan muligvis findes i dybden til grundvandsspejlet, da det er sandsynligt, at områder, hvor grundvandet naturligt ligger dybt, viser en lavere korrelation med tørkeskader pga. afstanden til bygningens fundament, da størstedelen af ejendomme er funderet i en dybde omkring 90-100 cm. Hvis tørkeskadeanmeldelser udelukkende inkluderer lokaliteter med en grundvandsstand mindre end 1,5m under terræn (data fra DK-modellen), så vil der være 83% af tørkeskadeanmeldelserne, som falder sammen med tørre forhold for SGDI. SGDI fra områder med en median dybde mindre end 1,5 meter fra terræn er således væsentligt bedre korreleret med tørkeskadeanmeldelser, end de områder hvor grundvandet står dybere.

Sammenhæng mellem tørkegraden (alvorlighed) og tørkeskader

Vi forventer, at klasserne "Overvejende sandsynlig" (OS) og "Sandsynlig" (S) burde have højere alvorlighedsværdier sammenlignet med "Ikke sandsynlig" (IS) og referenceklassen (Ref). Dette skyldes, at områder, der vurderes som sandsynligt eller overvejende sandsynligt tørkeramte, er identificeret på baggrund af kriterier, der relaterer sig til potentielle tørkeskader. Derfor undersøges det om der er systematisk forskel mellem alvorlighedsværdier omkring skadestidspunktet for de fire klasser.

På grund af usikkerhed i anmeldelsestidspunktet for tørkeskader vil skadesdatoen dog ofte ikke falde præcis sammen med en konkret tørkebegivenhed. Derudover er det også muligt at en tørkehændelse, som en given tørkeskadeanmeldelse er sammenfaldende med, ikke nødvendigvis er den tørke, der forårsagede sætningsskaden. Den skadeinducerede tørkeperiode (udviklingsperioden) kan således være en tørkebegivenhed, der opstod måneder før. Varigheden af den forudgående udviklingsperiode før skaden er dog ukendt, derfor testes flere udviklingsperioder (tidsvinduer) i denne analyse. Der introduceres en bufferperiode fra anmeldelsestidspunktet og et antal dage tilbage i tiden. På baggrund af forskellige kombinationer af buffer perioder og grænseværdi, udregnes en suite af potentielt korrelerede tørkekarakteristika for tørkeskadeanmeldelserne. Her testes buffervinduerne 14, 28, 42 og 84 dage og grænseværdierne 0, -0,25, -0,5 og -1 (SMDI er skaleret med faktor 1,5). Denne analyse giver en øget indsigt i hvordan bufferperiode og tørkegrænseværdi for indeks kombineres bedst muligt til at repræsentere og vurdere tørkeskader.

Figur 4.7 viser alvorligheden (eller omfanget) af tørke målt med SMDI (a) og SGDI (b) inden for forskellige bufferperioder på 14, 28, 42 og 84 dage fordelt på fire klasser: *Overvejende sandsynlig* (OS), *Sandsynlig* (S), *Ikke sandsynlig* (IS) og *Ref* (reference). Referencen er genereret ud fra punkter der er tilfældigt udvalgt fra områder uden rapporterede tørkeskader i perioden 2013-2023. Alvorlighed defineres som summen af underskudsværdier for indekset (svarende til integralet) under grænseværdien, der her er sat til 0 og over en given periode. Generelt stiger alvorligheden med længere bufferperioder, da mere data inkluderes i beregningen.



Figur 4-7: Boksplots med interkvartilafstand (farvede kasser), medianværdi (sorte horison-tallinjer), haler viser ydre observationer som ligger indenfor 1,5 standard afvigelse (sort ver-tikallinjer) og punkter viser individuelle observationer udenfor 1,5 standard afvigelse. Boks-plots er lavet for (a) SMDI-alvorlighed og (b) SGDI-alvorlighed, hvor alvorlighed er udregnet for hver tørkeskadeanmeldelse i klasserne OS (overvejende sandsynlig), S (sandsynlig), IS (ikke sandsynlig) og Ref (reference) som er tilfældigt valgte punkter i Danmark mellem 2013 og 2023. De forskellige farver viser alvorlighed udregnet med forskellige bufferperioder, hen-holdsvis med 14, 28, 42 og 84 dage. Tørkegrænseværdien er fastsat til 0.

I Figur 4-7a observeres en klar forskel i alvorlighedsværdier for SMDI mellem klasserne, især ved en bufferperiode på 84 dage (rød bar), ved den bufferperiode har klassen OS den høje-ste median alvorlighedsværdi, efterfulgt af S, mens IS og Ref har markant lavere værdier. Dette tyder på, at de sandsynlige tørkeramte områder (OS og S) er godt repræsenteret i forhold til alvorligheden. Det bemærkes også, at OS og S viser en mindre spredning i værdi-erne sammenlignet med IS, hvilket indikerer større homogenitet i alvorligheden for de sand-synlige klasser.

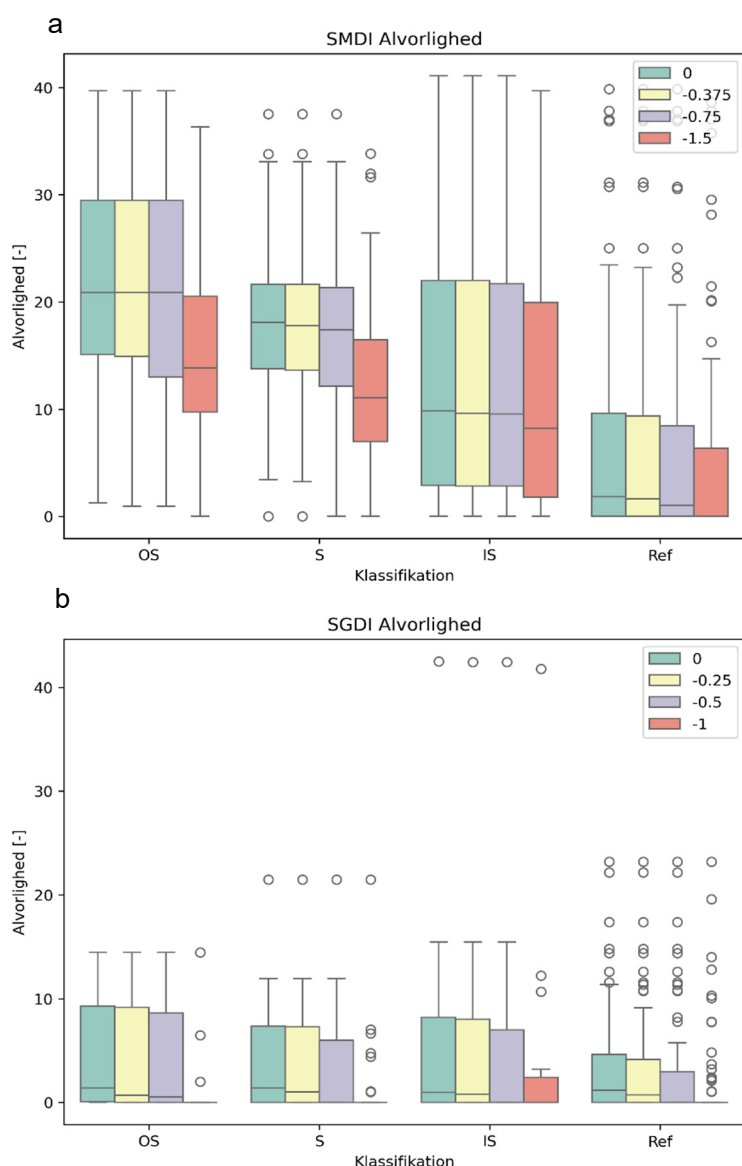
I *Figur 4-7b* er forskellen mellem klasserne mindre tydelig sammenlignet med SMDI. OS og S har generelt højere medianværdier end IS og Ref, men forskellene mellem bufferperioderne er ikke lige så markante. Ved 84 dage ses en tendens til større kontrast mellem OS/S og IS/Ref, men den samlede forskel er mindre udtalt, og spredningen inden for klasserne er højere end for SMDI. En del af forklaringen på den lavere kontrast for SGDI kan muligvis findes i gennemsnitsdybden til det øverste grundvandsspejl. Der findes flere tilfælde af tørkeskader, hvor dybden til grundvandsspejlet er betydelig. I sådanne situationer vil man, som nævnt, ikke forvente, at SGDI har en betydelig indflydelse på tørkeskader, da grundvandet ikke befinder sig i nærheden af bygningens fundering. Dette kan reducere SGDI's relevans som indikator for tørkeskader i områder med dybtliggende grundvand.

Bufferperioden på 84 dage giver den største kontrast i alvorlighedsværdier for SMDI, hvor OS og S-klasserne adskiller sig markant fra IS og Ref, både i median og spredning. Dette understøtter, at længere bufferperioder kan give en mere robust skelnen mellem tørkeramte og ikke-tørkeramte områder. For SGDI er resultaterne mindre entydige, men der ses stadig en tendens til højere alvorlighed for OS og S sammenlignet med IS og Ref. Som forventet har Ref-klassen de laveste alvorlighedsværdier. Denne klasse fungerer effektivt som reference og bekræfter forskellen mellem de sandsynlige og ikke-sandsynlige klasser.

Samme figurer for SMDI- og SGDI-alvorlighed er fremvist i *Figur 4-8*, hvor bufferperioden er fastsat til 84 dage og forskellige tørkegrænseværdier er testet. Her er testet tørkegrænseværdier på 0, -0,25, -0,5 og -1 er undersøgt for begge indeks, hvor SMDI er skaleret med en faktor på 1,5 for at kompensere for dets generelt højere absolutte værdier sammenlignet med SGDI. Der ses en væsentlige mindre kontrast mellem klasser ved forskellige tørkegrænseværdier, og en værdi mellem 0 og -0,75 har praktisk talt ingen påvirkning af alvorlighedsværdier. I tilfælde af SGDI, vil en tørkegrænseværdi på -1 dog resultere i, at der slet ikke findes tørkeforhold i størstedelen af tørkeskaderne.

For SMDI i *Figur 4-8a* observeres en generelt højere alvorlighed for klasserne OS og S sammenlignet med IS og Ref uanset grænseværdi. Ændring i grænseværdier fra 0 til -0,75 har begrænset indflydelse på alvorlighedsværdierne i klasserne, hvilket antyder, at SMDI kan være usensitiv over for variationer i tærskelværdier. Grænseværdien -1,5 medfører dog et generelt fald i alvorligheden for alle klasser, men kontrasten mellem OS/S og IS/Ref oprettholdes.

For SGDI i *Figur 4-8 b* viser figuren endnu mindre sensitivitet mellem tørkegrænseværdier og klassernes alvorlighedsværdier, hvor valg af tørkegrænseværdi har en meget lille betydning for fordelingen af alvorlighedsværdier. Derudover, findes der en tydelige grænse for hvor lavt tørkegrænseværdien kan fastsættes, da få tørkeskader falder sammen med tørkeforhold ved en grænseværdi på -1.



Figur 4-8: Boksplots med interkvartilafstand (farvede kasser), medianværdi (sorte horisontallinjer), haler viser ydre observationer som ligger indenfor 1,5 standard afvigelse (sorte vertikallinjer) og punkter viser individuelle observationer udenfor 1,5 standard afvigelse. Boksplots er lavet for (a) SMDI-alvorlighed og (b) SGDI-alvorlighed, hvor alvorlighed er udregnet for hver tørkeskadeanmeldelse i klasserne OS (overvejende sandsynlig), S (sandsynlig), IS (ikke sandsynlig) og Ref (reference) som er tilfældigt valgte punkter i Danmark mellem 2013 og 2023. De forskellige farver viser alvorlighed udregnet med forskellige tørkegrænseværdier, henholdsvis med 0, -0,375, -0,75 og -1,5 for SMDI (a) og 0, -0,25, -0,5 og -1 for SGDI (b). Bufferperioden er fastsat til 84 dage.

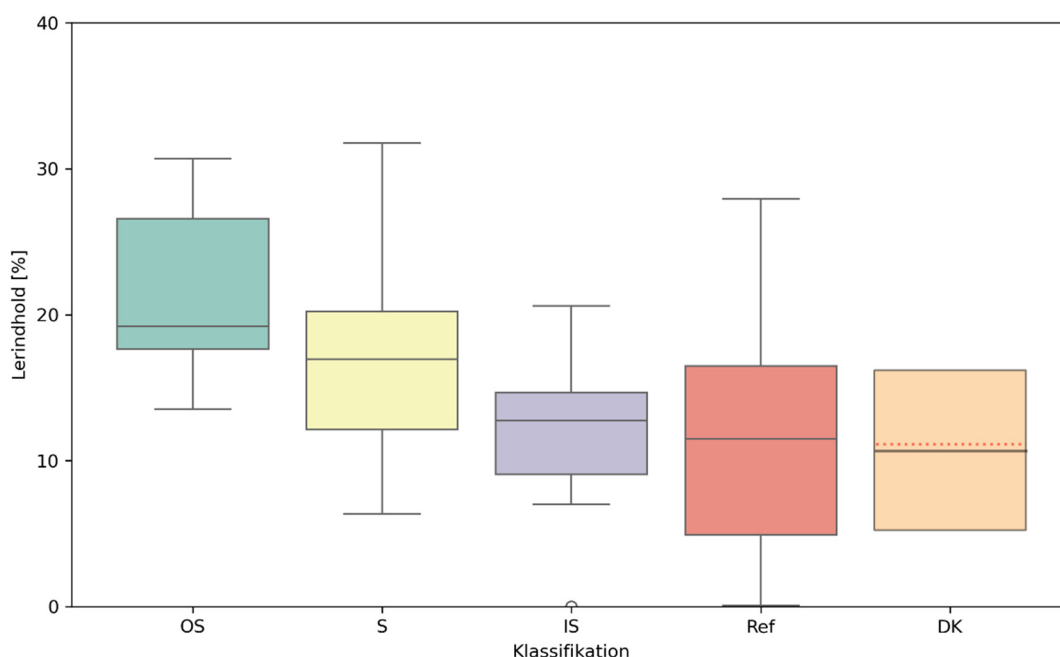
Figur 4-8 viser alvorligheden (eller omfanget) af tørke målt med SMDI (a) og SGDI (b) med forskellige tørkegrænseværdier på 0, -0,25, -0,5 og -1 (SMDI er skaleret med gange 1,5) fordelt på fire klasser: Overvejende sandsynlig (OS), Sandsynlig (S), Ikke sandsynlig (IS) og Ref (reference). Alvorlighed defineres som summen af underskudsværdier for indekset

(svarende til integralet) under en tærskelværdi og over en given periode. Her er bufferperioden fastsat til 84 dage

Analysen fremhæver at SMDI i forhold til SGDI, skaber en klassefordeling som passer bedre med den forventet klassefordeling, altså at der findes mere tørre forhold i OS- og S klassen i forhold til IS- og referenceklassen. Derudover viser analysen at den optimale tørkegrænseværdi for SGDI og SMDI forventes at være mellem 0 og -1, samt en bufferperiode på +84 dage. Mangel på en tydelig eller stærk kontrast mellem klasserne, tyder dog på at simuleringsanomalier ikke alene kan anvendes til vurdering af tørkepåvirkede sætningsskader.

Styrende jordbundsforhold

Særligt er jordens lerindhold og smektitindhold i leret afgørende faktorer i forbindelse med sætningsskader. Jo højere smektitindhold, desto mere vil jorden kunne trække sig sammen og udvide sig, når fugtighedsforholdene ændrer sig, hvilket er det, der forårsager sætnings-skader. Der findes ingen landsdækkende kort over smektitindholdet i de øverste 2-3 m af jordbunden i Danmark, men der eksisterer landsdækkende kortlægning af lerindhold [100]. Et jordbundstypekort er udarbejdet af Aarhus Universitet (AU) på baggrund af et kort over jordens lerindhold, tekstur og indhold af organisk kulstof ved hjælp af metoder beskrevet af [101, 102] i en opløsning på 30,4 m. Fordelingen af lerindhold er blevet undersøgt for hver klasse på baggrund af dette lerindholdsdatasæt og sammenlignet med en reference-klasse samt gennemsnittet af lerindholdet i hele Danmark.

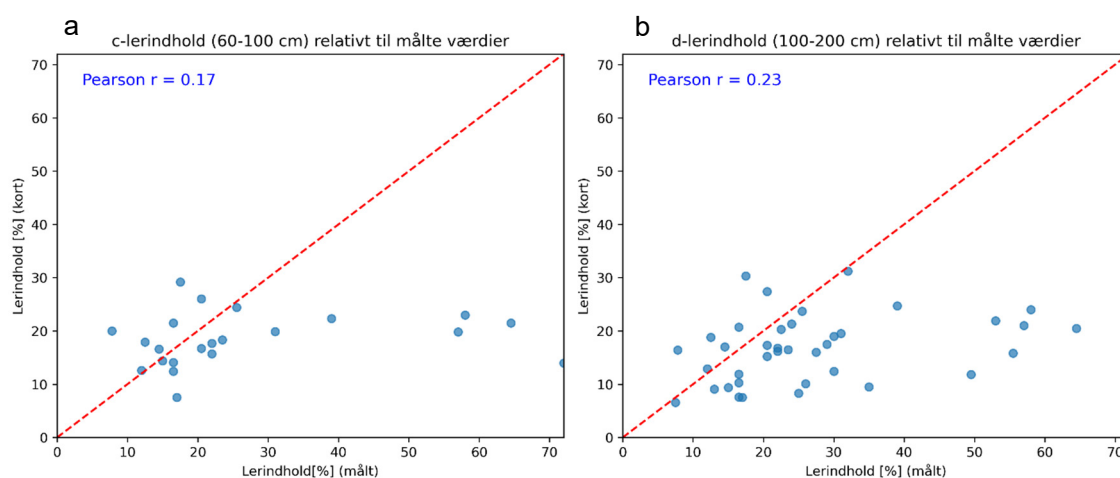


Figur 4-9: Boksplots for lerindhold [%] med interkvartilafstand (farvet kasser), medianværdi (sorte horisontallinjer), haler viser ydre observationer som ligger indenfor 1,5 standard afvigelse (sorte vertikallinjer) og punkter viser individuelle observationer udenfor 1,5 standard afvigelse. Gennemsnitsværdien i Danmark er markeret med en stiplede rød linje. Boksplots er lavet for Naturskaderådets klassifikationer, Ref (reference) og hele Danmark (DK).

Lerindholdsklassefordelingen i *Figur 4-9* viser en tydelig indikation for OS- og S-klasserne, hvor lerindholdet er markant højere sammenlignet med de øvrige klasser. Især skiller IS-klassen sig ud med et lavere lerindhold, ligesom det ses for reference-klassen og lerindholdet i Danmark generelt. Dette indikerer, at lerindholdsdatasættet potentielt kan anvendes som en proxy for jordbundsforhold til vurdering af sætningsskader i kombination med simulerings-anomalier. Det vil her betyde at desto højere lerindhold, desto mere sikre er vi at jordens forhold kan føre til sætningsskader.

Lerindholdsværdier er tilgængelige for følgende dybdeintervaller: 0-30 cm, 30-60 cm, 60-100 cm og 100-200 cm. I denne analyse er lerindholdet for intervallet 60-200 cm anvendt. Det er dog uklart, hvilket dybdeinterval der bedst korrelerer med sætningsskader for en given lokation. I forbindelse med sagsbehandling under NSR er der foretaget jordbundsanalyser, hvor lerindholdet er punktmålt i dybden 60-300 cm i forbindelse med geotekniske undersøgelser. Disse målinger er blevet sammenlignet med tilsvarende værdier fra lerindholdskortet for intervallerne 60-100 cm og 100-200 cm.

Resultaterne i *Figur 4-10* viser, at der er en vis korrelation mellem de målte værdier og lerindholdskortet for lerindhold under 30 %. For højere lerindhold afviger kortets værdier imidlertid markant. Lerindholdskortet repræsenterer generelt ikke værdier over 30 %, hvilket står i kontrast til resultaterne fra jordbundsanalyserne i sagsbehandlingen, hvor mange målinger viser lerindhold mellem 30 % og op til 70 %. Dette forhold er afgørende at være opmærksom på, når man sammenligner punktmålinger med kortets værdier, og peger på behov for at forbedre kortgrundlaget.



Figur 4-10: Lerindhold [%] for NSR målte værdier (x-aksen) og lerindholdskortet (y-aksen) i dybde interval 60-100 cm (a) og 100-200 cm (b), hvor 1:1 forholdet er vist med en rød stiplede linje.

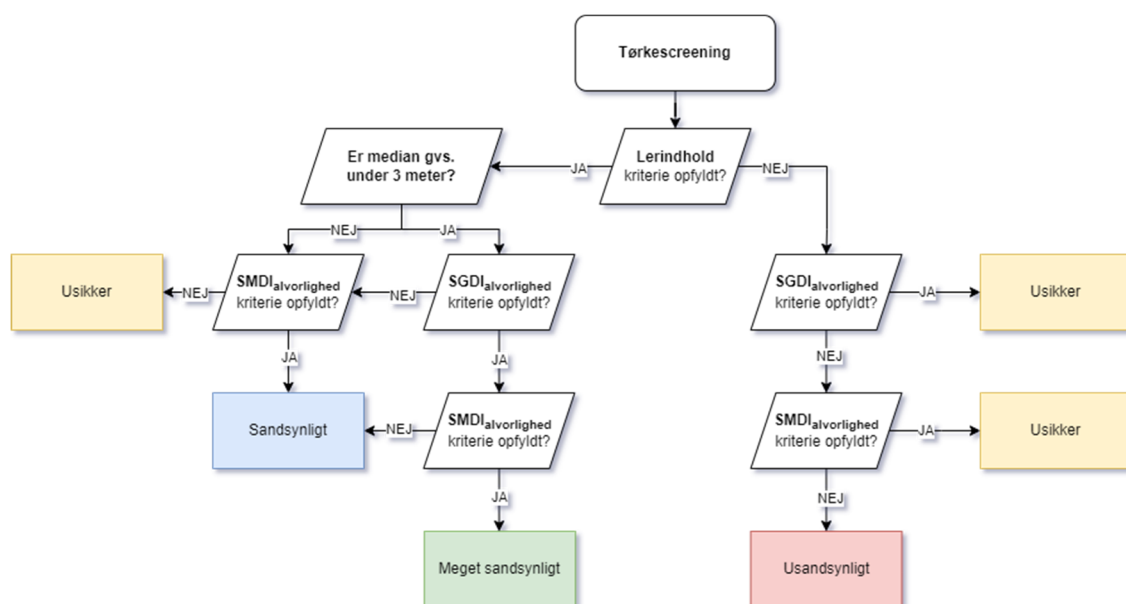
Tørkeskadevurderingsredskab

Vi vil på baggrund af overstående resultater, skabe en simpel vurderingsmodel af tørkeskader med brug af lerindhold, SMDI- og SGDI-alvorlighed som model inputs. Formålet med modellen vil være screening af tørkeskadeanmeldelser, samt som støtte til den geotekniske tørkeskadevurdering udført af NSR.

