

Identifikation af målsatte overfladevandsområder og GATØ

Lars Troldborg, Maria Ondracek & Bertel Nilsson

Identifikation af målsatte overfladevandsområder og GATØ

Lars Trolborg, Maria Ondracek & Bertel Nilsson

Rapportering til Miljøstyrelsens projekt

Identifikation af målsatte overfladevandsområder og GATØ

Forfattere

Lars Trolborg, Maria Ondracek, Bertel Nilsson

Indhold

Sammendrag (ikke teknisk resume)	7
1. Baggrund og formål	10
1.1 Formål	11
2. Den tilpassede DK-model	13
3. Identifikation af tilknyttede overfladevandssystemer og strømningsanalyse	14
3.1 Kontaktanalyse	14
3.2 Vandudvekslingen mellem grundvand og vandløb	16
3.3 Kystvande	18
3.4 Søer	18
3.5 GATØ	20
4. Vurdering af sø-konceptet	24
4.1 Kort beskrivelse af sø-konceptualisering	24
4.2 Vurdering af simulerede sø-vandstande	26
4.3 Søvandbalancer	30
5. Validering af sø-vandbalancer ("proof of concept")	34
5.1 Vurdering af overflade vandbalance komponenter	34
5.2 Beskrivelse af vandbalance komponenter	35
5.3 Modelberegnete vandbalancer sammenholdt med udvalgte testsøer	36
5.4 Sammenhæng mellem vandbalance, søgeologi og søtype	38
6. Opsummering	46
7. Konklusion	47
7.1 Anbefalinger	48
8. Referencer	49
Bilag 1	51

Ordliste

DK-model	Den Nationale Hydrologiske Model
DK-model2019	Seneste officielle release af DK-modellen i 500m opløsning (identisk med version brugt til seneste afgrænsning af grundvandsforekomster, seneste kvantitative tilstandsvurdering)
DK-model2023	Den tilpassede version af DK-modellen benævnes i dele af rapporten som ” DK-model2023 ” (arbejdstitel)
DK1-DK6	Del-områder i DK-modellen
GATØ	Grundvandsafhængige Terrestriske Økosystem
GEUS	Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland
Gi	Direkte grundvandstilstrømning til sø
GVF	Grundvandsforekomst
HIP	Hydrologisk Informations- og Prognosesystem
Målsat sø	VP3 sø målsat i tredje vandplanperiode 2021-2027
Målsatte vandløb	VP3 vandløb målsat i tredje vandplanperiode 2021-2027
Nret24	Projekt med deltagelse af GEUS og Aarhus Universitet om videreudvikling af den Nationale Kvælstofmodel til forbedret kvælstof-retentionskortlægning
OFGV	Overfladenær grundvandsindstrømning
Oi	Overfladisk tilløb til sø
Ou	Overfladisk afløb fra sø
Su	Søvandsudsivning til grundvand via søbund
VP3	Tredje vandplanperiode 2021-2027
Grundvand	Alt vand under jordoverfladen i den mættede zone i direkte kontakt med jord eller undergrund (som ikke er rørført)
Vandløbstværsnit	Tværsnit af et vandløb, som viser vandløbets bredde, dybde og form på et bestemt sted
Magasin	Afgrænset geologisk formation med vandførende egenskaber, fx grus, sand eller kalk.
Grundvandsforekomst	Afgrænset volumen grundvand indenfor et eller flere magasiner

Sammendrag (ikke teknisk resume)

Projektet har til formål at etablere koblingen mellem grundvandsforekomster og tilknyttede overfladesystemer, herunder grundvandsafhængige terrestriske økosystemer (GATØ) og overfladevandområder, for at kunne foretage en fyldestgørende karakterisering af grundvandsforekomsterne.

Koblingen er målrettet de krav, som findes til karakterisering af grundvandsforekomsterne i vandrammedirektivet, og opfylder dermed ikke nødvendigvis de krav, som der måtte være til eksempelvis vurderingen af, om nye aktiviteter kan udgøre en risiko for målopfyldelse af målsatte vandområder eller beskadigelse af beskyttet natur.

Efter en indledende karakterisering i Basisanalysen til vandområdeplanerne foretages en yderligere karakterisering af de grundvandsforekomster eller grupper af grundvandsforekomster, der anses for at være truet, så risikoen omfang kan vurderes mere præcist, og det bliver muligt at identificere de foranstaltninger, der skal træffes i henhold til direktivets artikel 11 (Indsatsprogrammet). Den yderligere karakterisering skal således omfatte relevante oplysninger om den menneskelige aktivitets indvirkning og, hvor det er relevant, oplysninger om:

- en oversigt over tilknyttede overfladesystemer, herunder grundvandsafhængige terrestriske økosystemer og overfladevandområder, som grundvandsforekomsten er dynamisk forbundet med
- skøn over retninger og omfang af vandudvekslingen mellem grundvandsforekomsten og de tilknyttede overfladesystemer.

Nærværende rapportering er en sammenfatning af arbejdet med at lave nye beregninger og skøn af kontakt, gradient og flux mellem grundvandsforekomster, overfladevandssystemer og GATØ. Der er taget udgangspunkt i konceptualisering af kontakten mellem grundvand, vandløb og søer i den tilpassede DK-model (DK-model2023) rapporteret i Ondracek med flere (2023). Simuleringer med DK-model2023 viste i første omgang resultater som ikke var tilfredsstillende og indikerede et behov for yderligere justeringer af sø konceptet der er beskrevet nærmere i denne rapport. Beregningerne af kontakt, gradient og flux i nærværende projekt er baseret på en rekalkuleret modelopsætning af Nret24 modellen der indeholder det ny VP3 vandløbsnetværk og søer.

