

# Metode til kategorisering af søer i forhold til deres kontakt med grundvandet

Bertel Nilsson, Lars Trolborg, Julian Koch & Jacob Kidmose

# **Metode til kategorisering af søer i forhold til deres kontakt med grundvandet**

Bertel Nilsson, Lars Trolborg, Julian Koch & Jacob Kidmose

# Metode til kategorisering af søer i forhold til deres kontakt med grundvandet.

Forfattere

Bertel Nilsson, Lars Trolborg, Julian Koch og Jacob Kidmose

## Indhold

|                                                                                                      |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Ordliste</b>                                                                                      | <b>6</b>  |
| <b>Sammendrag</b>                                                                                    | <b>7</b>  |
| <b>1. Baggrund og formål</b>                                                                         | <b>9</b>  |
| <b>2. Opgavebeskrivelse og datagrundlag</b>                                                          | <b>10</b> |
| 2.1 Leverancer .....                                                                                 | 11        |
| 2.2 Datagrundlag .....                                                                               | 12        |
| <b>3. Trinvis metode til kategorisering og bestemmelse af kontakten mellem grundvand og VP3 søer</b> | <b>13</b> |
| 3.1 Den trinvis metode .....                                                                         | 13        |
| 3.2 Læsevejledning .....                                                                             | 16        |
| <b>4. Analyse af sandsynligheden for udveksling af grundvand med målsatte søer (Trin VI) 17</b>      | <b>17</b> |
| 4.1 Inddeling af søerne efter sandsynlighed for grundvandskontakt.....                               | 17        |
| 4.2 Data til rådighed .....                                                                          | 20        |
| 4.2.1 DK model geologi omkring søen .....                                                            | 20        |
| 4.2.2 Søens dybdeforhold .....                                                                       | 21        |
| 4.2.3 Afstand mellem toppen af grundvandsforekomst og bunden af søerne.....                          | 22        |
| 4.3 Sandsynlighed for søers kontakt med grundvandsforekomster (kvalitativ analyse)                   | 24        |
| 4.4 Søer på 1-10 ha .....                                                                            | 26        |
| 4.5 Remote sensing baseret screening værktøj (satellit baseret temperatur-måling).                   | 28        |
| <b>5. Vurdering af grundvandsindsivning til søer</b>                                                 | <b>31</b> |
| 5.1 Søens vandbalance .....                                                                          | 31        |
| 5.2 Konceptuelle sø-typer .....                                                                      | 31        |
| 5.2.1 Grundvands-residualet.....                                                                     | 33        |
| 5.3 Fordampning for danske søer.....                                                                 | 34        |
| 5.4 Nedbør for danske søer .....                                                                     | 35        |
| 5.5 Overfladiske indløb og afløb til søer .....                                                      | 36        |
| 5.6 Afløb fra søer baseret på Miljøstyrelsens dataindsamling.....                                    | 37        |
| 5.6.1 Målte vandføringer i indløb og afløb (ODA databasen) .....                                     | 40        |
| <b>6. Validering af metode med test søer</b>                                                         | <b>43</b> |
| 6.1 Valg af testsøer .....                                                                           | 43        |
| 6.2 Test søernes vandbalance.....                                                                    | 43        |
| 6.3 Værktøjskassen 2019 .....                                                                        | 44        |
| 6.4 Evaluerings af kontakten mellem grundvand og testsø .....                                        | 46        |

|           |                                                                                             |           |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.4.1     | Kategorisering af søers grundvandskontakt på baggrund af beregnet grundvands-residual ..... | 46        |
| 6.4.2     | Sandsynlighed for grundvandsudveksling med testsøerne .....                                 | 48        |
| 6.5       | P belastningsmodel .....                                                                    | 49        |
| <b>7.</b> | <b>Datarepræsentativitet og sikkerhed på metoden</b>                                        | <b>51</b> |
| 7.1       | Fejl på vandbalancen .....                                                                  | 51        |
| 7.2       | Hvad er sikkerheden på bestemmelse af sandsynlighed for grundvandsindsivning<br>52          |           |
| 7.3       | Sikkerhed på metoden .....                                                                  | 52        |
| <b>8.</b> | <b>Konklusion og anbefalinger</b>                                                           | <b>53</b> |
| <b>9.</b> | <b>Referencer</b>                                                                           | <b>55</b> |
|           | <b>Bilag 1 Fordampning fra Søer</b>                                                         | <b>57</b> |

## Ordliste

|             |                                                                          |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------|
| DCE         | Nationalt Center for Miljø og Energi ved Aarhus Universitet              |
| DK-model    | Den Nationale Vandressource Model                                        |
| Dmid        | Målsatte søers middeldybde                                               |
| Dmax        | Målsatte søers maksimale dybde                                           |
| FOHM        | Den Fælles Offentlige Hydrogeologiske Model udviklet af Miljøstyrelsen   |
| GATØ        | Grundvandsafhængige terrestriske økosystemer                             |
| GEUS        | Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland               |
| GVF         | Grundvandsforekomst                                                      |
| MST         | Miljøstyrelsen                                                           |
| ODA         | Overfladevandsdatabase                                                   |
| proxy       | Her fællesbetegnelse for som geologiske, hydrologiske og klimatiske data |
| Sø-type A-E | Konceptuelle sø typer                                                    |
| VP3 sø      | Søer målsat i tredje vandplanperiode 2021-2027                           |

## Sammendrag

Nærværende rapportering er en sammenfatning af arbejdet med at videreudvikle en metode til vurdering af vandbalance og kontakten mellem grundvand og målsatte søer i vandområdeplanerne 2021-2027. Nilsson med flere (2019) påpegede et særlig behov for en videreudvikling af metoden til at bestemme kontakten mellem grundvand og søer med arealer < 10ha. En trinvis metode præsenteres til vurdering af grundvandsindstrømning til danske søer der består af en række metodiske trin, arbejdsprocesser og afhængigheder imellem processerne. Den trinvis metode tjener til formål at strukturere arbejdsflowet til at bestemme hvorvidt en given målsat sø er i kontakt med en grundvandsforekomst, og hvis tilgængeligt data tillader det, at bestemme søens vandbalance. Den primære udfordring til bestemmelsen er, at mange søer mangler essentielle datatyper, eksempelvis oplysninger om målt eller modelberegnet vandføring i overfladiske indløb og afløb til/fra søerne. Derfor er der i første omgang lavet en kvalitativ analyse, der sorterer søer efter deres sandsynlighed for kontakt med grundvandet (høj, moderat, lav og ingen sandsynlighed) på baggrund af geologiske forhold under søen (FOHM model), søens dybdemæssige forhold og en beregnet afstand mellem søens dybder og overkanten af nærmeste grundvandsforekomst. Den foreslåede analyse forventes at være et vigtigt element i vandplanarbejdets risikovurdering for de målsatte søer, da den kan anvendes for alle de målsatte søer uanset søens arealstørrelse.

Det vil være for ressourcekrævende at bestemme grundvandsindstrømning til søer som beskrevet i Nilsson med flere (2019) for alle søer < 10 ha, så der er behov for en automatiseret (maskinel) metode, så opgaven med vurdering af kontakt forholdene bliver mere overkommelig. Den foreslåede analyse af sandsynlighed for grundvandskontakt er gældende af alle målsatte søer uanset størrelse og vil være et supplement til DK-modellens vurdering af kontakt forholdene for søer > 10 ha. Da næsten halvdelen af de målsatte søer har en størrelse mindre end 10 ha (ca. 500 søer) anviser denne metode således en måde at vurdere kontakt forholdene, også for disse mindre søer.

En semi-kvalitativ remote sensing metode med landsdækkende satellit data (temperatur målinger) er testet på 4 søer og anses for komplementær til den kvalitative analyse med sandsynlighedsvurdering af kontakten mellem grundvand og sø. Negative anomalier i søens overfaldtemperatur (lake surface temperatur: LST), kan anvendes til at identificere søer der er påvirket af grundvandsindstrømninger. Denne antagelse er gyldig om sommeren hvor grundvandet er køligere ( $\approx 9^{\circ}\text{C}$ ) end søvand ( $\approx 15\text{-}20^{\circ}\text{C}$ ). Vi har processeret Landsat LST data fra Landsat Analysis Ready Data (ARD) billedarkiv (repositoriet) udviklet af Global Land Analysis and Discovery (GLAD). I vores analyse har vi fokuseret på sommermåneder med LST billeder, hvor mindst 90% af sø overfladen havde data i høj kvalitet (ikke påvirket af skyer). Vi konkluderer at, på trods af de tilfredsstillende første resultater, at Landsat data skal downloades igen og fra en anden kilde i et næste skridt. I den nuværende analyse anvendt vi Landsat data fra GLAD repositoriet hvor Landsat data er aggregeret i tid til 16-dags kompositter. Det påvirker særligt det termiske bånd, som er meget styret af vejret. Det har vist sig at den aggregering har gjort at mange datoer ikke er brugbare for LST, fordi de rumlige mønstre er inkonsistente.

En analyse af målsatte søers vandbalance baseres på eksisterende data primært fra de nationale overvågningsprogrammer på vandløb og søer samt klimatologiske data. Der er i analysen estimeret specifik sø fordampning og korrigeret nedbør til brug for søernes vandbalance. DMI's referencefordampning er sammenlignet med en direkte beregning af sø fordampning. Med baggrund i sammenligning af fordampning ved 21 danske søer vurderes det, at den aktuelle fordampning ved danske søer er 16% større end DMI's referencefordampning. Der er lavet et landsdækkende kort for alle målsatte søer der viser den årlige middelfordampning fra søer udregnet som 1,16 gange DMI's referencefordampning.

Vi har brugt to uafhængige datasæt indsamlet af Miljøstyrelsen til at få overblik over eksisterende viden om søernes afløbs forhold. Hvad angår afløbene fra målsatte søer er der gode oplysninger om, hvilke og hvor mange af de målsatte søer der har et fysisk afløb (430 søer). Der findes ingen tilsvarende opgørelse af hvor mange af søerne der har tilløb.

Da grundvandsindsivningen til målsatte søer ikke kvantificeres i overvågningsprogrammet, er der foretaget en omskrivning af søens vandbalanceligning så grundvands residualet kan beregnes. Alle søer med positivt grundvands-residual modtager grundvand, hvor hovedparten af disse søer er kategoriseret som gennemstrømningssøer. Hvis grundvands residualet er nær 0 ( $\pm 100$  mm/år) kategoriseres søerne typisk enten med lav (eller potentiel ingen) kontakt til grundvandsforekomsterne, eller søer med en vis udveksling af grundvand/søvand via søbunden. Søer med negativt grundvands-residual, dvs. mere end -100 mm/år, er domineret af nedbør i ind budgettet af vandbalancen. Grundvandsbidraget er beskedent så disse søer kategoriseres konceptuelt i overgangen fra at være rent klimadominerede søer (sø-type A) til søer med et beskedent grundvandsbidrag (sø-type C).

Evalueringen af kontakten mellem grundvand og sø er foretaget ved at sammenligne grundvands residualet i vandbalancen for 32 testsøer med den konceptuelle sø-type og sandsynligheden for kontakt mellem grundvand og test sø. På baggrund af søernes vandbalance har det været muligt at beregne grundvands residualet for 29 af 32 test søer. Specielt for søer med høj sandsynlighed for grundvandsindsivning er der god overensstemmelse med det beregnede grundvandsresidual. For søer med moderat sandsynlighed for grundvandsindsivning bliver dette til dels bekræftet i grundvands residualet. Der mangler i al væsentlighed testsøer karakteriseret ved mindre sandsynlighed for tilstedeværelse af et permeabelt grundvandsmagasin med stor udbredelse nær søen (type K3), og lav-ingen sandsynlighed for potentiel kontakt mellem grundvand og målsat sø (type M3). Kun få testsøer har en lav til ingen sandsynlighed for kontakt, så det ikke muligt at lave en generel sikkerhedsvurdering af metodens egnethed for denne gruppe. Generelt kan det opsummeres, at der er rimelig god overensstemmelse mellem de fleste af testsøernes inddeling i sø-typerne A-E, grundvands-residual og resultatet af sandsynlighedsanalysen for søernes grundvandskontakt.



# 1. Baggrund og formål

Gennem vandrammedirektivet er medlemsstaterne forpligtigede til, at vurderer om menneskelig påvirkning af grundvandsforekomsterne, hindrer opnåelse af miljømålet, eller væsentligt forringer tilstanden i tilknyttede overfladevandsområder. For at kunne vurdere grundvandets påvirkning på de søer, som er målsatte i vandområdeplanerne (i daglig tale 'VP3 søer'), skal grundvandsbidraget til søernes vandbalance bestemmes bedre. Der indgår ca. 990 søer i udkast til vandområdeplanerne 2021-2027 heraf opfylder ca. 20% af søerne deres målsætning mht. økologisk tilstand. Første skridt i at kunne estimere vandbalancen for søerne er at kategorisere dem i forhold til deres kontakt med grundvandet. I rapporten 'Vurdering af grundvandets kemiske og kvantitative påvirkning af søer' (Nilsson med flere 2019) beskrives det hvordan søer kan inddeles i fem forskellige konceptuelle sø-typer baseret på hydrogeologiske kriterier, hvor kun to af typerne er i kontakt med grundvandet, og hermed relevante for denne udredning. Rapporten indeholder en vurdering af direkte målinger af vandbalancen sammenholdt med geologiske, hydrologiske og klimatiske data (her benævnt proxyer), som potentielt kan anvendes ved kategoriseringen af søerne, samt en test af proxyerne på en række velkendte søer.

Nilsson med flere (2019) kommer ikke frem til en entydig metode, som kan anvendes til kategoriseringen. Nærværende projekt tager dog udgangspunkt i ideer fra Nilsson med flere (2019) til den nærværende metodeudvikling.

Formålet med nærværende kategorisering af søerne er at udvikle en metode, som danner grundlag for, at vurdere kontakt mellem grundvandsforekomster og målsatte søer, samt at kvantificere gradientforhold, og vand- og stofflux fra grundvandet til målsatte søer. Nærværende projekt støtter op om flere forskning-udviklingsprojekter om målsatte overfladevande og GATØ som GEUS udfører for Miljøstyrelsen i perioden 2022-2023, hvor kontakt og gradient forhold bestemmes for vandløb, søer og kystvande mens fluxberegninger kun laves for vandløb.

Det omfatter projekterne der afrapporteres af GEUS senest udgangen af 2023:

- Tilpasning af DK-modellen
- Kemisk påvirkning af målsatte overfladevandsområder - metodeudvikling - N-P-sporstoffer
- Identifikation af målsatte overfladevande og GATØ
- Kemisk påvirkning af GATØ – metodeudvikling
- Kvantitativ påvirkning af målsatte søer og GATØ

## 2. Opgavebeskrivelse og datagrundlag

Med udgangspunkt i erfaringer fra det indledende arbejde med at udvikle en metode til vurdering af kontakten mellem grundvand og målsatte søer (Nilsson med flere 2019), skal metoden videreudvikles så den kommer til at omfatte alle målsatte søer større end 1 ha i vandområdeplan 2021-2027. Datagrundlaget baseres primært på eksisterende data i nationale databaser og konkret viden fra Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE) ved Aarhus Universitet og Miljøstyrelsen (MST) fra målsatte søer i vandområdeplanerne 2021-2027. Dertil kommer det geologiske/hydrologiske kendskab GEUS har til hydrogeologisk konceptualisering af grundvandets strømningsforhold omkring de målsatte søer og udtræk af geologiske og hydrologiske fra den nationale vandresourcemodel (DK-modellen).

Miljøstyrelsen har bidraget med følgende data der danner grundlag for metodeudviklingen i nærværende projekt:

- Høringsversionen af 'VP3 søtemaet' for målsatte søer i vandområdeplanerne 2021-2027
- Søernes areal, middeldybde og maksimumdybde i de målsatte søer.
- Liste over målsatte søer inddelt i fire klasser af MST med oplysning om afløbsforholdene.
- Belastningsopgørelser for udvalgte målsatte søer der viser overskud af fosfor i søernes udløb (Bilag 1, Miljøministeriet 2022).

DCE / Aarhus Universitet har bidraget med følgende data:

- Årlige vandstandsvariationer, elektrisk konduktivitet (EC) og temperatur målinger i søvandet i målsatte søer for perioden 1989-2021
- Tidsserier for målte vandføringer udtrukket fra <https://odafordalle.au.dk> for perioden 1989-2020.

Den hydrogeologiske kategorisering skal ske med henblik på vurdering af kontakt forholdene mellem grundvandet og de målsatte søer. I forsknings- og udviklingsprojektet 'Tilpasning af DK-modellen' bliver der lavet en vurdering af kontaktforholdene ved et simpelt vertikalt afstandskriterium på 3m og kvantificering af gradientforholdene (opadrettet/nedadrettet) fra grundvandsforekomst til de målsatte søer med den tilpassede DK-model i 100m opløsning. Dokumentation og usikkerhedsvurdering med vurdering af kontakt og gradient forholdene afreporteres i projekterne 'Tilpasning af DK-modellen' og i 'Identifikation af målsatte overfladevande og GATØ'.

I Nilsson med flere (2019) blev der påpeget et særlig behov for en videreudvikling af metoder til at bestemme kontakten mellem grundvand og søer med arealer mindre end 10ha. Der er flere grunde til 10 ha er en kritisk størrelse. For det første er DK-modellen for 'grov' til søer med et areal mindre end 10 ha (også i den nye 100m opløsning). For det andet er ca. halvdelen af de målsatte søer i vandområdeplanerne 2021-2027 mindre end 10 ha, hvorfor det taler for udvikling af andre metoder til at vurdere kontaktforhold og vurdering af søernes vandbalance. Det skal nævnes at der allerede findes en samling af metoder der er indgående

beskrevet i Nilsson med flere (2019). Nogen af 2019-metoderne er udviklet som direkte felt-metoder til bestemmelse af grundvandsindsivning til søer og andre metoder til at vurdere grundvandsbidraget med baseret på eksisterende nationale sø- og grundvandsdata fra databaser. Flere af disse metoder anses dog for ret tidskrævende og omkostningstunge at anvende.

Nærværende projekt fokuserer på:

- at udvikle en national kvalitativ analyse der kan vurdere sandsynligheden for grundvandsindsivning til målsatte søer større end 1 ha. Analysen forventes at være særlig anvendelig i forbindelse med risikovurdering af kontakt forholdene for alle de målsatte søer.
- at etablere et nationalt datasæt baseret på eksisterende klima og vandføringsdata, som kan estimere vandbalancens nedbør/fordampning og overfladiske indløb/afløb til alle de søerne. Udvalgte målsatte søer inddeles i en kendt konceptuel sø typologi således at de af søerne der vurderes at have et grundvandsbidrag kan evalueres for kontakten til grundvandet og bestemmelse af vandbalancen.
- at verificere den udviklede metode med kendte søers hydrologi og vandbalancer. Der skal ud fra proxyer og den valgte metode udføres en dataanalyse af, hvor egnet data og metode, er til at opdele udvalgte målsatte søer i de foreslåede konceptuelle sø-typer (repræsentativitet og usikkerhed).

## 2.1 Leverancer

Rapporten indeholder følgende leverancer:

1. En kort beskrivelse af de kategorier af søer, som forventes anvendt, til at beskrive transporten af vand, sporstof og næringssalte fra grundvandet til søerne.
2. En gennemgang af relevante proxyer, som kan anvendes ved kategoriseringen af søerne, samt en vurdering af hvilke proxyer, som for de forskellige sø-typer er bedst egnede til at beskrive kontakten til grundvandet. Der skal tages udgangspunkt i proxyer, som i forvejen bliver målt i søerne, således at kategoriseringen i videst muligt omfang kan foretages i 2023.
3. En test af proxyernes egnethed i forhold til at beskrive vandbalancen for en række udvalgte søer, som dækker de kategorier, som er beskrevet under punkt 1.
4. En beskrivelse af præcision og usikkerhed på de udviklede metoder til bestemmelse af søens vandbalance og på anvendte proxyer. I beskrivelsen indgår en beskrivelse af særlige udfordringer i bestemte sø-typer, landsdele eller tilsvarende, hvis sådanne skulle forekomme.
5. Beskrivelse af en trinvis metode, som kan anvendes til helt, eller delvist maskinelt, at kategorisere søernes grundvandskontakt, på baggrund af de i pkt. 2 og 3 udvalgte proxyer.

## 2.2 Datagrundlag

Datagrundlaget for hver enkelt målsat sø kan variere fra sø til sø. Antallet af målsatte søer der har oplysninger om data fra de forskellige datakilder modtaget fra MST og DCE er listet nedenfor:

- Vandføringsdata modtaget fra DCE (udtræk fra ODA databasen): ukendt hvor mange søer der er data fra.
- Søarealer og sødybder (middel og maksimum) modtaget fra MST for 987 søer. Alle tre oplysninger er tilgængelig for 873 søer
- Søers afløbsklasser modtaget fra MST for 986 søer
- Søgeologi udtrukket fra DK modellen (ex. Bornholm) i 974 søer
- Afstand til GVF er beregnet af GEUS med DK modellen (ex. Bornholm) for 925 søer
- Afstand til GVF er beregnet af GEUS med DK modellen (ex. Bornholm) for søer der samtidig har oplysninger om sødybder og søgeologi for 833 søer
- Overfladevandstemperatur er modtaget fra DCE for 986 søer

### 3. Trinvis metode til kategorisering og bestemmelse af kontakten mellem grundvand og VP3 søer

#### 3.1 Den trinvis metode

I dette afsnit beskrives en trinvis metode til kategorisering af kontakt mellem grundvand og målsatte søer. Metoden for bestemmelse grundvandsindstrømning til danske søer består af en række metodiske trin og arbejdsprocesser og afhængigheder imellem processerne (Figur 3.1). Afhængighederne beskriver således en rækkefølge for, hvordan processerne slutteligt kan bestemme grundvandsindstrømningen til en målsat sø. De forskellige arbejdsprocesser der indgår i metoden er beskrevet nærmere i rapportens efterfølgende kapitler og udgør tilsammen en trinvis metode, som skitseret i Figur 3.1.