Den konceptuelle vurderingsmodel er vist i *Figur 4-11*, hvor der på baggrund af model inputs kan opnås fire forskellige klassifikationer. Henholdsvis, *meget sandsynlig* hvis alle kriterier opfyldes, *sandsynlig* hvis ler kriteriet og enten SGDI- eller SMDI-kriteriet er opfyldt, *usandsynlig* hvis ingen kriterier opfyldes og til sidst klassifikationen *usikker* i tilfælde hvor enten jordforholdene eller de hydrologiske tørkeindeks opfylder deres kriterie. Det kan bemærkes, at der lægges ekstra vægt på jordforholdene, altså lerindhold, da der kun opnås sandsynlige klassifikationer så længe lerindholdskriteriet er opfyldt. Hvorimod, hydrologiske indeks kriterie kun kan opnå *usikker* eller *usandsynlig* hvis lerindhold kriteriet ikke er opfyldt.

Definitionen af kriterierne vil her være grænseværdier, fx at lerindholdet mindst skal være 15 % eller at SMDI-*alvorlighed* mindst skal være 5. I tilfælde af SGDI-*alvorlighed* er der et sekundært kriterie, hvor SGDI kun inddrages i beslutningstræet hvis mediandybden til det øverste grundvandsspejl er under 3 meter. Denne værdi er valgt på baggrund af analysen i afsnit "Tørkekarakteristikker, grænseværdi og udviklingsperiode/buffer" og at dybden til det øverste grundvandsspejl har en *mean absolute error* (MAE) på 2 meter i DK-modellen [50].

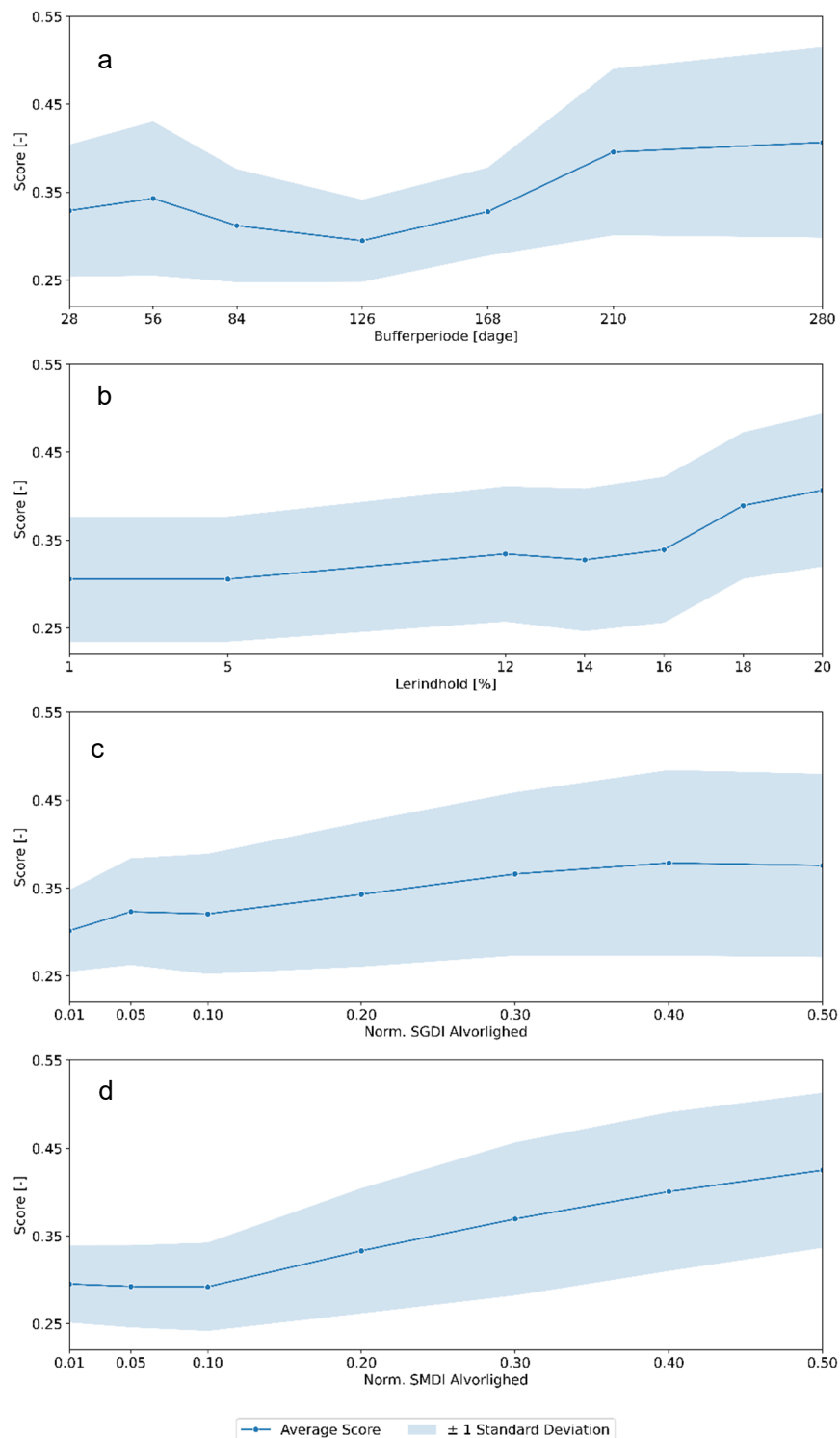
Disse kriterier vil dog være afhængig af hvilke værdier, der vælges for bufferperiode eller tørkegrænseværdi, fx hvis der vælges en meget lang bufferperiode vil alvorlighedsværdierne blive tilsvarende større og derfor vil alvorligheds-kriteriet også skulle øges. For bedre at indskrænke mulige parameter kombinationer, er det blevet lavet en såkaldt *grid search*, hvor alle kombinationer af forskellige værdier for bufferperioden, samt kriterieværdier for lerindhold og SGDI- og SMDI-*alvorlighed* (se *Figur 4-11*) er blevet testet mod en forventet klassefordeling. Tørkegrænseværdien er blevet fastsat til -0,75 for SMDI og -0,25 SGDI, da resultaterne i *Figur 4-8* antyder, at parameteren generelt har en lille betydning for klassefordelingerne.



*Figur 4-11: Konceptuel tørkeskade vurderingsmodel/beslutningstræ, som bruger lerindhold og SGDI- og SMDI-*alvorlighed* som datainput.*

Det antages, at alle OS og S tørkeskadeanmeldelser skal klassificeres som sandsynlige eller meget sandsynlige, mens alle IS tørkeskadeanmeldelser skal være usandsynlige. Sandsynlig og meget sandsynlig tildeles en værdi af 1, usandsynlig tildeles en værdi af 0, og usikker tildeles en værdi af 0,5. Ved at kombinere forskellige parameterverdier genereres 7^4 med 4 parameter og 7 parameterverdier hvilket giver 2,401 parameterkombinationer, som hver især evalueres i forhold til den forventede fordeling (OS & S: 1, IS: 0). Evalueringen sker ved at beregne den absolutte residual $|modelværdi - forventet værdi|$ for hver anmeldelse og derefter tage gennemsnittet af residualerne. En residualværdi på nul angiver et perfekt match mellem vurderingsmodellen og den forventede klassificering.

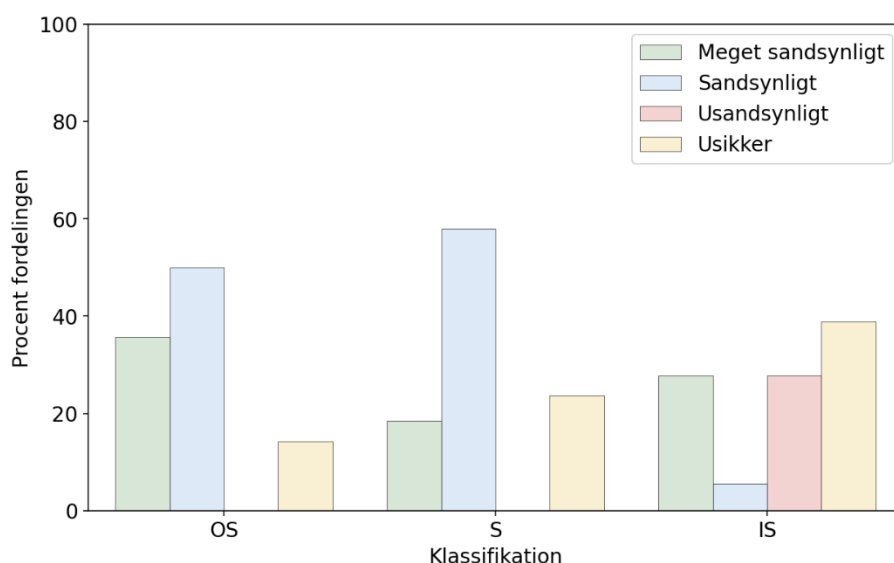
Formålet med denne *grid search* er at finde de parameterverdier for beslutningstræet, der bedst repræsenterer de faktiske tørkeskadeanmeldelser og deres sandsynlighedsklasser. Processen udføres udtømmende, hvor samtlige parameterkombinationer evalueres.



Figur 4-12: Følsomhed af den gennemsnitlige score og dens standardafvigelse over for variationer i forskellige parametre for vurderingsmodellen. Panelerne viser, hvordan den gennemsnitlige score (blå linje) og standardafvigelsen (skyggeområde) ændrer sig med (a) bufferperiode (dage), (b) lerindhold (%), (c) normaliseret SGDI-alvorlighed og (d) normaliseret SMDI-alvorlighed. De skyggefulde områder repræsenterer ± 1 standardafvigelse, hvilket giver et mål for variation omkring gennemsnittet.

Figur 4-12 viser den gennemsnitlige score for en given parameter samt standardafvigelsen for samme parameter. En flad kurve for en parameter indikerer, at vurderingsmodellen er ufølsom over for den pågældende parameter. Omvendt indikerer en dal i kurven, at der findes et optimalt værdispænd, altså et spænd af parameter værdier som giver tilsvarende score. Alvorlighedsværdier er i Figur 4-13 blevet normaliseret til maksimum og minimum alvorlighedsværdien på grund af SGDI- og SMDI-alvorlighedsværdikriteriet ændres når bufferperioden ændres.

Den bedste score blev opnået med en bufferperiode på 126 dage, lerindhold kriterie på 14 %, SGDI- og SMDI-alvorligheds kriterie på 0,1 (normaliseret til min-max) og med tørkegrænseværdien fastsat til -0,75 for SMDI og -0,25 SGDI, hvilket giver en score på 0,214. Der findes dog 96 parameterkombinationer, svarende til 5 % af kørslerne, som har en score på under 0,25. Det betyder at der ikke nødvendigvis findes én dominerende parameterkombination, men et spænd af parameterkombinationer kan skabe lignende resultater. Måske pga. af det relativt begrænsede datasæt. Fordelingen af klassifikationer fra vurderingsmodellens i Figur 4-11 for tørkeskadeanmeldelses klasserne IS, OS og S ved brug af parameterkombinationen med bedste score er vist i Figur 4-13. Her har IS tilsammen ca. 60 % af skadeanmeldelser som enten *usikker* eller *usandsynligt* og ca. 35-40 % i *meget sandsynligt* og *sandsynligt* klassen. Derimod er langt størstedelen af skadeanmeldelser for OS og S klassificeret som enten *meget sandsynligt* eller *sandsynligt*, med ca. kun 10 til 20 % i *usikker* klassen.



Figur 4-13: Fordeling af klassifikationer med vurderingsmodellen for NSR klassifikationer IS, OS og S, ved brug af parameterkombination med bedste score.

Resultatet er tilfredsstillende og vurderingsmodellen fordeler klassifikationer på en måde man ville forvente, fx IS skal have flest *usandsynlige* og *usikre* tørkeanmeldelser, hvorimod OS og S skal have flest *meget sandsynlige* og *sandsynlige* tørkeanmeldelser. Man kan måske påpege at vurderingsmodellen er for forsigtig med at angive tørkeanmeldelser som *usandsynlige*. Men som et screeningsværktøj vil det stadig kunne hjælpe med at identificere potentielle tørkerisici og prioritere yderligere undersøgelser i sager med høj usikkerhed. Modellen kan derfor fungere som en første indikation af tørkeforhold og bidrage til en mere målrettet indsats i både overvågning og håndtering af tørkeskadeproblemer.

4.2.3.4 Perspektivering

Tørkeskadevurderingsredskabet tillader brugeren eller eksperten at vurdere de historiske hydrologiske forhold før og i tidspunktet for en mulig tørkeskade, og ikke kun på det tidspunkt, hvor specialisten udfører den geotekniske jordbundsanalyse, som blot giver et øjebliksbillede hvor hyppigt mange uger eller måneder efter selve tørkeskaden optrådte. Som tidligere konkluderet, kan simuleringsanomalier ikke stå alene i vurderingen af tørkeskader, og det samme gælder for jordbundsanalysen. Det kræver, at en hydrologisk tørkeanomali har været til stede omkring tidspunktet for skadesindmeldingen for at kunne bekræfte en tørkepåvirket sætningsskade. I fremtiden, når hydrologiske sæsonprognoser regelmæssigt dannes, kan det være muligt at komme med en prognose for hele Danmark ved hjælp af en simpel model som den, der er vist her. Denne model vil kunne identificere, hvilke ejendomme eller regioner der er udsatte for potentielle sætningsskader som følge af tørkepåvirkning.

En højere opløsning på den hydrologisk model, kan også bidrage til en mere korrekt repræsentation af vandindhold og grundvandsanomalierne på adresser hvor tørkeskader er opstået. Ligeledes kan en forbedret beskrivelse af rodzonen som nævnt i afsnit 2.3.1, øge troværdigheden af SMDI tidsserierne.

Det er dog vigtigt at påpege at der for nuværende tidspunkt kun findes et begrænset datasæt for tørkeskader, pga. den korte tid som Naturskaderådets tørkeskadeindsats har eksisteret. Der vil således med tiden, blive indsamlet et større og bedre datasæt, der kan forbedre korrelationen og analysen her. Ydermere vil et teksturkort indeholdende information omkring de problematiske lertyper og deres plastiske egenskaber og forekomst, i høj grad forbedre mulighederne for at kortlægge og forudsige sætningsskader som følge af tørker.

4.2.4 Natur: Vegetation

4.2.4.1 Vegetationsstress på landbrugsarealer

I afsnit 3.2.3 er brugen af satellitdata til at overvåge tørke på arealer med landbrugsafgrøder evalueret, ved anvendelse af vegetationsindeks af to satellit produkter (MODIS og GIMMS) med relativt lav rumlig opløsning (km skala). Analysen af vegetationsindeksen viser en klar sæsonvariation med størst vegetationsdensitet om sommeren (*Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) op til 0,8) og et fald i NDVI i sensommeren på grund af høst samt lave værdier om vinteren. Rumligt ses lavere NDVI-værdier i byområder samt i Vestjylland i den tidlige vækstsæson. Dette skyldes, at Vestjyllands sandede jorde har en lavere markkapacitet end de mere lerede jorde i Østdanmark, hvilket begrænser vandtilgængeligheden og dermed plantevæksten. Derudover spiller forskelle i afgrøder også en rolle. Lave vegetationsindeks i vækstsæsonen, som kan indikere vandmangel og tørke, kan observeres både tidsmæssigt og rumligt. Tørkesomrene i 2018 og 2023 er tydelige i MODIS-data.

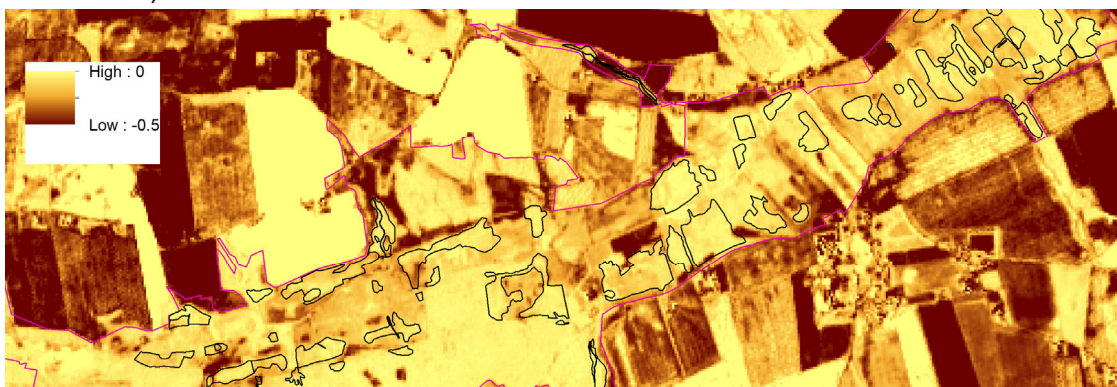
Det er vigtigt at bemærke, at der er en forsinkelseeffekt mellem nedbørsunderskud og vegetationspåvirkning. Vand i rodzonen og grundvandet kan opretholde plantesundheden i en vis periode med lav nedbør. Sammenligning af vegetationsindekset med SPI (Standardiseret Nedbørsindeks) viser, at synkroniseringen mellem lave vegetationsindekser og nedbørsunderskud bliver tydeligere, når nedbørsdata aggregeres over 2-3 måneder. Det konkluderes

at satellitbaserede vegetationsindekser har potentiale til både at validere hydrologiske modeller og fungere som overvågningsværktøj under tørke.

4.2.4.2 Vegetations stress i naturarealer (GATØ)

Til identifikation af områder i ådale med grundvandsindsivning har GEUS arbejdet med et screeningsværktøj baseret på satellitbaserede observationer for Kastbjerg Ådal i Midtjylland (MST 2024). Værktøjet bruger vegetationsindeks afledt af Sentinel-2 satellitdata, især NDVI, til at analysere rumlige og tidsmæssige mønstre i grundvandsafhængige terrestriske økosystemer (GATØ) vækst ved normale nedbørsforhold og under tørkehændelser. Sentinel-2 data anvendes her da en høj rumlig opløsning (10 m) er nødvendig til analyser af specifikke økosystemer. Det antages at vegetation påvirket af grundvand kan identificeres gennem en NDVI-analyse, da ådalens vegetationsmønstre udviser store variationer som delvis kan forklares af grundvandets påvirkning. Analysen omfatter fire Sentinel-2 billeder, der repræsenterer forskellige klimatiske situationer, herunder en tørkesommer (2018), en sommer med gennemsnitlig nedbør (2020), og to billeder fra 2024 (forår og sommer) (Figur 4-14).

- a) Relative NDVI-forskel mellem juli 2020 (normal sommer) og juli 2018 (tørkesommer)



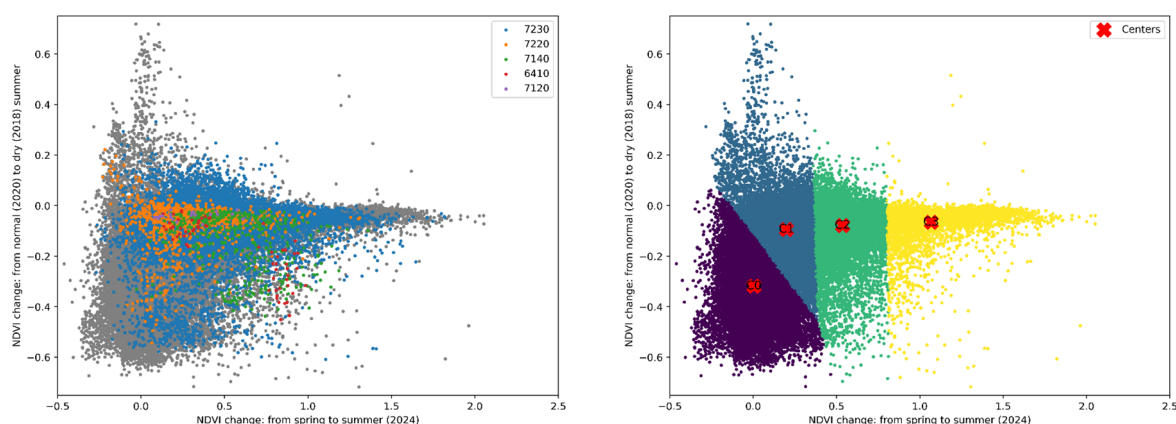
- b) Relative NDVI-forskel mellem juli 2024 og april 2024



Figur 4-14 Den relative NDVI-forskel er vist i (a) som responsen på tørke, og (b) sammenligningen af tidlige og maksimale vækststadier i 2024 (fra MST 2025). GATØ-forekomster er indtegnet som sorte polygoner og ådalen er afgrænset med polygonen i magenta.

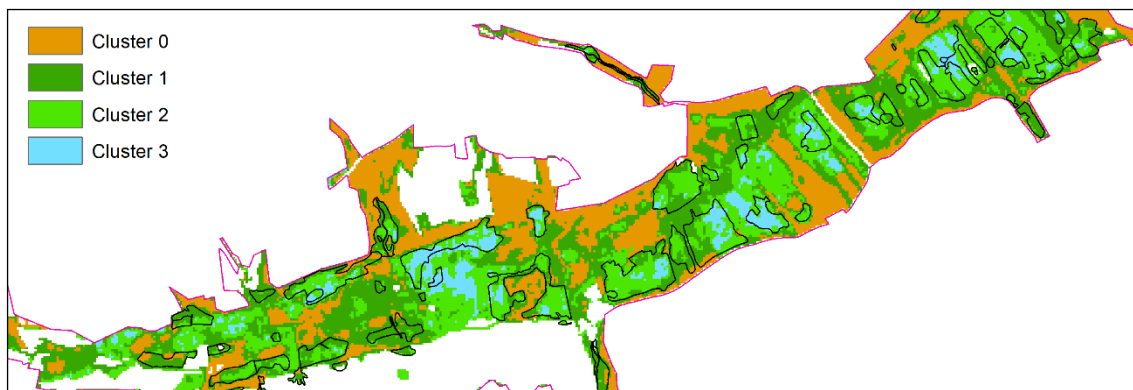
Undersøgelsen af NDVI-dynamikken i Kastbjerg Ådal indikerer at områder med grundvandsudsvining i arealer med udvalgte GATØ naturtyper (rigkær, kildevæld, hængesæk, nedbrudt højmosse og tidvis våd eng), er mindre påvirket af tørke end andre områder i ådalen. Dette fremgår af en mindre relativ reduktion i NDVI under tørkesituationen (gule arealer med værdier tæt på 0, Figur 4-14a). Desuden viser arealer med GATØ forsinket vækst i foråret på grund af vandmættede jordbundsforhold, men de når samme niveau af grønshed sammenlignet med andre områder om sommeren (mørkegrønne arealer med værdier tæt på 1, Figur 4-14b). Arealer udenfor ådalen indgår ikke i analysen, da signalet for disse er domineret af afgrødevalg og stadie.