Kontakten og vandudveksling mellem grundvand og vandløb er bestemt som specifik tilstrømning på delstrækninger (l/sek/km), samt med angivelse af om de enkelte delstrækninger har direkte kontakt til og opadrettet strømning fra det øverste magasinlag. Herudover er der indenfor en 100m buffer af alle VP3 vandløbsstrækninger beregnet til/frastrømning til øverste beregningslag, til/frastrømning fra magasinlaget, samt lavet en beregning af den relative magasin tilstrømning ift. den totale tilstrømning inden for bufferzonen (100m). Den opadrettede strømning repræsenterer en proxy for en gennemsnits grundvandstilstrømning, om end noget af den opadrettede strømning må forventes at strømme til dræn før det rammer vandløbet.

Kontakt og vandudvekslingen mellem grundvandsforekomster og søer er bestemt ved modelsimulerede opadrettede vandstrømninger (flux) fra øverste magasin under sø-arealet og en angivelse af hvor stor en andel denne udgør af søens samlede grundvandstilstrømning mellem modellens beregningslag 1 og 2 under sø-arealet, samt en simpel afstandsvurdering mellem sø-bunden og toppen af øverste magasin. For alle søer indbygget i modellen er der udført en sammenligning mellem modellens simulering af søvandstand og den ”målte” sø vandstand til belysning af begrænsninger og usikkerheder på det valgte sø koncept. Simulerede søvandstande i forhold til initielle søvandstande viser en forskel på under 1m for alle målsatte søer ≥ 10 ha i 83 % af tilfældene (417 søer) og for målsatte søer < 10 ha i 85% (358 søer) med det nuværende søkoncept, hvilket er rimelig tilfredsstillende. Af alle de målsatte søer har kun 32 søer en negativ forskel på simuleret og initiel søvandstand, dvs. søen ”taber vand” – uden dog at søerne tørlægges helt. Der er væsentligt flere af de små søer som simulerer en forhøjet søvandstand (positiv difference i søvandstand) end de søer ≥ 10 ha. Årsagen til dette er ukendt.

For alle VP3 søer er der lavet modelberegninger af vandstrømninger som indgår i søens vandbalance. Modelberegnete vandbalancer er blevet sammenlignet med vandbalancer bestemt ved feltundersøgelser i fem testsøer: Nørresø, Hampen sø, Vængsø, Skærsø og Store Gribso (alle VP3 søer større end 10 ha). Grundvandsbidraget bestemmes med modellen i forhold til feltmålinger og viser at for ingen af de fem testsøer er feltmålinger og modelopgørelser i perfekt overensstemmelse. I vandbalancen for Hampen sø, Nørresø og Vængsø udgør summen af den modelbestemt grundvandsindsivning (G_i) og overfladenære grundvandstilstrømning (OFGV) hhv. 13,2 % (Hampen sø), 49,4% (Nørresø) og 78,1 % (Vængsø) af den feltbestemte grundindsivning. Det modelberegnete grundvandsbidrag til de mindste søer Skærsø og Store Gribso (begge ca. 10 ha) er beregnet til at være 6-7 gange højere end grundvandsbidraget bestemt med feltmetoder. Simuleringerne viser at næsten hele grundvandsbidraget beregnet med modellen kommer fra den overfladenære grundvandskomponent (terrænnært grundvand, dræn, grøfter og kildevæld), hvilket er i god overensstemmelse med feltiagttagelser.

Sammenligningen mellem model og feltstudier indikerer en rigtige tendens med vandets strømningsretning (gradientforhold) til og fra søerne. Resultaterne viser at størrelsen af den modelberegnete vandflux til Nørresø og Vængsø er sammenlignelig med feltmålinger, mens modellen underestimerer grundvandsbidraget væsentligt i forhold til Hampen sø. Omvendt overestimerer modellen grundvandsbidraget ganske væsentligt for de to mindre søer Store Gribso og Skærsø beliggende i lerede oplande. Det er ikke umiddelbart muligt med den anvendte metode at vurdere usikkerheden på modelberegningerne af grundvandsbidraget, da det ikke kan afgøres om forskellen i grundvandsbidrag mellem felt og model alene kan forklares med modelusikkerhed eller om visse feltundersøgelser undervurderer den helt terrænnære tilstrømning af grundvand fra kildevæld, vådområder eller dræn. Yderligere vides det ikke om det er muligt med den nuværende viden eksempelvis at ekstrapolere til andre søer uden data eller vurdere om modellen performer bedre for nogle sø-typer end for andre.

Grundvandsforekomsterne og GATØ er blevet koblet efter samme principper som søer, dog med ekstra information om det tilknyttede habitatområde, typisk defineret ved ådale, kystnære arealer eller mindre sø-oplande, der hver især kan indeholde en mosaik

af GATØ arealer. Der er beregnet strømningsretning af grundvand tilknyttede magasiner og til øverste beregningslag under de enkelte GATØ, således at man i princippet kan bestemme grundvandsforekomstandelen af tilstrømningen til de enkelte GATØ på 100x100m skala (i stil med søerne). Det må forventes at den relativt lille skala GATØ er opgjort på vil påvirke usikkerheden for de enkelte forekomster markant, måske i en sådan grad at det ikke giver mening at anvende gradientretning og eller vandfluxe under de enkelte GATØ i det eksisterende modelsetup.

Der arbejdes videre i GATØ projektet (*Kemisk og kvantitativ påvirkning af GATØ*) med koblingen af GATØ og grundvandsforekomsterne på flere (mindre) rumlige skalaer fra økosystemskala til enkelt GATØ. Dette arbejde afleveres ultimo 2024. GATØ projektet udføres i samarbejde mellem GEUS og DCE/AU.