##### **Arbejdsproces 1. Bestemmelse af kontakt og gradientforhold med DK-modellen for målsatte søer >10ha.**

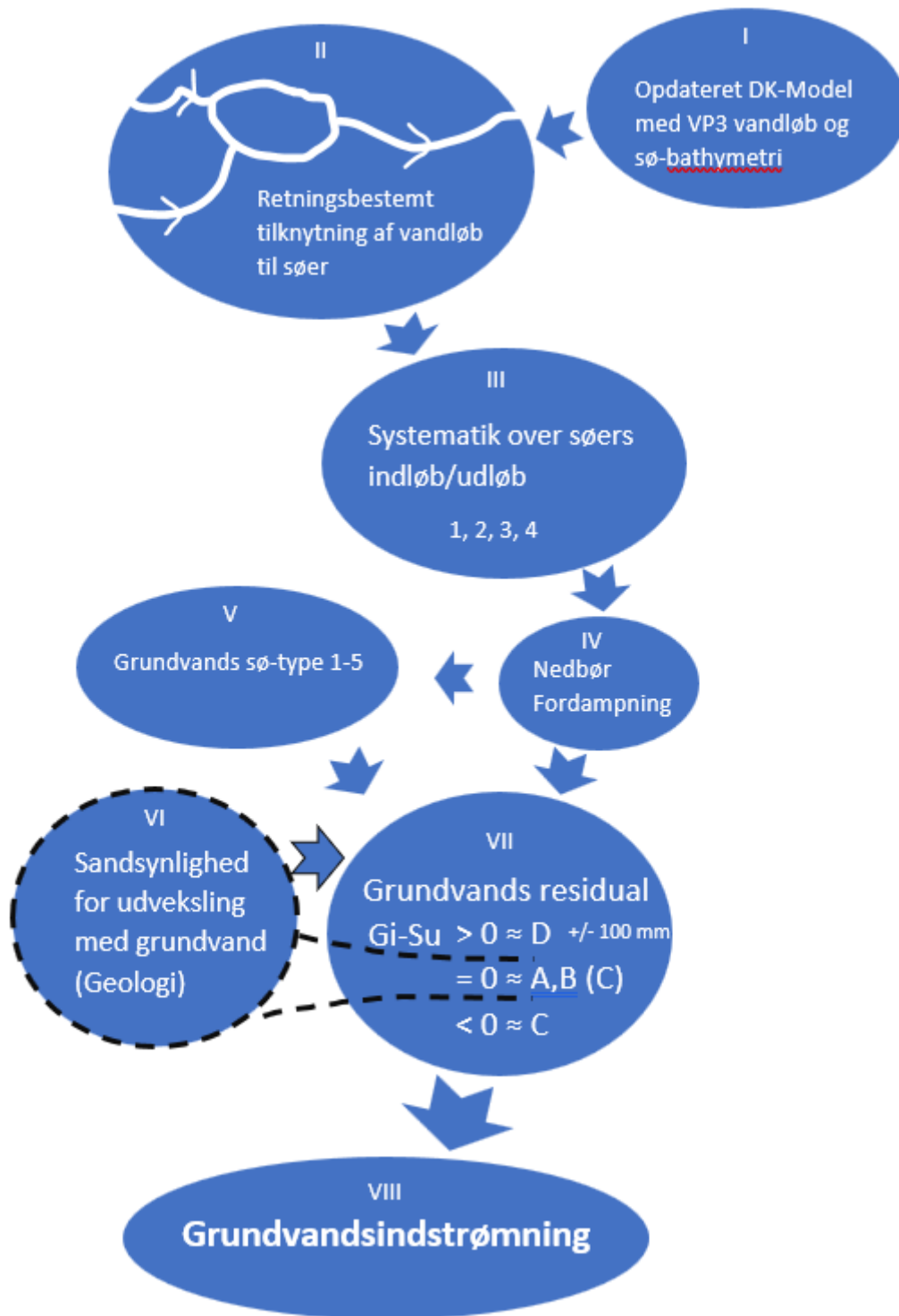
Trin I: Opdatering af DK-modellen til beregning af grundvandsbidraget til målsatte søer. *Arbejdet der ligger til grund for trin I udføres i projektet 'Tilpasning af DK-modellen', hvor der sker flere opdateringer af DK-modellen der bruges i nærværende projekt. Det omfatter en nedskalering af beregningsceller i 500m til 100m skala. Dertil kommer at alle målsatte vandløb samt de af de målsatte søer der har bathymetri-data lægges ind i modellen. Med denne opdatering af DK-modellen kan kontakten mellem grundvandforekomst og målsat sø estimeres for søer større end 10ha. Det er pt. uafklaret, hvorvidt modelberegningerne også kan estimere gradienter til de målsatte søer > 10 ha uden en re-kalibrering af det udvidede VP3 setup i DK modellen, dvs. vi kender ikke modellens kalibrerings og valideringsniveau (maj 2023). I praksis kan det betyde at DK modellen skal recalibreres før den anvendes til gradient og grundvandsflux beregninger til søerne.*

##### **Arbejdsproces 2. Bestemmelse af den overfladiske vandføring ind og ud af målsatte søer.**

Trin II og III: Bestemmelse af vandføring i målsatte vandløb (VP3 vandløb) via overfladiske indløb og afløb til/fra målsatte søer. I trin II etableres en retningsbestemt tilknytning af målsatte vandløb til alle målsatte søer (ikke kun målsatte søer med detaljeret/forsimplet bathymetri). Derved fastlægges hvilke målsatte vandløb der er henholdsvis indløb og afløb til de målsatte søer. *Arbejdet i trin II er ikke omfattet af nærværende projekt eller projektet 'Tilpasning af DK-modellen'. I trin III sammenkobles en ny systematik for de målsatte søers overfladiske indløb/afløb med målte og modellerede vandføringer (udtræk fra odafor-dalle.au.dk) og Miljøstyrelsens fire afløbsklasser (afsnit 5.5 og 5.6).*

##### **Arbejdsproces 3. Identifikation af målsatte søer uden grundvandskontakt**

Trin IV og VI: I trin IV beregnes nedbør/fordampning for alle målsatte søer (afsnit 5.3 og 5.4). I trin V klassificeres de målsatte søer i forhold til de konceptuelle hydrogeologiske sø-typer (afsnit 5.2) så kun målsatte søer med grundvandskontakt kan identificeres.



Figur 3.1: Trinvis metode for bestemmelse af grundvandsindstrømning til danske søer. Trin I – VIII som en del af den samlede metode er angivet med blå bobler. Afhængigheder, eller flowretning i metoden er angivet med pile.

#### **Arbejdsproces 4. Bestemmelse af grundvandsindstrømning til alle målsatte søer større end 1 ha**

Trin VI - VIII. I trin VI laves en national ikke-kvantitativ analyse af sandsynligheden for grundvandsindsivning til de målsatte søer. Analysen er baseret på oplysninger om de målsatte søers geologiske forhold, dybdemæssige forhold og afstand til tilknyttet grundvandsforekomst. Analysen udpeger både målsatte søer med moderat til høj sandsynlighed for grundvands kontakt og søer med lav til potentielt ingen kontakt med grundvandforekomster (jf. kapitel 4). I trin VII kan sandsynligheden for udveksling med grundvand i trin VI benyttes til vurdering og verificering af grundvands residualt. Ved et residual tæt på  $\pm 75\text{ mm}$  årligt skal sandsynligheden for udveksling med grundvand i trin VI benyttes til afklaring om søen er en gennemstrømnings-sø med høj sandsynlighed for udveksling. Generelt kan trin VI benyttes til at verificere konklusionerne omkring grundvands residualt i trin VII. Ud fra de ovennævnte trin og arbejdsprocesser kan det i den trinvis metode sidste trin VIII vurderes om målsatte søer har et væsentligt grundvandsbidrag i form af en grundvandsindstrømning (eller ikke) og i givet fald kvantificere denne med udgangspunkt i grundvands residualt.

Den trinvis metode tjener til formål at strukturere arbejdsflowet til at bestemme hvorvidt en given målsat sø er i kontakt med en grundvandsforekomst, og hvis tilgængeligt data tillader det, at bestemme størrelsen af den samlede grundvandsindsivning. Den primære udfordring til bestemmelsen er, at mange søer mangler essentielle datatyper, eksempelvis oplysninger om målte og/eller valide modelberegnedes overfladiske indløb og/eller afløb fra søerne. Derfor er der i første omgang lavet en kvalitativ analyse, der sorterer søer efter deres sandsynlige kontakt med grundvandet (høj, moderat, lav og ingen sandsynlighed). Det kan overvejes om søer med lav til ingen sandsynlighed for kontakt kan frasorteres umiddelbart ved denne analyse hvis andre og direkte data ikke peger imod grundvandsudveksling. Figur 3.1 angiver et arbejdsflow, men ikke nødvendigvis den rækkefølge som delkomponenter vil blive gennemført i. Dele af arbejdsflowet skal anses som processer, der kan håndteres samlet for alle målsatte søer, herunder f.eks. den kvalitative analyse af søers sandsynlige kontakt til grundvandet (trin VI, Figur 3.1). Andre dele vil bero på indsamling af data individuelt for hver enkelt sø, f.eks. indsamling af data for beregning af grundvands-residual (trin VII, Figur 3.1). På samme måde er flere processer (illustreret som blå bobler) i metoden allerede gennemført for alle målsatte søer i nærværende projekt, f.eks. trin IV (landsdækkende beregning af korrigeret nedbør og søfordampning) og trin V (søers sandsynlige kontakt til grundvandet).

## 3.2 Læsevejledning

Vær opmærksom på at beskrivelserne af de enkelte trin ikke følger hinanden i kronologisk rækkefølge i rapporten. Beskrivelserne af de enkelte trin fremgår af Tabel 3.1.

*Tabel 3.1: Læsevejledning til steder i rapporten hvor de enkelte trin uddybes*

| Metodens trin | Beskrives i:                                     |
|---------------|--------------------------------------------------|
| I og II       | GEUS rapport (2023): 'Tilpasning af DK-modellen' |
| III           | afsnit 5.5 og afsnit 5.6                         |
| IV            | afsnit 5.3 og afsnit 5.4                         |
| V             | afsnit 5.2                                       |
| VI            | kapitel 4                                        |
| VII           | afsnit 5.4.1 og afsnit 6.2                       |
| VIII          | afsnit 6.4                                       |



## 4. Analyse af sandsynligheden for udveksling af grundvand med målsatte søer (Trin VI)

Nærværende nationale kvalitative analyse af sandsynligheden for grundvandsindsivning fra grundvandsforekomster til målsatte søer i Danmark er inspireret af en irsk undersøgelse fra 2016 (Wilson med flere 2016), hvor en metode til at kategorisere irske søer i forhold til grundvandsindsivning blev præsenteret. Arbejdet skulle støttet op om den irske vurdering af grundvand-sø kontakten for ca. 850 målsatte irske søer (EU's anden vandområdeplanperiode).

Den foreslåede analyse af sandsynlighed for grundvandskontakt er gældende af alle målsatte søer større end 1 ha og vil være et supplement til DK-modellens vurdering af kontakt forholdene for søer > 10 ha. Da næsten halvdelen af de målsatte søer i vandområdeplanerne 2021-2027 har en størrelse mindre end 10 ha (ca. 500 søer) anviser denne metode således en måde at vurdere kontakt forholdene for disse. Den foreslåede analyse forventes at være et vigtigt element i risikovurderingen for de målsatte søer, da den kan anvendes for alle de målsatte søer uanset søens arealstørrelse. Det vil være for ressourcekrævende at bestemme grundvandsindstrømning til søer som beskrevet i Nilsson med flere (2019) for disse søer fra 1-10 ha, så der er behov for en automatiseret (maskinel) metode, så opgaven med vurdering af kontakt forholdene bliver mere overkommelig.

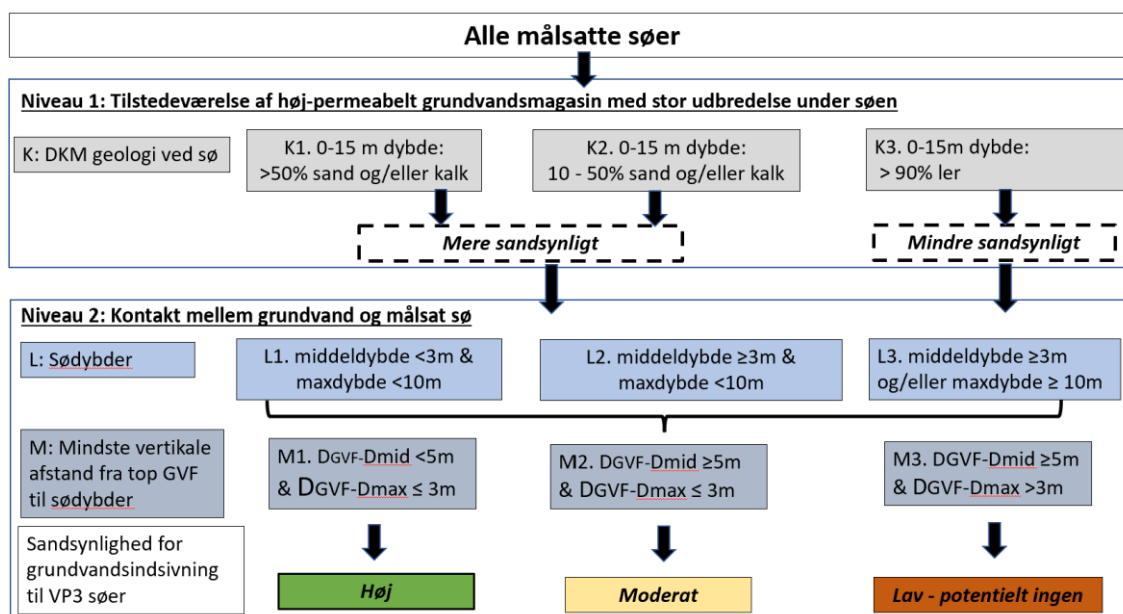
### 4.1 Inddeling af søerne efter sandsynlighed for grundvandskontakt

Sandsynligheden for om en målsat sø er i kontakt med en grundvandsforekomst (GVF) er vurderet med simple parametre der skitseres som vist i Figur 4.1. Sandsynligheden er defineret på baggrund af enkle kriterier der bruges til at vurdere grundvandets tilstrømning til søen på baggrund af oplysninger om bjergartstype og permeabilitet af grundvandsmagasinerne, dybdeforhold i søen og afstanden til den tilknyttede grundvandsforekomst. Sandsynligheden for grundvandsindsivning vurderes at være moderat til høj de steder hvor undergrunden består af over 50% sand og/eller (sprækket) kalk, der er identificeret som grundvandsmagasin. Omvendt vil forekomsten af lavpermeable ler aflejringer (her defineret som >90% ler) fungere som en barriere eller en aflejring med meget langsomt strømmende grundvand så grundvandsindstrømning til søen vil være kategoriseret med lav eller potentielt ingen sandsynlighed. Yderligere udbygges med viden om dybden til søens bund (middel og maksimum dybde) og vertikal afstand til nærmeste grundvandsforekomst.

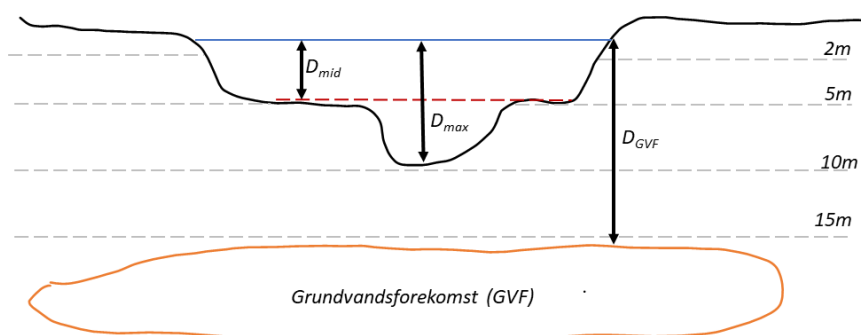
Der foretages en automatisk sortering af søerne i forhold til: (a) geologiske enheder af sand, ler og kalk i nærområdet til søen. Sorteringen baseres på den geologiske model (FOHM) i DK-modellen; (b) dybdemæssige forhold (middel og maksimumdybde) stammer fra Miljøstyrelsens kortlægning og opmåling af søernes bundvegetation, samt (c) den vertikale middel afstand udtrykket fra DK modellen mellem terrænet ved søbredden og overkanten af den tilknyttede grundvandsforekomst (GVF).

Søerne opdeles i tre grupper af sandsynlighed for kontakt: høj, moderat og lav til potentielt ingen kontakt. Søerne inddeles indledningsvist efter DK-modellens geologi i de øverste 15 meter fra terrænoverfladen med opdeling i tre geologiske undergrupper: > 50% sand og/eller kalk (K1 undergruppe); 10-50% sand og/eller kalk (K2 undergruppe), og i søer med > 90% ler (K3 undergruppe). Herefter videreinddeles søerne i tre dybdemæssige undergrupper (Figur 4.2): Søer med middeldybde  $D_{mid} < 3\text{m}$  og maksimumdybde  $D_{max} < 10\text{m}$  (L1 undergruppe);  $D_{mid} \geq 3\text{m}$  og  $D_{max} < 10\text{m}$  (L2 undergruppe); samt  $D_{mid} \geq 3\text{m}$  og/eller  $D_{max} > 10\text{m}$  (L3 undergruppe). Afslutningsvist sorteres søerne efter den mindste afstand, der kan bestemmes med DK modellen fra overkanten af grundvandsforekomsten (middelafstand) til søbredden, så afstanden mellem GVF og middeldybden og maksimumdybden kan beregnes: GVF afstand  $< 5\text{m}$  til  $D_{mid}$  og  $< 3\text{m}$  til  $D_{max}$  (M1 undergruppe); samt GVF afstand  $\geq 5\text{m}$  til  $D_{mid}$  og  $\leq 3\text{m}$  til  $D_{max}$  (M2 undergruppe); samt GVF afstand  $\geq 5\text{m}$  til  $D_{mid}$  og  $> 3\text{m}$  til  $D_{max}$  (M3 undergruppe). Søer i undergruppe M1 og M2 vurderes generelt at have henholdsvis høj og moderat sandsynlighed for kontakt mellem GVF og målsat sø; Søer i undergruppe M3 har oftest lav til potentielt ingen sandsynlighed for kontakt mellem GVF og målsat sø. De geologiske forhold omkring søerne (K-gruppen) er af afgørende betydning for i hvilken underklasse de enkelte søer indplaceres i på M-gruppen. Søer næsten totalt omgivet af ler i en horisontal buffer på 100m fra søens midte til 15 meters dybde (K3 undergruppen) har typisk stor afstand til den underliggende grundvandsforekomst, så søen har lav eller potentielt ingen sandsynlig for kontakt med grundvandsforekomsten. Omvendt vil søer der er i direkte kontakt med grundvandsforekomsten typisk være søer i undergruppe K1 (> 50% sand og kalk). Usikkerheden ved metoden diskuteres i kapitel 7.

Det skal bemærkes at dele af det terrænnære grundvand der sandsynligvis er i kontakt med søerne, men ikke er defineret som del af en grundvandsforekomst, da en grundvandsforekomst pr. definition skal have en vis udbredelse med en indvindingskapacitet der i gennemsnit kan frembringe  $10\text{ m}^3$  drikkevand pr. dag, eller som forsyner 50 personer (EU, 2000). *Det antages her at terrænnære grundvandsforekomster er den primære kontakt med målsatte søer og vil være hovedkilde til det indstrømmende grundvand til søerne. Det er ikke muligt med den her foreslåede metode at skelne mellem grundvand der kommer fra nærmeste grundvandsforekomst eller terrænnært grundvand uden for grundvandsforekomsten.*



Figur 4.1: Skematisk figur der opsummerer sandsynligheden for om målsatte søer har kontakt med grundvand. I niveau 1 er tilstedeværelsen af høj-permeabelt grundvandsmagasin af en vis udbredelse eneste kriterium. I niveau 2 er søens dybdeforhold og afstanden til den nærmeste grundvandsforekomst de to kriterier der bruges til at vurdere sandsynligheden for kontakt mellem grundvand og sø er høj, moderat eller lav-ingen sandsynlighed. Figur 4.6 viser resultatet af den kvalitative analyse for 833 målsatte søer.



Figur 4.2: Relationen mellem DK modellens geologi i 0-15m dybde ved søerne og de dybde-mæssige forhold i søerne. Middeldybde ( $D_{mid}$ ), maximumdybde ( $D_{max}$ ) og middelfrafstanden fra toppen af nærmeste grundvandsforekomst og terrænet ved søkanten ( $D_{GVF}$ ) er angivet.

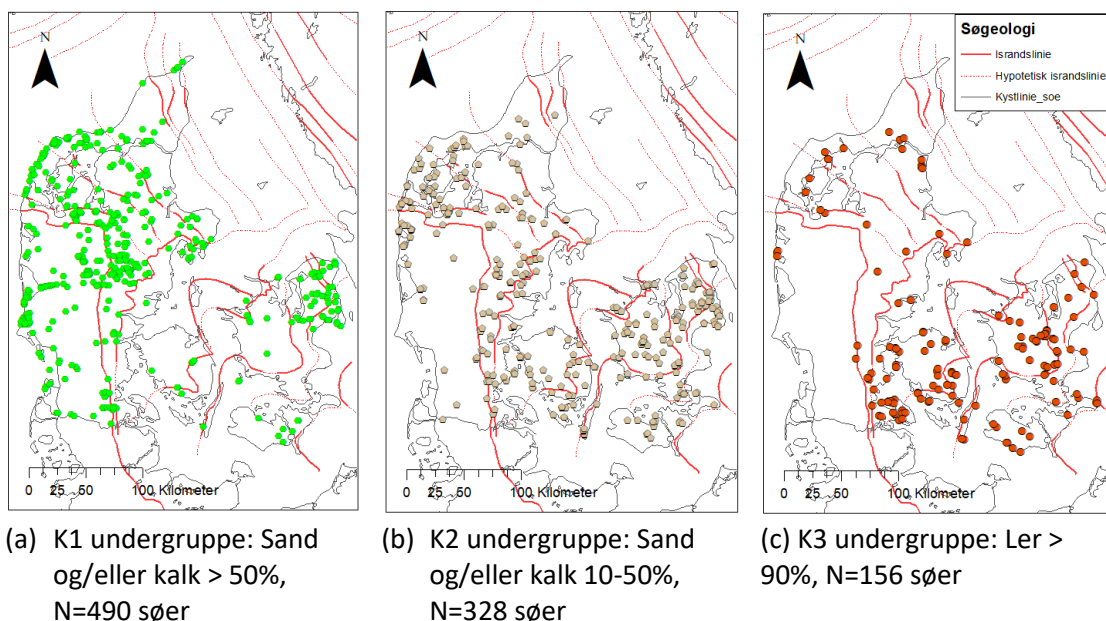
## 4.2 Data til rådighed

Til den kvalitative analyse indgår datasammenstillinger fra flere datakilder: (1) Søens geologi er udtrukket fra DK modellen i en procentvis fordeling mellem sand, kalk og ler (afsnit 4.2.1). (2) Søens dybdemæssige forhold for målsatte søer er modtaget fra Miljøstyrelsen i forbindelse med NOVANA overvågning af vegetationen i søerne (afsnit 4.2.2). (3) Den vertikale middelf afstand fra toppen af den underliggende grundvandsforekomster er udtrukket fra DK modellen (afsnit 4.2.3).

### 4.2.1 DK model geologi omkring søen

Geologien under søerne er udtrukket fra den hydrostratigrafiske model (FOHM) i DK-modellen. Der er dannet en buffer på 100m rundt om alle målsatte søer og indenfor denne buffer er den volumenmæssige fordeling af bjergarterne sand, kalk og ler for de øverste 15 m af undergrunden udtrukket med fordelingen af sand, kalk og ler i %, opsummeret til 100%. I denne metodeudvikling arbejdes med de øverste 15m geologiske aflejringer, da langt hovedparten af de målsatte søer har en maksimal dybde der er mindre end 15 meter (kun 29 søer ud af 974 søer har en maksimumdybde > 15m). Det skal nævnes at der yderligere er udtrukket volumenmæssige fordelinger af de tre aflejrings typer for gennemsnitstykkelser af ler, sand og kalk 2, 5, meter 10 meters dybde. Disse data er dog ikke vist i rapporten men gør det muligt at undersøge mere detaljerede sammenhænge mellem de geologiske forhold og de målsatte søer i anden forbindelse end nærværende projekt.