For at syntetisere informationen fra NDVI-analysen blev en clusteranalyse anvendt til at gruppere ådalen baseret på dens NDVI-signatur. Dette resulterede i fire clustre, der antages at repræsenterer forskellige grader af fugtighed. De fire clustre er sandsynligvis udsat for varierende påvirkning af dræning og grundvandsudsvining, hvilket kan kobles til GATØ forekomster.



Figur 4-15 Venstre: Scatter plot af vegetations respons på tørke er vist versus sammenligning af tidlig og sen vækstsæson for hele ådalen (gråpunkter) og GATØ arealer differentieret efter naturtype: 7230 (Rigkær), 7220 (Kildevæld), 7140 (Hængesæk), 7120 (Nedbrudt højmosse) og 6410 (Tidvis våd eng). Højre: Resultater af clusteranalysen anvendt på alle celler i Kastbjerg Ådal. De resulterende fire grupperinger er vist med grupperingens centerpunkt. Cluster 0 (mørk blå) er tørrest mens cluster 1 (lysblå), 2 (grøn) og 3 (gul) viser stigende grad af vådhed (grundvandsudsvining) (Fra [103]).

Kortlægning af cluster 0-4 er under udarbejdelse i et pågående Miljøstyrelsen projekt [103] og vist i Figur 4-16. Overordnet forekommer det rumlige mønster af de fire clustre i god overensstemmelse med de hydrologiske gradienter i ådalen. Når man vurderer fugtigheden af GATØ-forekomsterne i ådalen i forbindelse med tidligere kortlægninger, er det tydeligt, at cluster 0 er tørrest, mest sandsynligt på grund af enten tilstedeværelsen af kunstige drænsystemer eller fraværet af grundvandsudsvining. Cluster 1-3 repræsenterer varierende grader af grundvandsudsvining med stigende fugtighed fra cluster 1 til cluster 3. Det fremgår tydeligt at der er et betydeligt sammenfald mellem cluster 2 og 3 ode arealer som er udpeget som GATØ-forekomster (indtegnet som sorte polygoner i Figur 4-16). Omvendt indikerer analysen at cluster 0 ikke er relateret til GATØ-arealer.



Figur 4-16 Kortlagte cluster 0-4 arealer, hvor cluster 0 er de tørreste arealer, mens cluster 1 til 3 er stadig fugtigere arealer. De sorte polygoner viser arealer med GATØ-forekomster og ådalen er afgrænset med polygonen i magenta (fra MST 2025)

Undersøgelsen konkluderer:

- GATØ-forekomsterne ligger helt overvejende indenfor de arealer som antages at repræsentere de fugtigste forhold (cluster 2 og 3).
- Værktøjet har potentiale til at hjælpe med at identificere arealer i ådalen med vegetationsvækst som et GATØ.
- Samlet set viser undersøgelsen lovende resultater med et nyt og effektivt værktøj til at kortlægge grundvandsudsivning i ådale og forbedre vores forståelse af grundvandsafhængige økosystemers vegetationsstress under forskellige klimatiske betingelser.

4.2.4.3 Perspektivering

Der foreslås yderligere undersøgelser for at forbedre screeningsværktøjet, herunder:

- Undersøgelse af robustheden af NDVI-signaturer ved at analysere flere satellitbilleder fra forskellige år.
- Opskalering af analysen til regionale og nationale niveauer.
- Inkludering af yderligere variabler i clusteranalysen, såsom topografi og hydrogeologi.

Der er også andre konsekvensrelaterede naturemner, der er relevante for tørke. Her kunne man fx specifikt arbejde videre med tørkerelaterede konsekvenser for vandløb og søer. Reduktioner i vandløbenes vandføring om sommeren som følge af påvirkninger fra tørke er undersøgt nærmere for negative påvirkninger på akvatiske flora og fauna ved en bæredygtig vandindvinding med analyse af *Ecological Quality Ratio* (EQR) for fire vandløbsindikatorer [97]. Analysen har samfundsrelevans når vandforsyningerne søger kommunerne om nye vandindvindingstilladelser.

Kraftig regn efter tørke kan give iltsvind og fiskedød i danske søer. Da regnen endelig kom efter den ekstremt tørre sommer 2018, forårsagede den massiv fiskedød i den netop genoprettede Filsø i Vestjylland [106]. Sådanne begivenheder kan fuldstændigt ødelægge et økosystem. Årsagen er at når regnen falder efter en langvarig tørkeperiode ledes store mængder af let omsætteligt organisk materiale fra jorden, grøfter og drænrør til søen. Kombineret med de stadig høje temperaturer kan dette lede til omfattende iltsvind og deraf følgende fiskedød når det organiske materiale omsættes.

4.2.5 Grundvand

Tørkekonsekvenser for grundvandet er ofte usynlige for det brede samfund. Det skyldes særligt responstiden, sammenholdt med bufferkapaciteten i systemet, samt relationen mellem sæsonerne (vintertørker og nedsivning) (se afsnit 1.1). Der kan derfor gå lang tid før en nedgang eller påvirkning af grundvandet pga. tørke kan opfattes i samfundet. Derudover er tørkerelaterede ændringer i vandforbruget også en faktor, for både hvornår og om en tørke opleves.

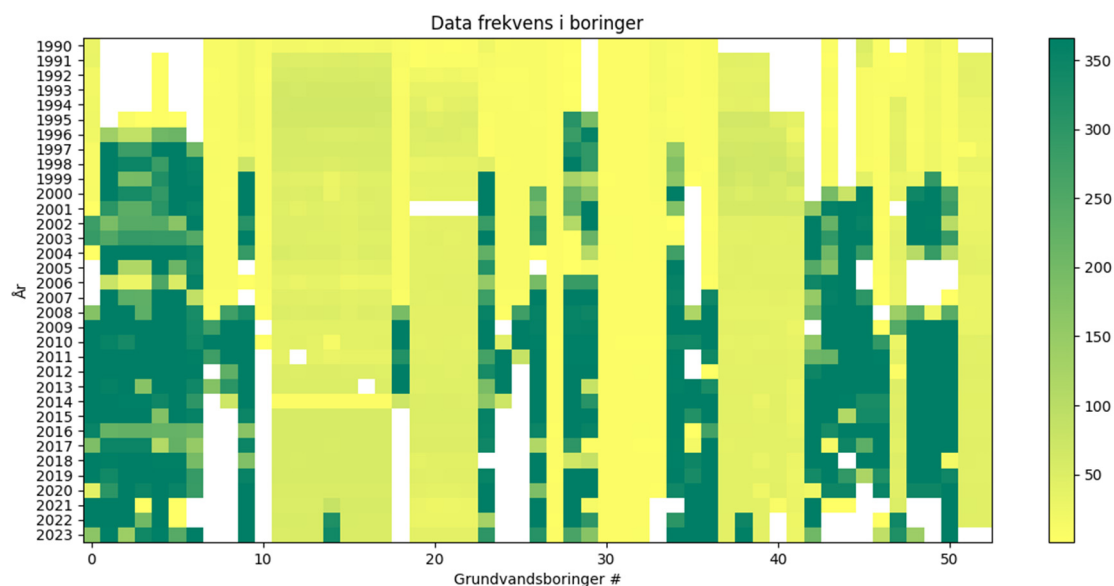
For den kvantitative del, findes der en lang række datasæt af grundvandsstand (både simuleret og observeret), som nævnt tidligere i denne rapport. Men det er uvist hvornår en tørkeleret nedgang i grundvandsstand rent faktisk fører til ressourceknaphed, bl.a. pga. den massive overliggende effekt af skiftende vandforbrug. Det er dog muligt indirekte at undersøge effekterne fra klimastyrede tørker på vandressourcen ved at evaluere:

- Nedsænkning af grundvandsstand i observationstidsserier, der ikke er påvirket af indvinding
- Modelleret nedsivningsnedgang under tørkeår (% af normal nedsivning, *recharge*)
- Modelbaseret udregning af grundvandsmagasinerne tørkesårbarhed (T-indeks)

Da konsekvenserne af tørke for grundvandsressourcen kun kan undersøges indirekte gennem observerede og modellerede variabler, giver det ikke mening at lave en decideret korrelation med tørkeanomalierne, der er baseret på stærkt korrelerede datasæt. Derfor beskrives de overordnede tendenser for de tre effekter i de efterfølgende afsnit.

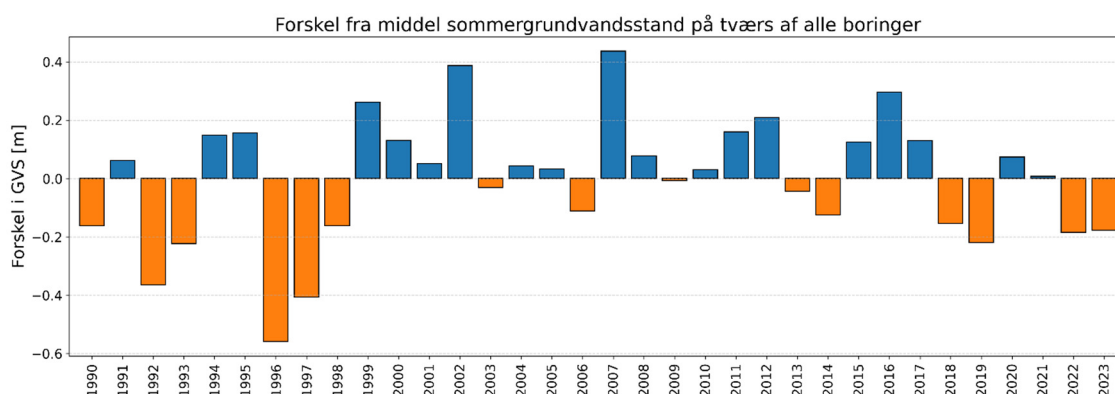
4.2.5.1 Nedsænkning af grundvandsstand i observationstidsserier

Som nævnt i afsnit 2.1, er det ikke ukompliceret at evaluere det klimastyrede signal i grundvandsstand som følge af tørke. Særlig på grund af den store menneskelige påvirkning fra indvinding og markvanding i store dele af landet. De 53 tidsserier identificeret i 2.1.2, er et bud på en datasamling, der vurderes til at være primært klimastyret. Disse 53 borer er derfor et godt udgangspunkt for en analyse af nedsænkning af grundvandsstand under tørkeår. Analysen kompliceres dog yderligere af forskellig observationsfrekvens og perioder med manglende data. Pga. kriterierne opstillet i afsnit 2.1, er der dog en vis datatæthed i disse boringstidsserier. En illustration af datafrekvensen ses på *Figur 4-17*.



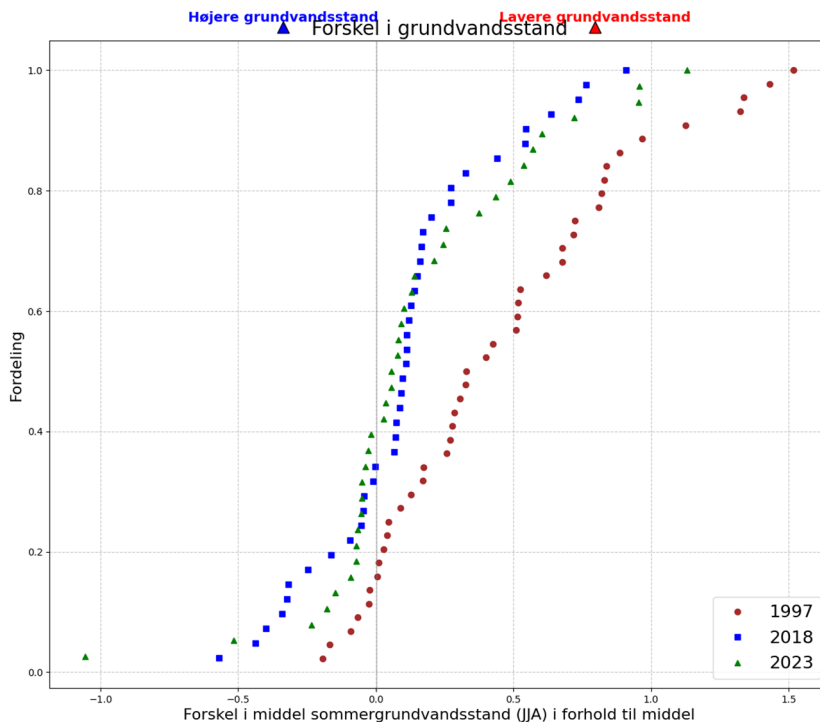
Figur 4-17 Antal målinger af grundvandsstanden hvert år for de 53 grundvandsboringer der er primært klimastyret.

I dette afsnit undersøges hvordan kendte tørkeevents har påvirket grundvandsstanden i de 53 klimastyrede boringer, ved at sammenligne sommer minimumgrundvandsstand og sommer middel grundvandsstand for tørkeår og "normale" år. For at sikre at der ikke er år der overrepræsenteres pga. forskellig datafrekvens, *resamples* alle boring til månedlig median. På **Figur 4-18** ses gennemsnittet af ændringen i forhold til middel grundvandsstand for alle boringer for hvert år i sommermånederne juni, juli, og august. Det skal nævnes at der således ikke er det samme antal boringer repræsenteret i alle årene (jf. **Figur 4-17**) pga. ukomplette tidsserier. Der ses dog alligevel nogle overordnede tendenser. Særlig 1996 og 1997 skiller sig ud fra gennemsnittet med over 40-50 cm lavere grundvandsstand om sommeren end normalt, mens 2018 og 2023 har mellem 10-15 cm lavere niveau end et normalt år. I områder hvor grundvandet er i tæt kontakt til følsomme naturtyper, kan disse ændringer have stor betydning. Bagved dette gennemsnit viser de enkelte boringer dog en vis spredning i signal.



Figur 4-18 Forskellen i sommer grundvandsstand for hver sommer i forhold til gennemsnittet midlet over de 53 boringer

På *Figur 4-19* vises forskellen mellem den gennemsnitlige sommergrundvandsstand og de tre tørkeår 1997, 2018 og 2023. Her ses hvordan 86% af borerne i 1997 viser dybere grundvandsstand (helt op til 1,5 meter lavere), mens der er i 2018 kun omkring 66% af borerne, der oplevede lavere grundvandsniveau, mens det i 2023 var 61%. Det er også tydeligt hvordan median for 1997 er kraftig skubbet mod højre, med langt større fald i grundvandsstand end de andre to eksempler.

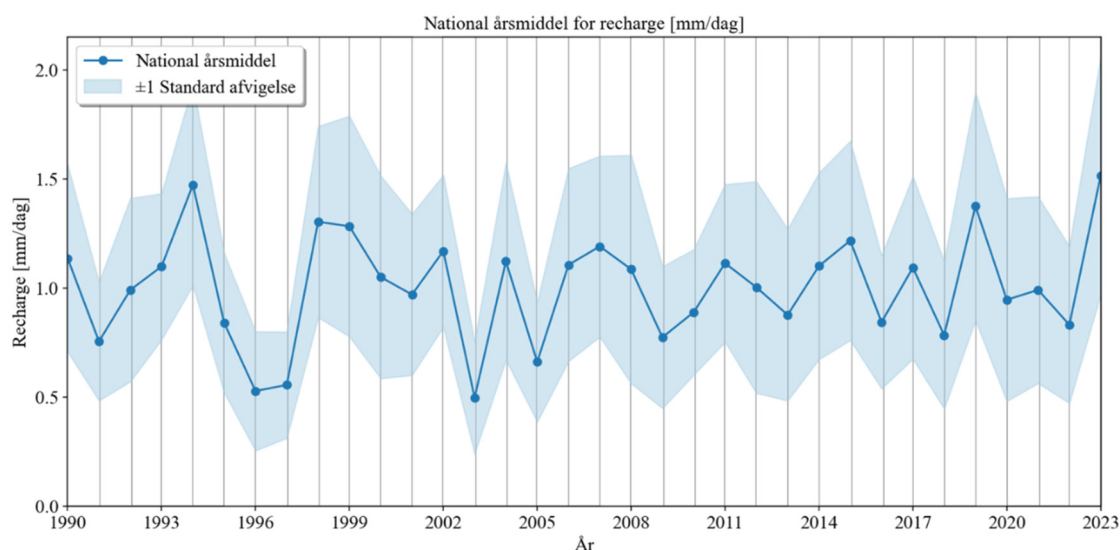


Figur 4-19 Forskellen i middel sommer grundvandsstand for 53 borer mellem sommer middel og 2018, 2023 (sommertørke)/1997 (vinter og sommertørke). JJA står for juni, juli og august.

Forskellen i respons for de forskellige tørker i forhold til nedsænkningen af grundvandsstand skal findes i timing af de forskellige tørker. For både 2018 og 2023, var tørkerne typiske sommertørker, hvor nedbørsunderskuddet primært ramte i sommerperioden. Kombineret med høje temperaturer og fordamning førte det til generel udtørring og tørkelignede tilstande særligt i jordvandet. 1997 var i kontrast en sommertørke, der forekom efter en vintertørke. Det betød at udgangspunktet før sommeren var anderledes for 1997, i gennemsnit var grundvandsstanden ved starten af juni 1997, 40 cm lavere end for årene 2018 og 2023. Denne forskel er primært drevet af det forhold at nedsivningen og genopfyldningen af grundvandsmagasinerne primært sker i vinterhalvåret. Vinternedsivningen de foregående år, eller mangel på samme, udgør således udgangspunktet for en eventuel grundvands-sommertørke. Nedsivnings/*recharge* processer kan ikke umiddelbart måles og kvantificeres, da nedsivning er problematisk at måle direkte. I stedet er det muligt at undersøge Den Nationale Hydrologiske Models simulering af nedsivning i de interessante tørkeår.

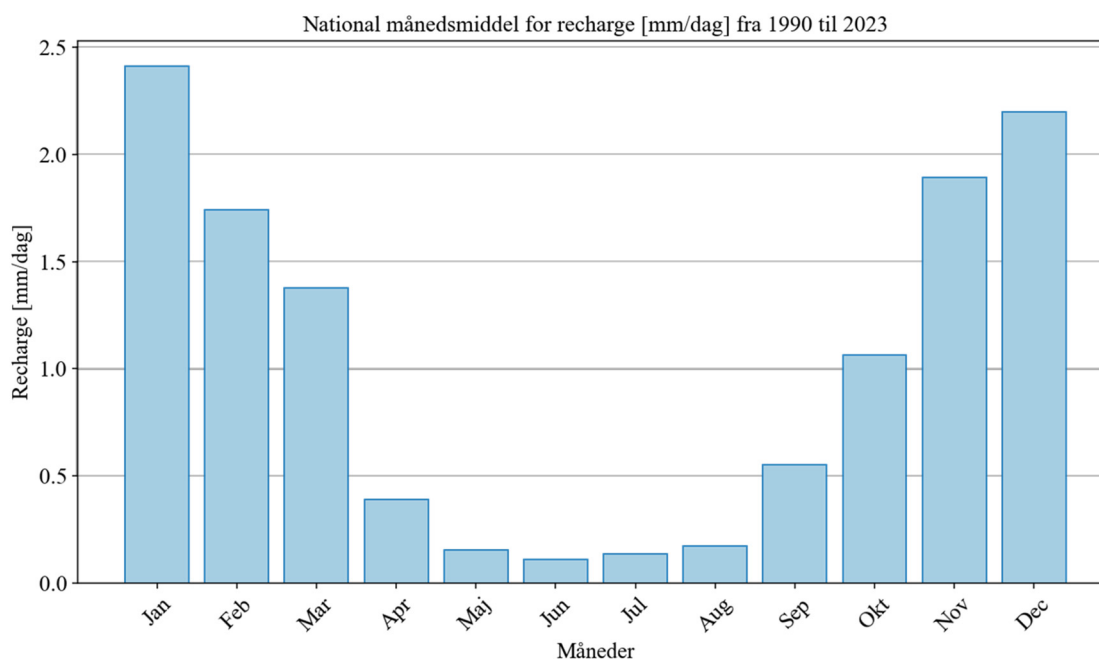
4.2.5.2 Modelleret nedsivningsnedgang under tørkeår

Ved at bruge den Nationale Hydrologiske model kan nedsivningen til det øverste grundvandsspejl udregnes på tværs af Danmark. På *Figur 4-20* ses den årlige variation i nedsivning til det øverste grundvandsspejl. I gennemsnit ligger nedsivning over de 34 år på 1 mm/dag svarende til 367 mm på et år, og svarer til at omkring 36% af nedbøren nedsiver. Nedsivningen svinger tydeligvis år for år, med 1994 og 2023 som de højeste (47-51% over middel) og 1996, 1997 og 2003 som nogle af de lavest. Her ses altså den tydelig påvirkning af nedsivningen i år hvor, der var kraftige vintertørker.