1. Baggrund og formål

EU's vandrammedirektiv forpligtiger medlemslandene til at vurdere om menneskelige påvirkninger af grundvandsforekomsterne hindrer opnåelse af miljømålet, eller væsentligt forringer tilstanden i tilknyttede overfladevandområder (vandløb, søer og kystvande) og grundvandsafhængige terrestriske økosystemer (GATØ). For de grundvandsforekomster der anses for at være truet af manglende målopfyldelse skal der laves en *yderligere karakterisering* af grundvandsforekomstens kontaktforhold til overfladevand og GATØ.

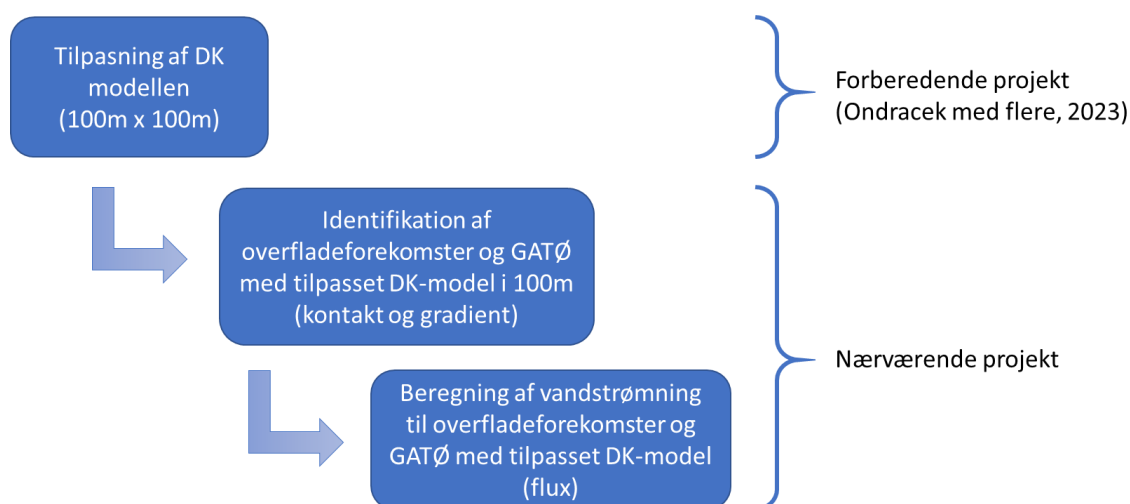
I forbindelse med Miljøstyrelsens beskrivelse og vurdering af grundvandets påvirkning af overfladevandområder og GATØ til vandområdeplanerne for tredje planperiode 2021-2027 (VP3) har der vist sig udfordringer med at kvantificere sammenhængen mellem grundvandsforekomsterne, målsatte overfladevandsområder og GATØ ved modellering med Den Nationale Hydrologiske Model (DK-model). Med udgangspunkt i metodeudviklingen fra DK-model HIP (Hydrologisk Informations- og Prognose system) (Henriksen med flere 2021) er der foretaget en opdatering af vandløbsnetværket i DK-modellen til at inkludere samtlige af de VP3 målsatte vandløbstrækninger der kan indarbejdes i et 100 m grid, samtidig med at modellens horisontale diskretisering nedskaleres fra 500 m x 500 m til 100 m x 100 m (Ondracek med flere 2023).

Simuleringer med den tilpassede DK-model i 100m versionen bruges til beregning af kontakt, gradienter og vandfluxe mellem grundvand og søvand og er i nærværende projekt anvendt til identifikation af tilknyttede overfladevandområder og GATØ, som grundvandsforekomsten er dynamisk forbundet med, samt give et skøn over gradienten til de identificerede områder. Derudover omfatter opgaven en beskrivelse af metoder til at vurdere omfanget af vandudvekslingen mellem grundvandet og overfladevandområder samt GATØ. Der er udarbejdet:

- en oversigt over tilknyttede overfladvandsområder samt GATØ, som grundvandsforekomsten er forbundet i en ikke-stationær (dynamisk) modelopsætning i den tilpassede DK-model.
- skøn over retninger og omfang af vandudvekslingen mellem grundvandsforekomsten og de tilknyttede overfladevandområder og GATØ.

Sammenhængen mellem det arbejde der er lavet med tilpasning af DK-modellen rapporteret i Ondracek med flere (2023) og nye beregninger af kontakt, gradient og flux mellem grundvandsforekomst og overfladevandssystem eller GATØ er vist i Figur 1. Opgaven indeholder overordnet set de tre elementer:

1. Identifikation af tilknyttede overfladevandssystemer og GATØ (kontakt)
2. Skøn over strømningsretninger (gradient)
3. Beskrive forslag til metoder til estimering af omfanget af vandudvekslingen (flux)



Figur 1: Projektsammenhænge mellem modellering af vandudvekslingen mellem grundvand-overfladevand og GATØ i VP3 regi (2022-2023) rapporteret i Ondracek med flere (2023), og nærværende projekts beregning af kontakt, gradient og flux med tilpasset DK-model for vandløb, søer og GATØ.

1.1 Formål

Det er projektets formål at sikre, at der udarbejdes en metode til at identificere og udarbejde en oversigt over grundvandsafhængige terrestriske økosystemer (GATØ) og overfladevandområder, som grundvandsforekomsterne er dynamisk forbundet med, samt at vurdere om strømningsretningen (opadrettet eller nedadrettet) er i overensstemmelse med direktivets minimumskrav til den *yderligere karakterisering* af grundvandsforekomster. Derudover skal der i projektet beskrives et forslag til metoder, der kan være anvendelige ift. at foretage et skøn over omfanget af vandudvekslingen for hhv. overfladevand (vandløb, søer, kystvande) og GATØ ¹. Det skal bemærkes at den geologiske model for områder beliggende under kystvande er særdeles usikker og at der ikke er afgrænset grundvandsforekomster der strækker sig ud under havet.