Fordelingen af sand, kalk og ler i søernes geologi fra 0-15m dybde fremgår af Figur 4.3. I alt er geologi udtrukket for 974 søer (ex. Bornholm) til nærværende metodeudvikling. Det betyder at der mangler at blive udtrukket geologi for de bornholmske søer (ca. 20 søer), hvor grundfjeld også indgår som både højpermeabelt grundvandsmagasin og lav permeabel barriere. Figur 4.3 viser at hovedparten af søerne med >90% ler og søer med 10-50% sand og/eller kalk er geografisk fordelt øst for hovedopholdslinjen i Jylland. Søer med >50% sand og/eller kalk er beliggende over hele landet, dvs. også vest for hovedopholdslinjen.



Figur 4.3: Geologiske forhold under søerne til 15m dybde og israndslinjer (røde linjer) er vist i figuren. Seneste istids hovedopholdslinje er vist som den vestligste israndslinje i Jylland. Den geografisk fordeling af de målsatte søer er inddelt i de tre undergrupper: K1 (sand og/eller kalk > 50%, N = 490 søer); K2 (sand og / eller kalk 10-50%, N = 328 søer) og K3 (ler > 90%, N = 156 søer). I figuren er medtaget alle målsatte søer med søgeologi.

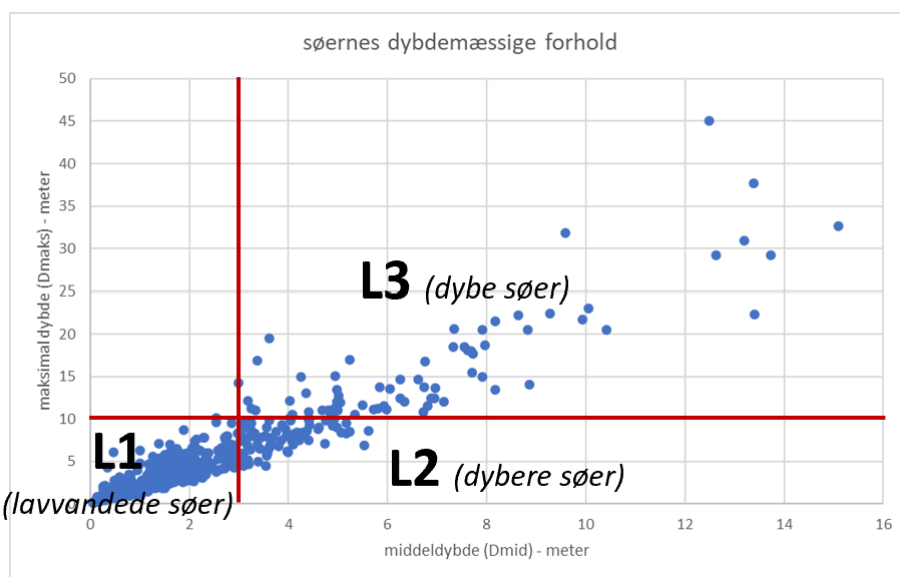
#### 4.2.2 Søens dybdeforhold

Søens dybdemæssige forhold er opmålt af Miljøstyrelsen – primært i forbindelse med kortlægning og opmåling af søernes bundvegetation.

Oplysninger om både middeldybden ( $D_{mid}$ ) og maximumdybden ( $D_{max}$ ) (Figur 4.2) er pt. kun kendt for 873 målsatte søer. Nogen af søerne har endnu ikke været omfattet af et overvågningsprogram, og derfor kender vi endnu ikke dybdeforholdene i disse søer. Maksimum og middeldybden mangler helt for 74 af de målsatte søer, samt middeldybden mangler fra yderligere 27 søer – i alt 101 søer.

Afstanden til GVF bestemmes med aktuelle maksimum og middel sødybder for hver enkelt sø og indpasses i den foreslåede inddeling i tre undergrupper i forhold til sødybderne (Figur 4.4). Den største middeldybde af søerne er ca. 15m og kun få af de målsatte søer (29 søer ud af 974 søer) har en maksimum-dybde større end 15 meter (Tabel 4.1).

Til denne metodeudvikling er taget udgangspunkt i målsatte søer med søareal ned til 1 ha, (i alt 833 søer). I disse søer kendes søernes geologi,  $D_{mid}$  og  $D_{max}$ , samt afstand til toppen af grundvandsforekomst for hver sø. Medianværdien for søernes areal er 9,7 ha, maksimumdybden er 2,1 m og middeldybden er 1,05 m.



Figur 4.4: Søernes dybdemæssige forhold opdelt på de tre undergrupper. L1 søer med  $D_{mid} < 3m$  og  $D_{maks} < 10m$ ; L2 søer med  $D_{mid} \geq 3m$  og  $D_{maks} < 10m$ ; og L3 søer med  $D_{mid} \geq 3m$  og  $D_{maks} \geq 10m$

Tabel 4.1: Antal målsatte søer med middel og maksimumdybder i forskellige søareal størrelser. I oversigten er kun medtaget de VP3 søer som indgår i den senere kvalitative analyse af sandsynlighed for grundvandsindsivning til søerne (i alt 833 søer). I disse søer kendes søernes geologi,  $D_{mid}$  og  $D_{maks}$ , samt afstand til toppen af grundvandsforekomst for hver sø.

| Antal søer    | $D_{mid}$ |           | $D_{maks}$ |            |
|---------------|-----------|-----------|------------|------------|
|               | <3m       | $\geq 3m$ | <10m       | $\geq 10m$ |
| ha            |           |           |            |            |
| $\geq 1000ha$ | 2         | 4         | 3          | 3          |
| 100-1000ha    | 56        | 27        | 60         | 23         |
| 10-100ha      | 267       | 53        | 294        | 26         |
| 5-10ha        | 187       | 50        | 218        | 19         |
| 1-5ha         | 177       | 10        | 186        | 1          |

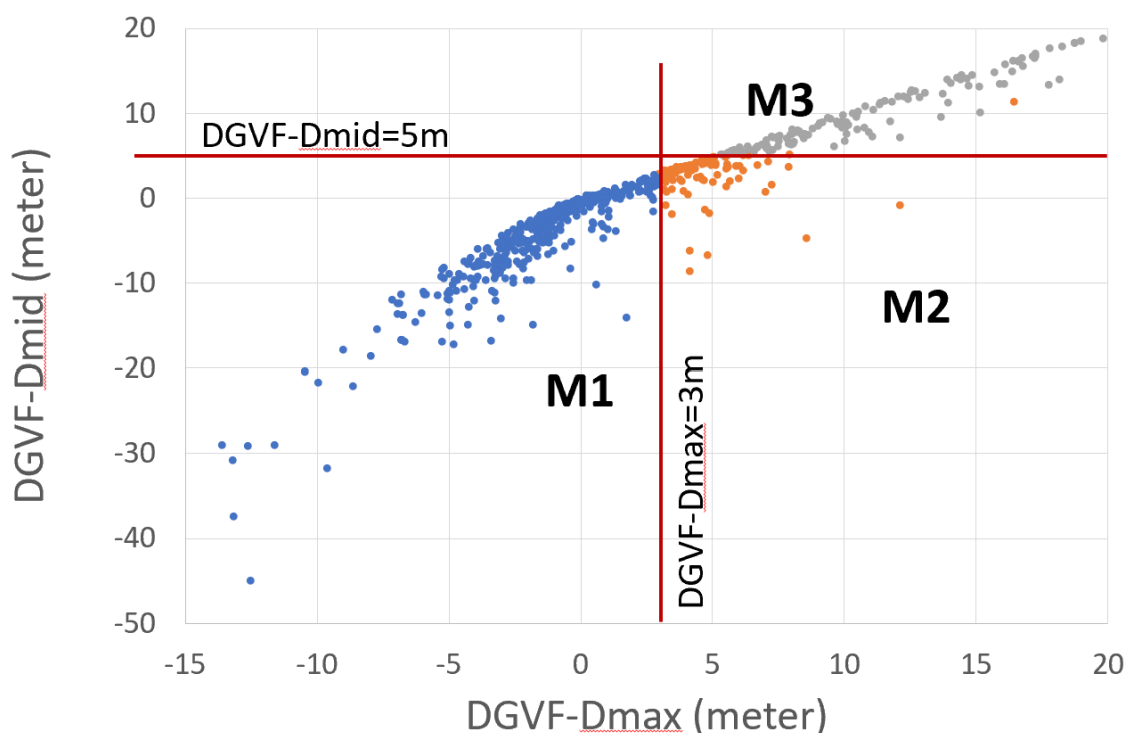
### 4.2.3 Afstand mellem toppen af grundvandsforekomst og bunden af søerne

Middelfstanden mellem overkanten af den underliggende grundvandsforekomst til terræn ( $D_{GVF}$ ) (se Figur 4.2) ved alle målsatte søer er udtrykt maskinelt i DK modellen for 925 søer. Kun 833 af disse søer har samtidig oplysninger om sødybder. Der er lavet en overlap-analyse af, hvilke grundvandsforekomster der ligger under søerne. Der kan være mere end 5 grundvandsforekomster under en sø og nogle gange mere end én forekomst i samme DK-model lag (fx Kvartært sand lag 'ks3'). I udtrækket er valgt for den forekomst som ligger øverst, og hvis der var flere der lå i samme lag, vælges den som havde det største fælles areal med søen (største overlap). Forekomster med mindre end 0,5ha overlap er fravalgt,

uanset om den lå øverst. Der er lavet dybde og tykkelses statistik for overlap arealet, dvs. dybden til toppen af forekomsten fra søkant (Geodanmark højdemodel) og tykkelsen af forekomsten. Dybden er beregnet for middel, minimum og maximum dybder for alle søerne. I det videre metodearbejde anvendes middeldybden til toppen af grundvandsforekomsten for søerne fra denne beregning.

I Figur 4.1 foreslås afstanden mellem toppen af grundvandsforekomst ( $D_{GVF}$ ) og bunden af søerne ( $D_{mid}$  og  $D_{maks}$ ) inddelt i tre undergrupper (Figur 4.5). Brugen af 5m afstanden mellem GVF og middeldybden samt afstanden mellem GVF og søens maximumdybde på 3m er i overensstemmelse med de afstandskriterier der blev anvendt Nilsson med flere (2019), hvor afstanden mellem GVF og søbunden blev sat til 3m, hvor  $\leq 3m$  blev brugt til at angive søer med 'potentiel kontakt' til GVF mens søer med  $>3m$  afstand angav 'ingen potentiel kontakt' til GVF. Den foreslåede afstandskrav mellem GVF og søbunden i dette projekt er således på linje med de afstandskriterier der har været brugt til vurdering af kontakten i 2019 mellem grundvand, vandløb og søer.

$D_{GVF}$  relateres til middeldybde og maksimumdybden af alle målsatte søer, der indgår i den kvalitative analyse i afsnit 4.3 (i alt 833 søer). Med andre ord kan sandsynligheden for kontakt mellem grundvand og sø vurderes for ca. 86% af de målsatte søer (833 søer ud af 974 søer), hvor geologi, afstand mellem søbund og GVF, samt sødybder er kendt (ex. Bornholm). I Figur 4.5 er vist en grafisk afbildning af relationen mellem afstand mellem GVF og middeldybde i søen (x-aksen) og afstanden mellem GVF og maksimumdybden i søen (y-aksen). Negative værdier på både x-aksen og y-aksen betyder at overkanten af GVF ligger højere end søbunden og har dermed høj sandsynlighed for kontakt mellem GVF og søen. Undergruppe M1 søer omfatter mest lavvandede søer; søer i undergruppe M2 er dybere søer, og søer i undergruppe M3 er en blanding af dybere og dybe søer. De her definerede inddelinger følger ingen anden kendt sødybde klassifikation og skal mest af alt bruges som deskriptive termer.



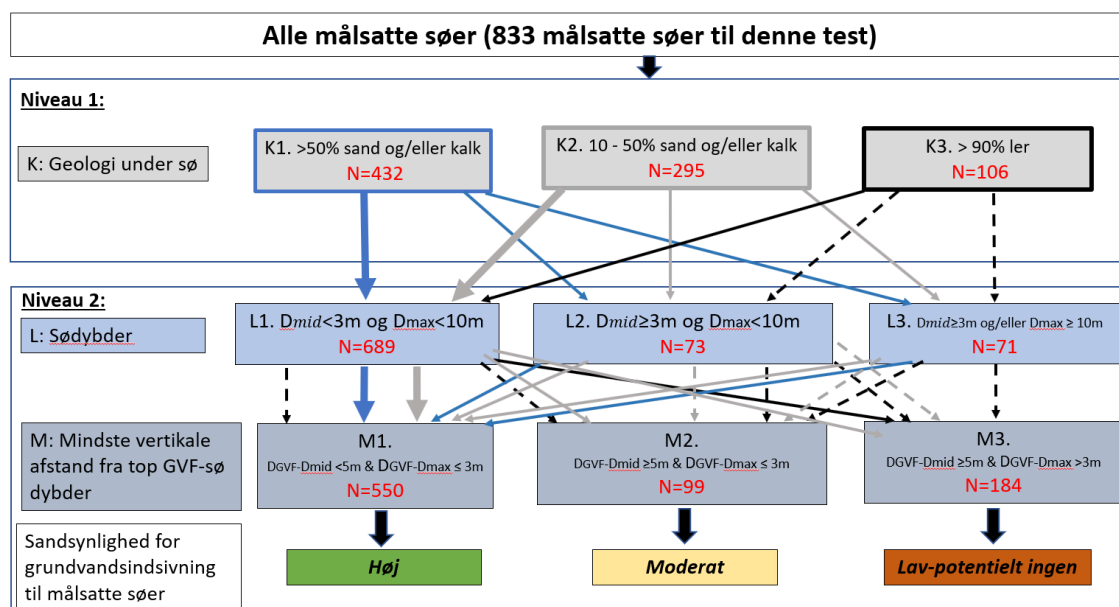
Figur 4.5: Afstand mellem toppen af nærmeste grundvandsforekomst ( $D_{GVF}$ ) og bunden af søerne ( $D_{mid}$  og  $D_{max}$ ). Søer med negative  $D_{GVF}-D_{mid}$  og  $D_{GVF}-D_{max}$  værdier (svarende til M1 undergruppen) vurderes at have høj sandsynlighed for kontakt mellem GVF og den målsatte sø. M1 søer med  $D_{GVF}-D_{mid} < 5\text{m}$  og  $D_{GVF}-D_{max} < 3\text{m}$ ; M2 søer med  $D_{GVF}-D_{mid} \geq 5\text{m}$  og  $D_{GVF}-D_{max} \leq 3\text{m}$ ; og M3 søer med  $D_{GVF}-D_{mid} \geq 5\text{m}$  og  $D_{GVF}-D_{max} > 3\text{m}$

### 4.3 Sandsynlighed for søers kontakt med grundvandsforekomster (kvalitativ analyse)

Dette afsnit beskriver metodens trin VI (afsnit 3.1), hvor sandsynligheden bestemmes for grundvandsudveksling med de målsatte søer. Den kvalitative analyse af sandsynligheden for kontakt mellem grundvandsforekomster og VP3 søer er baseret på 833 søer, der opfylder data kravene skitseret i den kvalitative analyse (Figur 4.1). Sorteringen af søerne i arbejdsflowet fra geologisk karakteristik (gruppe K), sødybde forhold (gruppe L), til afstandsforhold mellem GVF og søbunden (gruppe M) vist i Figur 4.6 og afbildet på kort (Figur 4.7). Undergruppe M1 omfatter 550 søer der vurderes at have en høj sandsynlighed for hydraulisk kontakt mellem grundvandsforekomst og sø. Søer med moderat sandsynlighed udgør 99 søer og der forekommer 184 søer med lav eller potentiel ingen sandsynlig for kontakt til GVF. Sandsynligheden for kontakt mellem søerne og grundvandsforekomsterne med de tre forskellige søgeologier (undergrupperne K1 til K3) er vist i Tabel 4.2 som den procentvise fordeling. Det fremgår af tabellen at 88% af søer med >50% sand og kalk (undergruppe K1) har høj sandsynlighed for kontakt mellem sø og grundvandsforekomst. Ingen søer, hvor over halvdelen af søgeologien udgør sand og/eller kalk har lav til ingen sandsynlig for kontakt mellem sø og grundvandsforekomst. 82% af søerne der ligger i mere end 90% ler aflejringer (undergruppe



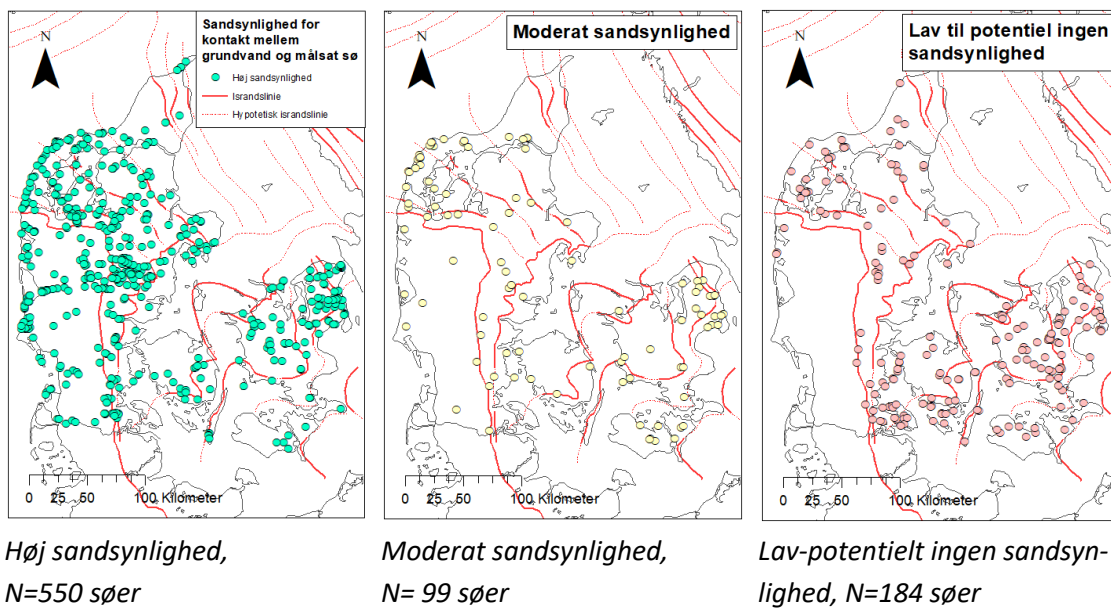
K3) har lav til ingen sandsynlighed for kontakt til grundvandsforekomsten. Til gengæld vil kun hver tiende sø med >90% ler aflejringer (undergruppe K3) have høj sandsynlighed for kontakt til grundvandsforekomsterne. Sandsynligheden for kontakt De målsatte søer fra de tre sandsynligheds kategorier sammenholdes i kapitel 6 med udvalgte testsøer.



Figur 4.6. Kvalitativ analyse af sandsynlighed for søers kontakt med grundvandsforekomst, hvor N er antal søer i hver af undergrupperne. De målsatte søer er opdelt i tre antalsinddelinger: antal søer <10 (stiplede pile); antal søer mellem 10-100 søer (tynde fuldt optrukne pile), og antal søer > 100 søer (brede blå og grå pile). I figuren er kun medtaget de målsatte søer der har oplysninger om geologi, sødybde og afstand til GVF.

Tabel 4.2: Den procentvise andel af alle de målsatte søer fra de tre søgeologiske undergrupper K1 til K3, der kan relateres til den endelige vurdering af sandsynligheden for kontakt mellem søerne og grundvandsforekomst.

| Sandsynlighed                    | K1. > 50% sand og/eller kalk (N=432 søer) | K2. 10-50% sand og/eller kalk (N=295 søer) | K3. > 90% ler (N=106 søer) |
|----------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------|
| Høj                              | 88%                                       | 53%                                        | 10%                        |
| Moderat                          | 12%                                       | 15%                                        | 8%                         |
| Lav til potentielt ingen kontakt | 0%                                        | 32%                                        | 82%                        |



Figur 4.7: Geografisk udbredelse af alle målsatte søer med høj sandsynlighed (venstre), moderat sandsynlighed (midt) og lav - potentielt ingen sandsynlighed (højre) for kontakt mellem grundvandsforekomst og målsat sø.

#### 4.4 Søer på 1-10 ha

For alle målsatte søer på 1-10ha skal kontakt-forhold mellem grundvandsforekomst og søerne og vandbalancen bestemmes på anden vis end ved anvendelse af DK modellens beregninger, da modellens opløsning er for grov til at opløse denne størrelse søer. Søer mellem 1 og 10ha udgør 54% af alle målsatte søer. Figur 4.8 viser fordelingen af VP2 og VP3 søer i søareal grupper, hvor den stiplede kasse indikerer de af søerne der er mindre end 10 ha og er vurderet med den kvalitativ sandsynligheds analyse beskrevet i afsnit 4.3. Resultatet af den kvalitative analyse for søer på 1-10 ha er vist i Figur 4.9, hvor det er klart at udbredelsen af de målsatte søer mindre end 10ha (i alt 424 søer) har nogenlunde den samme geografiske fordeling som når analysen laves på samtlige 833 målsatte søer (Figur 4.9).

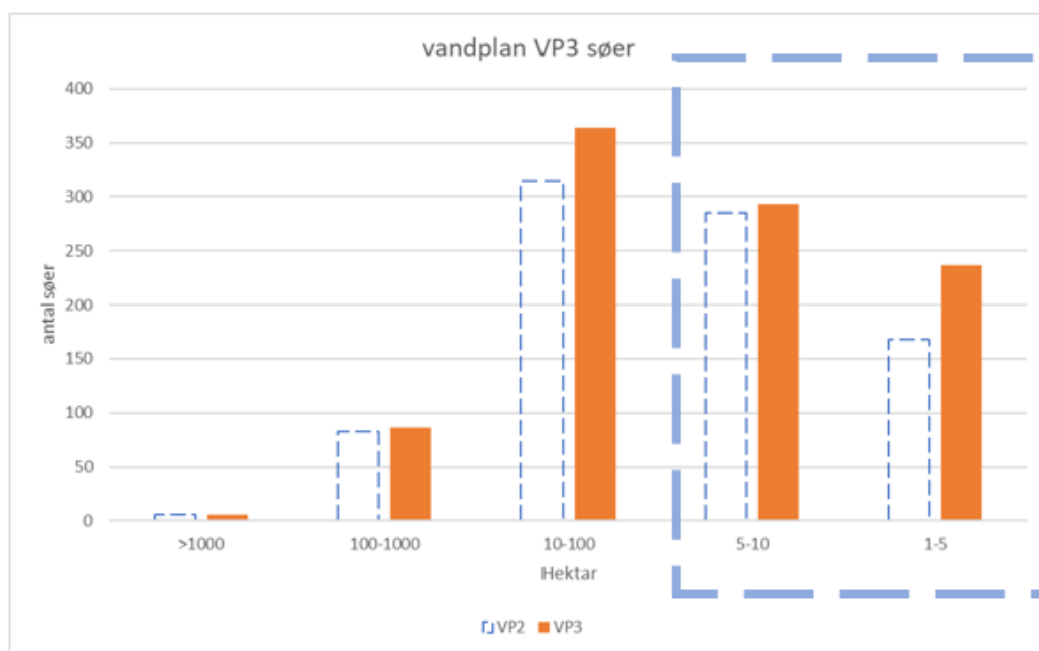


Fig 4.8: Antallet af målsatte søer relateret til søernes areal. Den stiplede kasse viser søerne der skal behandles med en kvalitativ analyse, da søer på 1-10ha er for små til at bestemme kontakten for mellem grundvand og sø med DK modellen. Medianværdien for alle målsatte søer er 9,1 ha.