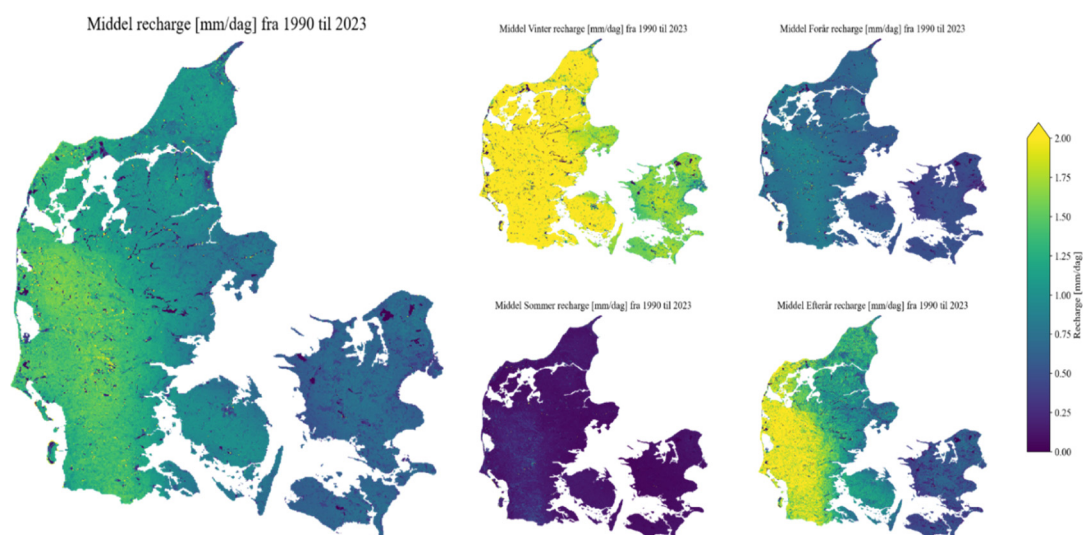
Figur 4-20 Nedsivnings-årsmiddel for de sidste 34 år opsummeret for hele Danmark.

Som nævnt er nedsivningen ikke ligeligt fordelt hen over året, som illustreret på *Figur 4-21*. Her ses at størstedelen af nedsivningen eller genopfyldningen af grundvandsmagasinerne sker i vinterhalvåret. En sommertørke som den i 2018, hvor nedbørsunderskuddet strakte sig fra maj-juli, medførte således kun et begrænset tab i nedsivning. Sommertørke kan dermed have betydning for grundvandsstand i kraft af øget planteoptag af grundvand og fordamning, men ikke i større grad på ressourcens opfyldning. En vintertørke derimod fører til mindsket genopfyldning, og kan særligt i kombination med en efterfølgende sommertørke fører til øget grundvandssænkning og pres på ressourcen.



Figur 4-21 Middelnedsvivning for de sidste 34 år opsummeret for hele Danmark fordelt hen over månederne.

Ligesom nedbøren ikke er ens hen over Danmark, er der også nationale forskelle i nedsvivningsmængderne illustreret på Figur 4-22. Her ses tydeligt at den største nedsvivning sker i Vestjylland, og at denne nedsvivning faktisk næsten er dobbelt så stor i forhold til Lolland Falster. Disse regionale forskelle fordelt hen over året kan ses til højre.



Figur 4-22 Venstre: Middel recharge/nedsvivning for hele Danmark. Højre: Middel recharge/nedsvivning for hele Danmark fordelt på sæson, med uret fra venstre øverst: vinter, forår, efterår og sommer.

4.2.5.3 Modelbaseret udregning af grundvandsmagasineres tørkesårbarhed (T-indeks)

Groundwater turnover index (T-index) [107] eller på dansk grundvandsomsætningsindeks er et mål for forholdet mellem vandvolumenet, der er lagret i et grundvandsmagasin (akvifer), og den hastighed, hvormed vandet bliver fornyet. Det betyder, at indekset vurderer, hvor lang tid det i gennemsnit vil tage at erstatte hele vandvolumenet i akviferen gennem naturlige processer i form af nedsivning (*recharge*). Grundvandsomsætningsindekset kan således konceptuelt sammenlignes med vandopholdstiden i søer.

For at udregne T-indekset i Danmark er alle grundvandsforekomster og deres vandvolumer afgrænset ved hjælp af den geologiske model i Danmarks Nationale Hydrologiske Model [13]. I modellen er data om grundvandsdannelse (GvD i mm/år) blevet udtrukket for de enkelte grundvandsmagasiner, og den gennemsnitlige tykkelse (meter) af de enkelte akviferer er blevet beregnet.

For enkelte små øer, hvor der ikke er blevet etableret en model, er grundvandsdannelsen konservativt sat til 250 mm/år, og den gennemsnitlige tykkelse af akviferen til 25 meter. For de akviferer, hvor data om grundvandsdannelse af en eller anden grund ikke kunne udtrækkes, er grundvandsdannelsen sat til 350 mm/år. Grundvandsmagasinet's volumen (VandVol) beregnes som:

$$\text{VandVol [m}^3\text{]} = \text{Areal [m}^2\text{]} * \text{Tyk [m]} * \text{porøsitet [-]}$$

Grundvandsmagasinet's volumen er således afhængig af porøsiteten, der generelt antages at variere mellem 0,1 og 0,5, i dette tilfælde er den sat til 0,3.

Volumenet af grundvandsdannelsen (GvdVol) beregnes som:

$$\text{GvdVol [m}^3\text{/år]} = \text{Areal [m}^2\text{]} * \text{GvD [mm/år]} / 1000 [\text{mm/m}].$$

Omsætningsindekset (T-index i år) beregnes herefter som akviferens volumen divideret med volumenet af grundvandsdannelsen:

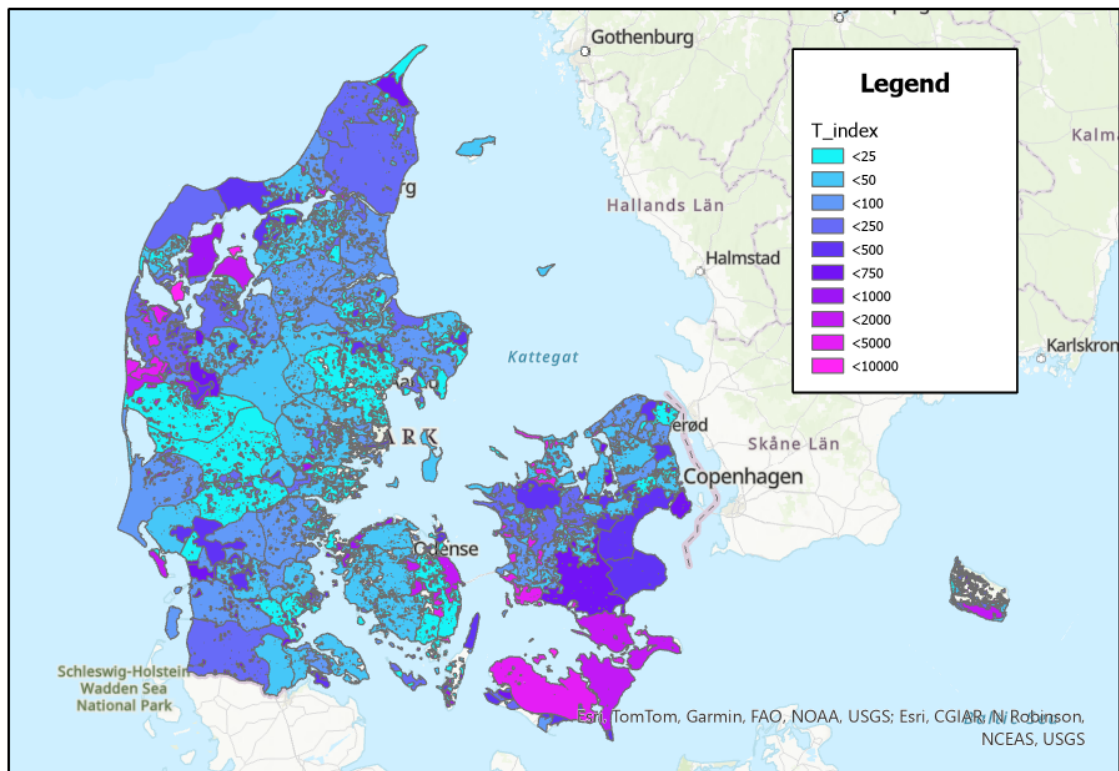
$$\text{T-index [år}^{-1}\text{]} = \text{VandVol [m}^3\text{]} / \text{GvdVol [m}^3\text{/år]}.$$

Høje T-indeksværdier indikerer dermed at akviferen har et stort volumen i forhold til fornyelsesraten, altså at det tager lang tid at erstatte ressourcen. Omvendt betyder lave T-indeksværdier en hurtigere udskiftning. Det vil sige, at akviferen (eller magasinet) under ekstrem tørke hurtigt kan tømmes, men også hurtigt genopfyldes når tørken er slut. En sådan udtømming forekommer aldrig eller meget sjældent i Danmark, men det forekommer relativt ofte i eksempelvis små Østsvenske grundvandsmagasiner i opsprækket grundfjeld.

Grundvandsmagasiner med høje T-indekser har ofte store volumener med relativt gammelt vand i nogle tilfælde mere end tusind år gammelt (Midt og Vestjylland, *Figur 4-25*), der ofte indeholder strategiske ressourcer, hvor indvindingen til markvanding etc. potentielt kan øges under længere tørkeperioder. Det er dog nødvendigt at overvåge trykniveauet i grundvandsmagasinet under lange tørkeperioder, så magasinet ikke overudnyttes og øger risikoen for

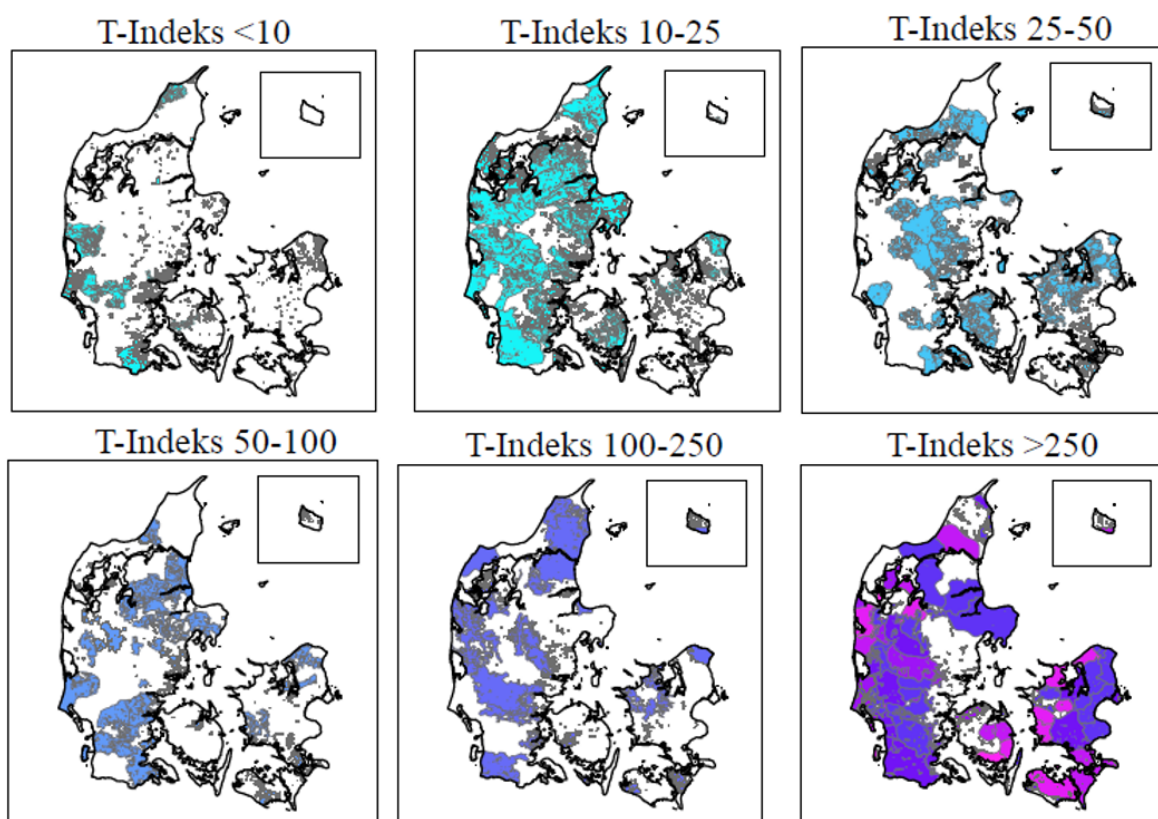
landsænkning og reduceret afstrømning. Faldende vandspejl kan give sætningsskader på huse og anden infrastruktur pga. kompaktion (se desuden afsnit 4.2.3) og svingende vandspejl kan initiere geokemiske processer, der resulterer i dårlig grundvandskvalitet [108], som ikke opfylder Vandramme- og Grundvandsdirektivernes kvalitetskrav.

Det er vigtigt at være opmærksom på, at de høje T-indekser ikke nødvendigvis indikerer store tørkerobuste akviferer, da de kan være resultat af meget lave grundvandsdannelser, der delvist er forårsaget af kraftig dræning og effektiv bortledning af nedbør i området, som eksempelvis Lolland og Falster (Figur 4-22, Figur 4-24 og Figur 4-25).



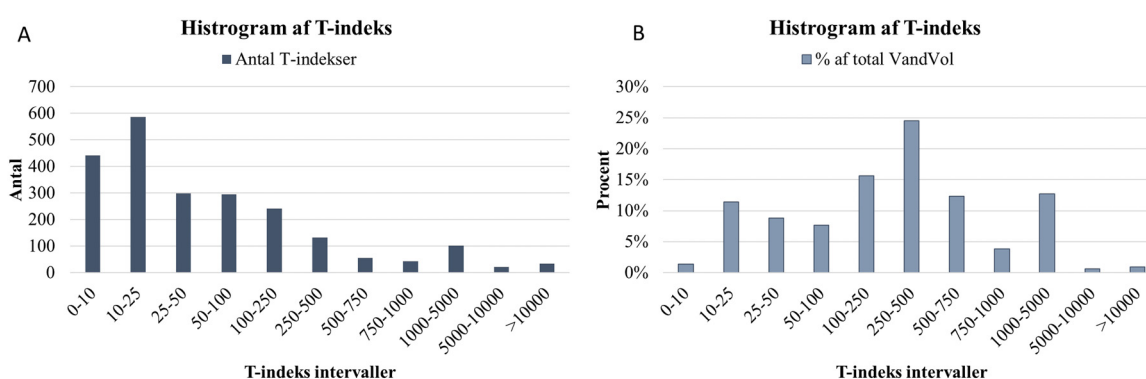
Figur 4-23: Kort over T-indeks for grundvandsforekomster i Danmark

Et kort over alle T-indekserne for Danmark ses på Figur 4-23. Der er dog i alt 2253 individuelle grundvandsforekomster kortlagt med DK-modellen, det er derfor umuligt at skelne dem alle i en figur, da de ligger i forskellige dybder. Der er derfor også genereret en figur med forskellige intervaller af T-indekser Figur 4-24. Her ses det, at der særligt er høje T-indekser i større forekomster i Nordsjælland, på Lolland-Falster og Sydøst Fyn.



Figur 4-24 Forekomst af de forskellige T-indeks grundvandsmagasiner.

Ved at se på et histogram over fordelingen af T-indeks i Danmark (Figur 4-25A), ses det, at langt de fleste grundvandsforekomster har T-indeks under 25. Kigger man derimod på vandmængder (givet ved grundvandsmagasinet's volumen, VandVol) er, ses det, at det primært er i grundvandsforekomster med T-værdier mellem 100 og 500, de store vandvolumener findes (Figur 4-25B).



Figur 4-25: Hyppigheden af T-indeks for grundvandsforekomster i Danmark

4.2.5.4 Perspektivering

Flere andre problematikker, der ikke er undersøgt her, kan potentielt påvirke grundvandsressourcen, deriblandt kvalitetsaspekter (vandkvalitet, saltvandsindtrængning og kvalitetsproblemer i forbindelse med grundvandssænkning) og korrelation til overfladevandet og konsekvenser forbundet til dette.

For data, der beskriver kvaliteten af grundvandet findes der ikke et samlet datasæt med kvalitetsoplysninger, der relaterer sig til tørke i Danmark. Kvaliteten af det danske drikkevand overvåges primært i forbindelse med pesticider, kvælstof og andre miljøskadelige stoffer. Men disses relation til tørke er ikke kortlagt på national skala. Ligeledes er påvirkningerne af saltvandsindtrængning i Danmark som følge af tørker ikke undersøgt eller kortlagt, men i særlige tilfælde i forhold til klimaændringer og stigende havniveau [109]. Dette kunne potentielt indgå i en fremtidig analyse. Hyppigere tørke og stigende indvinding fra grundvandsmagasiner forårsaget heraf vil sænke vandspejlet i grundvandsmagasinerne og øge saltvandsindtrængning i sårbare kystnære områder, men også længere inde i landet, hvor fersk-/saltvandsgrænsen ligger højt.

Historisk set er grundvandsboringer til drikkevand flyttet ud af byer og blevet dybere pga. øget pres på ressourcen, primært relateret til udfordringer med vandkvaliteten [16]. I tilfælde af flere grundvandstørker i fremtiden er det muligt at den samme tendens kan blive gældende, hvis det under større tørker opleves en øget udtørring af boringer fx med efterfølgende dybere boringsdybde.

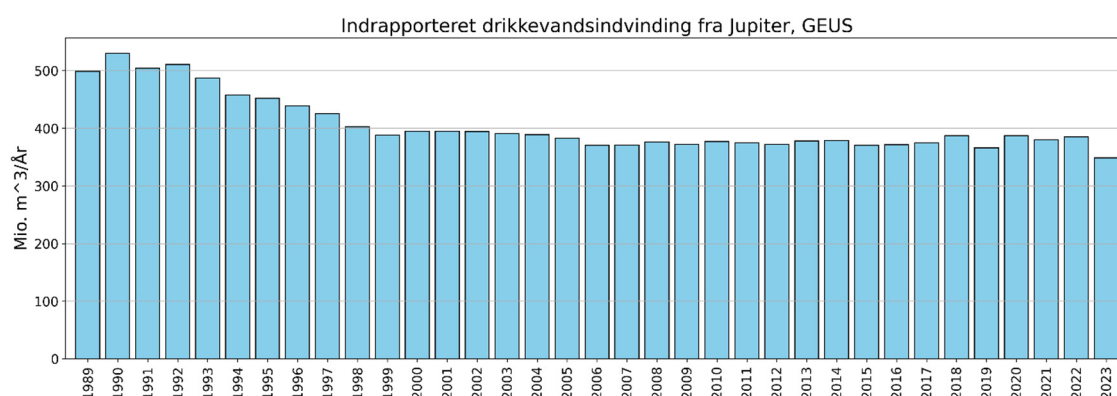
4.3 Sekundære effekter: Vandforsyning og Vanding

To grundvandsrelaterede tørkekonsekvenser kan umiddelbart registres i samfundet, nemlig dem, der relateres til regulering af vores forbrug af vand. Under nogle tørker registres øget forbrug af vand; i denne rapport betegnes dette menneskelige respons som sekundære effekter. Det kan skyldes både et stigende forbrug hos forbrugerne, f.eks. til badebassiner og vanding af have; og et stigende behov hos landmændene til markvanding. En dybdegående analyse af disse effekter er dog ikke en del af Tørkeprojektet, og derfor vil der blot her vises generelle informationerne om vandindvinding og markvanding. Her er der to relevante datasæt: vandforbruget til generelt forbrug og forbrug til markvanding. For begge disse datasæt gælder der, at den rummelige information er forholdsvis god, mens den tidslige opløsning umuliggør analyser på mindre end årsniveau. I dette afsnit vil de overordnede tendenser for de sekundære effekter vises.

4.3.1 Vandforsyning

Drikkevandsindvindingen indrapporteres som en årlig sum af vandselskaberne til Jupiter Databasen [57] for hver kildeplads. En kildeplads kan bestå af flere indvindingsboringer men der er sjældent indrapporteret information om deres relative oppumpningsmængder boringerne imellem, kun den samlede indvinding på kildepladsen. Vandindvinding på mindre end årsniveau, er nødvendige hvis man i realtid skal kunne følge dets påvirkning på grundvandets tilstand.

En oversigt over indvindingsboringerne i Danmark og deres middel indvinding kan ses på *Figur 4-27*. Et detaljeret udtræk fra Jupiter Databasen er også gjort for de sidste 34 år for drikkevandsboringer (*Figur 4-26*). Den gennemsnitlige indvinding er 405 millioner m³/år. På figuren ses en generel nedgang i drikkevandsforbrug fra starten af 1990'erne og frem. Der er dog ikke nogen tydelig øgning af drikkevandsforbrug korreleret med de store tørkeår at finde i datasættet. Det skyldes sandsynligvis, at øgningen i forbrug under tørker om sommeren til blandt andet havevanding og badebassiner, drukner i det samlede regnskab og de mindre år til år fluktuationer i forbrug.



Figur 4-26 Årlig indrapporterede drikkevandsindvindinger til Jupiter Databasen [57]

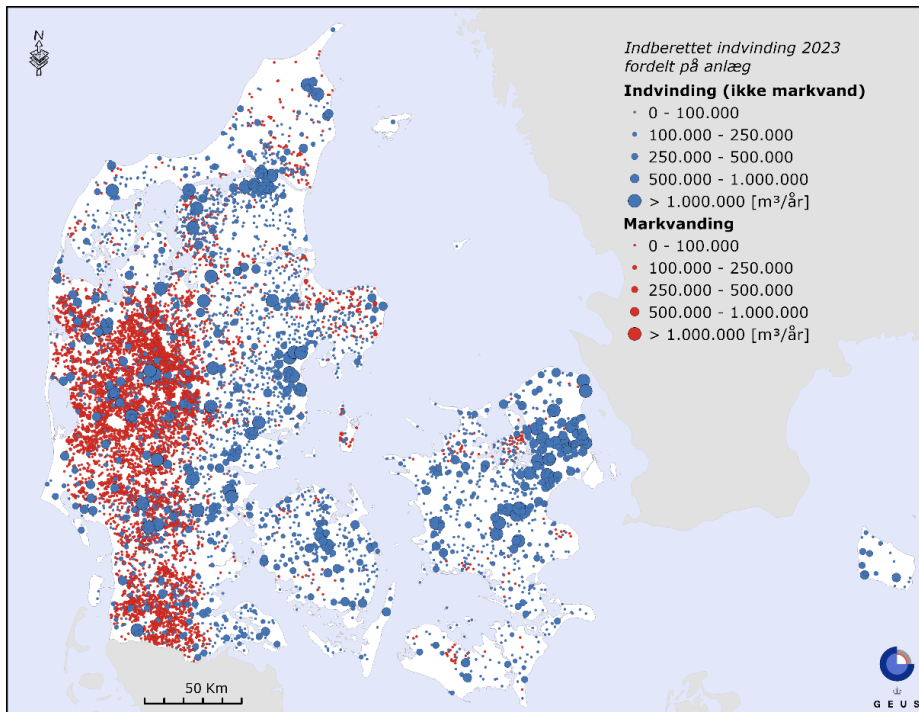
Forøget vandefterspørgsel hos forbrugerne under sommertørkerne i 2018 og 2023 førte til, at vandværkerne nogle steder i landet indførte lavere tryk i hannerne og opfordrede til at sænke vandforbruget. Her er det dog vigtigt at nævne at disse tiltag har været indført pga. kapacitetsproblemer i forsyningsnetværket og ikke af ressource-begrænsninger i grundvandet. Dog er vandværkerne underlagt et loft på indvinding (indvindingstilladelser), der også begrænser den tilladte mængde vand, der må oppumpes, baseret på den bæredygtige grundvands-ressource [13]. Det er derfor muligt at vandværker under meget intense og lange tørkeperioder kan løbe ind i dette loft, særligt i områder hvor grundvandsressourcen i forvejen er under pres pga. højt forbrug og utilstrækkelig genopfyldning (*recharge*), eller særlig sårbare økosystemer.