Formålet med koblingen mellem grundvandsforekomster og tilknyttede overfladesystemer, herunder grundvandsafhængige terrestriske økosystemer og overfladevandområder, er at kunne foretage en fyldestgørende karakterisering af grundvandsforekomsterne. Koblingen er dermed målrettet de krav, som findes til karakterisering af grundvandsforekomsterne i vandrammedirektivet, og opfylder dermed ikke nødvendigvis de krav, som måtte være til eksempelvis vurderingen af, om nye aktiviteter kan udgøre en risiko for målopfyldelse af målsatte vandområder eller beskadigelse af beskyttet natur.

Formelt skal der efter en indledende karakterisering i Basisanalysen til vandområdeplanerne foretages en yderligere karakterisering af de grundvandsforekomster eller grupper af grundvandsforekomster, der anses for at være truet, så risikoens omfang kan vurderes

¹ Jf. vandrammedirektivets art. 2, nr. 2, 11 og 12, som implementeret i dansk ret i §3, nr. 3, 12 og 13 i lov om vandplanlægning, jf. lovbekendtgørelse af 26. januar 2017 af lov om vandplanlægning.

mere præcist, og det bliver muligt at identificere de foranstaltninger, der skal træffes i henhold til vandrammedirektivets artikel 11 (Indsatsprogrammet). Den yderligere karakterisering skal således omfatte relevante oplysninger om den menneskelige aktivitetes indvirkning og, hvor det er relevant, herunder identifikation af tilknyttede overfladevandssystemer og GATØ der er i hydraulisk kontakt med grundvandsforekomsterne.

2. Den tilpassede DK-model

I tilpasningsprojektet af DK-modellen (DK-model2023) blev der lavet en væsentlig udvidelse af vandløbsnetværket i forhold til DK-model2019 (Ondracek med flere 2023). Herudover blev der indarbejdet en lang række modelændringer baseret på erfaringer fra HIP projektet (Anon, 2023) og den nationale nitrat retentionsmodel (Nret24) beskrevet i Højberg med flere (2021). Modelændringerne omfatter arealanvendelse, jordtyper og dræningsopsætningen. Formålet med at inkludere VP3 målsatte vandløbsstrækninger og søer i DK-modelopsætningen er at der kan udføres modelberegninger af kobling mellem grundvand - overfladevand og GATØ for hele landet.

I forhold til at vurdere kontakten mellem grundvand, søer og GATØ var det især DK-modellens diskretisering i den horisontale opløsning på 500 m der gav udfordringer. Dels er mange af de målsatte søer og GATØ meget mindre end den rumlige opløsning på 500 m og dels vurderes den rumlige opløsning i DK-model2019 til at være for grov til at beregne kontakten mellem grundvand og søer med et areal mindre end 100ha. Tabel 1 opsummerer de væsentligste forskelle mellem DK-model2019 og den tilpassede anvendte DK-model (DK-model2023) i dette projekt.

Tabel 1: Oversigt med overordnede forskelle mellem DK-model2019 (Stisen med flere 2019) og DK-model2023 (Ondracek med flere 2023).

Modelopsætning	DK-model2019	DK-model2023 (Tilpasset til VP3 i 100m)
Skala	500m	100m
Vandløbsnetværk	Ca. 16.500 km vandløb. Lækage koefficient svarende til den dominerende jordtype (sand/ler/tørv).	Ca. 23.600 km vandløb. Lækage koefficient svarende til den dominerende jordtype (sand/ler/tørv).
Søer	44 søer beskrives med brede vandløbstværsnit, fastholdt sø vandstand (Q-h relation) og lækagekoefficient svarende til den dominerende jordtype (sand/ler/tørv).	Søer > 10ha beskrives med unik sø-branch, smalle tværsnit og kobling til grundvandsmodulet MIKE SHE med lækage koefficient 10^{-8} m/s. Sø-bathymetri inkluderet i modeltopografien og sø-vandstand inkluderet som vand på terræn (detention storage).
GATØ	Ingen beskrivelse	<i>Rapporteres i GATØ projektet (Kemisk og kvantitativ påvirkning af GATØ)</i>
Arealanvendelse	Statistisk fordeling af afgrødetyper opgjort på kommune niveau	Klimatologi på baggrund af MODIS data
Jordtyper	Parametriseret per DK-model område	Én parametrisering på tværs af alle områder.
Dræn	Differentiering af drændybde og dræntidskonstant baseret på arealanvendelse, topografisk variabilitet samt jordtyper	Distribueret dybde og tidskonstant (T_c), skaleret T_c efter 100 m vandløbs netværk
Geologi og beregningslag	Geologi fra FOHM. Beregningslag 11 (delområde DK1 og 2 i DK modellen), 9 (delområde DK3), 22 (delområde DK4 og 5) 18 (delområde DK6). Parameter-værdier beskrevet i DK-model2019 rapport	Geologi identiske med DK-model2019. Parameter-værdier fra afsluttet Nret24 kalibrering i 500m.

3. Identifikation af tilknyttede overfladevandssystemer og strømningsanalyse

Der er lavet beregninger der skal kunne bruges til vurdering af potentiel kobling mellem grundvand og overfladevand (søer og vandløb), samt grundvandsafhængige terrestriske økosystemer (GATØ). Beregningerne er delt op i en identifikation af tilknyttede overfladevandssystemer (kontakt og gradient analyse) og en vandstrømningsanalyse, hvor omfanget af vandudvekslingen estimeres.