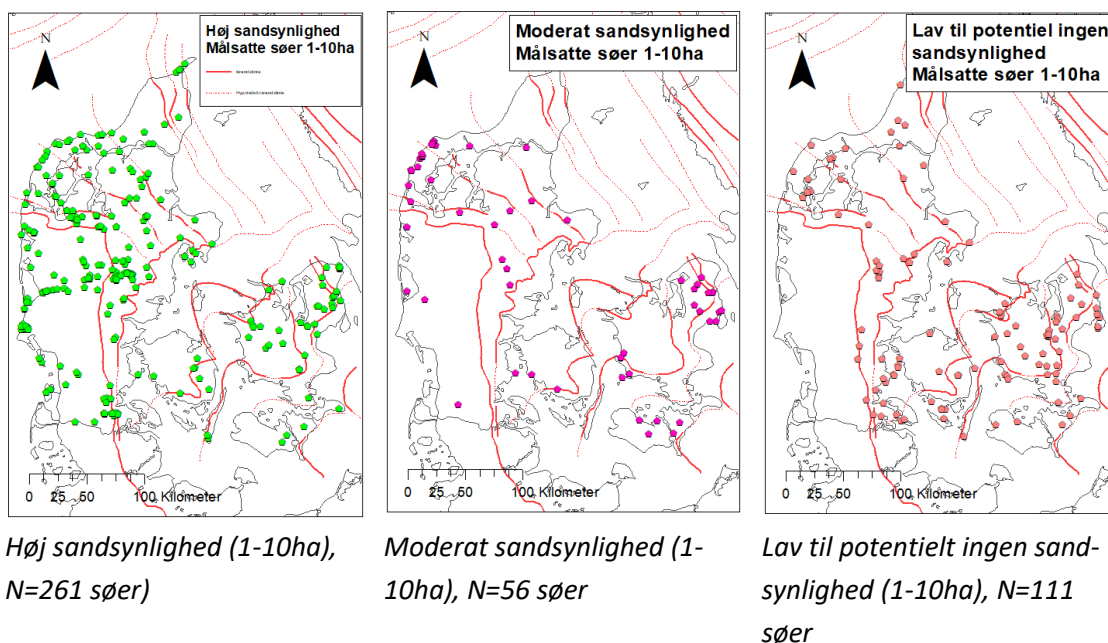


Fig 4.9: Udbredelse af målsatte søer (1-10ha) med høj sandsynlighed (venstre), moderat sandsynlighed (midt) og lav - potentielt ingen sandsynlighed (højre) for kontakt mellem grundvandsforekomst og målsat sø.

## 4.5 Remote sensing baseret screening værktøj (satellit baseret temperatur-måling)

I dette afsnit beskrives en indledende afprøvning af en semi-kvalitativ metode med landsdækkende satellit data (temperatur målinger), som et supplement til den kvalitative analyse af sandsynligheden for grundvandsindsivning fra grundvandsforekomsterne til målsatte søer. Remote sensing metoden må anses for komplementær til den kvalitative analyse med sandsynlighedsvurdering af kontakten mellem grundvand og sø (trin VI og VII i den trinvis metode). Hvis nærværende test vurderes at være nyttig i risiko- og/eller tilstandsvurdering af søerne kan det overvejes at afprøve metoden på flere søer i forskellige landsdele, søer med forskellige konceptuelle sø typer og søer < 10ha. Temperatur data indsamlet med satellit anses for at være en meget cost-effectiv metode og i en rumlig skala der vil kunne være meget attraktiv når målsatte søer og naturarealer med GATØ skal vurderes på landsplan.

Negative anomalier i søens overfaldtemperatur (lake surface temperatur: LST), kan anvendes til at identificere søer der er påvirket af grundvandsindstrømninger. Denne antagelse er gyldig om sommeren hvor grundvandet er køligere (~9 grader Celsius) end søvand (~15-20 grader Celsius). Inspireret af to irske studier (Wilson med flere 2016 og Wilson and Rocha (2016) har vi gennemført en indledende analyse af fire danske søer som er kendt for at være grundvandspåvirket: Arresø (3995 ha), Nors Sø (351 ha), Nørresø (68 ha), og Vængsø (16 ha).

Vi har processeret Landsat LST data fra Landsat Analysis Ready Data (ARD) repositoret (billedarkiv) udviklet af Global Land Analysis and Discovery (GLAD) ved University of Maryland (Potapov med flere 2020). I vores analyse har vi fokuseret på sommermåneder med LST billeder, hvor mindst 90% af søoverfladen havde data i høj kvalitet (ikke påvirket af skyer).

Landsat LST data er processeret i to skridt og følger metoden præsenteret i Wilson med flere (2016). I det første skridt beregnes en temperaturanomali ( $T_A$ ) for søens vandoverflade for en given dag (ligning (1)):

$$T_A = T - \bar{T} \quad (\text{Lign. (1)})$$

hvor  $T$  er temperaturen for en given sø pixel og  $\bar{T}$  er middelværdien af søens overladetemperatur for samme dag. Derudover beregnes en normaliseret anomali ( $NT_A$ ) (ligning (2)):

$$NT_A = T_A / \sigma_T \quad (\text{Lign. (2)})$$

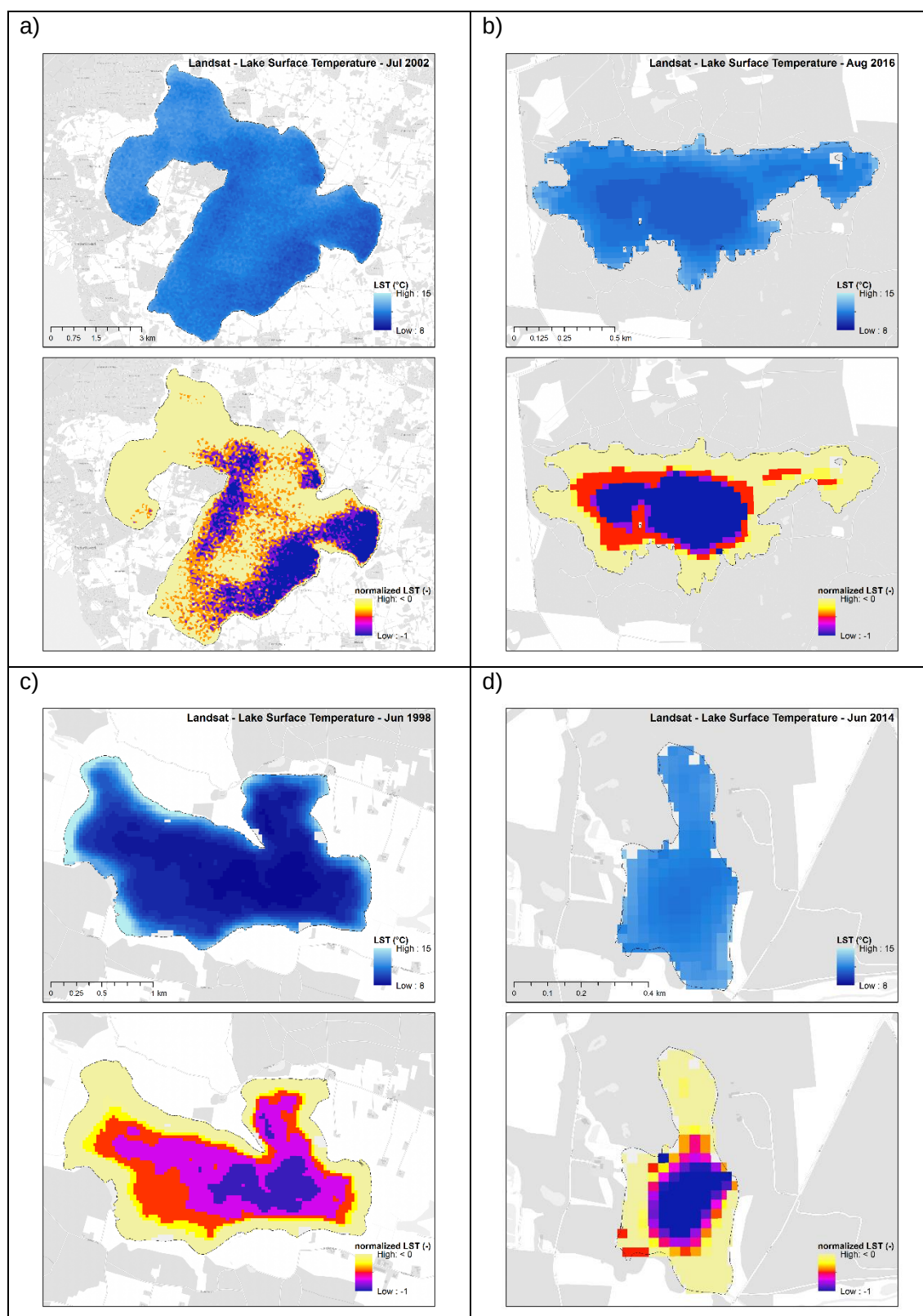
hvor temperaturanomalien  $T_A$  bliver divideret med standardafvigelsen af søens overladetemperatur ( $\sigma_T$ ) for en given dag.

Fordelen ved normaliseringen ( $NT_A$ ) er, at man således kan sammenligne  $NT_A$  mønstrene på tværs af en række dage og forskellige søer. Figur 4.10 viser resultater af vores indledende analyse, hvor alle fire søer viser et tydeligt mønster med arealmæssig variation i deres normaliseret temperaturanomali. Positive  $NT_A$  er ikke vist differenceret på kortene. De fire viste søer har minimum  $NT_A$  værdier af omkring -1.5 som indikerer at temperaturanomalien er 1.5

gange dens standardafvigelsen mindre end gennemsnitstemperaturen. Negative  $NT_A$  (vist i lilla farve på kortene) kan forstås som tegn på en øget sandsynlighed for grundvandsindsivning. De fire søer har varierende størrelse (Vængsø er mindst med 16 ha op til Arresø med 3955 ha eller Danmarks største sø), men den første analyse indikerer at metoden kan anvendes på søer uafhængigt af størrelsen på deres areal. Det mangler dog test på små søer i intervallet på 1-10ha.

#### ***Erfaringer fra vurdering af grundvandsindstrømning ved brug af satellitdata:***

- En negativ temperaturanomali skyldes ikke kun grundvandsindstrømninger. Vind og skyer påvirker også temperaturmønstret over søens overflade.
- I en mere detaljeret analyse skal LST data for mange dage analyseres systematisk og en middel  $NT_A$  skal beregnes. Dermed vil man udligne de andre faktorer der påvirker søens overfladetemperatur mere tilfældigt og det grundvandsstyrede LST-mønster forventes at blive mere dominerende.
- Landsat satellitters termiske kameraer optager overfladetemperatur billeder der har en varierende opløselighed afhængigt af generationen af Landsat satellitten. Grid størrelse varierer mellem 120 m i Landsat 5, 100 m i Landsat 8 og 60 m i Landsat 7. Det skal der tages hensyn til når Landsat LST data sammenlignes på tværs af Landsat generationer. LST data i GLAD repositoriet er resampled til 30x30 m grid skala (eller ca. 0,1 ha), der vil være af særlig interesse for de små søer.
- Vi konkluderer at, på trods af de tilfredsstillende første resultater, at Landsat data skal downloades igen og fra en anden kilde i et næste skridt. I den nuværende analyse anvendt vi Landsat data fra GLAD repositoriet hvor Landsat data er aggregeret i tid til 16-dags kompositter. Det påvirker særligt det termiske bånd, som er meget styret af vejret. Det har vist sig at den aggregering har gjort at mange datoer ikke er brugbare for LST, fordi de rumlige mønstre er inkonsistente. I et næste skridt skulle Landsat data downloades og processeres separat for enkelte dag i stedet for 16-dags kompositter for at undgå denne inkonsistens.
- Denne analyse har ikke kun til formål at generere  $NT_A$  kort, da kortene yderligere skal suppleres med statistiske beregninger af f.eks. middelværdi af de negative  $NT_A$  eller en værdi for den andel af søarealet med  $NT_A$  der er mindre end en defineret tærskelværdi. Denne statiske analyse vil muliggøre en sammenligning på tværs af mange søer.
- Det bør testes om det er muligt at benytte både komposit satellit (billede) data og direkte data fra enkelt satellitbilleder, specielt fordi direkte temperaturdata fra satellitter er i 60-120 m opløsning.
- Tidligere studier (Wilson med flere 2016) vurderer at metoden ikke kan benyttes til søer under 50 ha, da det irske studie fra 2016 blev baseret på satellitbilleder i lavere opløsning. Det bør undersøges hvad minimum sø-størrelsen er med de nuværende tilgængelige satellitdata.



Figur 4.10: Analyse af søens overfladetemperatur for fire udvalgte søer: a) Arresø, b) Nørresø, c) Nors sø og d) Vængsø. Data er fra Landsat satellitsystemet og stemmer fra forskellige datoer som er oplyst i kortene. Det øverste kort for hver sø viser overfladetemperatur i grader Celsius og kortet nedenunder viser den normaliseret overfladetemperatur beregnet med ligning (2).

## 5. Vurdering af grundvandsindsivning til søer

Dette kapitel leverer input til den trinvis metode trin III (afsnit 5.5 og 5.6), trin IV (afsnit 5.3 og 5.4), trin V (afsnit 5.2), samt trin VII (afsnit 5.4.1).

Afsnittet gennemgår de relevante proxyer, som kan anvendes ved kategoriseringen af søerne der er bedst egnede til at beskrive kontakten til grundvandet, med hensyntagen til de forskellige sø-typer. Der skal tages udgangspunkt i proxyer, som i forvejen bliver målt i søerne.

### 5.1 Søens vandbalance

De enkelte led i søernes vandbalanceligning er vist i nedenstående ligning (3):

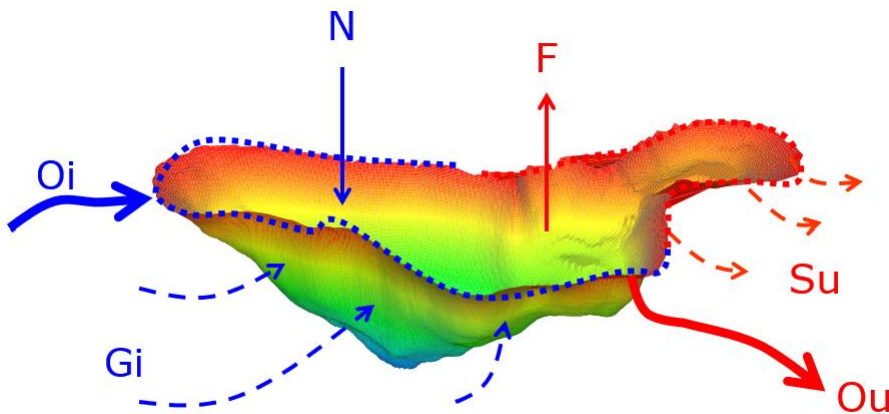
$$(G_i + N + O_i) - (S_u + F + O_u) = \Delta V / \Delta t = 0 \quad (\text{Lign. (3)})$$

hvor grundvand ind i søen ( $G_i$ ), nedbør ( $N$ ) og overfladisk indløb ( $O_i$ ) via vandløb, grøft, dræn eller kildevæld på søbredden tilsammen er den mængde vand, der tilføres søen. Søvand ud af søbunden til grundvandsmagasinet ( $S_u$ ), fordampning ( $F$ ), og overfladisk afstrømning ( $O_u$ ) via grøfter eller naturlige vandløb er den mængde vand, der løber ud af søen.  $\Delta V / \Delta t$  er ændringen i søens vandvolumen for den givne periode vandbalancen estimeres for (ændringen antages at være nul som årligt gennemsnit, da der sker volumen ændringer hen over året). Som et eksempel viser Figur 5.1 en konceptuel model for grundvandsudvekslingen i Hampen Sø, Midtjylland. Hampen Sø er udvalgt, da den igennem flere år har været undersøgt intensivt og bidraget væsentligt til udvikling af metoder til vurdering af vandbalancer for danske søer.

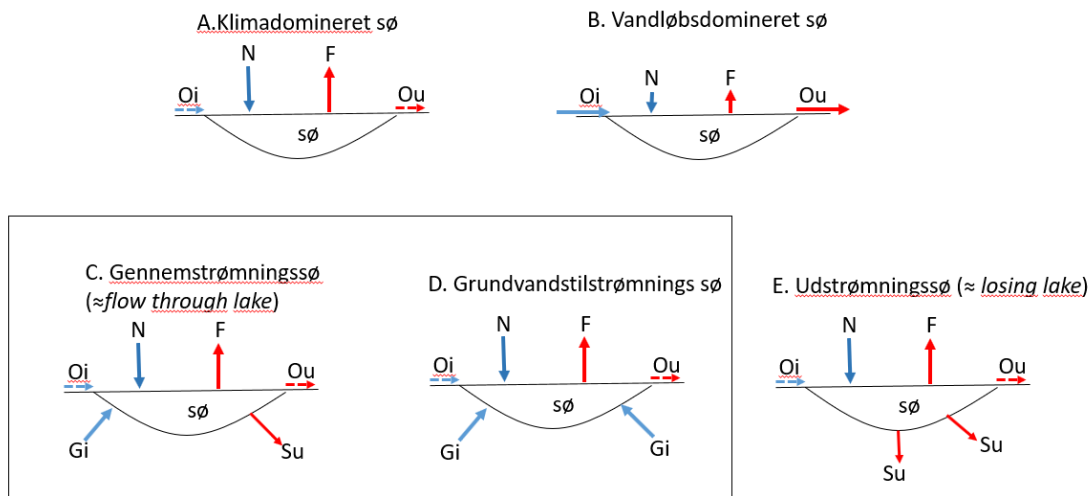
### 5.2 Konceptuelle sø-typer

Baseret på de hydrogeologiske forhold omkring en sø kan søer inddeles i fem konceptuelle typer, Figur 5.2. De to øverste typer er helt uden forbindelse til grundvandssystemet, og vandbalancen for disse søer er enten domineret af de klimatiske forhold (nedbør og fordampning) (type A) eller overfladisk indløb og afløb (type B). Nederst i Figur 5.2 er vist tre forskellige typer, der er kendetegnet ved indstrømning og/eller udstrømning af grundvand (type C og D), samt en type der er karakteriseret ved søvand der strømmer ud i grundvandszonen uden grundvandsindstrømning (type E). Type C benævnes en gennemstrømnings sø (flow through lake), type D en grundvandstilstrømnings sø (seepage lake) og type E en udstrømnings sø. Det er kun sø-type C og D i det følgende behandles for kontakt forhold og vandbalance-forhold. Der findes yderligere varianter af de 5 konceptuelle modeller idet de overfladiske indløb og afløb kan være helt eller periodevist ikke-eksisterende. De konceptuelle modeller forventes anvendt til at beskrive den overordnede transport af vand, sporstoffer og næringsstoffer fra grundvandet til søerne, til vurdering af, hvordan kemiske stoffer i grundvand påvirker søer.





Figur 5.1: Vandbalance for søer. Vandbalancens enkeltled for en sø (eksempel: Hampen Sø). Nedbør (N), fordampling (F), overfladisk indstrømning via vandløb eller grøft (Oi), og overfladisk udstrømning via vandløb eller grøft (Ou). Linjer med blå farver viser tilførsel af vand til søen. Linjer med røde farver viser fjernelse af vand fra søen. Endelig er vist grundvandsindstrømning til søen (Gi) (blå stiplede linjer) og søvandets udstrømning via søbunden (røde stiplede linjer) til grundvandsmagasinet. De enkelte led kan opgives i enheden  $\text{m}^3/\text{år}$  (Fra Kidmose, 2010)



Figur 5.2: Konceptuelle sø-typer for søer med eller uden kontakt til grundvandet. Overfladiske indløb (Oi) og udløb (Ou); nedbør (N), fordampling (F), grundvandsindsivning (Gi) og søvandets udstrømning til grundvandszonen (Su). Pile med blå farver er ind-balancen mens røde pile er ud-balancen af vandbalance ligningen. De to indrammede sø-typer er de eneste med grundvandsbidrag og der med af relevans for nærværende projekt.



### 5.2.1 Grundvands-residualet

Nærværende analyse af målsatte søers vandbalance baseres på eksisterende data primært fra de nationale overvågningsprogrammer på vandløb og søer samt klimatologiske data. Der er i analysen estimeret specifik søfordampning og nedbør korrigeret for aerodynamiske fejl til brug for søernes vandbalance. Klimadata beskrives nærmere i afsnit 5.3 og 5.4. De overfladiske indløb og afløb beskrives nærmere i afsnit 5.5. Grundet at grundvandsindsivningen eller søvandsudsivningen til grundvandszonen ikke kvantificeres i overvågningsprogrammet for målsatte søer, skal følgende omskrivning af vandbalanceligningen være til hjælp for at kategorisere søers grundvandsbidrag på baggrund af grundvands-residualet (Gi-Su). Grundvands-residualet defineres som det led i vandbalanceligningen hvor grundvandsindsivning (Gi) fratrækkes søvandets udsivning (Su) via søbunden til grundvandet. I ligningerne (4) - (6) er vist forholdet mellem N-F og Ou-Oi. Hvis forskellen imellem nedbør og fordampning er lige så stor som forskellen imellem vandmængder, der løber til søen via et eller flere indløb og typisk et afløb, så kan det enten forklares med, at sandsynligheden for grundvandsudveksling er meget lav eller potentielt ingen udveksling forekommer (sø-type A eller B) eller det kan forklares med at mængden af indsivende grundvand er akkurat lige så stor som mængden af søvand der siver ud i grundvandszonen (sø-type C) (Ligning (4)). I Nilsson med flere (2019) er beskrevet metoder der kan anvendes for søer med et grundvandsresidual nær 0, hvormed det kan afklares om søerne af type A, B eller C (Figur 5.1).

$$(N-F) = (Ou-Oi) \rightarrow (Gi-Su) \approx 0 \quad (\text{Lign. (4)})$$

Det er pt. ukendt hvor mange målsatte søer med et grundvands-residual nær  $\approx 0$  (nul) der er repræsenteret ved sø-type A, B eller C.