4.3.2 Markvanding og grundvandsmagasiner og vandløb¹⁰

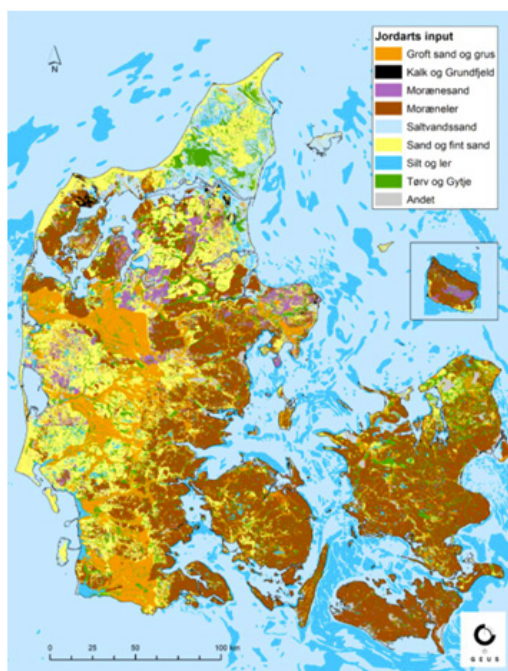
Markvanding i Danmark foregår hovedsageligt ved grundvandsoppumpning fra landmandens egne indvindingsboringer, og er dermed afkoblet fra det kommunale vandforsyningsnet som varetages af vandselskaberne. Markvandingsindvinding er underlagt indvindingstilladelser, der udstedes af kommunerne. Tilladelser gives på baggrund af undersøgelser af vandingsbehovet, den tilgængelige ressource og vandløbspåvirkningen. I tørkeperioder er det muligt for landmændene at søge om ekstraordinære tilladelser til vanding. Disse særlige markvandindvindings korttidstilladelser gives på op til tre måneder. Ifølge vandindvindingsbekendtgørelsens § 17, skal der være tale om ekstraordinære vejsituationer, hvor der søges

¹⁰ NB: Dette afsnit (4.3.2) indgår også i rapporten *Tørkes betydning for kvælstofudledning, vandføring og biologi i vandløb*. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. [14]

om øget indvinding af grundvand fra eksisterende vandindvindingsanlæg, og vandet skal bruges til vanding af landbrugsafgrøder. Oppumpede vandingsmængder indberettes hvert år til Jupiter [57] som årlige gennemsnit. Det er ikke muligt at se i Jupiter, om der ligger specielle korttidsstilladelser i forhold til markvandsindvindingen.

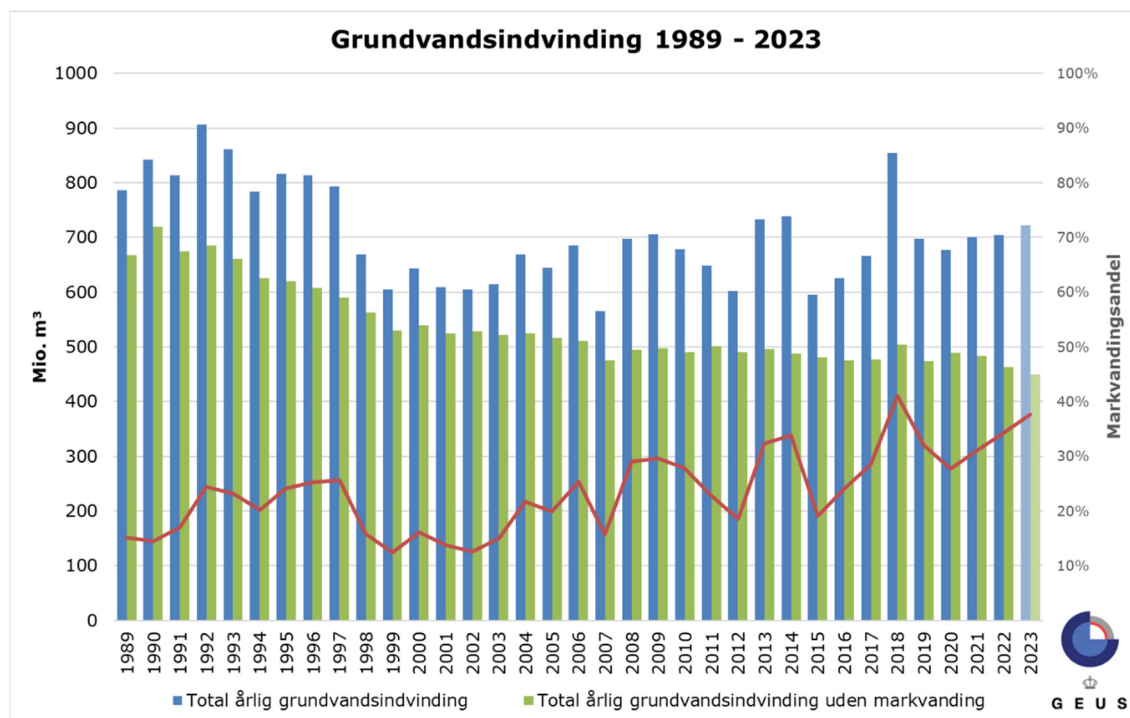


Figur 4-27 Placering af indvindingsanlæg og indvindingsstørrelse (figur hentet fra seneste GRUMO rapport, [110]). Markvandingsanlæg er typisk af mindre indvindingsstørrelse og placeret vest for hovedopholdslinjen, mens de store vandforsyningsanlæg typisk ligger rundt om de store byer.



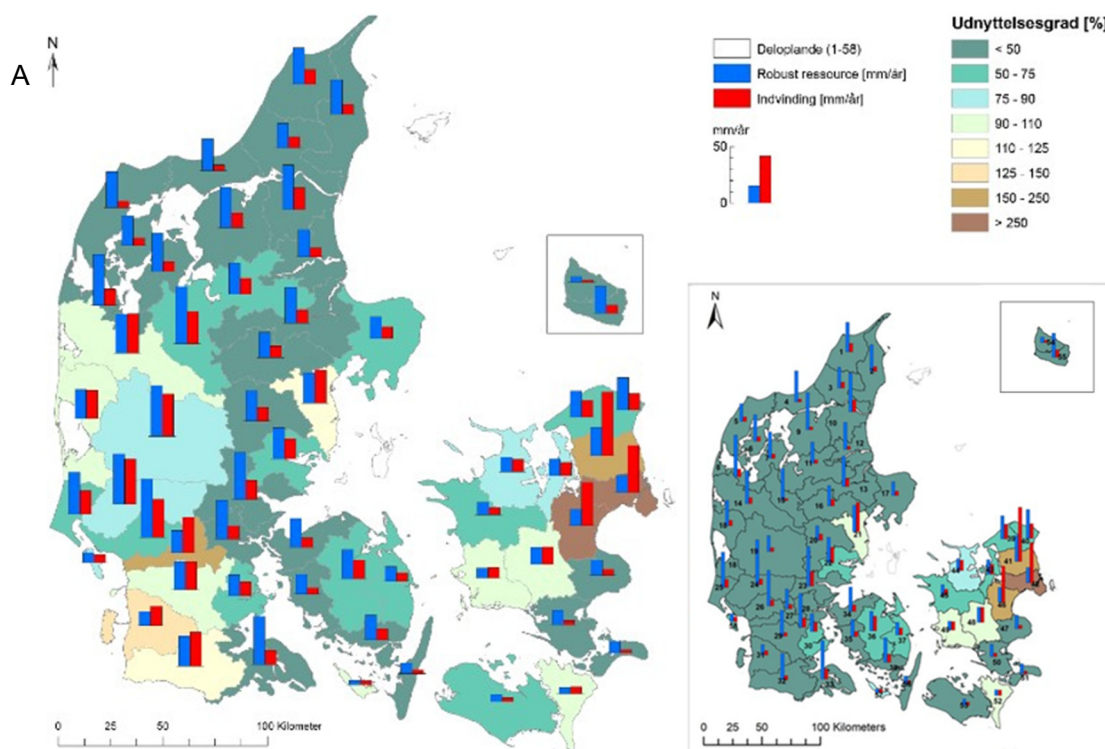
Figur 4-28: Jordartskort over Danmark (gengivet med tilladelse fra [13])

Der gives primært tilladelser til vanding i Jylland (Figur 4-27), hvilket skyldes et øget behov for vanding pga. sandede jorde (Figur 4-28). Der findes omkring 20.000 markvandingsboringer i Jylland, mens der på Fyn og Sjælland inkl. Øerne kun eksisterer ca. 140 og 540 markvandingsboringer.



Figur 4-29 Årsgennemsnit af samlet indberettet grundvandsindvinding med og uden markvanding for perioden 1989-2023 samt opgørelse af markvandsandelen af den samlede indberettede indvinding (røde kurve), reproduktion af figur fra seneste GRUMO-rapport [110].

Figur 4-29 viser de indrapporterede grundvandsindvindingsmængder opgjort pr. år med og uden markvanding for de seneste 34 år. Her ses tydeligt tørken i 2018, hvor der blev indvundet væsentligt mere vand til markvanding end gennemsnittet for hele perioden. Ligeledes er 2023 et år med højt markvandsforbrug, mens tørkerne i 1992, 1996 og 1997 ikke skiller sig mærkbart ud. Her skal det dog bemærkes, at vandingsmængder kan afhænge af vandingskapaciteten og -infrastrukturen hos den enkelte landmand. I forhold til de omkringliggende år, var de samlede oppumpede mængder disse år dog højere end normalt, hvilket antyder et øget behov i forhold til kapacitet på dette tidspunkt. Helt overordnet forventes det at tallene for markvanding før kommunalreformen 2007 er behæftet med større usikkerhed end i de senere år.



Figur 4-30 Resultat af ressourceopgørelse for alle vandindvindinger (ALT) for 58 deloplande. Med farvetoner er vist udnyttelsesgrad baseret på indvindingens %-del af opgjort tilgængelig ressource. I den lille figur nederst til højre er det samme vist, blot for VF-scenariet (vandforsyning). [13].

DK-modellen (<https://vandmodel.dk/>) bruges blandt andet til vandressourceopgørelsen, den detaljerede afrapportering kan ses i [13], og mere information om DK-modellen kan findes i [60, 61]. DK-modellen simulerer også markvanding. Vandingsmodulet er her baseret på vandingsbehov således, at vanding igangsættes i modellen afhængigt af jordens vandindhold. Indrapporterede markvandingsmængder fra Jupiter indgår også i kalibreringen af DK-modellen, således at det tilstræbes, at de årlige mængder rammes bedst muligt [62]. Kalibreringsparametrene er primært start og stop kriterier for vanding, vandingslængde og et vandindvindingsloft. I DK-modellen er det kun markvanding i Jylland, der er modelleret efter behov; for resten af landet er markvandingsboringer indlagt i modellen med indberettet indvinding.

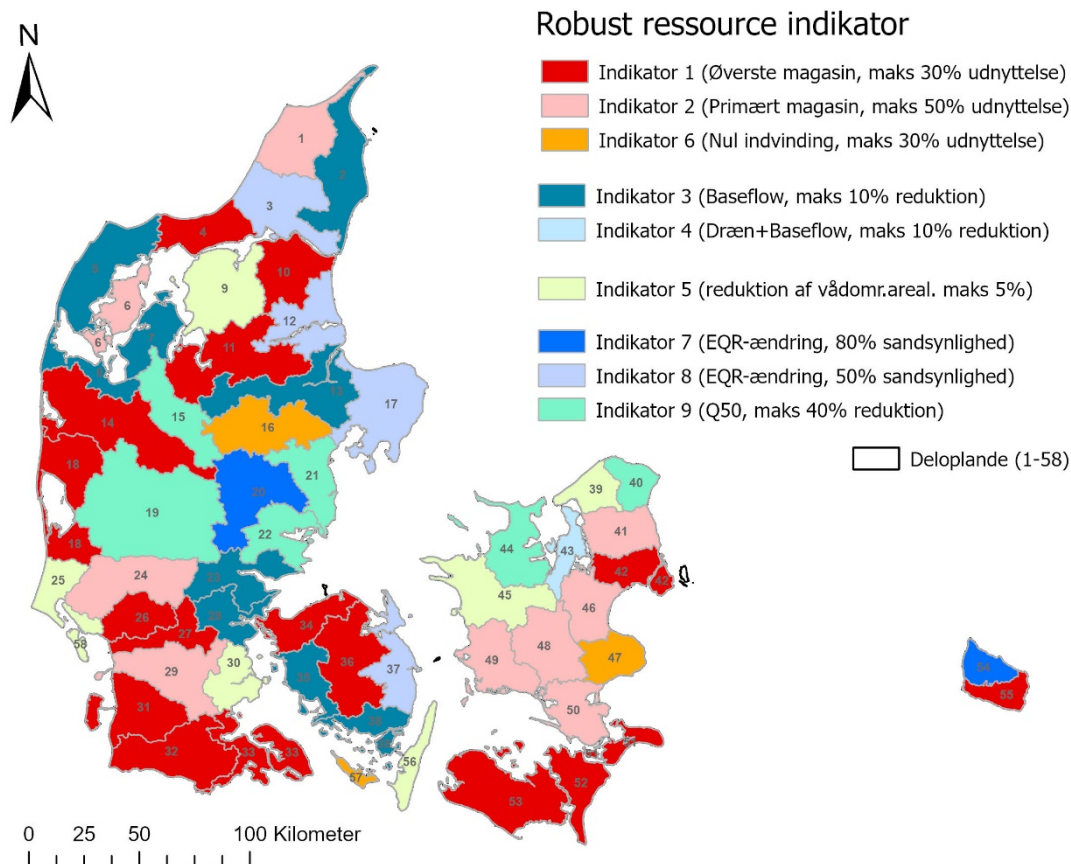
I ressourceopgørelsen er den tilgængelige grundvandsressource estimeret på baggrund af et ensemble af indikatorer samt modelberegninger med DK-modellen for scenarier, 0-50-100-150-200-300 % af den nuværende indvinding (middelværdi for perioden 2017-2021) for henholdsvis alle vandindvindinger, inkl. markvanding og industri (ALT) og almene vandindvindinger til vandforsyninger (VF). Alle de hydrologiske beregninger, og dermed også statistikken, der ligger til grund for ressourceestimatet, er gennemført med klimadata for perioden 1991-2020 (den seneste klima-normal). Beregningen af den robuste ressource tager med andre ord udgangspunkt i en normal situation, hvor de klimatiske variationer, som også påvirker vandindhold i rodzonen, afstrømning, dybde til grundvandet og grundvandsdannelse, er inkluderet. De ni indikatorer, som anvendes for at estimere den tilgængelige grundvandsressource, afspejler potentielle udfordringer relateret til magasin-bæredygtighed, naturlig

forurening, og påvirkning af vandløb og vådområder. Det er i opgørelsen af den robuste ressource valgt at anvende det næstmindste ressourceestimat blandt de ni indikatorer for hvert delopland, som hver især giver ret forskellige bud på ressourcens størrelse i forskellige dele af landet (*Figur 4-31*). For en nærmere beskrivelse henvises til [13].

Landsgennemsnittet for den tilgængelige vandressource er opgjort til 1,1 mia. m³/år for hele landet [13], og indberettet indvinding til markvanding udgør typisk 20-30 % af den samlede indvinding (*Figur 4-29*). Af *Figur 4-30A* fremgår den geografiske spredning for robust ressource, indvinding og udnyttelsesgraden inden for hvert delopland. Figuren viser, hvordan den tilgængelige robuste ressource (blå søjle) er generelt større i Jylland, særligt i Vestjylland, i forhold til ressourcens størrelse på Fyn, Sjælland og Øerne. Opgørelsen viser også, at der flere steder i Danmark er udnyttet mere end 100 % af den bæredygtige ressource, særligt omkring de store byer. Gennemsnitligt for hele landet er udnyttelsesgraden opgjort ift. udnyttelig ressource beregnet til 66 %. Ud fra den overstående analyse er det ikke umiddelbart muligt at udregne direkte, i hvilken grad markvanding har påvirket grundvandsressourcen, da påvirkningen fra markvanding indgår sammen med de andre indvindinger i scenarierne (ALT), og som nævnt er markvanding behovsbaseret i modellen.

Fra ressourceopgørelsen, hvor der udelukkende ses på almene vandforsyninger (VF) (kortudsnittet på *Figur 4-30B*), kan det ses, at udnyttelsesgraden falder kraftigt for de markvandingstunge områder i Vestjylland, hvor den mange steder falder til under 50 %. Dette viser dels, at markvanding udgør en betydelig del af den samlede indvinding i disse områder, langt over de 25-35 % på landsgennemsnit, dels at der til trods for dette stadig er et råderum op til den robuste ressource grænse i de fleste områder. For områderne omkring storbyerne er der allerede en beregnet overudnyttelse ift. den robuste ressource, og dermed ikke umiddelbart et råderum til yderligere markvandingstilladelser. For den sydlige del af Jylland er udnyttelsesgraden opgjort til 90-150 % med markvanding (*Figur 4-30A*), hvilket indikerer, at der i dette område er en betydelig påvirkning som følge af indvindingen. Ved nærmere gennemgang af de ni indikatorer, der fremgår af *Figur 4-31*, ses det, at særligt indikator 1, 2 og 6, der relaterer sig til magasin-bæredygtighed (potentielle udfordringer med naturlig forurening, som fx arsen og nikkel), begrænser størrelsen af den robuste ressource. Udfordringer med naturlig forurening optræder typisk som følge af iltning af særlige geologiske enheder eller kraftig indvinding i nærheden af saltvand, og de vil som sådan være lokale, specifikke udfordringer, der skal tages stilling til i arbejdet med indvindingstilladelser.

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

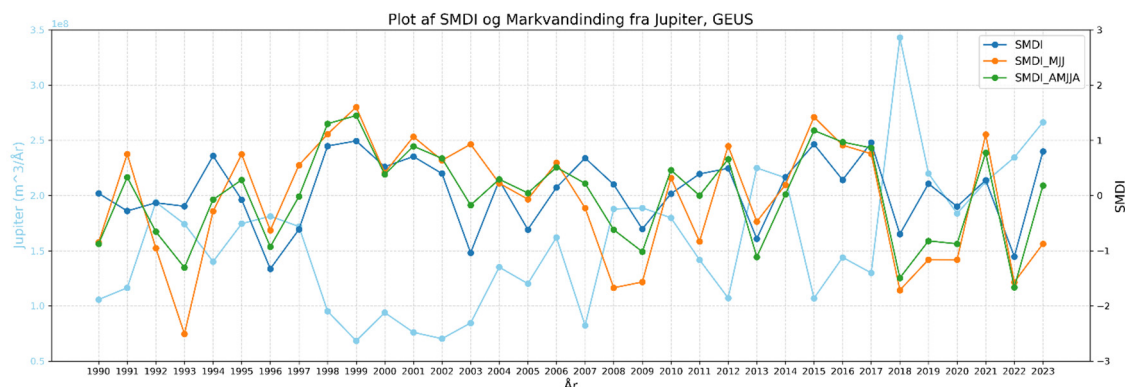


Figur 4-31: Indikator, der definerer robust ressource (næstmindste estimat af ressourcen for ALT scenariet for hvert af de 58 deloplande), gengivet med tilladelse fra [13]. Indikatorerne 1, 2 og 6 beskriver grundvandsmagasinet egen bæredygtighed, 3 og 4 vandløbspåvirkningen, 5 beskriver påvirkningen af vådområder, mens 7, 8, og 9 vandløbspåvirkningen i forhold til økologisk flow.

I prognosesammenhæng kunne det være relevant at se på DK-modellens fremskrivninger af markvanding og markvandingsbehov, fx. før en kommende vækstsæson. Det kan gøres ud fra den modellerede vandings-mængde i DK-modellen kørt i prognosetilstand, men det er også muligt at bruge hydrologiske indeks. DK-modellen anvendes i tørkeprojektet til at udregne hydrologiske indeks for de forskellige dele af det hydrologiske kredsløb. De hydrologiske indeks beskriver den statistiske afvigelse fra normalen for årstiden, og er dermed en udregning af anomalien i de forskellige dele af det hydrologiske system [111].

Indeks for jordvandstørke (*Soil Moisture Deficit Index*, SMDI, [27]) antages at være det mest relevante at korrelere til vandingsmængder. Indekset beskriver anomalier i jordfugtighed, og da vandingen primært finder sted i sommerhalvåret, kan korrelationen mellem SMDI i disse måneder udregnes (Figur 4-32). Her ses det, at Pearson-korrelationen for april-august (SMDI-AMJJA) giver -0,62, mens det for de mest intense vandingsmåneder maj-juli (SMDI-MJJ) giver -0.6. SMDI for hele året har en korrelationsværdi på -0.41. SMDI-værdierne for sommeråret har således en vis prædiktiv evne for markvandingsmængderne indrapporteret til Jupiter. Det er dog muligt, at andre variabler, fx varighed eller alvorlighed af jordvandstørken, udviser større korrelation til markvandingsmængder. Det skal også nævnes, at vandingen implementeret i DK-modellen naturligt nok delvist udligner eller afbøder den værste tørke

i flere områder, og det kan også medvirke til lavere korrelation til SMDI i denne analyse. Disse overstående emner bør undersøges nærmere i fremtidige tørkeprojekter.



Figur 4-32: Sammenholdning af SMDI og indrapporteret indvinding til markindvinding (lyseblå kurve, venstre y-akse). Negative SMDI-værdier indikerer jordvandstørke, her vil man forvente at markvandning er høj.