Identifikation af tilknyttede overfladevandssystemer tager udgangspunkt i at for at der kan være direkte strømning mellem grundvandsforekomster og overfladevandsforekomster, GATØ og kystvande, så skal der dels være kontakt mellem disse, dels vurderet ud fra en simple afstandsvurdering mellem magasiner og de tilknyttede overfladevandsforekomster/GATØ, og dels være hydraulisk kontakt fra magasinet mod overfladevandsforekomst/GATØ, vurderet ud fra om der er opadrettet strømning fra magasinet.

Strømningsanalysen forsøger at sætte tal på størrelsen af den grundvandsstrømning der er fra grundvandsforekomsterne mod overfladevandsforekomsterne/GATØ relateret til den totale grundvandstilstrømning til overfladevandsforekomsterne/GATØ. Grundvandsstrømningen er vurderet ud fra strømningsberegninger i DK-modellen mellem grundvandsforekomster og overfladevandforekomster/GATØ.

For vandløbsstrækninger er der desuden gennemført beregninger af relativ tilvækst i "baseflow" opgjort som den del af afstrømningen der overskrides 90 % af tiden (Q90) i perioden 2001-2020.

3.1 Kontaktanalyse

Analysen af grundvandsforekomsternes kontakt til overfladevandselementer består af fire dele. Del et, to og fire er stort set identiske med en tidligere procedure beskrevet af Troldborg (2014) om kontakten mellem grundvandsforekomster og overfladevandsforekomster, mens del tre inddrager en analyse af om de enkelte forekomster har opadrettet eller nedadrettet flux:

Første del bestemmer hvilke arealer der har mindre end tre meter afstand mellem de laveste områder af terrænoverfladen ($10 \times 10 \text{ m}^2$ grid) indenfor et $100 \times 100 \text{ m}^2$ grid og magasinernes overflade, hvor magasinerne er afgrænset i et $100 \times 100 \text{ m}^2$ grid, samt hvor der samtidigt er opadrettet strømning fra magasinet.

Beregningsmæssigt er der dannet en minimums terræn model hvor hvert $100 \times 100 \text{ m}^2$ grid er tildelt den mindste værdi fra en $10 \times 10 \text{ m}^2$ aggregeret raster udgave af Danmarks højdemodel, hvor sø bathymetri/sø middeldybde for alle VP3 målsatte søer større end

10 ha er indarbejdet. Der gennemføres herefter på gridniveau analyse af om dette minimums topografiske grid (100m) ligger mindre end tre meter over toppen af de enkelte magasinlag (100m grid) og at der enten er opadrettet gennemsnitsstrømning (for perioden 2001-2020) hen over toppen af de enkelte magasinlag eller at der er direkte (horizontal) tilstrømning til en vandløbsstrækning fra de enkelte magasinlag (100m grid). Resultatet af analysen er et binært grid for hvert magasinlag hvor et angiver at der er lille afstand og opadrettet strømning (benævnt dkm_x_terr, hvor x angiver magasinlaget, f.eks. ks1).

For vandløb og GATØ er der ikke indarbejdet bathymetri data i topografien, da disse ikke eksisterer på gridformat. Vandløb modelleres i DK-modellen som linje elementer (1D), hvor vandspejlet i vandløbet primært bestemmes ud fra simuleret vandføring i type tværsnit eller opmålte tværsnit. GATØ er ikke indarbejdet eksplicit i DK-modellen. Modelberegnet strømninger indenfor GATØ områder vil således være bestemt af de lokale hydrogeologiske forhold, som overjorden, jordarten i jordartskortet, lokal topografisk variation og trykforhold i de dybere magasinlag.

Anden del bestemmer fællesmængden af områder med mindre end tre meters afstand til terræn og opadrettet strømning (binært grid fra første del) og områder defineret som tilhørende magasiner. Rent praktisk dannes et polygontema med information om de lagspecifikke resulterende binære grid (dkm_x_terr) hvilket klippes med tilsvarende magasiner afgrænsninger (polygon) indenfor de specifikke lag (f.eks. magasiner indenfor KS1). De resulterende polygontemaer navngives (dkm_x_TerrPolClip) og gemmes internt i proceduren og samles efterfølgende til et landsdækkende polygontema (dkm_TerrClipGVF). Herved samles alle områder med magasiner som hvor afstanden til terræn er mindre end tre meter og med opadrettet strømning indenfor magasinet.

Tredje del bestemmer fællesmængden mellem overfladevandselementer (vandløb, søer og GATØ) og de områder af magasinerne med lille afstand til terræn og opadrettet gradient (dkm_TerrClipGVF). Teknisk set udføres en "Identity" analyse, hvorved information om magasinnummer og grundvandsforekomstnummer stemples ind i overfladevand temaerne indenfor de områder af magasinerne med lille afstand til terræn.