Oftest er N-F mindre end Ou-Oi for søerne (positivt residual), hvilket betyder at søerne modtager et grundvandsbidrag (Ligning (5)). Det vides ikke om søen er en konceptuel type C eller D alene ud fra det positive residual, da udstrømning af søvand til grundvand også kan forekomme (type D). Det skal bemærkes at søer beliggende i Bæltområdet og på Lolland-Falster kan have en højere fordampning end nedbør der i sig selv medvirker til at der kan forventes grundvandsindsivning til søer i disse egne af Danmark. Ellers ville disse søer med tiden tørre ud.

$$(N-F) < (Ou-Oi) \rightarrow (Gi-Su) > 0 \quad (\text{Lign. (5)})$$

Visse steder i Danmark forekommer det, at N-F er højere end Ou-Oi leddet i vandbalancen således at søerne netto mister mere søvand til grundvandszonen end der siver grundvand ind i søen (Ligning (6)).

$$(N-F) > (Ou-Oi) \rightarrow (Gi-Su) < 0 \quad (\text{Lign. (6)})$$

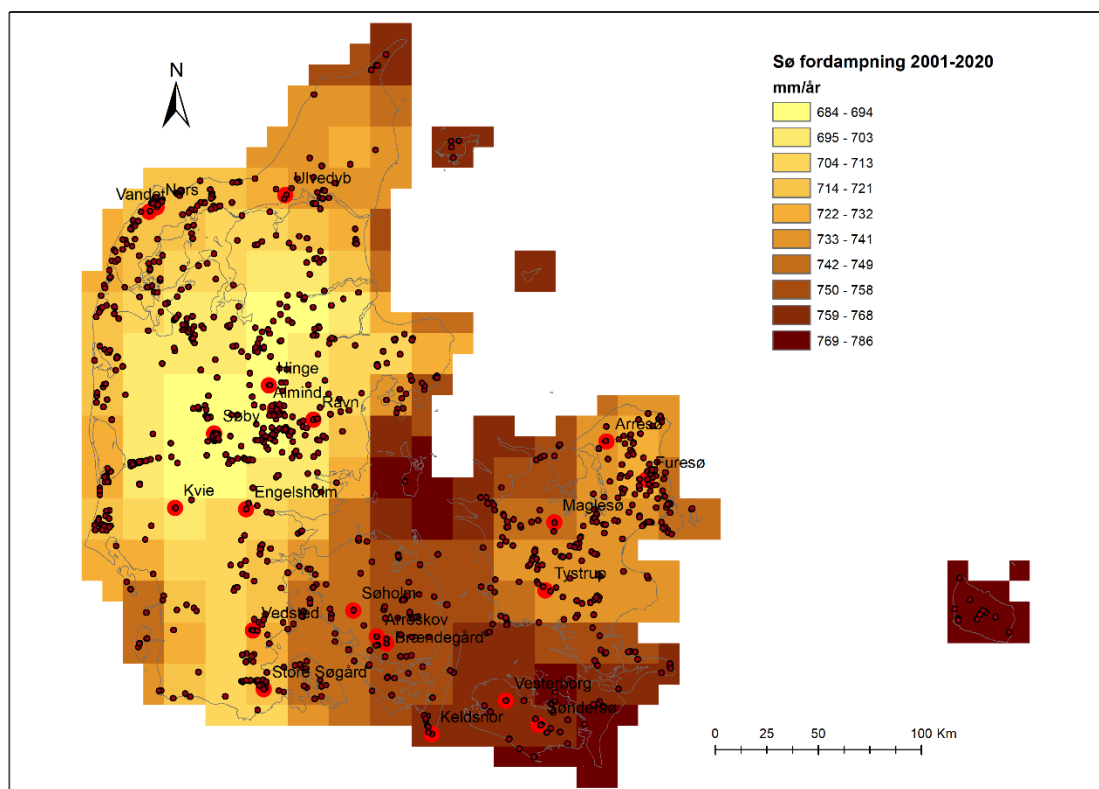
I sjældne tilfælde forekommer der slet ingen grundvandsindsivning til søen, men til gengæld tabes en stor del af vandet via søens bund til grundvandet, svarende til konceptuel sø-type E, der ikke er relevant for nærværende rapportering.

### 5.3 Fordampning for danske søer

Fordampning er et vigtigt element i søers vandbalance og kan kvantificeres ud fra målinger af temperatur, vindhastighed, relativ fugtighed, og solar stråling.

Tidligere er der til vurdering af fordampning fra danske søer typisk benyttet DMI's reference fordampning, der udgives som 20 x 20 km daglige gridværdier i. Denne referencefordampning er defineret som den potentielle fordampning fra en kortklippet græsoverflade med frit tilgængeligt vand. Der er et stort behov for at vurdere denne beregningsmetodes repræsentativitet af fordampningen fra søoverflade. Det er i nærværende projekt foretaget ved at sammenligne DMI's referencefordampning, med beregninger udledt til direkte at beregne søfordampning.

Med baggrund i sammenligning af fordampning ved 21 danske søer (røde cirkler, Figur 5.3), vurderes det, at den aktuelle fordampning ved danske søer er 16% større end DMI's referencefordampning. Figur 5.3 viser den årlige middelfordampning fra søer udregnet som 1,16 gange DMI's referencefordampning. Kortet viser års-middel for perioden 2001-2020.



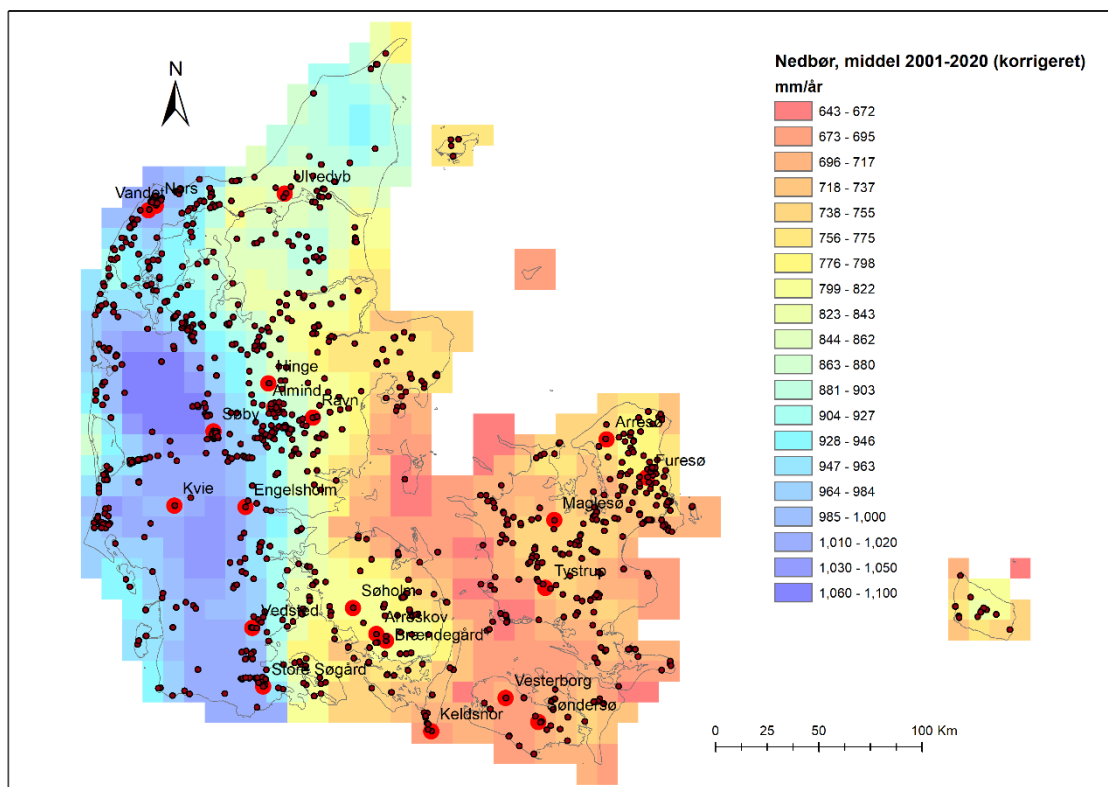
Figur 5.3: Fordampning pr. år for danske søer. Søfordampningen er beregnet som middel årlig fordampning for perioden 2001-2020. Baseret på DMI's referencefordampning i 20x20 km grid, multipliceret med 1,16.

GEUS anbefaler at anvende fordampningstal for danske søer som illustreret i Figur 5.3. Nærmere faglig dokumentation for sammenligning af referencefordampningen og beregnet søfordampning findes i Bilag 1.

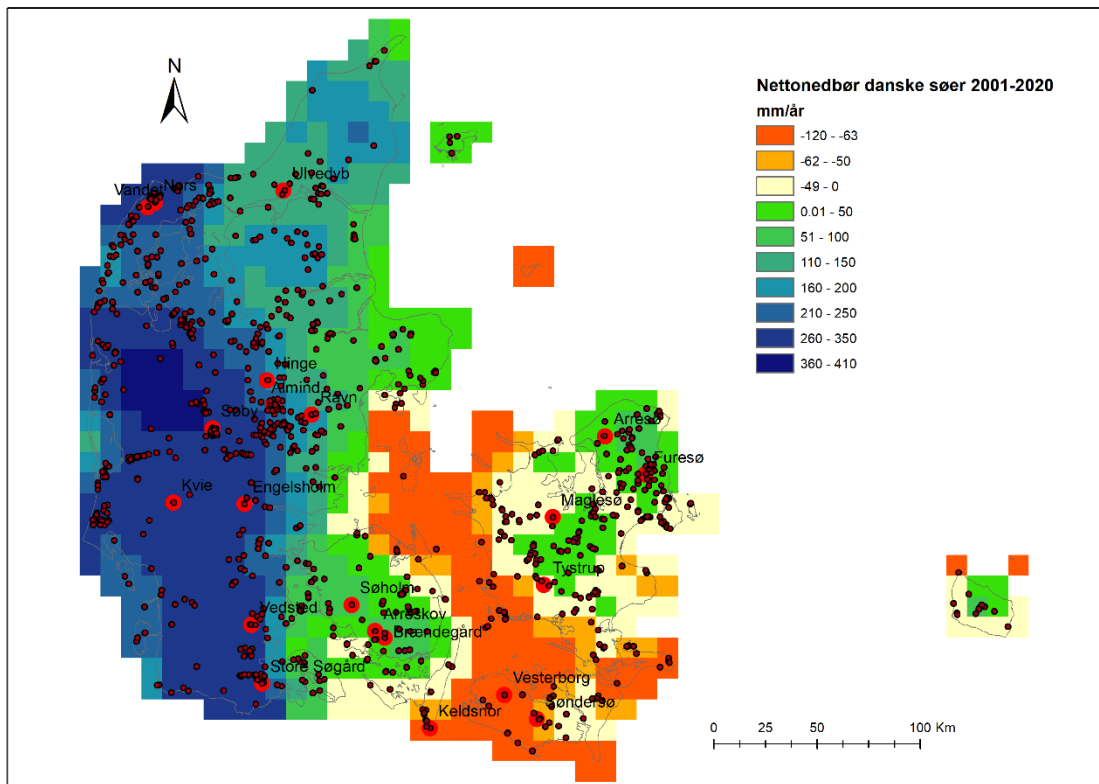
## 5.4 Nedbør for danske søer

Målt nedbør skal altid korrigeres for måletab. Dvs. at den mængde fast eller flydende nedbør som måleinstrumentet fanger, næsten altid er mindre end den nedbør som rent faktisk falder ved en given lokation. Nedbørskorrekturen er primært afhængigt af vind og temperatur og er i således dynamisk. Desuden er korrektion forskellig mellem måleinstrumenter. Figur 5.4 viser korrigeret nedbør over Danmark (Kilde DMI). Benyttes ikke korrigeret nedbør til beregning af nedbør for søer vil denne typisk underestimeres med 20-30 % (typiske årlige korrektioner fra Allerup 1998), hvilket vil være vigtigt for bestemmelse af søens vandbalance. Beregnes grundvandsindstrømningen som et residual af vandbalanceligningen, kan 30 % underestimering af nedbøren være væsentlig. Derfor er det afgørende at benytte korrigerede nedbørsværdier til beregning af søers vandbalance.

Figur 5.5 viser en såkaldt nettonedbør for danske søer baseret på korrigeret nedbør (Figur 5.4) minus sø fordampning (Figur 5.3).



Figur 5.4: Nedbør (korrigeret) for Danmark ved middel årsværdier for perioden 2001-2020.



Figur 5.5: Nettonedbør for danske søer (middel årsværdi for 2001-2020).

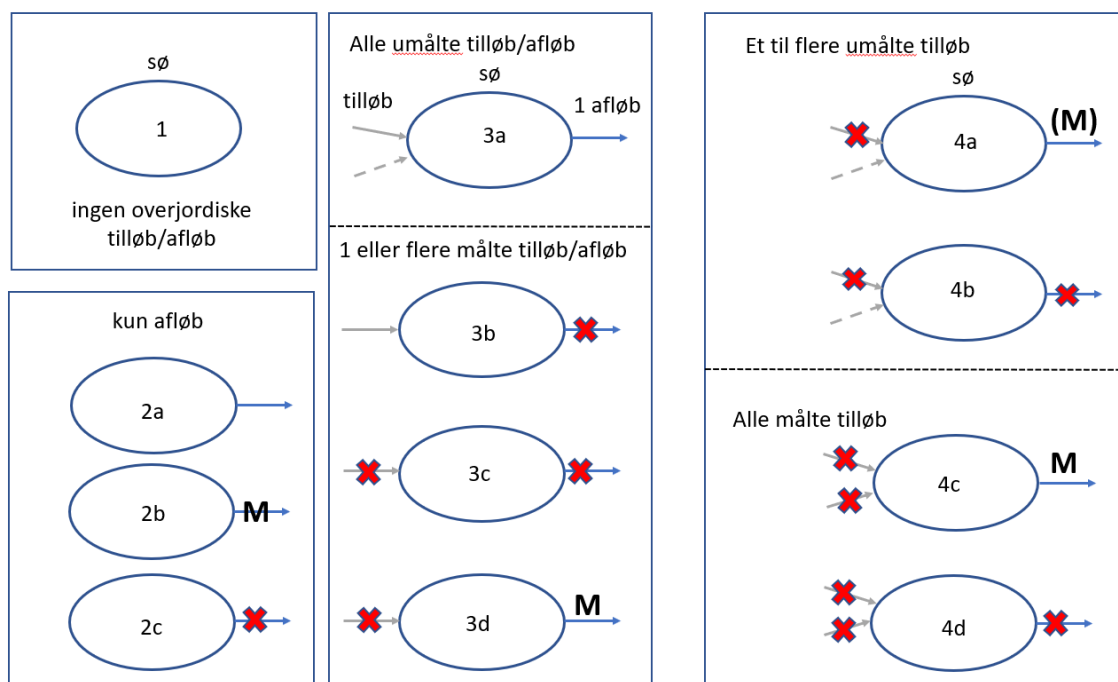
Nettonedbøren er typisk positiv, dvs. der er mere nedbør end søfordampning. Søer i Sydøstlige områder af landet som Falster og Lolland har en tilsyneladende højere fordampning end nedbør, altså en negativ nettonedbør på mere end 100 mm/år. Ellers er nettonedbøren op til ca. 400 mm/år i den midt-vestlige del af Jylland.

## 5.5 Overfladiske indløb og afløb til søer

Afsnittet redegør for værdien af at sammensætte eksisterende vandføringsdata der skal redegøre for Ou-Oi leddet i søernes vandbalance. Overfladiske målte vandføringer i indløb og afløb til søerne er samlet i ODA databasen. I de tilfælde hvor afløbene ikke er målt kan modellerede vandføringer i forbindelse med belastningsopgørelser for udvalgte målsatte søer bruges (Miljøministeriet 2022).

En gennemgang af udvalgte målsatte søer med indløb og afløb har dannet grundlag for den oversigt af mulige kombinationer af søers målte og umålte vandføring i indløb og afløb til søerne samt modelleret vandføring i afløb der er vist i Figur 5.6. Indløb og afløb fra søerne er defineret ved at lægge VP3 søerne over på VP3 vandløbstemaet og de steder hvor vandløbene løber ind i søen er et indløb defineret og tilsvarende for søernes afløb. Figur 5.6 viser de mest almindelige kombinationer af søer med/uden overfladiske indløb og afløb. Ikke alle de viste sø-typer har vi eksempler på i de udvalgte testsøer (kapitel 7) men de 11 sø kombinationer vil sandsynligvis være dækkende for de 974 målsatte søer (ex. bornholmske søer) når de alle skal klassificeres i forhold til deres overfladiske tilstrømningsforhold med målte eller umålte vandføringer ved næste basisanalyse af MST. Søerne er grupperet i 4 grupper.

Gruppe 1 har ingen indløb/afløb og kategoriseres som en klimadomineret sø (Figur 5.2). Gruppe 2 har kun afløb (ingen indløb). Afløbsklasser for 437 søer med beregning af årlig vandføring er vist i Tabel 5.1 vandbalancen kan vurderes for to af tre underklasser (2b og 2c). Gruppe 3 er søer med ét/flere overfladisk indløb og ét afløb. Vandbalancer kan vurderes for 2 af de 4 underklasser (3c og 3d). I gruppe 4 har alle søerne flere indløb og et afløb. I visse søer er alle indløb målt vandføring men i mange søer er et eller flere umålte. Det forventes at med sikkerhed kan 2 af de 4 underklasser i gruppe 4 kan der vurderes vandbalancer for (4c og 4b). Det er et skøn om søer af underklasse 4a og 4b har nok indløb målt så det giver mening at beregne vandbalance for søen.



Figur 5.6: Systematik over søers overfladiske indløb og afløb koblet med målte vandføringer (rødt kryds) fra ODA databasen og modellerede vandføringer (M) fra P belastningsmodellen. Den stiplede linje i gruppe 3 adskiller et eller flere umålte indløb (gruppe 3a) fra de øvrige gruppe 3 eksempler hvor et eller flere indløb/afløb er målt. I gruppe 4 søer adskiller en stiplede linje eksempler på søer med et eller flere umålte indløb (gruppe 4a og 4b) fra søer hvor alle indløb er målt (gruppe 4c og 4d).

## 5.6 Afløb fra søer baseret på Miljøstyrelsens dataindsamling

Vi har brugt to uafhængige MST datasæt til at få overblik over eksisterende viden om søernes afløbs og indløbs forhold. Hvad angår afløbene fra målsatte søer er der gode oplysninger registreret af Miljøstyrelsens teknikere om, hvilke og hvor mange af de målsatte søer der har et fysisk afløb. Miljøstyrelsen har inddelt de målsatte søers afløbsforhold i fire klasser: (1) afløb, (2) ingen afløb, (3) temporært afløb og (4) afløb uden beregning af vandføring (Tabel 5.1). MST har defineret et 'afløb' som et udløb fra en målsat sø, hvor kravet er at afløbet er vandførende året rundt. Et temporært afløb er kun vandledende i våde perioder (typisk vinter eller nedbørsrige perioder). I klasse 1 afløb er beregnet en årlig vandføring for 430 målsatte søer (P belastningsberegning (jf. Miljøministeriet 2022)). Alle øvrige afløbsklasser findes in vandføringsdata (Tabel 5.2). Med udgangspunkt i Miljøstyrelsens fire afløbsklasser vurderes

det at næsten hver tredje målsatte sø (321 søer) er afløbsløs (uden afløb). Der findes ingen tilsvarende opgørelse fra MST med samme type oplysninger som vist i Tabel 5.1 for indløbene til søerne.

Til sammenligning med MST opgørelsen af 321 søer 'uden afløb' (klasse 2) skal det nævnes at GEUS i forbindelse med opdateringen af VP3 vandløbsnetværket i projektet 'Tilpasning af DK modellen' til samtlige målsatte vandløb opgør antallet af målsatte søer uden indløb og afløb for søer mindre end 10 ha til at være 329 målsatte søer (GEUS 2023); målsatte søer på 10-100 ha til 75 søer, og målsatte søer >100ha til 4 søer. GEUS-opgørelsen skal dog tages med forbehold da vandløb i DK-modellen sandsynligvis ikke er det mest retvisende at bruge, til at vurdere om søer i størrelsesordenen 1 til 10 ha har til- og afløb. Der er mange vandløb som ikke er med i modellen netop fordi de er for korte/små og frasorteret i forbindelse med opdatering af vandløbsnetværket ved nedskalering fra 500m til 100m grid opløsning (GEUS 2023).

De to datasæt fra Miljøstyrelsen sammenstillet i Tabel 5.2 passer fint sammen. For 430 søer har MST beregnet P belastningen til søerne. For søer med temporært afløb i vintersæsonen (163 søer), kan der ikke beregnes P fjernelse, da det forudsættes for P belastningsberegningen at afløbet er vandførende året rundt. 7 søer med afløb mangler P stofberegning.

Tabel 5.1: Afløbsforholdene fra målsatte søer inddelt i 4 klasser på baggrund af afløbstype af Miljøstyrelsen (MST data)

| Søareal (ha) | 1: afløb + beregning | 2: uden afløb | 3: tempo-<br>rært afløb | 4: afløb men in-<br>gen beregning | antal søer |
|--------------|----------------------|---------------|-------------------------|-----------------------------------|------------|
| ≥1000        | 6                    | 0             | 0                       | 0                                 | 6          |
| 100-1000     | 74                   | 2             | 6                       | 4                                 | 86         |
| 10-100       | 222                  | 65            | 49                      | 14                                | 350        |
| 5-10         | 96                   | 114           | 62                      | 27                                | 299        |
| 1-5          | 39                   | 140           | 46                      | 20                                | 245        |
| samlet       | <b>437</b>           | <b>321</b>    | <b>163</b>              | <b>65</b>                         | <b>986</b> |

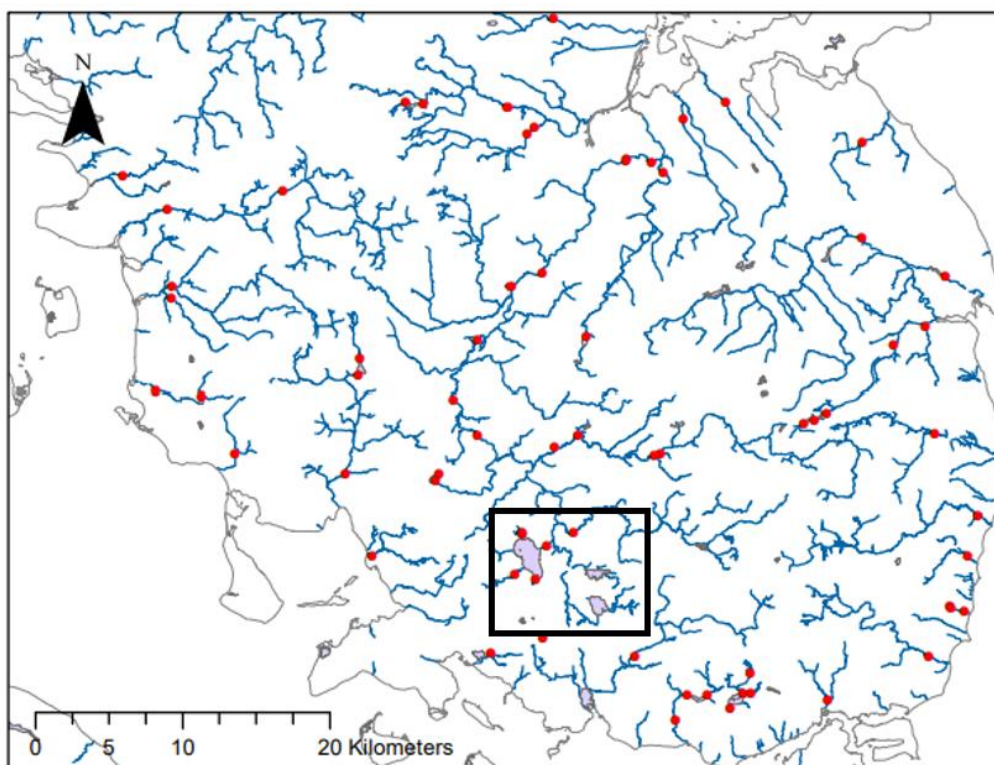
Tabel 5.2: Afløbsklasser sammenholdt med P belastningsberegning til målsatte søer (MST data)

| Afløbsklasser |                                                                   | Antal søer med be-<br>regning af stofbe-<br>lastning for afløb | Søer uden bereg-<br>ning af stofbelast-<br>ning for afløb |
|---------------|-------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 1             | Afløb, belastning beregnes                                        | 430                                                            | 7                                                         |
| 2             | Uden afløb, belastning kan ikke beregnes                          |                                                                | 321                                                       |
| 3             | Temporært afløb, belastning kan af tekniske grunde ikke beregnes  |                                                                | 163                                                       |
| 4             | Afløb, men belastning kan af tekniske grunde ikke beregnes        |                                                                | 65                                                        |
| 0             | Ukendt (X,Y) – afløbsforhold ikke beskrevet (Fæstningskanal Nord) |                                                                | 1                                                         |
| <b>Total</b>  |                                                                   | <b>430</b>                                                     | <b>557</b>                                                |

### 5.6.1 Målte vandføringer i indløb og afløb (ODA databasen)

Målte vandføringer for hele eller dele af perioden 1989-2020 er udtrukket af DCE fra <https://odafordalle.au.dk> til nærværende projekt for 969 vandføringsstationer. Data er godkendt af MST, men der forekommer huller i visse tidsserier og der er også perioder, hvor data er interpoleret.