4.4 Perspektiver og anbefalinger for mulige fremtidige planlægningsværktøjer

4.4.1 Landbrug

Den udviklede prototype af den prædiktive udbyttemodel har potentiale som et planlægningsværktøj, der kan støtte beslutninger om afgrødestrategier ved at forudsige sandsynlige udbytter baseret på jordfugtighed og klimaprognoser. Integration af mere detaljerede data vil kunne øge modellens værdi som værktøj for landbrugsplanlægning og kan bidrage til at reducere støj i modellen og øge dens præcision. Validering af modellen på uafhængige datasæt er dog et nødvendigt skridt for at sikre modellens anvendelighed og troværdighed. Det vil være hensigtsmæssigt at tilvejebringe udbyttedata med højere geografisk opløsning, så der skabes bedre sammenhæng mellem de enkelte marker og beregnet jordfugtighed. Dette kan f.eks. opnås gennem samarbejde med aktører som SEGES, der allerede indsamler detaljerede udbyttedata. Det vil ligeledes være oplagt at inddrage landbrugsfaglig ekspertise i analyserne af korrelationen mellem udbytte og anomalier i jordfugtighed.

4.4.2 Infrastruktur

Undersøgelserne i denne rapport viser, at der er et potentiale for at anomalier i hydrologiske indeks kan understøtte Naturskaderådets sagsbehandling af anmeldte sætningsskader som følge af tørke. Desuden kunne fremtidige planlægningsværktøjer i forhold til sætningsskader udnytte hydrologiske sæsonprognoser i kombination med risikokort (dry spot kort) til at identificere ejendomme og regioner, der er i risiko for sætningsskader som følge af tørke. Denne analyse har været begrænset af et relativt lille datasæt for tørkeskader pga. den korte levetid af tørkeskadeordningen. Med tiden vil flere indrapporteringer kunne bruges til at styrke

modellernes systematik, korrelation og troværdighed. En højere opløsning af hydrologiske modeller og forbedret beskrivelse af rodzonen forventes ligeledes at kunne øge præcisionen og anvendeligheden af sådanne værktøjer, ligeledes er detaljeret viden om jordens beskaffenhed og lertyper, bl.a. detaljerede teksturkort som beskriver områder med meget højt lerindhold, et centralt manglende datasæt.

4.4.3 Natur

Satellitbaserede vegetationsindeks (NDVI) viser stort potentiale som redskab til overvågning af tørke og vegetationsstress i både landbrugsarealer og naturarealer. Screeningsværktøjet kan på sigt forbedres ved at inddrage flere datasæt og variabler, og ved at analysere satellitdata over længere tidsperioder og fra flere år for at øge robustheden af NDVI-signaturerne og opnå mere pålidelige resultater. En opskalering til regionale og nationale niveauer vil gøre det muligt at overvåge større områder og identificere både sårbare og resiliente økosystemer under tørkeforhold. Samtidig vil mere detaljerede analyser kunne hjælpe med at udvikle målrettede forvaltningsplaner for både landbrug og natur, særlig ved også at fokusere på relaterede tørkekonsekvenser for vandløb og søer.

4.4.4 Grundvand og Sekundære effekter¹¹

Historisk set har vi i den offentlige debat under tidligere kraftige tørke-hændelser set en problematisering af indvindingens størrelse og af, i hvilken grad denne kan kobles til udtørring af vandløb og påvirkning af vådområder. Hydrologisk set er det indvindingens størrelse i forhold til grundvandsdannelsen, som traditionelt undersøges fagligt, når vandressourcen relateres til tørke. Under danske klimabetingelser er dette forhold, selv for år med længerevarende tørkeperioder, ikke bestemmende for ressourcens størrelse. Som nævnt i afsnittene ovenfor, er det ofte lokale geologiske faktorer, som begrænser ressourcen i Danmark, og som kan føre til naturlig forurening af grundvandet. Det kan typisk være som følge af indvindingsrelaterede afsænkninger (faldende grundvandsspejl), eller mere permanente effekter på naturen, som er påvirket af variationer og størrelser af afstrømning eller det kan være ændring af vandbalancer for andre sårbare økosystemer. De tidligere ni nævnte indikatorer i ressourceopgørelsen (*Figur 4-30*) er et forsøg på at sammenholde denne type af udfordringer med indvindingernes størrelse og den nuværende lokale placering.

Ressourceopgørelsen [13] tager ikke tørke særskilt i betragtning, men da den er udregnet ud fra en 30-års klimatologisk periode (1991-2020), vil den i nogen grad også være påvirket af de klimatologiske udsving, der er forekommet naturligt i denne periode og dermed er tørker indirekte repræsenteret i ressourceestimatet. Som vist med anvendte hydrologiske indeksindeholder perioden flere tørkehændelser, fx i 1990'erne og senere i 2018. Det er dog sandsynligt, at forudsigelse af sjældne hændelser med meget ekstreme tørker ikke er repræsenteret i 30-års perioden, ligesom mere sjældne ekstreme nedbørs-hændelser heller ikke kan forventes at være repræsenteret.

¹¹ NB: Dette afsnit (4.4.4.) indgår også i rapporten *Tørkes betydning for kvælstofudledning, vandføring og biologi i vandløb*. Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi. Under overskriften *Tørkepåvirkning af den tilgængelige ressource* [14]

Hvis man ønsker at afsøge tørkens indvirkning på vandressourcen, anbefaler [13] at undersøge mulighederne for at inkludere yderligere indikatorer til de ni tidligere nævnte, der særligt belyser tørkerelaterede problematikker. Her nævnes specifikt indikatorer, der bedre beskriver fald i grundvandsstand og udtørring af vandløb under tørkehændelser. Her er det dog nødvendigt at overveje, hvorvidt det er relevant eller hensigtsmæssigt at tage hensyn til de meget sjældne eller mest ekstreme tilfælde af tørke, fx 100- eller 500-års hændelser. Mere relevant kunne det være at belyse effekten af langvarige vintertørker, som kan være problematiske for grundvandsressourcen. I ressourceopgørelsen [13] nævnes i denne sammenhæng tidligere estimater på op mod en 20 % reduktion i den bæredygtige ressource under længere grundvandstørker. En anden tilgang kunne være at bruge de ni anvendte indikatorer til at estimere grundvandsressourcen for en kendt tørkeperiode. Det vil sige, udtrække og anvende DK-model resultater for kun bestemte perioder til en ressourceopgørelse. Det ville gøre det muligt at bestemme en slags baseline for ressourcens størrelse under eller efter tørkehændelser.

Derudover kunne det være muligt at udbygge og videreudvikle de i denne rapport anvendte hydrologiske indeks, så de ville være brugbare til at undersøge ressourcens størrelse udover den information, de lige nu giver omkring anomalier. Det ville kræve en ændring af den måde, indekserne standardiseres og udregnes på. Til gengæld ville det kunne muliggøre løbende at følge ressourcens udvikling under tørkeperioder, da de hydrologiske indeks allerede udregnes i realtid [112], og på sigt kan de inkluderes som en del af et prognoseværktøj.

5. Referencer

5.0 Videnskabelig litteratur

1. Mishra, A.K., Singh, V.P.: A review of drought concepts. *J. Hydrol.* 391, 202–216 (2010)
2. Publication, U.: World Drought Atlas. (2024)
3. Mukherjee, S., Mishra, A., Trenberth, K.E.: Climate Change and Drought: a Perspective on Drought Indices. *Curr. Clim. Chang. Reports.* 4, 145–163 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0098-x>
4. Seneviratne, S.I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C.M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., Rusticucci, M., Semenov, V., Alexander, L. V, Allen, S., Benito, G., Cavazos, T., Clague, J., Conway, D., Della-Marta, P.M., Gerber, M., Gong, S., Goswami, B.N., Hemer, M., Huggel, C., van den Hurk, B., Kharin, V. V, Kitoh, A., Tank, A.M.G.K., Li, G., Mason, S., McGuire, W., van Oldenborgh, G.J., Orlowsky, B., Smith, S., Thiaw, W., Velegakis, A., Yiou, P., Zhang, T., Zhou, T., Zwiers, F.W.: Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment. In: Field, C.B., Dahe, Q., Stocker, T.F., and Barros, V. (eds.) *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* pp. 109–230. Cambridge University Press, Cambridge (2012)
5. Tallaksen, L.M., Van Lanen, H.A.J.: *Hydrological Drought Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater.* Elsevier (2024)
6. Liu, S., Shi, H., Sivakumar, B.: Socioeconomic Drought Under Growing Population and Changing Climate: A New Index Considering the Resilience of a Regional Water Resources System. *J. Geophys. Res. Atmos.* 125, e2020JD033005 (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2020JD033005>
7. Shi, H., Chen, J., Wang, K., Niu, J.: A new method and a new index for identifying socioeconomic drought events under climate change: A case study of the East River basin in China. *Sci. Total Environ.* 616–617, 363–375 (2018). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.321>
8. Klaus, J., Monk, W.A., Zhang, L., Hannah, D.M.: Ecohydrological interactions during drought. *Ecohydrology.* 15, e2456 (2022). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/eco.2456>
9. Gudmundsson, L., Seneviratne, S.I.: European drought trends. *Proc. Int. Assoc. Hydrol. Sci.* 369, 75–79 (2015). <https://doi.org/10.5194/piahs-369-75-2015>
10. Fleig, A.K., Tallaksen, L.M., Hisdal, H., Hannah, D.M.: Regional hydrological drought in north-western Europe: linking a new Regional Drought Area Index with weather types. *Hydrol. Process.* 25, 1163–1179 (2011)
11. Tallaksen, L.M., Van Lanen, H.A.J.: Chapter 1 - Introduction. In: Tallaksen, L.M. and van Lanen, H.A.J. (eds.) *Hydrological Drought (Second Edition).* pp. 3–20. Elsevier (2024)
12. Stahl, K., Kohn, I., Blauhut, V., Urquijo, J., De Stefano, L., Acácio, V., Dias, S., Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., Kampragou, E., Van Loon, A.F., Barker, L.J., Melsen, L.A., Bifulco, C., Musolino, D., de Carli, A., Massarutto, A., Assimacopoulos, D., Van Lanen, H.A.J.: Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16, 801–819 (2016). <https://doi.org/10.5194/nhess-16-801-2016>
13. Henriksen, H.J., Ondracek, M., Trolborg, L.: Vandressourceopgørelse – datarapport. Baggrundsrapport til Miljøstyrelsens samlede afrapportering omkring forvaltning af fremtidens drikkevandsressource. Metode, resultater, usikkerheder og forventede klimapåvirkninger. GEUS (2023)
14. Blicher-Mathiesen, G., Larsen, S. E., Rasmussen, J. K. J.1, Thorsen. M., Seidenfaden, I.

- K., Trolborg, L., Ondracek, M., ten Damme, Andersen, M. N., Kratschmer, A. K., Lissner, E. S., Tornbjerg, Thodsen, H.: Tørkes betydning for kvælstofudledning, vandføring og biologi i vandløb. Perspektiver for klimasikring og forvaltning af vores vandressourcer. (2025)
15. Quevauviller, P., Hinsby, K., Karlsson Seidenfaden, I., Pulido Velázquez, D., Sapiano, M., Coelho, R., Gattinesi, P., Hohenblum, P., Jirovsky, V., Marinho, F., Simas, L., Teixeira, R., Ugarelli, R., Cardarilli, M., Paraskevopoulos, S., Vrachimis, S., M, F.: Review: Urban Water Security and Safety. *Acque Sotter. - Ital. J. Groundw.* 13, (2024). <https://doi.org/https://doi.org/10.7343/as-2024-803>
 16. Jørgensen, L.F., Trolborg, L., Ondracek, M., Seidenfaden, I.K., Kidmose, J., Vangsgaard, C. and Hinsby, K.: Groundwater resilience, security, and safety in the four largest cities in Denmark. *Acque Sotter. - Ital. J. Groundw.* 13, (2024). <https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.7343/as-2024-803>.
 17. Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., Khan, F.I.: A review of drought indices. *Environ. Rev.* 19, 333–349 (2011)
 18. de Matos Brandão Raposo, V., Costa, V.A.F., Rodrigues, A.F.: A review of recent developments on drought characterization, propagation, and influential factors. *Sci. Total Environ.* 898, 165550 (2023). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165550>
 19. World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP), M.S. and B.A.F.: Handbook of Drought Indicators and Indices. , Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva. (2016)
 20. Hisdal, H., Tallaksen, L.M., Gauster, T., Bloomfield, J.P., Parry, S., Prudhomme, C., Wanders, N.: Chapter 5 - Hydrological drought characteristics. In: *Hydrological Drought (Second Edition)*. p. 75 (2023)
 21. Bachmair, S., Stahl, K., Collins, K., Hannaford, J., Acreman, M., Svoboda, M., Knutson, C., Smith, K.H., Wall, N., Fuchs, B., Crossman, N.D., Overton, I.C.: Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. *WIREs Water*. 3, 516–536 (2016). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wat2.1154>
 22. McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J.: The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: *Conference on Applied Climatology*. pp. 1–6. American Meteorological Society, Anaheim, California (1993)
 23. Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I.: A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Clim.* 23, 1696–1718 (2010). <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
 24. Palmer, W.C.: Meteorological Drought. *Res. Pap.* 45, (1965)
 25. Staudinger, M., Stahl, K., Seibert, J.: A drought index accounting for snow. *Water Resour. Res.* 50, 7861–7872 (2014). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2013WR015143>
 26. Hunt, E.D., Hubbard, K.G., Wilhite, D.A., Arkebauer, T.J., Dutcher, A.L.: The development and evaluation of a soil moisture index. *Int. J. Climatol.* 29, 747–759 (2009). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/joc.1749>
 27. Narasimhan, B., Srinivasan, R.: Development and evaluation of soil moisture deficit index (SMDI) and evapotranspiration deficit index (ETDI) for agricultural drought monitoring. *Agric. For. Meteorol.* 133, 69–88 (2005)
 28. Torelló-Sentelles, H., Franzke, C.L.E.: Drought impact links to meteorological drought indicators and predictability in Spain. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 26, 1821–1844 (2022). <https://doi.org/10.5194/hess-26-1821-2022>
 29. Palmer, W.C.: Keeping Track of Crop Moisture Conditions, Nationwide: The New Crop Moisture Index. *Weatherwise.* 21, 156–161 (1968). <https://doi.org/10.1080/00431672.1968.9932814>
 30. Matera, A., Fontana, G., Marletto, V., Zinoni, F., Botarelli, L., Tomei, F.: Use of a new

- agricultural drought index within a regional drought observatory. *Methods tools drought Anal. Manag.* 103–124 (2007)
31. Hao, Z., AghaKouchak, A.: Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. *Adv. Water Resour.* 57, 12–18 (2013). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.03.009>
 32. Sepulcre-Canto, G., Horion, S., Singleton, A., Carrao, H., Vogt, J.: Development of a Combined Drought Indicator to detect agricultural drought in Europe. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 3519–3531 (2012). <https://doi.org/10.5194/nhess-12-3519-2012>
 33. Cammalleri, C., Arias-Muñoz, C., Barbosa, P., de Jager, A., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., McCormick, N., Naumann, G., Spinoni, J., Vogt, J.: A revision of the Combined Drought Indicator (CDI) used in the European Drought Observatory (EDO). *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 21, 481–495 (2021). <https://doi.org/10.5194/nhess-21-481-2021>
 34. Carrão, H., Russo, S., Sepulcre-Canto, G., Barbosa, P.: An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 48, 74–84 (2016). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.06.011>
 35. Vicente-Serrano, S.M., I., L.-M.J., Santiago, B., Jorge, L.-L., Cesar, A.-M., Enrique, M.-T.: Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *J. Hydrol. Eng.* 17, 318–332 (2012). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433)
 36. Nalbantis, I., Tsakiris, G.: Assessment of Hydrological Drought Revisited. *Water Resour. Manag.* 23, 881–897 (2009). <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9305-1>
 37. Telesca, L., Lovallo, M., Lopez-Moreno, I., Vicente-Serrano, S.: Investigation of scaling properties in monthly streamflow and Standardized Streamflow Index (SSI) time series in the Ebro basin (Spain). *Phys. A Stat. Mech. its Appl.* 391, 1662–1678 (2012). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.10.023>
 38. Modarres, R.: Streamflow drought time series forecasting. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* 21, 223–233 (2007). <https://doi.org/10.1007/s00477-006-0058-1>
 39. Shukla, S., Wood, A.W.: Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophys. Res. Lett.* 35, (2008). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2007GL032487>
 40. Bloomfield, J.P., Marchant, B.P.: Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 4769–4787 (2013). <https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013>
 41. Bhuiyan, C., Singh, R.P., Kogan, F.N.: Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 8, 289–302 (2006). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2006.03.002>
 42. Mendicino, G., Senatore, A., Versace, P.: A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a mediterranean climate. *J. Hydrol.* 357, 282–302 (2008). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.005>
 43. Sur, C., Park, S.-Y., Kim, J.-S., Lee, J.-H.: Prognostic and diagnostic assessment of hydrological drought using water and energy budget-based indices. *J. Hydrol.* 591, 125549 (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125549>
 44. Zhang, B., AghaKouchak, A., Yang, Y., Wei, J., Wang, G.: A water-energy balance approach for multi-category drought assessment across globally diverse hydrological basins. *Agric. For. Meteorol.* 264, 247–265 (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.10.010>
 45. Peters, E., Torfs, P.J.J.F., Van Lanen, H.A.J., Bier, G.: Propagation of drought through groundwater - a new approach using linear reservoir theory. *Hydrol. Process.* 17, 3023–3040 (2003)
 46. Svoboda, M., LeComte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., Miskus, D., Stephens, S.: THE DROUGHT

- MONITOR. Bull. Am. Meteorol. Soc. 83, 1181–1190 (2002). <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1181>
47. Prudhomme, C., Parry, S., Hannaford, J., Clark, D.B., Hagemann, S., Voss, F.: How well do large-scale models reproduce regional hydrological extremes: In Europe? *J. Hydrometeorol.* 12, 1181–1204 (2011). <https://doi.org/10.1175/2011JHM1387.1>
 48. Tallaksen, L.M., Clausen, B.: On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrol. Sci. J.* 42, 15–33 (1997). <https://doi.org/10.1080/02626669709492003>
 49. Salami, A.: Cross Correlation with Two Time Series in Python, <https://www.datainsightonline.com/post/cross-correlation-with-two-time-series-in-python>
 50. KDS: HIP. (2024)
 51. Chan, S.S., Seidenfaden, I.K., Jensen, K.H., Sonnenborg, T.O.: Climate change impacts and uncertainty on spatiotemporal variations of drought indices for an irrigated catchment. *J. Hydrol.* 601, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126814>
 52. Karlsson, I.B., Sonnenborg, T.O., Seaby, L.P., Jensen, K.H., Refsgaard, J.C.: Effect of a high-end CO₂-emission scenario on hydrology. *Clim. Res.* 64, 39–54 (2015)
 53. Karlsson, I.B., Sonnenborg, T.O., Jensen, K.H., Refsgaard, J.C.: Historical trends in precipitation and stream discharge at the Skjern River catchment, Denmark. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 595–610 (2014). <https://doi.org/10.5194/hess-18-595-2014>
 54. Andreasen, M., Jensen, K.H., Zreda, M., Desilets, D., Bogen, H., Looms, M.C.: Modeling cosmic ray neutron field measurements. *Water Resour. Res.* 52, 6451–6471 (2016). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015WR018236>
 55. Andreasen, M., Jensen, K.H., Bogen, H., Desilets, D., Zreda, M., Looms, M.C.: Cosmic Ray Neutron Soil Moisture Estimation Using Physically Based Site-Specific Conversion Functions. *Water Resour. Res.* 56, e2019WR026588 (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019WR026588>
 56. Jensen, K.H., Illangsekere, T.H.: HOBE: A Hydrological Observatory. *Vadoze Zo. J.* 10, 1–7 (2011). <https://doi.org/10.2136/vzj2011.0006>
 57. GEUS: National well database JUPITER, <https://eng.geus.dk/products-services-facilities/data-and-maps/national-well-database-jupiter>.
 58. Collenteur, R.A., Bakker, M., Klammler, G., Birk, S.: Estimation of groundwater recharge from groundwater levels using nonlinear transfer function noise models and comparison to lysimeter data. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 25, 2931–2949 (2021). <https://doi.org/10.5194/hess-25-2931-2021>
 59. Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O’Connell, P.E., Rasmussen, J.: An introduction to the European hydrological system – système hydrologique européen, “She”, 2: Structure of a physically-based, distributed modeling system. *J. Hydrol.* 87, 61–77 (1986)
 60. Stisen, S., Ondracek, M., Trolborg, L., Schneider, R.J.M., Til, M.J. van: National Vandressource Model. Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019. . Geological Survey of Denmark and Greenland, Copenhagen, Denmark (2019)
 61. Højberg, A.L., Trolborg, L., Stisen, S., Christensen, B.B.S., Henriksen, H.J.: Stakeholder driven update and improvement of a national water resources model. *Environ. Model. Softw.* 40, 202–213 (2013). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.010>
 62. Henriksen, H.J., Kragh, S.J., Gotfredsen, J., Ondracek, M., van Til, M., Jakobsen, A., Schneider, R.J.M., Koch, J., Trolborg, L., Rasmussen, P., Pasten-Zapata, E., Stisen, S., GEUS: Udvikling af landsdækkende modelberegninger af terrænnære hydrologiske forhold i 100m grid ved anvendelse af DK-modellen. GEUS (2021)
 63. Famiglietti, J.S., Ryu, D., Berg, A.A., Rodell, M., Jackson, T.J.: Field observations of soil moisture variability across scales. *Water Resour. Res.* 44, (2008). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2006WR005804>