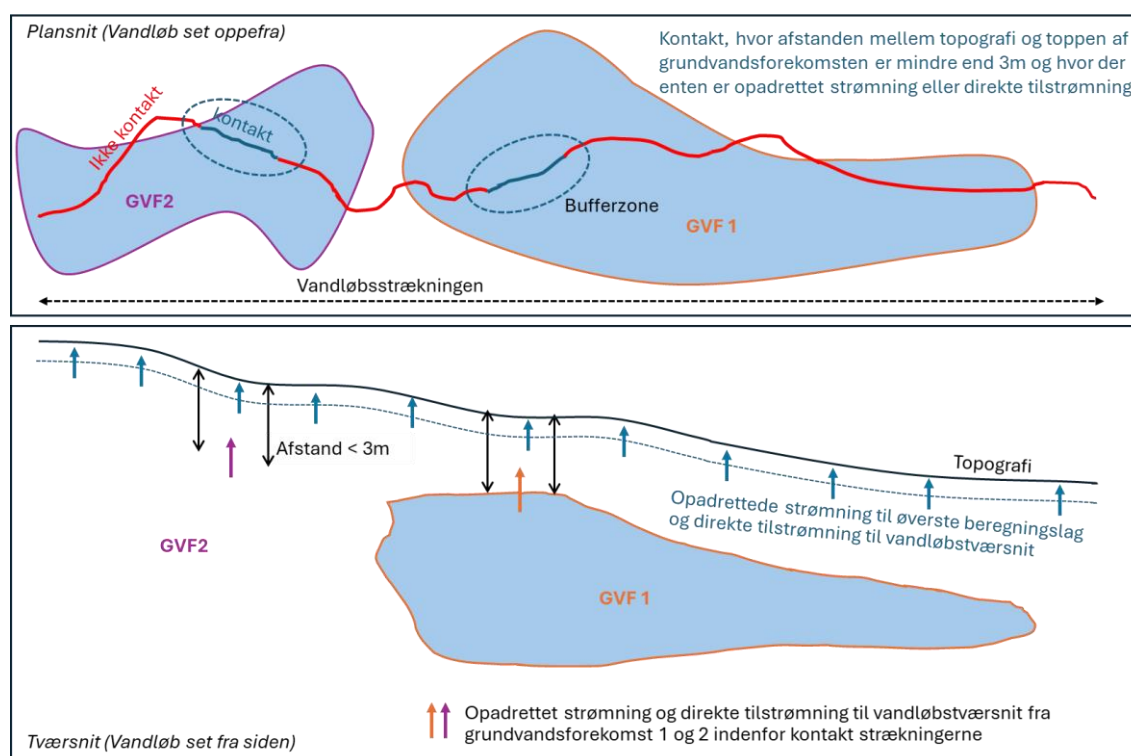
Kontakten er samlet i shape filer for de enkelte overfladevand elementer (vandløb, søer og GATØ, benævnt x_ident_gvd, hvor x angiver overfladevandtypen, fx 'Rivers') med angivelse af hvilke delstrækninger/areal som har direkte kontakt og opadrettede strømning fra det øverste magasinlag (Tabel 2). Herudover er kontakt arealet summeret for de enkelte magasiner og indskrevet i et tema med grundvandsforekomster (dkm_gvf_mkontakt)

Herudover er der indsat data fra flux beregninger (se de næste afsnit) indenfor en 100m buffer af alle VP3 vandløbsstrækninger, samt for alle sø og GATØ, beregnet tilstrømning til øverste beregningslag, tilstrømning fra magasinlaget, samt lavet en beregning af den relative magasin tilstrømning ift. den totale tilstrømning.

3.2 Vandudvekslingen mellem grundvand og vandløb

For vandløb bestemmes både vandudveksling mellem MST-vandløbstemaet og alle vandløb indplaceret i DK-modellen. Som beskrevet i Ondracek med flere (2003), vil der være mindre forskelle i placering og navngivning mellem MST temaet og DK-model indarbejdelsen, som primært afspejler at de enkelte vandløb i DK-modellen skal være hydrologisk sammenhængende med en strømningsretning, sekundært at der selv i 100m model grid vil være mindre strækninger som ikke er indarbejdet (Ondracek mf., 2023).

Indenfor en 100m buffer af alle VP3 vandløbsstrækninger (MST vandløbstema) er der beregnet den opadrettede strømning til øverste beregningslag samt den samlede direkte tilstrømning til vandløbstværsnit. Indenfor en buffer af hver af kontakt strækningerne er der tilsvarende lavet en beregning af den opadrettede flux – og direkte tilstrømning fra kontakt magasinet. Den relative tilstrømning fra de enkelte kontakt strækninger er beregnet som forholdet mellem tilstrømningen fra de enkelte magasiner for kontakt strækninger og tilstrømningen fra hele VP3 vandløbsstrækningen, se Figur 2



Figur 2: Principskitse for grundvandsforekomst kontaktvurdering og strømningsberegninger (flux) for vandløb. Indenfor en buffer af 100m af hele vandløbsstrækningen opgøres den samlede tilstrømning (vertikal flux og horisontal flux til vandløbsbunden) øverste lag, mens der indenfor en 100m buffer af kontakt strækningerne opgøres den samlede magasinspecifikke tilstrømning.

Den opadrettede strømning plus den direkte strømning til vandløb i modellen repræsenterer en proxy for en gennemsnits grundvandstilstrømning, om end noget af den opadrettede strømning må forventes at strømme til eventuelle dræn indenfor ådalene, før det rammer vandløbet. Hertil vil der også være en helt terrænnær tilstrømning af vand som

ikke har været forbi eller indgår i grundvandsforekomsterne. Årsagen til, at der ikke kun tages udgangspunkt i den modelberegnete direkte tilstrømning til vandløbstværsnittene, er dels, at tværsnittene mange steder kun når ned til det øverste beregningslag, hvilket betyder, at den direkte tilstrømningsberegning kun sker i dette lag, og dels at både tværsnitsudformningen og den rumlige placering er meget usikre. Resultaterne fra buffer beregningen er indsat i tabellen med de beregnede kontakt relationer (Tabel 2).