Hovedparten af målestationerne har ingen relevans for dette projekt, da de er placeret i vandløbsnetværket med en maks. afstand mere end 1,5 km fra søbredden. Det ligger uden for dette projekts formål at opgøre hvor mange af søerne der har tilstrækkelige vandføringsdata til at opstille vandbalancer for alle målsatte søer. I udvalgte målsatte søer er tidsserier for målte tilløb og afløb sammenstillet (se senere tabel 6.1). Figur 5.7 viser vandløbsstationer med målte vandføringer i ODA databasen på dele af Fyn. Som det fremgår, er mange stationerne placeret i vandløbsnetværket og ikke tæt på en målsat sø.



Figur 5.7: Kortudsnittet af dele af Fyn viser eksempel på vandføringsstationer med vandføringsmålinger i ODA databasen (røde prikker). Arreskov sø, Nørresø og Brændegård sø i sort firkant svarer til figur 5.8b.

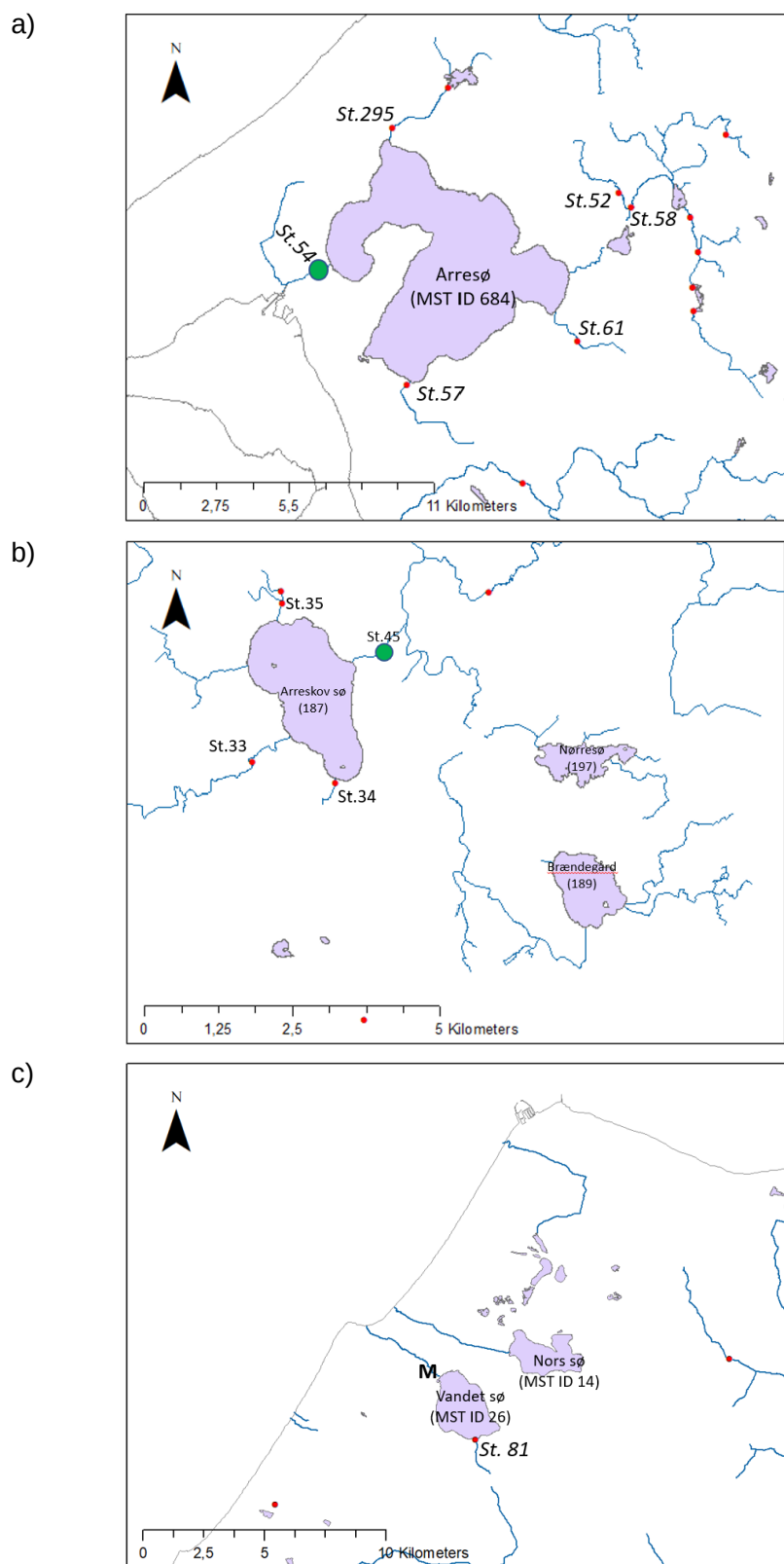
Eksempler på overfladiske indløb og afløb er vist fra Arresø i Nordsjælland, Arreskov sø på Fyn og Vandet sø i Thy. Arresø får målt alle indløb og afløbet (Figur 5.8a); Arreskov sø har næsten målt alle indløb og afløbet (Figur 5.8b), mens Vandet sø kun får målt indløbet mens vandføringen fra afløbet vurderes med P belastningsmodellen (Figur 5.8c).

Arresø: Alle 5 indløb og 1 afløb målt, svarende til underklasse 4d i Figur 5.6. Vandføringer fra overfladiske indløb og afløb er relativt sikre til vurdering af vandbalancen.



Arreskov sø: Alle indløb på nær et enkelt måles samt afløbet. Da ikke alle indløb måles kategoriseres den i underklasse 4b, der dog stadig anses for rimelig sikkert til vurdering af vandbalancen. Bemærk at fra de to målsatte søer Nørre sø og Brændegård sø nær Arreskov sø måles ingen vandføring fra nogen af indløbene eller afløb (underklasse 3a). Det er således ikke muligt at vurdere vandbalancen med de foreliggende data fra ODA databasen for Nørresø og Brændegård sø.

Vandet sø: Vandet sø har et målt indløb og med belastningsmodellen kan årsafstrømningen via afløbet beregnes. Søen tilhører underklasse 3d, så en vandbalance kan vurderes for Vandet sø. Bemærk at den nærliggende Nors sø har et umålt afløb (ingen indløb). Det er således ikke muligt at vurdere vandbalancen for søen med nationale data.



Figur 5.8: (a) Arresø, (b) Arreskov sø og (c) Vandet sø med målte indløb og/eller afløb i VP3-høringsversion af vandløbstemaet (blå streger). Vandføringsstationsnumre (rød prik) i ODA databasen (sidste 2-3 unikke numre er vist på figuren). Grøn prik viser målt afløb fra søen. M= modelleret afløb med P belastningsmodellen fra søen.

## 6. Validering af metode med test søer

### 6.1 Valg af testsøer

Testsøerne, der benyttes til validering af vandbalance metoden og vurdering af sandsynlighed for kontakt mellem grundvandsforekomst og sø, er for en stor del de samme, som indgik i 2019 arbejdet (Nilsson med flere 2019). Den ene halvdel af testsøerne omfatter de intensivt overvågede NOVANA søer samt tre supplerende søer. Den anden halvdel af søerne har været brugt til forskningsprojekter, hvor indstrømningen af grundvand til søerne er undersøgt (her benævnt Hydrologi-søerne). Disse 32 testsøer har været brugt til at efterprøve om målsatte søer kategoriseret med den ny sandsynlighedsanalyse for grundvandskontakt er i nogenlunde overensstemmelse med den viden der eksisterer fra test søerne. En vigtig del af valideringen har været at få afklaret om vandføringsdata fra ODA databasen kan benyttes til at lukke vandbalancen for de af søerne hvor der ikke har været intensive målinger af den overfladiske til og afstrømning fra søerne i forbindelse med forskningsprojekter (Tabel 6.1). NOVANA søerne har lange tidsserier specielt på de biologiske parametre. Der er begrænset viden om disse søers kontakt med grundvandet. NOVANA søerne er valgt af DCE/Aarhus Universitet til en repræsentativ overvågning af den økologiske tilstand i disse søer. Omvendt er overvægten af Hydrologi-søerne valgt med det for øje, at undersøge kontakten mellem grundvand og søerne. Derfor er der et indgående kendskab til disse søers vandbalance og strømningsveje.

### 6.2 Test søernes vandbalance

På baggrund af vandbalance ligningerne (2) til (4) i afsnit 5.2.1 har det været muligt at beregne grundvands residualen for 29 af 32 test søer (Tabel 6.1). Tre af NOVANA søerne (Nors sø, Ulvedybet og Hinge sø) kan der ikke beregnes grundvandsresidual for, da der mangler oplysninger om enten overfladisk tilstrømning eller afstrømning via afløb.

Alle søer med **positivt grundvands-residual** modtager grundvand. Hovedparten af disse er kategoriseret som gennemstrømningssøer mens kun to søer er kategoriseret som grundvandstilstrømningssøer (Ejstrup sø og Vængsø) (Figur 5.2).

Søer med et **grundvands-residual nær 0** ( $\pm 100$  mm/år) er typisk enten søer med lav (eller potentiel ingen) kontakt til grundvandsforekomsterne, eller søer med en vis udveksling af grundvand/søvand via søbunden. Eksempler på dette vil være Hampen sø, Arresø og Kvie sø. Ved at sammenholde sandsynligheden for kontakt mellem grundvand og sø (afsnit 4.3) er det ofte muligt at vurdere, hvilken af de to konceptuelle sø-typer der dominerer.

Søer med **negativt grundvands-residual**, dvs. mere end -100 mm/år er kun kendt fra testsøer af typen Hydrologi-søer. Vi ved fra detaljerede undersøgelser af mange af disse søer, at de er domineret af nedbør i ind budgettet af vandbalancen. Grundvandsbidraget er beskedent så disse søer kategoriseres konceptuelt i overgangen fra at være rent klimadominerede

søer (sø-type A) til søer med et beskedent grundvandsbidrag (sø-type C) (Figur 5.2). Herunder Kalgaard sø, Grane Langsø, Krag sø, Ræv sø, Vedsted sø, Store Gribsø og Tvorup Hul. Det er ikke muligt kun med baggrund i det beregnede negative grundvands-residual, at skelne om søen er en sø-type A eller C. Ved at sammenholde med sandsynligheden for kontakt mellem grundvand og sø (afsnit 3.3) er det oftest muligt at vurdere, hvilken af de to konceptuelle sø-typer der dominerer.

### **6.3 Værktøjskassen 2019**

I Nilsson med flere (2019) er beskrevet to metoder til bestemmelse af vandbalancen for søer mindre end 100 ha, samt inddeling af søer i en konceptuel sø-type. De to metoder er (a) segment approach metoden og (b) EC i søvand og EC-faktor metoden. I nærværende arbejde er der ikke arbejdet videre med disse metoder, da der allerede er etableret den nødvendige dokumentation af disse metoders egnethed til bestemmelse af vandbalance og vurdering af konceptuel sø-type i Nilsson med flere (2019).

Tabel 6.1: Vandbalance for NOVANA intensivt overvågede søer (N=14), Hydrologi-søer (N=15) samt de supplerende søer, Ove Sø, Vandet Sø og Søndersø Maribo (N=3). Venstre kolonne: NOVANA søer (lys gule); supplerende søer (mørkere gule); Hydrologi-søerne (grønne). Alle tal er opgivet i mm/år.

| mm/år (2001-2020)      | Oi         | Ou         | N    | F   | F-N  | Ou-Oi | Gi-Su |
|------------------------|------------|------------|------|-----|------|-------|-------|
| Nors sø                | 0          | ingen data | 1012 | 964 | 48   | -     | -     |
| Kvie sø                | 0          | 303        | 997  | 681 | -316 | 303   | -13   |
| Engelsholm sø          | 3080       | 12649      | 1020 | 684 | -336 | 9569  | 9233  |
| Søholm sø              | 4354       | 5656       | 804  | 796 | -8   | 1302  | 1294  |
| Arreskov sø            | 784        | 1888       | 815  | 757 | -58  | 1104  | 1046  |
| Keldsnor <sup>1)</sup> | 20         | ingen data | 694  | 815 | 121  | -     | -     |
| Ulvedybet              | 3734       | ingen data | 847  | 896 | 49   | -     | -     |
| Hinge                  | ingen data | 26601      | 859  | 606 | -253 | -     | -     |
| Ravn                   | 6804       | 8067       | 852  | 534 | -318 | 1263  | 945   |
| Søby sø                | 0          | 3419       | 1011 | 638 | -373 | 3419  | 3046  |
| Arresø                 | 999        | 1165       | 762  | 686 | -76  | 166   | 90    |
| Maglesø v. Brorfelde   | 0          | 1692       | 744  | 746 | 2    | 1692  | 1694  |
| Furesø                 | 746        | 1173       | 773  | 548 | -225 | 427   | 202   |
| Vesterborg sø          | 21246      | 25760      | 697  | 775 | 78   | 4514  | 4592  |
| Store Søgård sø        | 14572      | 16340      | 1007 | 771 | -236 | 1768  | 1532  |
| Ove sø                 | 20893      | 25571      | 959  | 718 | -241 | 4678  | 4437  |
| Vandet                 | 1080       | 1827       | 1003 | 718 | -285 | 747   | 462   |
| Søndersø Maribo        | 112        | 161        | 713  | 773 | 60   | 49    | 109   |
| Stigholm sø            | 53454      | 54158      | 922  | 691 | -231 | 703   | 472   |
| Halle sø               | 26012      | 26699      | 970  | 691 | -279 | 687   | 408   |
| Kalgaard sø            | 0          | 0          | 970  | 691 | -279 | 0     | -279  |
| Grane Langsø           | 0          | 0          | 970  | 691 | -279 | 0     | -279  |
| Ræv sø                 | 0          | 0          | 970  | 691 | -279 | 0     | -279  |
| Torup sø               | 0          | 2393       | 970  | 691 | -279 | 2393  | 2114  |
| Krag sø                | 0          | 0          | 970  | 691 | -279 | 0     | -279  |
| Ejstrup sø             | 0          | 9759       | 981  | 684 | -297 | 9759  | 9462  |
| Hampen sø              | 0          | 210        | 970  | 691 | -279 | 210   | -69   |
| Vedsted sø             | 60         | 0          | 980  | 722 | -258 | -60   | -318  |
| Skærsø                 | 281        | 688        | 1007 | 711 | -296 | 407   | 111   |
| Vængsø                 | 3185       | 30130      | 884  | 697 | -187 | 26945 | 26758 |
| St. Gribsø             | 141        | 0          | 803  | 727 | -76  | -141  | -217  |
| Tvorup hul             | 0          | 0          | 993  | 718 | -275 | 0     | -275  |
| Nørresø                | 162        | 705        | 815  | 751 | -64  | 543   | 479   |

1) Keldsnor udelades som test sø da det ikke har været muligt at udtrække søgeologi fra DK modellen fra det område og der eksisterer tilmed ingen vandføringsdata fra afløbet.

## 6.4 Evaluering af kontakten mellem grundvand og testsø

### 6.4.1 Kategorisering af søers grundvandskontakt på baggrund af beregnet grundvands-residual

Dette afsnit omhandler en evaluering af den metode, der foreslås anvendt til bestemmelse af kontakten mellem grundvandsforekomster og målsatte søer samt søernes vandbalance. Evalueringen er baseret på erfaringer med at etablere et datasæt der skal danne grundlag for beregning af grundvands residualt for 33 testsøer (Tabel 6.1). Da der ikke er tilstrækkelige data på den overfladiske til- eller afstrømning for fire af de 33 søer, har det ikke været muligt at beregne grundvands-residual for disse fire søer. Det har dog alligevel været muligt med anvendelse af metoderne præsenteret i Nilsson med flere (2019) at kategorisere testsøerne i konceptuelle sø-typer udelukkende baseret på det tidligere arbejde fra 2019. Resultatet af den nye beregning af grundvands residualt for alle 33 testsøer inddeles i sø-typer og sandsynligheder for kontakt mellem grundvand og sø som vist i tabel 5.2. Hovedparten af testsøerne har en høj sandsynlighed for grundvandsindsivning til søerne i henhold til sandsynlighedsanalysen, hvilket stemmer godt overens med det beregnede grundvandsresidual for disse søer. To af søerne med overvejende sandsynlighed for grundvandskontakt (Vedsted sø og Kvie sø) indplaceres i sø-typerne A, B og E. Kvie sø er beliggende i kvartære sand aflejringer til 30-40m dybde og må formodes at være i god kontakt, men mangler gode hydrologi data og er derfor vanskelige at vurdere med det forhåndenværende datagrundlag. Vedsted sø er en velkarakteriseret sø hvad angår de hydrauliske forhold og er kategoriseret som en gennemstrømnings sø med et ret beskedent grundvandsbidrag (Hansen og Wodschow, 2008). Den klassificeres som en sø med moderat sandsynlighed for grundvandskontakt, hvilket ikke nødvendigvis er i uoverensstemmelse med at søen kun har et beskedent grundvandsbidrag. Tre af testsøerne har en moderat sandsynlighed for grundvandskontakt og indplaceres i sø-typerne C og D med forventet grundvandsindsivning. Feltstudier har vist at Skærsø modtager <10% af ind-balancen som grundvandsbidrag; Engelsholm sø har et stort positivt grundvandsresidual hvilket forventes at skyldes et væsentligt grundvandsbidrag mens Søndersø Maribo sandsynligvis modtaget et beskedent grundvandsbidrag vurderet ud fra et mindre positivt grundvandsresidual. Evalueringen viser altså at tre søer med moderat sandsynlighed for grundvandsindsivning fra GVF, alle viser en stor variation i grundvandsbidraget. To søer har lav til potentiel ingen kontakt til grundvandet. Ulvedybet er med værktøjskassen 2019 indplaceret som en sø-type C med forventeligt grundvandsbidrag. Grundvands residualt kan dog ikke beregnes for Ulvedybet, da vandføringsdata for afløbet til Limfjorden ikke findes. Således er det ikke muligt at evaluere denne sø ift. sø-type eller sandsynlighed for kontakt-forhold. Vesterborg sø på Lolland er en lavvandet sø med en middeldybde på 1,4m, maksimumdybde på 2,9m og en middeldybde til grundvandsforekomsten under søen på 9,9m. Søgeologien omkring søen er domineret af 77% ler og ca. 23% sand fra 0-15m dybde. Vesterborg sø viser både ved beregning af grundvands residualt og ved anvendelsen af værktøjskassen fra 2019, at der forekommer (væsentlig) grundvandsindsivning til Vesterborg sø. Søen rubriceres i kategorien med lav til ingen sandsynlighed for kontakt til grundvandsforekomst, hvilket er i dårlig overensstemmelse med det beregnede grundvands-residual. De geologiske forhold ved Vesterborg sø er komplicerede med glaciotektoniske forstyrrelser (Jakobsen 1996). Trods dominans af lerede aflejringer omkring søen kan

lokal-skala geologiske vinduer dannet af glacialtektonik fungere som strømningsveje af grundvand fra underliggende grundvandsforekomster søen. Vesterborg Sø og Nørresø på Fyn er eksempler på denne type geologiske forhold med lokal-skala geologi der ikke 'fanges' af sandsynlighedsanalysen. Generelt kan det opsummeres, at der er rimelig god overensstemmelse mellem de fleste af testsøernes inddeling i sø-typerne A-E og resultatet af sandsynlighedsanalysen for søernes grundvandskontakt.

*Tabel 6.2: Inddeling af testsøer i sø-typer og sandsynligheder for kontakt mellem grundvand og sø baseret på dette arbejde og 'Værktøjskassen 2019'. Søer med navnet angivet i kursiv er udelukkende vurderet ud fra metoder beskrevet i Nilsson med flere (2019).*

| Sø-typer (figur 5.2) | Høj sandsynlighed                                                                                                         | Moderat sandsynlighed         | Lav til potentielt ingen sandsynlighed | Kontakt grundvandsforekomst og sø                                                      |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| C                    | Kalgaard sø, Grane Langsø, Ræv sø, Torup sø, Hampen sø, Arreskov sø, <i>Keldsnor</i> , Ravn sø, Arresø, Furesø, Søholm sø | Skærsø                        | <i>Ulvedybet</i>                       | Søer, der overvejende sandsynligt modtager grundvand                                   |
| D                    | Ejstrup sø, Vængsø, Stigholm sø, Halle sø, Store Gribsø                                                                   |                               |                                        |                                                                                        |
| C/D                  | <i>Nors sø, Hinge sø, Maglesø v. Brorfelde, Store Søgaard sø, Søby sø, Vandet sø, Ove sø,</i>                             | Engelholm sø, Søndersø Maribo | Vesterborg sø                          |                                                                                        |
| A/B/E                | Kvie sø, Vedsted sø                                                                                                       |                               |                                        | Søer, der overvejende sandsynligt ikke modtager grundvand eller meget beskedent bidrag |

## 6.4.2 Sandsynlighed for grundvandsudveksling med testsøerne

Testsøernes repræsentativitet i forhold til sandsynlighed for tilstedeværelse af permeable grundvandsmagasiner med stor udbredelse ved søen (undergruppe K1 til K3, Figur 4.1) og sandsynlighed for potentiel kontakt mellem grundvand og sø (undergruppe M1 til M3) er vist i Tabel 6.3. Det fremgår af tabellen, at der i særlig grad mangler test søer til valideringen af kontakt forhold til målsatte søer, der er karakteriseret af en mindre sandsynlighed for tilstedeværelse af permeable grundvandsmagasin (undergruppe K3) og lav til ingen sandsynlighed for grundvandskontakt (undergruppe M2 og M3, Figur 4.1). Kategorien er vigtig da der i dag forekommer 87 målsatte søer i denne gruppe. Vesterborg sø på Lolland er den eneste sø med lav til ingen sandsynlighed for grundvandskontakt, men bedømt på baggrund af grundvands residualet (+4592mm/år), indikerer det, at søen har en betydelig grundvandsindsivning. Der er en betydelig usikkerhed ved den geologiske model fra FOHM nær Vesterborg sø inkluderer småskala geologiske heterogeniteten som antagelig forekommer ved Vesterborg Sø.