64. Köhli, M., Schrön, M., Zreda, M., Schmidt, U., Dietrich, P., Zacharias, S.: Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons. *Water Resour. Res.* 51, 5772–5790 (2015). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/2015WR017169>
65. Zreda, M., Desilets, D., Ferré, T.P.A., Scott, R.L.: Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophys. Res. Lett.* 35, (2008). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2008GL035655>
66. Andreasen, M., Jensen, K.H., Desilets, D., Franz, T.E., Zreda, M., Bogen, H.R., Looms, M.C.: Status and Perspectives on the Cosmic-Ray Neutron Method for Soil Moisture Estimation and Other Environmental Science Applications. *Vadose Zo. J.* 16, vzj2017.04.0086 (2017). <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/vzj2017.04.0086>
67. Baldoncini, M., Albéri, M., Bottardi, C., Chiarelli, E., Raptis, K.G.C., Strati, V., Mantovani, F.: Biomass water content effect on soil moisture assessment via proximal gamma-ray spectroscopy. *Geoderma*. 335, 69–77 (2019). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.08.012>
68. Baldoncini, M., Albéri, M., Bottardi, C., Chiarelli, E., Raptis, K.G.C., Strati, V., Mantovani, F.: Investigating the potentialities of Monte Carlo simulation for assessing soil water content via proximal gamma-ray spectroscopy. *J. Environ. Radioact.* 192, 105–116 (2018). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.06.001>
69. Baldoncini, M., Albéri, M., Bottardi, C., Chiarelli, E., Raptis, K.G.C., Strati, V., Mantovani, F.: Investigating the potentialities of Monte Carlo simulation for assessing soil water content via proximal gamma-ray spectroscopy. *J. Environ. Radioact.* 192, 105–116 (2018). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.06.001>
70. Bogen, H.R., Schrön, M., Jakobi, J., Ney, P., Zacharias, S., Andreasen, M., Baatz, R., Boorman, D., Duygu, M.B., Eguibar-Galán, M.A., Fersch, B., Franke, T., Geris, J., González Sanchis, M., Kerr, Y., Korf, T., Mengistu, Z., Mialon, A., Nasta, P., Nitychoruk, J., Pinaras, V., Rasche, D., Rosolem, R., Said, H., Schattan, P., Zreda, M., Achleitner, S., Albertosa-Hernández, E., Akyürek, Z., Blume, T., del Campo, A., Canone, D., Dimitrova-Petrova, K., Evans, J.G., Ferraris, S., Frances, F., Gisolo, D., Güntner, A., Herrmann, F., Iwema, J., Jensen, K.H., Kunstmann, H., Lidón, A., Looms, M.C., Oswald, S., Panagopoulos, A., Patil, A., Power, D., Rebmann, C., Romano, N., Scheffele, L., Seneviratne, S., Weltin, G., Vereecken, H.: COSMOS-Europe: a European network of cosmic-ray neutron soil moisture sensors. *Earth Syst. Sci. Data*. 14, 1125–1151 (2022). <https://doi.org/10.5194/essd-14-1125-2022>
71. Fatima, E., Kumar, R., Attinger, S., Kaluza, M., Rakovec, O., Rebmann, C., Rosolem, R., Oswald, S.E., Samaniego, L., Zacharias, S., Schrön, M.: Improved representation of soil moisture processes through incorporation of cosmic-ray neutron count measurements in a large-scale hydrologic model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 28, 5419–5441 (2024). <https://doi.org/10.5194/hess-28-5419-2024>
72. Schmidt, T., Schrön, M., Li, Z., Francke, T., Zacharias, S., Hildebrandt, A., Peng, J.: Comprehensive quality assessment of satellite- and model-based soil moisture products against the COSMOS network in Germany. *Remote Sens. Environ.* 301, 113930 (2024). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113930>
73. SWD: Meddelelse fra kommissionen til Europa-Parlamentet, rådet, det Europæiske Økonomiske og Sociale Udvalg og Regionsudvalget. Opbygning af et klimarobust Europa — den nye EU-strategi for tilpasning til klimaændringer. (2021)
74. GEUS: Grundvandsstanden. www.grundvandsstanden.dk
75. AghaKouchak, A., Mirchi, A., Madani, K., Di Baldassarre, G., Nazemi, A., Alborzi, A., Anjileli, H., Azarderakhsh, M., Chiang, F., Hassanzadeh, E., Huning, L.S., Mallakpour, I., Martinez, A., Mazdidasni, O., Moftakhar, H., Norouzi, H., Sadegh, M., Sadeqi, D., Van Loon, A.F., Wanders, N.: Anthropogenic Drought: Definition, Challenges, and Opportunities. *Rev. Geophys.* 59, e2019RG000683 (2021). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2019RG000683>

76. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, <http://data.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj>, (2000)
77. Naumann, G., Cammalleri, C., Mentaschi, L., Feyen, L.: Increased economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. *Nat. Clim. Chang.* 11, 485–491 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01044-3>
78. Rossi, L., Wens, M., De Moel, H., Cotti, D., Sabino Siemons, A., Toreti, A., Maetens, W., Masante, D., Van Loon, A., Hagenlocher, M., Rudari, R., Naumann, G., Meroni, M., Avanzi, F., Isabellon, M. and, Barbosa, P.: European Drought Risk Atlas. (2023)
79. Luetkemeier, R., Frick-Trzebitzky, F., Hodžić, D., Jäger, A., Kuhn, D., Söller, L.: Telecoupled Groundwaters: New Ways to Investigate Increasingly De-Localized Resources. *Water*. 13, (2021). <https://doi.org/10.3390/w13202906>
80. Söller, L., Luetkemeier, R., Müller Schmied, H., Döll, P.: Groundwater stress in Europe—assessing uncertainties in future groundwater discharge alterations due to water abstractions and climate change. *Front. Water*. 6, (2024). <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1448625>
81. European Environment Agency: Europe's state of water 2024 - The need for improved water resilience. EEA report 07/2024, Copenhagen,. (2024)
82. Pohle, I., Zeilfelder, S., Birner, J., Creutzfeldt, B.: The 2018–2023 drought in Berlin: impacts and analysis of the perspective of water resources management. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* 2024, 1–28 (2024). <https://doi.org/10.5194/nhess-2024-187>
83. Schmidt, G. (Coord), A. do Ó, A. Markowska, C. Benítez-Sanz, C. Tetelea, D. Cinova, E. Stonevičius, E. Kampa, I. Vroom, J. Fehér, J. Rouillard, K. Våljataga, L. Navas, L. Blanka, L. De Stefano, M. Jones, M. Dekker, O. Gustafsson, P. Lundberg, P. Pengal, T. T.Z. and Z.L. (2023): Stock-taking analysis and outlook of drought policies, planning and management in EU Member States. Final report under contract “Technical and scientific support to the European Drought Observatory (EDO) for Resilience and Adaptation - Lot 2: In-depth ass. Eur. Comm. Dir. Environ.
84. Wilhite, D.A., Svoboda, M.D., Hayes, M.J.: Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resour. Manag.* 21, 763–774 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9076-5>
85. Koch, J., Elsgaard, L., Greve, M.H., Gyldenkerne, S., Hermansen, C., Levin, G., Wu, S., Stisen, S.: Water-table-driven greenhouse gas emission estimates guide peatland restoration at national scale. *Biogeosciences*. 20, 2387–2403 (2023). <https://doi.org/10.5194/bg-20-2387-2023>
86. Stahl, K., Blauhut, V., Barker, L.J., Stagge, J.H.: Chapter 12: Drought impacts. In: *Hydrological Drought* (2024)
87. Matthiesen, H., Hollesen, J., Dunlop, R., Seither, A., Beer, J.: In situ Measurements of Oxygen Dynamics in Unsaturated Archaeological Deposits. *Archaeometry*. 57, (2015). <https://doi.org/10.1111/arc.12148>
88. Matthiesen, H., Brunning, R., Carmichael, B., Hollesen, J.: Wetland archaeology and the impact of climate change. *Antiquity*. 96, 1412–1426 (2022). <https://doi.org/DOI:10.15184/aqy.2022.112>
89. Zscheischler, J., Fischer, E.M.: The record-breaking compound hot and dry 2018 growing season in Germany. *Weather Clim. Extrem.* 29, 100270 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100270>
90. Zscheischler, J., Martius, O., Westra, S., Bevacqua, E., Raymond, C., Horton, R.M., van den Hurk, B., AghaKouchak, A., Jézéquel, A., Mahecha, M.D., Maraun, D., Ramos, A.M., Ridder, N.N., Thiery, W., Vignotto, E.: A typology of compound weather and climate events. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1, 333–347 (2020). <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z>

91. Jutglar, K., Hellwig, J., Stoelzle, M., Lange, J.: Post-drought increase in regional-scale groundwater nitrate in southwest Germany. *Hydrol. Process.* 35, e14307 (2021). <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/hyp.14307>
92. Klaus, V.H., Friedritz, L., Hamer, U., Kleinebecker, T.: Drought boosts risk of nitrate leaching from grassland fertilisation. *Sci. Total Environ.* 726, 137877 (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137877>
93. Wilhite, D.A., Svoboda, M.D., Hayes, M.J.: Understanding the complex impacts of drought: A key to enhancing drought mitigation and preparedness. *Water Resour. Manag.* 21, 763–774 (2007). <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9076-5>
94. Rayner, T.: Adaptation to climate change: EU policy on a Mission towards transformation? *npj Clim. Action.* 2, 36 (2023). <https://doi.org/10.1038/s44168-023-00068-z>
95. Hinsby, K., Négrel, P., de Oliveira, D., Barros, R., Venvik, G., Ladenberger, A., Griffioen, J., Piessens, K., Calcagno, P., Götzl, G., Broers, H.P., Gourcy, L., van Heteren, S., Hollis, J., Poyiadji, E., Čápková, D., Tulstrup, J.: Mapping and understanding Earth: Open access to digital geoscience data and knowledge supports societal needs and UN sustainable development goals. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 130, 103835 (2024). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103835>
96. Lundø, M.: Præcision og pålidelighed. Høsten af korn, raps og bælgssæd: Præcision og pålidelighed. *Danmarks Stat.* (2024)
97. Henriksen, H.J., Schneider, R.J.M., Nilsson, B.: Analysis of drought indicators based on a national coupled hydrological model. Identification of drought events, propagation of drought indices, aggregation level and illustration of how data from HIP realtime model can support vulnerability assessment fo. GEUS, Copenhagen (2022)
98. Naturskaderådet: No Title, <https://naturskaderaadet.dk/>
99. Barthelemy, S., Bonan, B., Calvet, J.C., Grandjean, G., Moncoulon, D., Kapsambelis, D., Bernardie, S.: A new approach for drought index adjustment to clay-shrinkage-induced subsidence over France: Advantages of the interactive leaf area index. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 24, 999–1016 (2024). <https://doi.org/10.5194/nhess-24-999-2024>
100. Møller AB, Greve MH, B.A.: Opdateret jordbundstypekort. Rådgivningsnotat fra DCA – Natl. Cent. Fødevarer og Jordbrug, Aarhus Univ. 41 (2024)
101. Adhikari, K., Kheir, R.B., Greve, M.B., Bøcher, P.K., Malone, B.P., Minasny, B., McBratney, A.B., Greve, M.H.: High-Resolution 3-D Mapping of Soil Texture in Denmark. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 77, 860–876 (2013). <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0275>
102. Adhikari, K., Hartemink, A.E., Minasny, B., Bou Kheir, R., Greve, M.B., Greve, M.H.: Digital Mapping of Soil Organic Carbon Contents and Stocks in Denmark. *PLoS One.* 9, 1–13 (2014). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105519>
103. Miljøstyrelsen: Kemisk og kvantitativ påvirkning af GATØ. Samarbejdsprojekt mellem GEUS og AU/DCE er afsluttes december 2025. Finansieret af Miljøstyrelsen. (2025)
104. Henriksen, H.J., Jakobsen, A., Pasten-Zapata, E., Trolborg, L., Sonnenborg, T.O.: Assessing the impacts of climate change on hydrological regimes and fish EQR in two Danish catchments. *J. Hydrol. Reg. Stud.* 34, 100798 (2021). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100798>
105. Nilsson, B., Li, F., Chen, H., Sebok, E., Henriksen, H.J.: Evidence of karstification in chalk and limestone aquifers connected with stream systems and possible relation with the fish ecological quality ratio in Denmark. *Hydrogeol. J.* 31, 53–70 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02565-7>
106. Kragh, T., Martinsen, K.T., Kristensen, E., Sand-Jensen, K.: From drought to flood: Sudden carbon inflow causes whole-lake anoxia and massive fish kill in a large shallow lake. *Sci. Total Environ.* 739, 140072 (2020). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140072>

107. Pulido-Velazquez, D., Romero, J., Collados-Lara, A.-J., Alcalá, F.J., Fernández-Chacón, F., Baena-Ruiz, L.: Using the Turnover Time Index to Identify Potential Strategic Groundwater Resources to Manage Droughts within Continental Spain. *Water*. 12, (2020). <https://doi.org/10.3390/w12113281>
108. Larsen, F., Postma, D.: Nickel Mobilization in a Groundwater Well Field: Release by Pyrite Oxidation and Desorption from Manganese Oxides. *Environ. Sci. Technol.* 31, 2589–2595 (1997). <https://doi.org/10.1021/es9610794>
109. Rasmussen, P., Sonnenborg, T.O., Goncear, G., Hinsby, K.: Assessing impacts of climate change, sea level rise, and drainage canals on saltwater intrusion to coastal aquifer. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 421–443 (2013). <https://doi.org/10.5194/hess-17-421-2013>
110. Thorling, L., Albers, C.N., Ditlefsen, D., Hansen, B., Johnsen, A.R., Kazmierczak, J., Mortensen, M.H. Trolborg, L.: Grundvand. Status og udvikling 1989–2022. Tek. Rapp. GEUS 2024. (2024)
111. Henriksen, H.J., Schneider, R.J.M., Nilsson, B.: Analysis of drought indicators based on a national coupled hydrological model. Identification of drought events, propagation of drought indices, aggregation level and illustration of how data from HIP realtime model can support vulnerability assessment fo. GEUS, Copenhagen (2022)
112. Henriksen, H.J., Schneider, R., Koch, J., Ondracek, M., Trolborg, L., Seidenfaden, I.K., Kragh, S.J., Bøgh, E., Stisen, S.: A New Digital Twin for Climate Change Adaptation, Water Management, and Disaster Risk Reduction (HIP Digital Twin). *Water*. 15, (2023). <https://doi.org/10.3390/w15010025>

5.1 URLS til Tabel 4-2 - Mediedækning af tørkekonsekvenser

Tema	Link
Natur	Vegetation: https://www.danskskovforening.dk/nyhed/toerken-vil-faa-langvarige-konsekvenser-for-skovene/ Ferskvandsøkosystemer: https://ugeavisen.dk/elbobladet/toerlagte-vandloeb-og-soeer-gaar-ud-over-dyrelivet https://www.tv2east.dk/den-lange-sommer-torke-i-2018/torke-kan-tage-livet-af-truede-padder-og-hasselmus Terrestriske økosystemer: https://www.dr.dk/nyheder/regionale/syd/vandloeb-og-soeer-er-toerret-ud-hjaelp-havens-dyr-inden-de-doer-af-toerst Marine økosystemer: https://www.tv2east.dk/den-lange-sommer-torke-i-2018/fjordvand-fordamper-fisk-risikerer-do Skov og naturbrande: https://www.tv2nord.dk/torke-2018/sommertorke-saetter-kedelig-rekord-1000-naturbrande-bare-i-juli
Infrastruktur	Transport via vandvejen: https://nyheder.tv2.dk/samfund/2018-07-23-toerken-rammer-turbaade-har-aldrig-oplevet-noget-lignende Jordsætning/sætningsskader: https://www.bolius.dk/toer-sommer-gav-flere-saetningsskader-saadan-tjekker-du-dit-hus-80660 Kulturarv: https://www.dr.dk/nyheder/regionale/trekanten/toerken-truer-harald-blaatands-for-svarsvaerk
Landbrug	Afgrødeproduktivitet: https://www.landbrugsinfo.dk/public/a/2/e/produktionsokonomi_vejr_ekonomisk_konsekvenser https://www.berlingske.dk/virksomheder/landbruget-opjusterer-sit-milliardtab-paa-historisk-toerke Afgrødepriser: https://www.dst.dk/da/Statistik/nyheder-analyser-publ/nyt/NytHtml?cid=28479
Grundvand	Vandforsyning: https://nyheder.tv2.dk/samfund/2018-06-07-pressede-danske-vandvaerker-spar-paa-vandet Vanding: https://effektivtlandbrug.landbrugnet.dk/artikler/markvanding/tilladelse-til-ekstra-markvanding-kan-tage-lang-tid.aspx https://okonu.dk/mark-og-stald/landmaend-rades-nu-til-at-prioritere-hvad-de-vander

5.2 URLS - Tørkeovervågningsprogrammer

Tabel 5-1: En oversigt over ULRer for hvert identificeret monitoringsprogram

Land	Institut	Link
Belgien	RMI	https://www.meteo.be/en/
Bulgarien	NIMH	https://hydro.bg/
Danmark	GEUS	https://denationalhydrologiskemodel.dk/
	DMI	https://www.dmi.dk
Estland	ILM	https://www.ilmateenistus.ee/ilm/
Finland	Waterinfo.fi	https://www.vesi.fi/en/karttapalvelu/
Frankrig	Meteo-France	https://vigilance.meteofrance.fr/fr/crues
Grækenland	EMY	https://emy.gr/emy/en
Holland	KWR, Wageningen, Deltares	https://droogteportaal.nl/droogteportaal/web/
	KNMI	https://www.knmi.nl/nederland-nu/klimatologie/droogtemonitor
Irland	MetÉireann	https://www.met.ie/
Italien	ISPRA	https://www.isprambiente.gov.it/
Kroatien	DHMZ	https://meteo.hr/index_en.php
Letland	LVGMC	https://bridinajumi.meteo.lv/
Litauen	LHMT	https://www.meteo.lt/
Norge	NVE, MET, SVV og Kartverket	https://senorge.no/
Polen	IMGW-PIB	https://www.agrometeo.imgw.pl/monitoring/
Portugal	IPMA	https://www.ipma.pt/en/
	SNIRH	https://snirh.apambiente.pt/
Rumænien	MeteoRomania	https://www.meteoromania.ro
Schweiz	MeteoSwiss	https://www.meteoswiss.admin.ch/
	Bundesamt für Umwelt	https://www.hydrodaten.admin.ch/de/grundwasser/bulletin
Slovakiet	CzechGlobe m.fl.	https://www.intersucho.cz
Slovenien	ARSO	https://meteo.arso.gov.si
Spanien	AEMET	https://www.aemet.es/en/
Storbritannien	CEH	https://eip.ceh.ac.uk/hydrology/water-resources
Sverige	SMHI	https://www.smhi.se/en/
	SGU	https://www.sgu.se/grundvatten/
Tjekkiet	CzechGlobe m.fl.	https://www.intersucho.cz/en/
Tyskland	UFZ	https://www.ufz.de/index.php?en=37937
	DWD	https://www.dwd.de/EN/
Ungarn	HungaroMet	https://www.met.hu/
Østrig	ZAMG	https://www.zamg.ac.at/incaanalyse/
Europa	EDO	https://edo.jrc.ec.europa.eu
	Copernicus CCS	https://climate.copernicus.eu/esotc/2022/drought

6. Appendiks

6.0 Supplerende information til Afsnit 1.2

Tabel 6-1 Tørkeanomalier i jordvandet. Grønne rækker markerer Ekstreme tørkeforekomster, der dækker eller strækker sig ind i perioden April-Juni.

#	Kategori	Start	Slut	Længde (udv./ Gen.)	Maks index	Alvorlig- hed	Intensi- tet	Sæ- son
J1	Tørt	12-04-1990	12-04-1990	1 (0/0)	-1,39	0,39	0,39	F
J2	Meget tørt	10-05-1990	14-06-1990	6 (3/2)	-2,32	4,27	0,71	F/S
J3	Tørt	09-08-1990	16-08-1990	2 (0/1)	-1,30	0,59	0,29	S
J4	Meget tørt	08-02-1991	01-03-1991	4 (1/2)	-2,11	2,39	0,60	V/F
J5	Ekstrem tørt	30-08-1991	11-10-1991	7 (3/3)	-3,03	7,05	1,01	S/E
J6	Tørt	13-12-1991	13-12-1991	1 (0/0)	-1,11	0,11	0,11	V
J7	Tørt	25-01-1992	25-01-1992	1 (0/0)	-1,05	0,05	0,05	V
J8	Ekstrem tørt	06-06-1992	22-08-1992	12 (5/6)	-3,73	19,71	1,64	S
J9	Ekstrem tørt	03-05-1993	19-07-1993	12 (4/7)	-3,34	20,00	1,67	F/S
J10	Meget tørt	19-07-1994	23-08-1994	6 (3/2)	-2,34	4,92	0,82	S
J11	Ekstrem tørt	02-08-1995	27-09-1995	9 (4/4)	-3,45	13,84	1,54	S/E
J12	Tørt	18-10-1995	15-11-1995	5 (2/2)	-1,57	1,63	0,33	E
J13	Ekstrem tørt	29-11-1995	28-03-1996	18 (5/12)	-3,23	19,20	1,07	E/F
J14	Tørt	02-05-1996	16-05-1996	3 (2/0)	-1,46	1,00	0,33	F
J15	Meget tørt	18-07-1996	31-10-1996	16 (10/5)	-2,94	16,11	1,01	S/E
J16	Meget tørt	26-12-1996	08-02-1997	7 (2/4)	-2,73	6,09	0,87	V
J17	Tørt	15-03-1997	22-03-1997	2 (1/0)	-1,27	0,50	0,25	F
J18	Meget tørt	16-08-1997	11-10-1997	9 (2/6)	-2,15	6,46	0,72	S/E
J19	Tørt	20-09-1999	27-09-1999	2 (0/1)	-1,28	0,30	0,15	E
J20	Meget tørt	01-03-2001	08-03-2001	2 (1/0)	-2,03	1,03	0,52	F
J21	Tørt	12-04-2002	26-04-2002	3 (2/0)	-1,70	1,60	0,53	F
J22	Meget tørt	20-09-2002	18-10-2002	5 (3/1)	-2,08	4,47	0,89	E
J23	Tørt	27-12-2002	27-12-2002	1 (0/0)	-1,09	0,09	0,09	V