Tabel 2: Indhold af shape fil for delstrækninger med kontakt og gradientforhold mellem grundvandsforekomster og overfladevand forekomster (søer/Gatø/vandløb)

Field Name	Data Type	Description
OBJECTID	Object ID	Object ID
Shape	Geometry	geometry type
shape_Area	Float	Contact Area (not rivers)
shape_length	Float	Contact perimeter (Contact length for rivers)
ov_id	Text	MST ID for surface water body (SWB)
mstid_stoe	Float	SWB area (SWB river section length)
magasinid	Text	Contact aquifer id
GVForekom	Text	groundwater body id (of contact aquifer)
GWBcode_WF	Text	WaterFramework directive Groundwater body id
dkmlag	Text	dkm layer (contact aquifer)
flux_dkmlag	Float	upward flux from contact aquifer [mm/year]
flux_lag12	Float	upward flux to top layer [mm/year]
Aq2r_dkmlag	Float	Direct flux from contact aquifer to contact river section (only rivers)
Aq2r_all	Float	Direct flux from all layers to SWB river section (only rivers)
RelFlux	Float	Relative flux contribution from contact area $\text{Flux_dkmlag} / \text{Gvd_lag12} * \text{shape_area} / \text{mstid_stoe}$ (flux+aq2r and shape_lenght for rivers)
Aktid	Float	MST Aktid for Groundwater Dependent Terrestrial Eco Systems (only for GDTES)
Naturtype	Text	GDTES type (only for GDTES)
hab_nr	Float	MST id for the habitat area (only for GDTES)
hab_navn	Text	MST name for the habitat area (only for GDTES)

For vandløbspunkter er der som supplement til buffer beregningerne gennemført en beregning af baseflowtilvæksten for vandløb (DK-model vandløb) er opgjort som forskellen i den afstrømning som overskrider 90% af tiden (Q90) for de enkelte beregningspunkter (q-punkter) minus den tilsvarende Q90 for det opstrøms q-punkt. Tilvæksten er også omregnet til strækningsspecifik tilstrømning ved at dividere tilvæksten i Q90 med afstanden til opstrøms q-punkt. Baseflow beregningerne er samlet til en shape fil indeholdende en række kolonner er beskrevet i Tabel 3. Det skal bemærkes at DK-modelens q-punkter har en rumlig placering som følger DK-modellens vandløb. Der er for hvert q- punkt hentet magasinid og grundvandsforekomst id, hvis der er et magasin med beregnet kontakt indenfor 50m af q-punktet. Tilsvarende er der for hvert q-punkt hentet

information om vandløbs id og vandløbsnavn for det nærmeste vandløb i VP3 vandløbs-temaet indenfor 50m af q-punktet.

Tabel 3: Indhold af shape fil med beregning af vandudveksling mellem grundvand og vandløb.

Field Name	Data Type	Description
FID	Object ID	Object ID
Shape	Geometry	geometry type
Name	Text	Internal dkm name
Branch	Text	Internal dkm river section name
Downstream	Text	not used
Chainage	Float	downstream position [m]
Average	Float	Average discharge [m3/s]
Q90	Float	Q90 discharge [m3/s]
deltaQ90	Float	change in Q90 from upstream Qpoint to Qpoint [m3/s]
deltaChain	Float	length between upstream point and point [m]
l_sek_km	Float	change in discharge per km stream section ($\text{deltaQ90}/\text{deltaChain} \cdot 1000 \cdot 1000$) [l/s/km]
magasinid	Text	Aquifer id below q-point
GVForekom	Text	groundwater body (of aquifer id)
dkmlag	Text	dkm layer (of aquifer id)
GWBcode_WF	Text	WaterFramework directive Groundwater body id
ov_id	Text	MST river section id (nearest MST river)
ov_navn	Text	MST river section name (nearest MST river)

I Tabel 3 repræsenterer kolonnerne deltaQ90 og l_sek_km to versioner af beregnet specifik tilstrømning, dels gennemsnits tilvækst i Q90 for alle vandløbspunkter, og dels gennemsnitstilvæksten gjort relativ til vandløbslængden mellem de enkelte vandløbspunkter (l/s/km). Kolonnen GWBcode_WF indeholder angivelse af hvilken grundvandsforekomst id der ligger umiddelbart under vandløbspunkterne

3.3 Kystvande

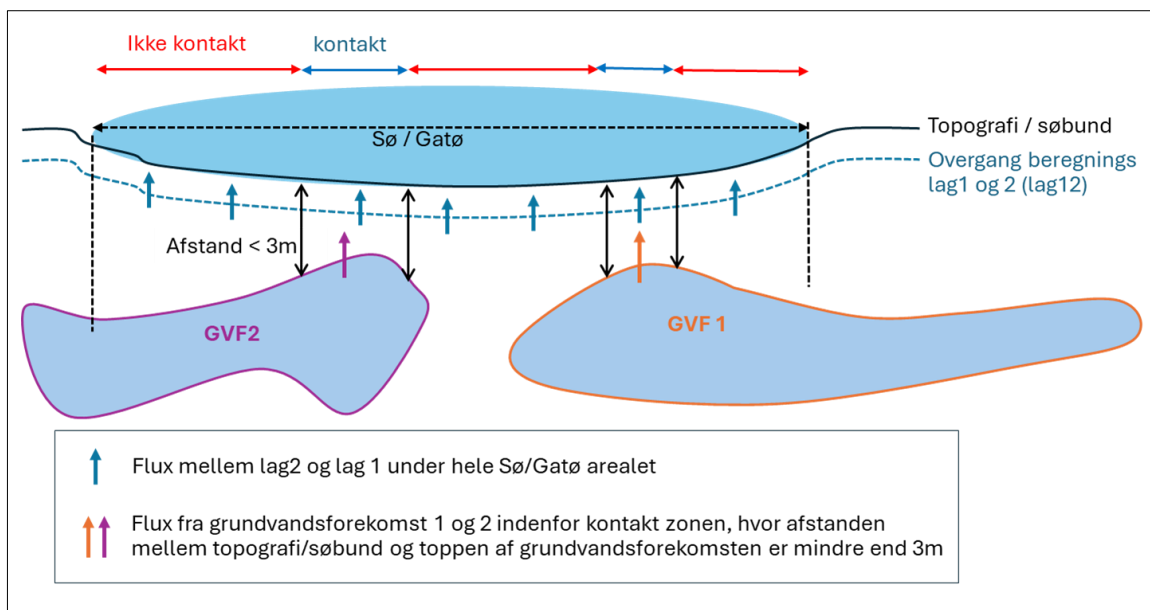
Direkte vandudveksling mellem grundvandsforekomster og kystvande kan ikke forekomme, da grundvandsforekomster er afgrænset indenfor kystafgrænsningen og der er derfor ikke direkte kontakt mellem havbunden og grundvandsforekomsterne. Dette er ikke ensbetydende med at der ikke er grundvandsforekomster som ligger ud til kystoplande og at der ikke strømmer grundvand ud til kystvandene via havbunden, det kommer bare ikke direkte til havbunden fra grundvandsforekomsterne i den eksisterende afgrænsning af grundvandforekomster.