De udvalgte test søer viser en fin repræsentation af søer med god kontakt til grundvandet. Det gælder både for Hydrologi søerne og for NOVANA overvågnings søerne. Med denne erkendelse kan vurderingen af sandsynligheden for grundvandsudveksling med testsøerne udelukkende bedømmes for søer med høj sandsynlighed for kontakt, der udgør langt hovedparten af de målsatte søer i Danmark.

Tabel 6.3: Repræsentation af testsøerne i forhold til sandsynligheden for tilstedeværelse af permeable grundvandsmagasiner med stor udbredelse ved søen (undergruppe K1 til K3, Figur 4.1) og sandsynlighed for potentiel kontakt mellem grundvand og sø (undergruppe M1 til M3). Søer skrevet med rødt er NOVANA søer mens søer med blå er Hydrologi søer.

Tilstedeværelse af permeable grundvandsmagasin med stor udbredelse

|                    |    |                                                                                                                                                                                                                              |                                     |                                     |
|--------------------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Mindre sandsynligt | K3 | Arreskov sø<br>Målsatte søer: <10                                                                                                                                                                                            | Målsatte søer: <10                  | Målsatte søer: 10-100               |
| Mere sandsynligt   | K2 | Søholm sø, Ravn sø, Arresø, Maglesø v. Brorfelde, Store Søgård sø, Ove sø, Vandet sø, Søndersø v. Maribo<br>Vedsted sø, Nørresø<br>Målsatte søer: >100                                                                       | Engelsholm sø<br>Målsatte søer: <10 | Vesterborg sø<br>Målsatte søer: <10 |
|                    | K1 | Nors sø, Kvie sø, Ulvedybet, Hinge sø, Søby sø, Furesø<br>Stigsholm sø, Halle sø, Kalgård sø, Grane Langsø, Rævsø, Torup sø, Krag sø, Ejstrup sø, Hampen sø, Skærsø, Vængsø, Store Gribso, Tvorup Hul<br>Målsatte søer: >100 | Ingen målsatte søer                 | Ingen målsatte søer                 |
|                    |    | M1                                                                                                                                                                                                                           | M2                                  | M3                                  |
|                    |    | Høj sandsynlighed                                                                                                                                                                                                            | Moderat sandsynlighed               | Lav-ingen sandsynlighed             |

Potentiel kontakt mellem grundvand-målsat sø

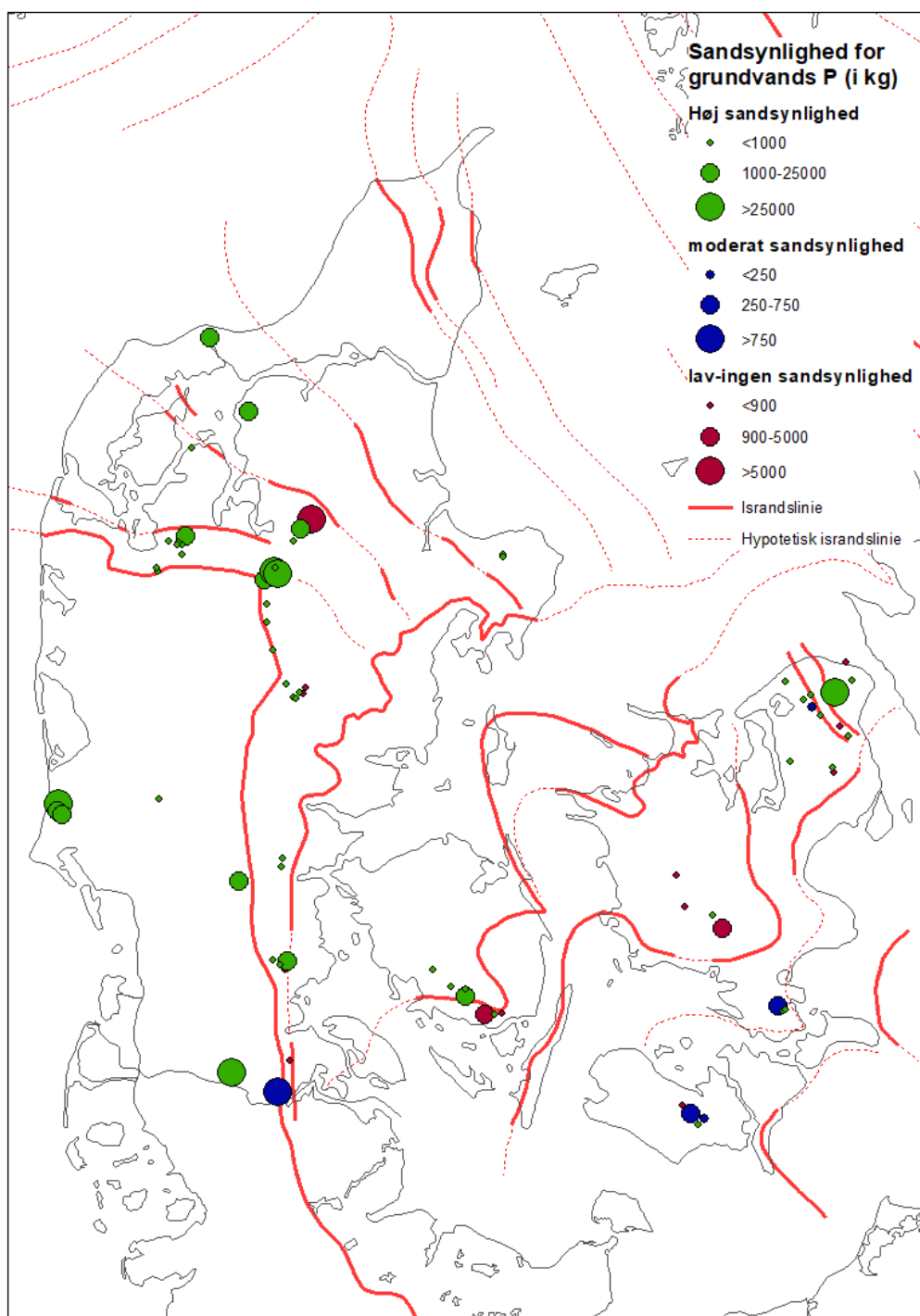


## 6.5 P belastningsmodel

Miljøstyrelsens belastningsopgørelser for søer estimerer den samlede mængde fosfor der strømmer ud af 430 søer via søens afløb (Miljøministeriet 2022). I disse modelberegningerne indregnes ikke en udveksling af grundvand med de målsatte søer i modellen. For 77 af de målsatte søer viser beregningerne at der er overskydende fosfor (eller negative sum) i søernes afløb. Det er derfor relevant at belyse om det overskydende fosfor kan forklares med indstrømning af fosfor via grundvand til søerne. Modelberegningerne vil ikke kunne dokumentere denne relation så længe der ikke simuleres grundvand-sø interaktion i modelkonceptet. Det skal afklares om nærværende kategoriseringsprojekt kan kaste lidt mere lys over forhold uden dog at projektet kan belyse om antropogene kilder til P i disse søer kan henføres til en konkret tilkøbet grundvandsforekomst. Den afklaring belyses ved et andet forskningsudviklingsprojekt i 2023 ('Kemisk påvirkning af målsatte overfladevandsområder – metodeudvikling – N, P og sporstoffer') der udføres af GEUS. Problemstillingen er kendt fra et fåtal af danske søer der er dokumenteret påvirket af geogen fosfor fra grundvand (eks. Vængsø, Nørresø og Ejstrup sø). Da P kilden i disse søer ikke er af antropogen oprindelse er disse søer ikke som sådan relevante for denne metodeudvikling. Alligevel omtales de nedenfor da naturligt eutrofe søer der kan være svære at adskille fra antropogent P påvirkede søer.

Figur 5.12 viser den geografiske udbredelse af disse søer. I figuren er søerne inddelt i sandsynlighed for grundvandskontakt efter om den kvalitative analyse med høj, moderat eller lav/ingen sandsynlighed for kontakt mellem grundvandsforekomst og den aktuelle sø.

P belastningsberegninger for Nørresø på Midtfyn viser, at denne sø har et overskud af P i søens afløb. Detaljerede feltstudier i Nørresø viser at søen modtager P via grundvand (Nisbeth med flere, 2019). Endelig viser dette projekts sandsynlighedsanalyse at Nørresø med høj sandsynlighed har kontakt til det underliggende grundvand og sø til trods for søen er omgivet af 98% ler aflejringer. I Vængsø og Ejstrup sø i Midtjylland er det veldokumenteret fra målinger og feltstudier at den er betydelig belastet af P fra grundvand (Kazmierczak med flere 2021). Disse to søer er omgivet af aflejringer af marint sand, der er kendt for at indeholde fosforholdige mineraler, der over geologisk tid, sandsynligvis kan udvaskes til søerne. For Væng og Ejstrup søer gælder (modsat Nørresø), at Miljøstyrelsens belastningsberegning viser en positiv sum for P stoffjernelse (ingen grundvandsbidrag med P). Den kvalitative sandsynlighedsanalyse viser for både Vængsø og Ejstrup Sø en høj sandsynlighed for kontakt mellem søerne og den underliggende grundvandsforekomst. Med andre ord passer belastningsberegningerne for disse to søer ikke med det rent faktisk observerede grundvandsbidrag af P til søerne og resultatet af sandsynlighedsanalysen. Der er behov for en nærmere analyse af hvorfor Vængsø og Ejstrup sø ikke beregnes med negativ sum (P via grundvand) mens Nørresø gør. **Betragtninger fra disse få søer indikerer, at anvendelsen af belastningsmodellen til vurdering af søers vandbalance og potentielle grundvandsbidrag i bedste fald skal foretages meget forsigtigt.**



Figur 5.12: Miljøstyrelsens belastningsopgørelser for målsatte søer, hvor beregningen estimerer overskydende P i afløbet fra disse søer (også benævnt 'negativ sum') i afløbet fra 77 målsatte søer. P stofmængden er opgjort som summen af antal kg P for perioden 2000-2018 med P belastningsmodellen. Søerne er grupperet efter sandsynligheden (høj, moderat, lav-ingen) for kontakt mellem grundvandsforekomst og søerne (jf. Figur 4.1).

## 7. Datarepræsentativitet og sikkerhed på metoden

### 7.1 Fejl på vandbalancen

Ikke korrigeret nedbør til beregning af nedbør for søer vil typisk underestimere nedbøren med 20-30% (Allerup 1998). I dette projekt er anvendt korrigeret nedbør som også bruges i vandressourceopgørelsen med DK-modellen og for nyligt frigjort af DMI. Nedbør er for det meste lokalt varierende hvilket betyder, at en nedbørsopgørelse for en sø-lokalitet baseret på f.eks. DMI's 10 x 10 km nedbørsgrid (nedbørskorrigeret), er forskellig fra den aktuelle årsnedbør, som er faldet på direkte på søen. Forskellen mellem en aktuel årsnedbør ved en sø og den korrigerede årsnedbør fra 10 x 10 km produktet er også et resultat af den stationstæthed og interpolations rutine, som 10 x 10 km gridet er fremkommet af. Usikkerheden på anvendelse af korrigeret nedbør fra 10 x 10 km vurderes til ligge på 10 % på årsnedbør for en given sø.

Beregning af fordampningen fra sø overfladen indeholder usikkerhed. I nærværende arbejde anbefales at benytte den gridbaserede referencefordampning multipliceret med en sø faktor på 1,16. Således vil søfordampningen i gennemsnit være 16 % højere end referencefordampningen fra DMI's 20 x 20 km grid. Det er pt det bedste generelle grundlag for beregning af sø fordampning fra danske søer (som et årsgennemsnit for perioden 2001-2020), men udregninger viser også, at forskellen på referencefordampningen og den beregnede aktuelle søfordampning (MT tilgang) for de individuelle søer, typisk indeholder omfattende variation. Faktoren på 1,16 er altså et gennemsnit som dækker over en variation, hvilket betyder, at der er en usikkerhed på fordampningsestimatet for søerne baseret på referencefordampningen. Det vurderes at denne usikkerhed typisk er på 10-20 %.

Vandføringsmålinger fra ODA databasen er behæftet med en usikkerhed af ukendt størrelse. Usikkerheden er specielt knyttet til skift i instrument-typer til måling af vandføring ved hydro-meterstationer i NOVANA (Ovesen med flere 2023). Der forestår pt. et udredningsarbejde af DCE, hvor stor usikkerheden på vandføringsmålingerne er. Den overfladiske tilstrømning til søerne er behæftet med en yderligere usikkerhed da vandføringen i den overvejende del af de mindre vandløb, grøfter eller kildevæld der leder vand til søerne overfladisk ikke er målt. Det betyder at den overfladiske tilstrømning oftest må forventes at være underestimeret for de fleste søer. Hvor stor en andel denne umålte tilstrømning udgør af den overfladiske tilstrømning er ukendt, men må i de fleste tilfælde antages at være mindre end de målte tilløb repræsenteret ved VP3 vandløbene. Specielt i de af søerne der er vandløbs-domineret (sø-type B, Figur 5.2) vil det have en væsentlig betydning.

Grundvands-residualet i Tabel 6.1 er gjort sammenlignelig søerne imellem ved at dividere søens vandbalance led med søens areal og angive residualet i enheden mm/år. Usikkerheden på residualet er afhængigt af sø-typen for den målsatte sø (Figur 5.2).

## 7.2 Hvad er sikkerheden på bestemmelse af sandsynlighed for grundvandsindsivning

Søens geologi er udtrukket fra DK modellens hydrostratigrafiske model (FOHM) i 100m opløsning. Til denne metodeudvikling er geologien udelukkende udtrukket for de tre kategorier sand, ler og kalk. Da den bornholmske geologi i væsentlighed består af grundfjeld, er den bornholmske søer udeladt til denne metodeudvikling. Fejlen på den volumenmæssige fordeling af de tre bjergarter (sand/kalk/ler) kan estimeres ved at opgøre standardafvigelsen for de enkelte beregningsgrids og sammenholde med den summerede fordeling. Dette er ikke gjort i metodeudviklingsarbejdet men er muligt at gøre.

Sødybden er opmålt af Miljøstyrelsen. Middeldybden og maksimumdybden vurderes at være rimelig præcis og under alle omstændigheder væsentlig mere sikkert bestemt end sand/kalk/ler fordelingen i den geologiske model i DK-modellen og afstanden fra terræn til middeldybden af grundvandsforekomsten.

Afstand mellem middeldybden til grundvandsforekomsten og sø-dybderne (middel og maksimum) er behæftet med en mindre fejl der kan estimeres for hver 100m grid under søen med en standardafvigelse fra middeldybden til grundvandsforekomstens top til sø-dybderne. Det er ikke gjort i denne metodeudvikling, men er muligt at gøre.

## 7.3 Sikkerhed på metoden

Evalueringen af kontakten mellem grundvand og sø er foretaget ved at sammenligne grundvands residualen i vandbalancen for 32 testsøer med indplacering af testsøerne i konceptuelle sø typer og i en sandsynlighedsanalyse af kontakten mellem grundvand og sø. Specielt for søer med høj sandsynlighed for grundvandsindsivning er der god overensstemmelse med det beregnede grundvandsresidual. For søer med moderat sandsynlighed for grundvandsindsivning bliver dette til dels bekræftet i grundvands residualen. Der mangler i al væsentlighed testsøer af typen K3-M3 (Tabel 6.3) til at validere sikkerheden på metoden for disse søer, som må forventes at have en lav til ingen kontakt til grundvandet. Kun få testsøer har en lav til ingen sandsynlighed for kontakt, så det ikke muligt at lave en generel sikkerhedsvurdering af metodens egnethed for denne gruppe.

## 8. Konklusion og anbefalinger

Sandsynligheden for kontakt mellem grundvandsforekomst og sø kan vurderes for alle målsatte søer (ex. bornholmske søer) større end 1ha med en national kvalitativ sandsynlighedsanalyse baseret på søens geologiske forhold udtrukket fra DK modellen; søens dybdemæssige forhold (middeldybde og maksimumdybde), samt beregning af afstanden mellem overkanten af grundvandsforekomsten og søens middel- og maksimumdybde. Geologiske data er ikke udtrukket for bornholmske lokaliteter men det er muligt at gøre.

Fordampning (og nettonedbør) er beregnet med en ny fordampningsberegning. For 21 test-søer ses en anden fordampning beregnet med en mass transfer (MT) tilgang end ved udtræk fra referencefordampning genereret af DMI. Søerne viser op til 36 % højere fordampning eller et gennemsnit på 16 % større fordampning beregnet med MT tilgangen.

Vandbalancen kan vurderes for alle målsatte søer, hvor grundvands residualet kan beregnes. For de af de målsatte søer der mangler målt/modelleret vandføring af indløb/afløb kan vandbalancen ikke estimeres.

Der er testet en metode til kategorisering af søer i forhold til deres kontakt med grundvand med 32 test søer. Der er god overensstemmelse for søer med beregnet positiv grundvands-residual og høj sandsynlighed for kontakt mellem grundvandsforekomst og sø. For søer med et residual nær 0 er det ikke entydigt hvor vidt søerne har ingen/lav sandsynlighed for kontakt eller har et begrænset grundvandsbidrag. Endelig viser metoden, at for søer med beregnet negativ residual, er det nødvendigt at sammenholde sandsynligheden for om søerne har grundvandskontakt så sø-typen kan fastslås. Herefter kan sø-typen med rimelig sikkerhed vurderes. Det vurderes, at remote sensing metoden har et stort potentiale til at vurdere om søer har en betydelig grundvandsindstrømning. Det er ikke muligt med den foreslåede metode at skelne mellem grundvand der kommer fra nærmeste grundvandsforekomst eller terrænnært grundvand uden for grundvandsforekomsten.

### Anbefalinger:

- Det anbefales at der laves en kategorisering af overfladiske indløb/afløb fra alle VP3 søer med udgangspunkt i det korrigerede VP3 vandløbstema fra projektet 'Tilpasning af DK modellen'. Arbejdet kan udføres ved en simpel GIS analyse. Alle målte vandføringer fra stationer i [www.odaforalle.dk](http://www.odaforalle.dk) der ligger maksimum 1,5km fra søens kant kan anvendes i analysen. Vandføringsdata udtrækkes for perioder med minimum 5 års kontinuerte målinger (daglig basis).
- Det anbefales, at der laves et udtræk af søer uden indløb og afløb og grundvands residualet beregnes for disse søer.
- Det anbefales at der udtrækkes geologi for bornholmske søer, hvor grundfjeld udgør en af bjergartskategorierne.
- Det anbefales at der beregnes grundvands residual for 15 til 20 målsatte søer der repræsenterer feltet K3-M3 i Tabel 6.3.

- Det bør testes om det er muligt at benytte både komposit satellit (billede) data og direkte data fra enkelt satellitbilleder, specielt fordi direkte temperaturdata fra satellitter er i 60-120 m opløsning.
- Det bør undersøges ved hvilken minimum sø-størrelse de nuværende tilgængelige satellitdata kan anvendes til vurdering af grundvandsindstrømning.
- Det anbefales at anvende fordampningstal for danske søer udregnet som 1,16 gange DMI's referencefordampning.

## 9. Referencer

Allerup, P., Madsen, H. & Vejen, F. 1998. Standardværdier (1961-90) af nedbørskorrektio-  
ner. Teknisk rapport 98-10, Danmarks Meteorologiske Institut.

Aslyng, H.C. & S. Hansen (1982), Water balance and crop production simulation. Hydrotech-  
nical  
Laboratory. The Royal Veterinary and Agricultural University. Copenhagen. 200 pp.

Dingman S.L. (2008). Physical Hydrology, 2nd ed. Waveland Press Inc. ISBN: 978-1-57766-  
561-8.

EU (2000): Europa-Parlamentets og Rådets direktiv 2000/60/EF af 23. oktober 2000 om fast-  
læggelse af en ramme for Fællesskabets vandpolitiske foranstaltninger med senere ændrin-  
ger

GEUS (2023, in prep) Tilpasning af DK modellen. Miljøstyrelsen forsknings- og udviklings-  
projekt udarbejdet af GEUS.

Hansen AL og Wodschow IKH (2008). Undersøgelse af grundvandsstrømningen ved Ved-  
sted Sø. Institut for Geovidenkab og Naturforvaltning. Bachelorprojekt Februar-Maj 2008.

Jakobsen PR (1996). Distribution and intensity of glacialtectonic deformation in Denmark.  
Bulletin of the Geological Society of Denmark.Vol. 42, pp. 175- 185. Copenhagen 1996-02-  
01. <https://doi.org/10.37570/bgsc-1995-42-14>

Kazmierczak J, Nilsson B, Postma D, Sebok E, Karan S, Müller S, Czakaj J, Engesgaard P  
(2021). Transport og geogenic phosphorus to a groundwater-dominated eutrophic lake. Jour-  
nal of Hydrology 598 (2021) 126175.

Kidmose J. (2010). Groundwater - Surface water Interaction: From Catchment to Interfaces  
at Lakes and Streams. PhD afhandling. Københavns Universitet 2010.

Kidmose J, Nilsson B, Engesgaard P, Frandsen M, Karan S, Landkildehus DF, Søndergård  
M, Jeppesen E (2013). Focused groundwater discharge of phosphorus to a eutrophic seep-  
age lake (Lake Væng, Denmark): implications for lake ecological state and restoration. Hy-  
drogeology Journal, 21, 1787.-1802, DOI10.1007/s10040-013-1043-7

Miljøministeriet (2022). Retningslinjer for udarbejdelse af forslag til vandområdeplaner 2021-  
2027 (<https://mim.dk/media/231261/retningslinjer-for-udarbejdelse-af-forslag-til-vp3.pdf>).

Nilsson B, Søndergaard M, Johansson LS, Olesen A, Kazmierczak J, Thorling L, Trolborg  
L (2019). Vurdering af grundvandets kemiske og kvantitative påvirkning af søer. GEUS rap-  
port 2019/3.

Nisbeth CS, Jessen S, Bennike O, Kidmose J, Reitzel K (2019). Role of Groundwater-Borne  
Geogenic Phosphorus for the Internal P Release in Shallow Lakes. Water, 11,  
DOI10.3390/w11091783

Ovesen, N.B., Kronvang, B., Larsen, S.E. & Andersen, P.M. 2023. Betydning af skift i instrument-typer til vandføringsmåling ved hydrometrstationer i NOVANA. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 63 s. - Teknisk rapport nr. 258 <http://dce2.au.dk/pub/TR258.pdf>

Plauborg F., Refsgaard J.C., Henriksen H.J., Blicher-Mathiesen G., Kern-Hansen C. (2002). Vandbalance på mark- og oplandsskala. DJF rapport Markbrug nr. 70 april 2002.

Potapov, P., Hansen, M. C., Kommareddy, I., Kommareddy, A., Turubanova, S., Pickens, A., ... & Ying, Q. (2020). Landsat analysis ready data for global land cover and land cover change mapping. *Remote Sensing*, 12(3), 426.

Scharling M. 2001. Sammenligning af potentiel fordampning beregnet ud fra Makkinks formel og den modificerede Penman formel. DMI. Teknisk rapport 01-19.

Wilson, J., & Rocha, C. (2016). A combined remote sensing and multi-tracer approach for localising and assessing groundwater-lake interactions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 44, 195-204.

Wilson, J., Coxon, C., & Rocha, C. (2016). A GIS and remote sensing based screening tool for assessing the potential for groundwater discharge to lakes in Ireland. In *Biology and Environment: Proceedings of the Royal Irish Academy* (Vol. 116, No. 3, pp. 265-277). Royal Irish Academy.