J24	Ekstrem tørt	22-02-2003	03-05-2003	11 (9/1)	-3,58	15,38	1,40	V/F
J25	Ekstrem tørt	23-08-2003	20-12-2003	18 (12/5)	-3,08	21,13	1,17	S/V
J26	Tørt	07-03-2004	21-03-2004	3 (1/1)	-1,90	1,01	0,34	F
J27	Tørt	13-06-2004	20-06-2004	2 (1/0)	-1,21	0,24	0,12	S
J28	Tørt	03-05-2005	03-05-2005	1 (0/0)	-1,05	0,05	0,05	F
J29	Ekstrem tørt	13-09-2005	06-12-2005	13 (6/6)	-3,56	16,19	1,25	E/V
J30	Tørt	20-12-2005	20-12-2005	1 (0/0)	-1,14	0,14	0,14	V
J31	Tørt	04-01-2006	11-01-2006	2 (1/0)	-1,04	0,07	0,03	V
J32	Tørt	25-01-2006	08-02-2006	3 (1/1)	-1,68	1,04	0,35	V
J33	Meget tørt	15-03-2006	29-03-2006	3 (1/1)	-2,67	3,87	1,29	F
J34	Tørt	19-07-2006	09-08-2006	4 (2/1)	-1,90	1,81	0,45	S
J35	Meget tørt	19-04-2007	31-05-2007	7 (3/3)	-2,86	7,52	1,07	F
J36	Ekstrem tørt	23-05-2008	08-08-2008	12 (4/7)	-3,15	13,35	1,11	F/S
J37	Meget tørt	26-04-2009	14-06-2009	8 (2/5)	-2,35	7,62	0,95	F/S
J38	Tørt	05-07-2009	19-07-2009	3 (1/1)	-1,43	0,87	0,29	S
J39	Tørt	27-09-2009	01-11-2009	6 (1/4)	-1,76	2,13	0,35	E
J40	Ekstrem tørt	18-01-2010	15-03-2010	9 (5/3)	-3,35	13,31	1,48	V/F
J41	Tørt	13-12-2010	11-01-2011	5 (3/1)	-1,92	2,15	0,43	V
J42	Meget tørt	03-05-2011	07-06-2011	6 (2/3)	-2,66	5,66	0,94	F/S
J43	Tørt	29-11-2011	29-11-2011	1 (0/0)	-1,07	0,07	0,07	E
J44	Tørt	15-02-2012	15-02-2012	1 (0/0)	-1,57	0,57	0,57	V
J45	Tørt	04-04-2012	11-04-2012	2 (1/0)	-1,77	1,02	0,51	F
J46	Tørt	19-12-2012	19-12-2012	1 (0/0)	-1,11	0,11	0,11	V
J47	Ekstrem tørt	15-03-2013	24-05-2013	11 (3/7)	-3,12	11,83	1,08	F
J48	Meget tørt	02-08-2013	20-09-2013	8 (5/2)	-2,40	6,57	0,82	S/E
J49	Tørt	11-10-2013	25-10-2013	3 (1/1)	-1,30	0,48	0,16	E
J50	Tørt	09-08-2014	16-08-2014	2 (0/1)	-1,27	0,34	0,17	S
J51	Meget tørt	26-09-2016	07-11-2016	7 (1/5)	-2,41	5,61	0,80	E
J52	Tørt	01-02-2017	01-02-2017	1 (0/0)	-1,03	0,03	0,03	V
J53	Ekstrem tørt	31-05-2018	06-09-2018	15 (10/4)	-3,78	25,32	1,69	F/E
J54	Tørt	01-11-2018	20-12-2018	8 (5/2)	-1,79	4,22	0,53	E/V
J55	Meget tørt	19-04-2019	31-05-2019	7 (3/3)	-2,46	7,00	1,00	F

J56	Meget tørt	18-04-2020	13-06-2020	9 (2/6)	-2,43	6,67	0,74	F/S
J57	Tørt	22-08-2020	29-08-2020	2 (1/0)	-1,61	0,63	0,32	S
J58	Tørt	26-09-2020	10-10-2020	3 (2/0)	-1,53	1,07	0,36	E
J59	Tørt	24-10-2020	24-10-2020	1 (0/0)	-1,12	0,12	0,12	E
J60	Tørt	22-02-2021	22-02-2021	1 (0/0)	-1,60	0,60	0,60	V
J61	Meget tørt	08-03-2021	15-03-2021	2 (1/0)	-2,24	1,55	0,77	F
J62	Tørt	20-09-2021	20-09-2021	1 (0/0)	-1,06	0,06	0,06	E
J63	Meget tørt	22-03-2022	28-06-2022	15 (2/12)	-2,98	14,44	0,96	F/S
J64	Ekstrem tørt	02-08-2022	11-10-2022	11 (6/4)	-3,08	10,59	0,96	S/E
J65	Meget tørt	20-12-2022	04-01-2023	3 (1/1)	-2,04	2,02	0,67	V
J66	Ekstrem tørt	07-06-2023	12-07-2023	6 (3/2)	-3,04	8,20	1,37	S

Tabel 6-2 Tørkeanomalier i vandløb

#	Kategori	Start	Slut	Længde (udv./Gen.)	Maks index	Alvorlighed	Intensitet	Sæson
V1	Tørt	04-01-1990	18-01-1990	3 (2/0)	-1,14	0,37	0,12	V
V2	Tørt	13-12-1991	13-12-1991	1 (0/0)	-1,27	0,27	0,27	V
V3	Tørt	12-04-1993	05-07-1993	13 (6/6)	-1,41	3,48	0,27	F/S
V4	Ekstrem tørt	29-11-1995	26-09-1996	44 (11/32)	-2,65	30,91	0,70	E
V5	Tørt	10-10-1996	31-10-1996	4 (2/1)	-1,26	0,79	0,20	E
V6	Meget tørt	04-01-1997	15-02-1997	7 (4/2)	-1,85	3,86	0,55	V
V7	Tørt	22-03-1997	22-03-1997	1 (0/0)	-1,02	0,02	0,02	F
V8	Tørt	05-04-1997	17-05-1997	7 (4/2)	-1,31	1,33	0,19	F
V9	Tørt	07-06-1997	21-06-1997	3 (1/1)	-1,14	0,33	0,11	S
V10	Tørt	12-07-1997	26-07-1997	3 (1/1)	-1,09	0,17	0,06	S
V11	Tørt	09-08-1997	23-08-1997	3 (2/0)	-1,26	0,56	0,19	S
V12	Tørt	06-09-1997	04-10-1997	5 (4/0)	-1,12	0,39	0,08	E
V13	Meget tørt	01-11-1997	20-12-1997	8 (4/3)	-1,68	3,25	0,41	E/V
V14	Tørt	08-03-2003	08-03-2003	1 (0/0)	-1,07	0,07	0,07	F
V15	Tørt	22-03-2003	26-04-2003	6 (3/2)	-1,46	1,98	0,33	F
V16	Tørt	10-05-2003	10-05-2003	1 (0/0)	-1,05	0,05	0,05	F
V17	Meget tørt	01-11-2003	27-12-2003	9 (6/2)	-1,73	3,16	0,35	E/V
V18	Meget tørt	15-11-2005	08-02-2006	13 (8/4)	-1,61	4,48	0,34	E/V
V19	Tørt	22-03-2006	29-03-2006	2 (0/1)	-1,22	0,34	0,17	F
V20	Tørt	18-01-2009	18-01-2009	1 (0/0)	-1,09	0,09	0,09	V

V21	Meget tørt	01-02-2010	01-03-2010	5 (3/1)	-1,79	2,30	0,46	V/F
V22	Tørt	05-04-2013	12-04-2013	2 (1/0)	-1,08	0,13	0,07	F
V23	Tørt	08-02-2017	22-02-2017	3 (2/0)	-1,48	0,76	0,25	V
V24	Tørt	15-11-2018	18-01-2019	10 (3/6)	-1,46	1,86	0,19	E/V
V25	Tørt	19-12-2020	19-12-2020	1 (0/0)	-1,08	0,08	0,08	V
V26	Tørt	20-12-2022	20-12-2022	1 (0/0)	-1,26	0,26	0,26	V
V1	Tørt	04-01-1990	18-01-1990	3 (2/0)	-1,14	0,37	0,12	V
V2	Tørt	13-12-1991	13-12-1991	1 (0/0)	-1,27	0,27	0,27	V
V3	Tørt	12-04-1993	05-07-1993	13 (6/6)	-1,41	3,48	0,27	F/S

Tabel 6-3 Tørkeanomalier i det terrænnære grundvand

#	Kategori	Start	Slut	Længde (udv./ Gen.)	Maks index	Alvorlighed	Intensitet	Sæson
GT1	Tørt	04-01-1990	18-01-1990	3 (2/0)	-1,15	0,28	0,09	V
GT2	Tørt	10-05-1993	19-07-1993	11 (7/3)	-1,35	2,44	0,22	F/S
GT3	Eks-trem tørt	06-12-1995	07-11-1996	49 (16/32)	-2,46	38,97	0,80	V/E
GT4	Meget tørt	04-01-1997	15-02-1997	7 (4/2)	-1,59	2,84	0,41	V
GT5	Tørt	12-04-1997	17-05-1997	6 (2/3)	-1,19	0,85	0,14	F
GT6	Tørt	21-06-1997	21-06-1997	1 (0/0)	-1,03	0,03	0,03	S
GT7	Tørt	26-07-1997	26-07-1997	1 (0/0)	-1,01	0,01	0,01	S
GT8	Tørt	16-08-1997	11-10-1997	9 (7/1)	-1,16	0,80	0,09	S/E
GT9	Meget tørt	25-10-1997	27-12-1997	10 (5/4)	-1,67	3,58	0,36	E/V
GT10	Tørt	12-04-2003	03-05-2003	4 (2/1)	-1,18	0,45	0,11	F
GT11	Meget tørt	08-11-2003	27-12-2003	8 (5/2)	-1,64	2,79	0,35	E/V
GT12	Meget tørt	29-11-2005	08-02-2006	11 (6/4)	-1,51	3,23	0,29	E/V
GT13	Tørt	22-03-2006	29-03-2006	2 (1/0)	-1,06	0,11	0,05	F
GT14	Tørt	15-02-2010	01-03-2010	3 (1/1)	-1,30	0,69	0,23	V/F
GT15	Tørt	22-02-2017	22-02-2017	1 (0/0)	-1,12	0,12	0,12	V
GT16	Tørt	22-11-2018	13-12-2018	4 (2/1)	-1,32	0,54	0,13	E/V
GT17	Tørt	11-01-2019	18-01-2019	2 (1/0)	-1,11	0,18	0,09	V

Tabel 6-4 Tørkeanomalier i det dybe grundvand

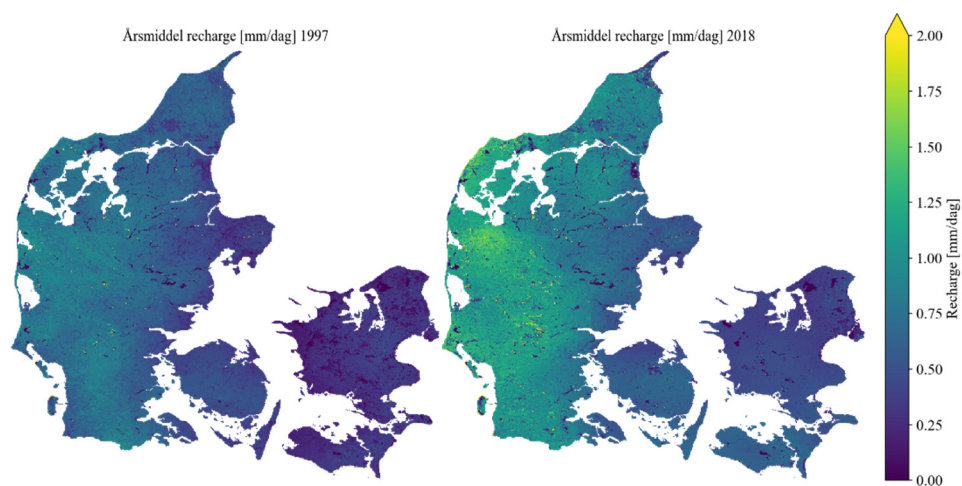
#	Kategori	Start	Slut	Længde (udv./ Gen.)	Maks index	Alvorlig- hed	Inten- sitet	Sæ- son
GD1	Tørt	01-01-1990	01-01-1990	4 (0/0)	-1,09	0,09	0,09	V
GD2	Tørt	01-06-1992	01-06-1992	4 (0/0)	-1,16	0,16	0,16	S
GD3	Tørt	01-05-1993	01-06-1993	9 (0/4)	-1,34	0,61	0,31	F/S
GD4	Meget tørt	01-01-1996	01-03-1998	117 (100/13)	-1,96	13,02	0,48	Alle
GD5	Tørt	01-12-2003	01-12-2003	4 (0/0)	-1,09	0,09	0,09	V
GD6	Tørt	01-12-2005	01-03-2006	17 (4/8)	-1,33	0,65	0,16	V/F
GD7	Tørt	01-07-2006	01-07-2006	4 (0/0)	-1,12	0,12	0,12	S

Tabel 6-5 Tørkeanomalier for nedbør

#	Kategori	Start	Slut	Længde (udv./ Gen.)	Maks index	Alvorlig- hed	Inten- sitet	Sæson
N1	Tørt	01-05-1990	01-05-1990	1 (0/0)	-1,04	0,04	-1,04	F
N2	Meget tørt	01-06-1992	01-06-1992	1 (0/0)	-1,97	0,97	-1,97	S
N3	Tørt	01-03-1993	01-06-1993	4 (0/13)	-1,17	0,36	-1,17	F/S
N4	Meget tørt	01-07-1994	01-07-1994	1 (0/0)	-1,53	0,53	-1,53	S
N5	Meget tørt	01-07-1995	01-08-1995	2 (4/0)	-1,54	0,68	-1,54	S
N6	Tørt	01-10-1995	01-10-1995	1 (0/0)	-1,48	0,48	-1,48	E
N7	Meget tørt	01-12-1995	01-01-1996	2 (4/0)	-1,99	1,10	-1,99	V
N8	Meget tørt	01-03-1996	01-04-1996	2 (0/4)	-1,54	0,76	-1,54	F
N9	Tørt	01-06-1996	01-06-1996	1 (0/0)	-1,27	0,27	-1,27	S
N10	Eks- trem tørt	01-12-1996	01-01-1997	2 (4/0)	-2,03	1,14	-2,03	V
N11	Tørt	01-11-1999	01-11-1999	1 (0/0)	-1,37	0,37	-1,37	E
N12	Tørt	01-09-2002	01-09-2002	1 (0/0)	-1,02	0,02	-1,02	E
N13	Tørt	01-12-2002	01-12-2002	1 (0/0)	-1,30	0,30	-1,30	V
N14	Tørt	01-02-2003	01-03-2003	2 (0/4)	-1,48	0,71	-1,48	V/F
N15	Tørt	01-08-2003	01-08-2003	1 (0/0)	-1,16	0,16	-1,16	S
N16	Tørt	01-10-2003	01-10-2003	1 (0/0)	-1,04	0,04	-1,04	E
N17	Tørt	01-09-2005	01-09-2005	1 (0/0)	-1,24	0,24	-1,24	E
N18	Tørt	01-06-2006	01-07-2006	2 (0/4)	-1,02	0,03	-1,02	S
N19	Tørt	01-09-2006	01-09-2006	1 (0/0)	-1,00	0,00	-1,00	E
N20	Tørt	01-04-2007	01-04-2007	1 (0/0)	-1,35	0,35	-1,35	F
N21	Tørt	01-10-2007	01-10-2007	1 (0/0)	-1,38	0,38	-1,38	E
N22	Tørt	01-05-2008	01-05-2008	1 (0/0)	-1,38	0,38	-1,38	F

N23	Tørt	01-12-2008	01-12-2008	1 (0/0)	-1,14	0,14	-1,14	V
N24	Tørt	01-04-2009	01-04-2009	1 (0/0)	-1,39	0,39	-1,39	F
N25	Meget tørt	01-11-2011	01-11-2011	1 (0/0)	-1,59	0,59	-1,59	E
N26	Tørt	01-03-2012	01-03-2012	1 (0/0)	-1,08	0,08	-1,08	F
N27	Tørt	01-02-2013	01-03-2013	2 (4/0)	-1,20	0,20	-1,20	V/F
N28	Tørt	01-07-2013	01-07-2013	1 (0/0)	-1,33	0,33	-1,33	S
N29	Tørt	01-10-2015	01-10-2015	1 (0/0)	-1,40	0,40	-1,40	E
N30	Tørt	01-12-2016	01-01-2017	2 (4/0)	-1,12	0,17	-1,12	V
N31	Tørt	01-05-2018	01-07-2018	3 (9/0)	-1,45	0,93	-1,45	F/S
N32	Tørt	01-11-2018	01-11-2018	1 (0/0)	-1,09	0,09	-1,09	E
N33	Tørt	01-04-2019	01-04-2019	1 (0/0)	-1,07	0,07	-1,07	F
N34	Tørt	01-06-2021	01-06-2021	1 (0/0)	-1,06	0,06	-1,06	S
N35	Meget tørt	01-03-2022	01-03-2022	1 (0/0)	-1,75	0,75	-1,75	F
N36	Tørt	01-05-2023	01-06-2023	2 (0/4)	-1,47	0,67	-1,47	F/S

6.1 Supplerende information til Afsnit 4.2



Figur 6-1 Middel recharge/nedsivning for hele Danmark for 1997 (venstre) og 2018 (højre).

6.2 Program for Soil Moisture and Drought seminar

One-day seminar **Soil moisture and Droughts**

Friday November 8th, 2024 – Theodor Sorgenfrei Auditoriet - GEUS

Location: Theodor Sorgenfrei Auditoriet, GEUS, Øster Voldgade 10, 1350 København K.

Organising committee: Simon Stisen, Julian Koch, David Terpager Christiansen, and Ida Seidenfaden (GEUS).

9:15- 9:25 Welcome by Heidi Barlebo, Department Head, GEUS • Introduction to the seminar
9:25-11:40 Session 1: National scale soil moisture modelling (Chair Julian Koch) • <i>A 20-meter root-zone soil moisture dataset using Earth Observations and water balance modelling</i>, Cecile Marie Margaretha Kittel (DHI) • <i>Assessing Drought Projections in Fenno-Scandinavia Using High-Resolution Convection-Permitting Models</i>, Ruben Häberli (DMI) • <i>Hydrological (drought) indices and the National Hydrological Model</i>, Raphael Schneider (GEUS)
10:45-11:00 Coffee break
• <i>Climate change effect on global agricultural droughts and resulting consequences</i>, Jørgen E. Olesen (AU) • <i>Geo-Daisy and validation of the FAO Penman-Monteith equation and net radiation model</i>, Simon Fiil Svane (KU)
11:40-12:10 Lunch (sandwiches are served)
12:10-12:50 Session 2: International perspectives (Chair Simon Stisen) • <i>The German Drought Monitor and model developments</i>, Luis E. Samaniego (UFZ, Leipzig Germany) • <i>OpenET: Field Scale ET Data for Water Resources Management, Soil Moisture and Drought Monitoring</i>, Garshaw Amidi-Abraham (OpenET konsortiet)
12:50-15:00 Session 3: Satellite-based and In-Situ observations (Chair Ida Seidenfaden) • <i>Needs and opportunities for using detailed satellite data to prevent drought consequences for agriculture and nature</i>, Eva Bøgh (KDS)
13:10-13:25 Coffee break
• <i>Satellite data for meteorological drought analysis</i>, Tobias Holmgaard (DMI) • <i>Conventional soil moisture estimation methods</i>, Majken Looms Zibar (KU) • <i>Novel non-invasive soil moisture estimation based on cosmic and gamma radiation</i>, Mie Andreasen (GEUS) • <i>Site scale soil moisture and drought monitoring for archaeology</i>, Jørgen Hollesen (National Museum)
15:00-15:15 Closing remarks

6.3 Engelsksprogede Videnskabelig Publikation - Abstrakt – Analyse H1

Drought across the hydrological cycle– an evaluation of historical droughts and their propagation simulated with the National Hydrological Model of Denmark

Ida Karlsson Seidenfaden, Raphael Schneider, Bertel Nilsson, Klaus Hinsby, Mark F.T. Hansen, Mie Andreasen, Julian Koch, Simon Stisen

Droughts are a natural hazard with large consequences for nature, economy, and society. Since the large droughts in recent times, e.g., 2018 drought impacts in temperate regions such as Northern Europe have received increasing attention. In these regions the drought impacts can be very different from naturally arid areas, however, the general wet climatology of the regions may cause the society to be underprepared and lacking terminologies and frameworks in dealing with droughts. The close coupling between the components of the hydrological cycle also means that the evaluation of drought migration and impacts must be done in an integrated manner to capture delays and dependencies. In this study, we utilized a distributed physically based groundwater-surface water model covering the entire Denmark (the National Hydrological Model) for evaluating the historical droughts and their propagation through the water cycle for soil moisture, stream flow and surface/deep groundwater droughts.

The study uses four standardized drought indices and shows that several larger droughts have occurred in the Danish area in the last 34 years. For soil moisture, the most noteworthy is the 2018 drought, while for streams and groundwater, the 1995-1997 drought was the far most distinct and severe. Investigation of drought characteristics shows that the geological inhomogeneity of the Danish area results in very different accumulation times of SPI and emphasises the need to establish a locally dependent correlation between hydrological droughts and precipitation.

The integrated approach in this study also revealed that the timing and seasonality of the precipitation deficit are a main governing factor in determining the affected water balance components during droughts. Due to the recharge to the groundwater system is mainly attributed to the winter period, summer drought has less effect on groundwater systems than expected, even though surface waters and terrain near groundwater experience increased pressure from evapotranspiration during these events. More severe for the groundwater system and the coupled surface waters are multi-year winter droughts, especially if they are interlaid with dry summers.

6.4 Engelsksprogede Videnskabelig Publikation - Abstrakt – Validering H2

Drought across the hydrological cycle – an extensive validation of drought indices simulated with the National Hydrological Model of Denmark

Raphael Schneider, Simon Stisen, Bertel Nilsson, Klaus Hinsby, Mark F.T. Hansen, Mie Andreassen, Julian Koch, Lars Trolborg, Ida Karlsson Seidenfaden

Monitoring and forecasting of droughts and their propagation through the hydrological cycle are essential to mitigating drought impacts and hazards. When investigating the full hydrological cycle and the drought impact on the different parts of the water balance, integrated hydrological models are an essential tool. In contrast to observations, such models offer complete spatial and temporal coverage, and they cover the entire cycle of water moving through the natural system. However, hydrological models underlay multiple uncertainty sources from conceptual, structural, and numerical shortcomings, and if they are to produce meaningful information regarding droughts, models must be validated based on drought-related statistics and data.

In this study, we investigate the performance of the integrated National Hydrological Model of Denmark in reproducing drought characteristics for soil moisture, streamflow and groundwater. Due to the integrated nature of the model, it is possible to test the connectivity, delays and lags when droughts are migrating from one part of the water cycle to the next. Furthermore, the diverse geology and soil types across the Danish basin provide a unique opportunity to investigate the performance across different hydrogeological settings. The performance is evaluated by utilising an extensive quality-assured observational data set of soil moisture from Cosmic Ray sensors, as well as observed groundwater head times series and stream flow measurements with more than 20 years of data.