Winter T, Rosenberry DO, Sturrock AM (1995). Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in the North Central United-States. *Water Resources Research*, 31, 983-993, doi:10.1029/94WR02537.



## Bilag 1 Fordampning fra Søer

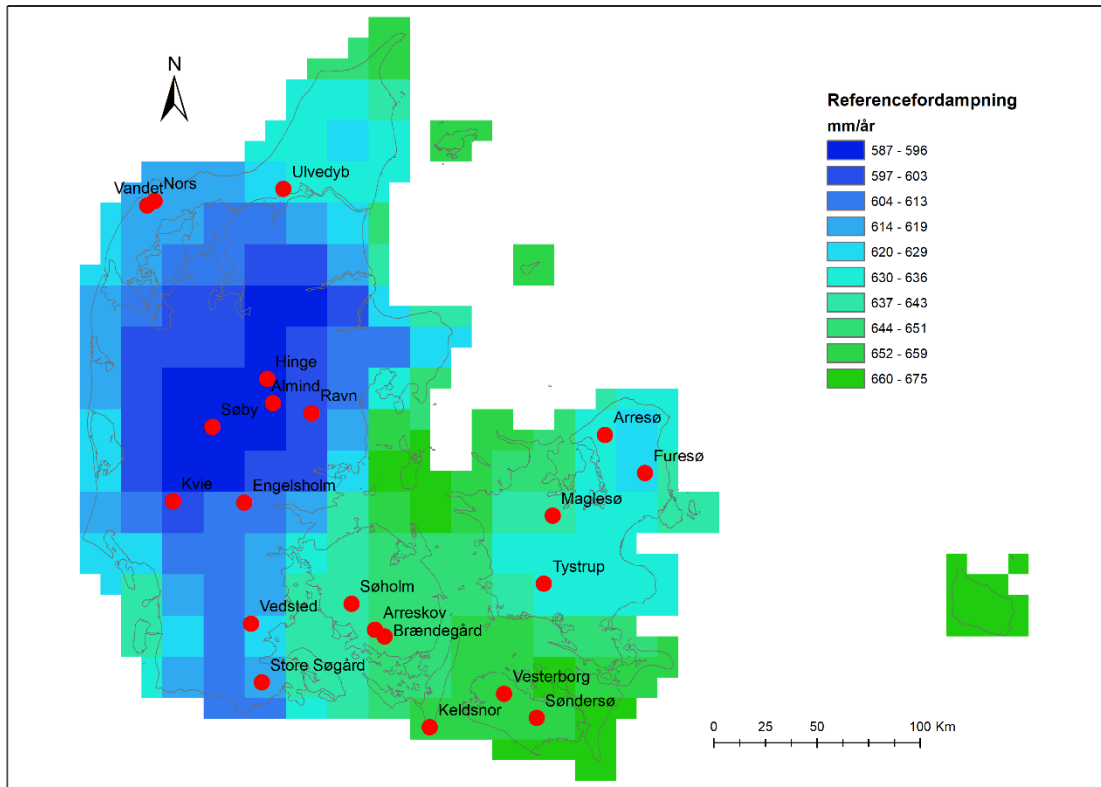
Tidligere er der til beregning af fordampning fra danske søer typisk benyttet DMI's reference fordampning, der udgives med daglige værdier i 20 x 20 km grid. Den er beregnet og defineret som den potentielle fordampning fra en kortklippet græsoverflade med frit tilgængeligt vand. Derfor er der som minimum et stort behov for at vurdere denne beregningsmetodes repræsentativitet af fordampningen fra søoverflade. I det følgende afsnit sammenlignes denne beregningsmetodes estimat af fordampning med mere korrekte fordampningsberegninger for en søoverflade. Beregninger af søtemperatur foretages for perioden 2001-2020 og gives som denne periodes gennemsnitlige årsværdier.

Til beregning af fordampning fra en sø er der flere forhold som er forskellige fra fordampning fra andre overfladetyper. Varmekonvektion i vandsøjlen og magasinering af varme i søen påvirker søens overfladetemperatur og dermed fordampningen (Dingman 2008). Udover det, har en vandoverflade også en anden ruhed og albedo end en vegetationsoverflade, hvilket også påvirker fordampningen. Ud fra disse betragtninger er det rimeligt at antage, at fordampningen fra en sø er forskellig fra en referencefordampning fra en græsoverflade. I Danmark har DMI fortaget beregninger af potentiel fordampning for en referenceoverflade af kortklippet græs med en modificeret Makkink ligning. Beregning af referencefordampning i 20 x 20 km gridværdier genereres og frigives løbende af DMI. Den modificerede Makkink-ligning, efter Aslyng og Hansen (1982), og defineres således:

$$ET_0 = 0.7 * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{R_g}{\lambda} \quad (\text{Lign. B1})$$

hvor  $R_g$  er daglig globalstråling,  $\Delta$  er hældningen på kurven for mættet vanddamptryk,  $\gamma$  er psykrometerkonstanten (som relaterer sig til den relative fugtighed) og  $\lambda$  er vands fordampningsvarme.

Således er referencefordampningen hverken påvirket af temperaturforskellen mellem søvand og luft eller vindhastighed. Ved at benytte en mass-transfer baseret beregning af fordampning fra en søoverflade, kan søtemperaturen og vindhastigheden inkluderes. For at teste hvordan den gridbaserede Makkink beregning (DMI) relaterer sig til fordampning fra danske søer, er der beregnet fordampning for 21 forskellige danske søer udvalgt efter geografisk og klimatologisk variation, med den mere korrekte mass-transfer (MT) beregning. Figur B1 viser som baggrundskort DMI's beregnede referencefordampning og placering af de 21 søer hvor den mere korrekte MT-beregning af søfordampning gennemføres.



Figur B1: Placering af 21 søer hvor fordampning er beregnet ved mass transfer (MT) tilgang. Baggrundskort er DMI's referencefordampning (gennemsnit for perioden 2001-2020) beregnet ved modificeret Makkinks formel (Aslyng og Hansen, 1982).

De 21 søer er beliggende i forskellige områder af Danmark for at inkludere geografisk repræsentativitet. For søerne findes observationer af søtemperaturen i større eller mindre grad. MT-beregning af søfordampning for de 21 søer er baseret på Dingman 2008:

$$E = 1.26 \cdot 10^{-3} \cdot v_a \cdot (e_s - e_a) \quad (\text{Lign. B2})$$

Fordampning fra søoverfladen (E) beregnes på daglig basis (m/dag), hvor  $v_a$  er vindhastighed i 2 meters højde (m/s),  $e_s$  og  $e_a$  er hhv. mættede dampe ved overfladetemperaturen  $T_s$  (søtemperaturen, °C) og det aktuelle damptryk (i Pa) og estimeres som:

$$e_s = 0.611 \cdot \exp\left(\frac{17.3 \cdot T_s}{T_s + 237.3}\right) \quad (\text{Lign. B3})$$

$e_a$  er damptrykket i luften givet som:

$$e_a = W_a \cdot e_a^* \quad (\text{Lign. B4})$$

Hvor  $W_a$  er den relative fugtighed (som ratio) og  $e_a^*$  er mættet damptryk ved en given temperatur (mættet damptryks kurve)

I en evaluering af 11 forskellige metoder til at bestemme søfordampning konkluderede Winter med flere (1995) at en mass transfer baseret fordampningsberegning kan anvendes, hvis gode temperaturdata for søen overfladetemperatur er tilgængelige.

For beregning af fordampning fra de danske søer med daglige værdier er der benyttet data for relativ fugtighed (DMI-stationer/daglige værdier), lufttemperatur (DMI 20 x 20 km grid/daglige værdier), vindhastighed (DMI 20 x 20 km grid/daglige værdier) og indsamlede temperaturdata for søernes overflade fra perioden 1989-2021. Sø fordampning på daglig basis er estimeret for perioden 2001-2020. Sø temperaturen er ikke målt dagligt, men typisk månedligt og derfor er månedsværdien, gennemsnit for alle målinger den givne måned, benyttet. Da der ikke har været tilgængelige temperaturdata for søerne med dagsværdier, kan det ikke vurderes om gennemsnitlige månedsværdier introducerer en fejl i beregning af daglig fordampning, men det skønnes ikke at være af væsentlig betydning. Gennemsnitsværdierne for hver måned er beregnet med brug af målinger fra 0 og til og med 1 meters vanddybde. For måneder hvor søtemperaturen ikke er målt, er månedsgennemsnittet for hele perioden 1989-2021 benyttet. Figur B2 viser benyttede sø temperaturer for fordampningsberegningen for 7 søer.



Figur B2: Sø temperatur for 7 danske søer i beregningsperioden. Månedsværdier.

Tabel B1 viser eksempel på to søer hvor målinger af søtemperatur er analyseret og hhv. fundet tilstrækkeligt til beregning af søfordampning (Arresø) og et dataset som er fundet utilstrækkeligt til beregning af søfordampning (Nørresø ved Maribo). Ved Arresø er målinger jævnt fordelt over hele perioden og for alle måneder, både for beregningsperioden (2001-2020) og hele måleperioden. De måneder i beregningsperioden som ikke har målte data er udfyldt med middelværdien for den givne måned for hele måleperioden. Middelværdien for hvor hver måned er angivet længst til højre i tabellerne. Således er værdier fra før beregningsperioden 2001-2020 også anvendt til udfyldning af manglende månedsværdier. For mange af de 21 søer, hvor der er beregnet søfordampning er det specielt gældende efter 2014/2015, hvor der kun er målt søtemperatur de enkelte måneder hvert andet år.

Tabel B1: Tilgængeligt målt data for søtemperatur  $^{\circ}\text{C}$  ved Arresø og Nørresø ved Maribo

Arresø

| År |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   | m |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |  |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|--|
| 1  | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |  |

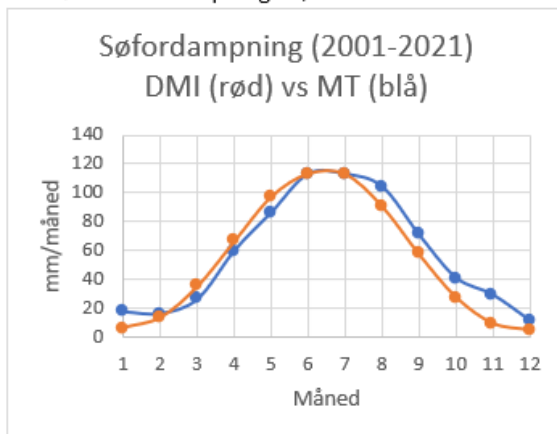
Nørresø ved Maribo

| År m | 1990 | 1992 | 1993 | 1994 | 1995 | 1996 | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2011 | 2016 | 2020 | *m |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| M    | 9    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 9  |
| A    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 13   |      |      |      | 14   | 10   |      |      | 13 |
| M    |      |      | 21   |      |      | 14   | 14   |      |      |      |      |      | 19   |      |      |      | 16   | 18   | 14   | 13   | 16 |
| J    |      |      |      | 16   | 18   | 17   |      |      |      |      |      |      | 19   |      |      | 16   | 20   | 21   | 19   | 21   | 18 |
| J    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 20   |      |      |      | 23   | 23   | 21   | 21   | 21 |
| A    | 16   | 20   | 18   | 17   | 15   |      | 24   | 19   |      |      |      |      | 22   |      |      |      | 21   | 19   | 20   | 24   | 20 |
| S    |      |      |      |      |      |      |      |      | 18   | 13   | 17   | 20   | 18   | 14   | 16   |      | 15   | 17   | 21   | 17   | 17 |
| N    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      | 8    |      |      |      | 4    | 4    |      |      | 6  |
| q*   | 13   | 20   | 19   | 16   | 17   | 15   | 19   | 19   | 18   | 13   | 17   | 20   | 18   | 14   | 16   | 16   | 16   | 15   | 18   | 19   | 17 |

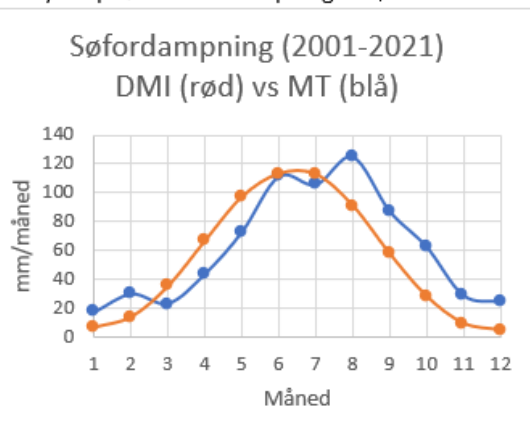
\*g er beregnede middelværdier for alle månedsværdier i perioden (horisontal) og årsmiddelværdier for perioden (vertikalt). Tabelværdier er kun vist som heltal i fremstilling mens observationer er målt og anvendt til beregninger med 2 decimaler for temperatur. Alle værdier er angivet i  $^{\circ}\text{C}$ .

Figur B3 viser forskel i gennemsnitlige månedsværdier for 20 års beregninger (2001-2020) af fordampning estimeret ud fra MT-tilgangen (Dingman 2008), og udtræk fra DMI's 20x20 km Grid produkt af reference fordampning for 7 af de 21 analyserede søer.

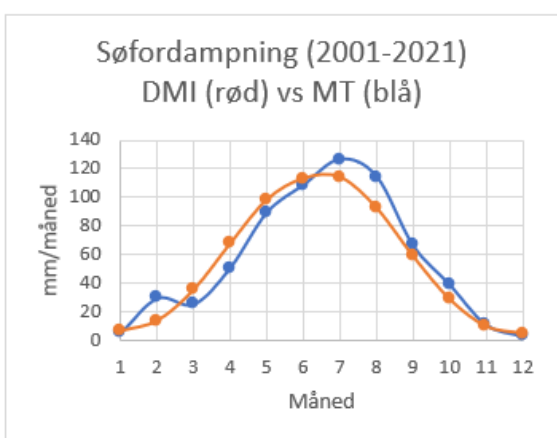
Arresø – Årsfordampning +7,6 %



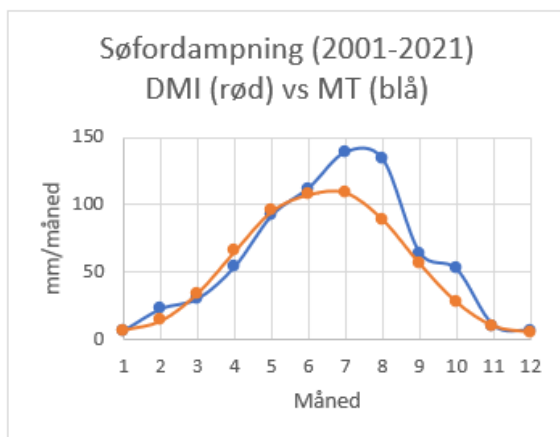
Tystrup sø – Årsfordampning +13,3 %



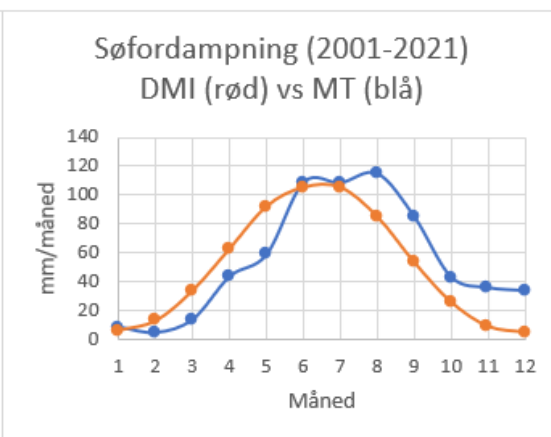
Brændegård sø – Årsfordampning +3,7 %



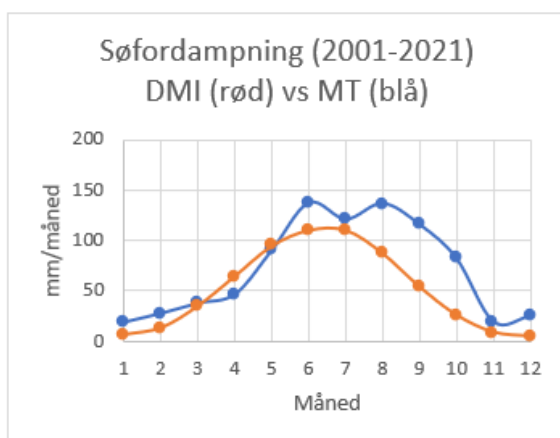
Vedsted Sø – Årsfordampning +13,9 %



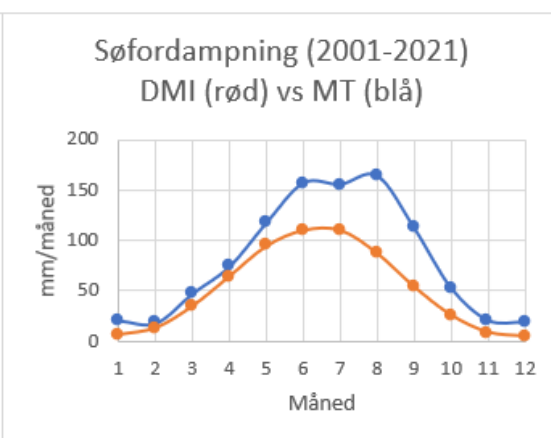
Almind sø – Årsfordampning +9,7 %



Vandet sø – Årsfordampning +28,6 %



Nors sø – Årsfordampning +36,3 %



Figur B3: Gennemsnitlig måneds-fordampning for 7 danske søer beregnet med mass-transfer MT baseret ligning (blå kurver og punkter) og sammenlignet med DMI 20x20 km gridværdi for potentiel fordampning (rød) baseret på modificeret Makkink.

De blå kurver viser gennemsnitlige månedsværdier fra MT-beregningen og de røde (orange) tilsvarende for DMI's referencefordampning. Figur B3 sammenligner således, på månedsopløsning, de MT-baserede estimer for søfordampning og DMI's estimerede referencefordampning for den gridcelle, som de enkelte søer ligger i.

Ud fra MT-beregning af fordampning sammenlignet med DMI referencefordampning kan det erkendes at:

- For alle søer ses en anden fordampning beregnet med MT tilgang end ved udtræk fra referencefordampning genereret af DMI. Søerne på Figur B3 viser mellem 4 og 36 % højere fordampning.
- Gennemsnitlig for alle 21 søer ses en 16 % større fordampning beregnet med MT tilgangen.
- DMI gridværdier overestimerer systematisk fordampning i foråret i forhold til beregnet søfordampning, mens der sker en underestimering i sensommer og vinter. Det skyldes sandsynligvis at søens vandtemperatur er længere om at stige end lufttemperaturen, og modsat i efteråret. MT-beregningen, som inkluderer disse data, har derfor

en mindre fordampning om foråret, hvor vandtemperaturen stiger langsommere end lufttemperaturen (mindre energi tilgængeligt). Om efteråret falder vandtemperaturen også langsommere, hvilket forøger fordampningen relativt.

Tidligere undersøgelser, dokumenteret i Scharling (2001), argumenterer for, at Makkink beregningen overestimerer beregning af potentiel fordampning i de vestlige egne set i forhold til den tidligere Penman baserede beregning. Den store forskel mellem den estimerede søfordampning (MT) og referencefordampningen fra DMI, udover søtemperaturen, er, at førstnævnte indeholder en vindkomponent, som beskriver transport af vanddamp væk fra fordampningsoverfladen. Det skaber en mere uens fordampning imellem søer med forskellig vindeksposering. MT-beregningen er måske lidt for sensitiv for denne vindkomponent. De to nordvestjyske søer, Norssø og Vandet sø har gennemsnitlige årlig fordampning på hhv. 36 og 29 % højere end referencefordampningen. Den gennemsnitlige forskel på 16 % højere fordampning beregnet ved MT-beregningen, dækker således over en store geografiske forskelle. Således viser MT-beregningen 1,16 gange højere gennemsnitlige værdier end DMI's referencefordampning.

Standardafvigelsen på beregning af gennemsnitfaktoren på 1,16 er 0,16, hvilket tydeliggør variationen i differensen mellem referencefordampningen og MT-beregningen af søfordampningen imellem de 21 søer. Til sammenligning med denne faktor på 1,16 kan nævnes, at den hidtil brugte faktor for national modellering i DK-modellen, er på 1,2. Den anvendte faktor i DK-modellen er baseret på vurdering af overfladekoefficienter i forhold til referencefordampningen (Plauborg med flere 2002). Det er også relevant for sammenligningen af DMI's referencefordampning og den estimerede søfordampning, at reference fordampningen er tiltænkt at repræsentere "potentiel fordampning fra et kortklippet græs, der er velforsynet med vand" (Plauborg med flere 2002), men nærværende beregning af søfordampning repræsenterer en aktuel fordampning fra en fri vandoverflade. Fordi en fri vandoverflade i princippet er velforsynet med vand, vil den aktuelle fordampning fra en sø være lig referencefordampningen gange en overfladekoefficient. Plauborg med flere (2002) vurderer, at koefficienten på 1,2 er dårligt undersøgt. Ved at benytte korrektionsfaktoren på 1,16 sammen med DMI's gridbase-rede referencefordampning, er der således generet en beregning af søfordampningen for hele Danmark. Produktet, vist i Figur 5.3 repræsenterer en middel årlig fordampning for perioden 2001-2020.

Beregningen af fordampning for danske søer, Figur 5.3, vurderes som et bedre grundlag til bestemmelse af søfordampningen end referencefordampningen. Med baggrund i 21 forskellige søer er en samlet årsfaktor på 1,16 bestemt uanset geografisk variation. Det vurderes ikke at være rimelige at benytte, endsige implementerer en geografisk variation af multifikationsfaktoren for søfordampning på nuværende tidspunkt, da grundlaget med beregning fra 21 søer ikke er tilstrækkeligt til en sådan variation af faktoren. Det er i midlertidigt tydeligt, jf. figur B3, at faktoren i praksis varierer fra kystnære og vindudsatte søer, til søer beliggende mindre vindudsat. Figur 4.6 viser en geografisk variation af søfordampningen mellem ca. 650 mm/år og til enkelte områder med søfordampning over 750 mm/år. Den relative lave variation hen over landet er drevet af den lave geografiske variation af referencefordampningen.

Beregningen af søfordampningen er baseret på månedsværdier for de 21 søer, mens alle andre data til beregningen er baseret på dagsmiddelværdier fra hhv. 20x20 km gridværdier (vindhastighed og temperatur) eller automatiske klimastationer (relativ fugtighed).

Hvis gode data for dagsdata søtemperaturen var tilgængeligt for danske søer med forskellige geografisk udbredelse, ville det være muligt at lave en reel vurdering af usikkerheden på fordampningsberegningen lavet ud fra måned data. På trods af denne store usikkerhed vurderes MT-beregningen troværdig end tidligere anvendt DMI referencefordampning.

Endeligt vil en decideret Penman-baseret beregning af søfordampningen kunne danne en optimal ramme for sammenligning med den her anvendte mass-transfer baserede søfordampning. Det er for nærværende ikke muligt beregne søfordampningen for eksempelvis de 21 søer ved en Penman-baseret beregning på grund af manglende data. En anden mulighed kunne være at benytte den energibaserede tilgang til søfordampning fra MIKE SHE SVAT.