3.4 Søer

Grundvandsforekomsterne og søerne er koblet efter samme principper som GATØ, dvs. hvis bare en mindre del af en sø har kontakt, så registreres hele søen som koblet til en

grundvandsforekomst. Der er beregnet kontakt, gradient og vandudveksling for alle VP3 målsatte søer indarbejdet i modellen.

Vandudveksling for VP3 målsatte søer er dels beregnet for hele søen som de modelberegne opadrettede vandstrømninger (flux) mellem modellens beregningslag 1 og 2 under hele sø-bunden, og dels for den del af søen med kontakt, som den magasin specifikke tilstrømning se principskitse i Figur 3. Herudover er der udregnet en relative magasin tilstrømning, dvs. den relative andel af grundvand som strømmer til søen direkte fra magasinet i forhold til den samlede grundvandstilstrømning til det øverste beregningslag.

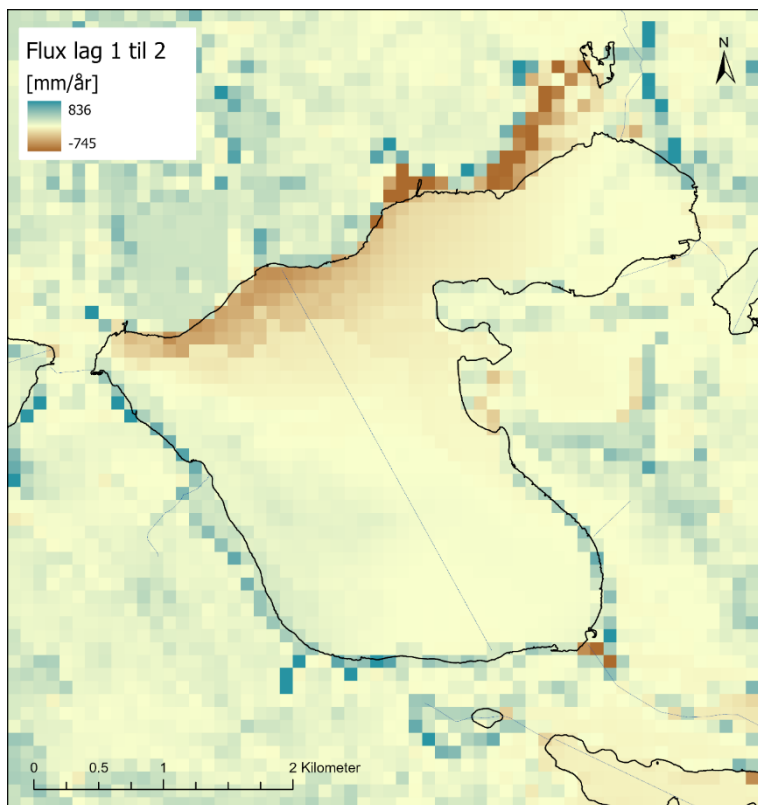


Figur 3: Tværsnit principskitse af afstandskriterie og modelsimuleret vandudveksling mellem søer og grundvandsforekomster. For det samlede sø-areal opgøres den opadrettede grundvandstilstrømning til det øverste beregningslag, mens den magasinsspecifikke opadrettede strømning kun opgøres for kontaktarealet, svarende til den del af sø-arealet hvor afstanden er mindre end 3 meter til toppen af grundvandsforekomsten og der er opadrettet strømning.

Ud over den grundvandstilstrømning, der udgøres af opadrettet strømning umiddelbart under søerne (og GATØ), så vil der som for vandløbene også være en helt terrænnært tilstrømning. Den terrænnære del af grundvandstilstrømningen sker primært helt overfladenært langs kanterne af søen, men kan også strømme ind/ud horisontalt fra øverste beregningslag til søen via søbunden. I DK-model komplekset vil en vurdering af den terrænnære del af tilstrømningen kræve en decideret vandbalance opgørelse pr sø. Samtidigt vil strømmingen på tværs af søbunden også være relateret til nedbør og fordampning den nuværende DK-model opsætning (anvendelse af rodzone modulet 'two-layer' i Mike SHE). Teknisk set placeres nedbøren på overfladen, mens fordampningen tages fra vandindholdet i "rodzonen" (som ligger i DK-modellens øverste beregningslag). Metodikken har den ulempe at det øverste beregningslag på denne måde "indgår i sø-modellen", således strømning til og fra overfladen til dette lag også indeholde den mængde vand som fordampes. Dette er de primære årsager til at grundvandsdannelsen til/fra søen hentes fra fluxen mellem lag 1 og lag 2, men det betyder samtidigt at der kan

være en del horisontal tilstrømning af grundvand via lag 1, som ikke fanges af flux beregning (men som heller ikke vil være relateret til en grundvandsforekomst).

Generelt har feltstudier vist at vandfluxen varierer en del til en sø og typisk ses indstrømning til søen langs søbrinken, i søbunden og i våde områder nær søbredden (f.eks. Kidmose med flere 2011). Figur 4 viser et tilsvarende billede af modelberegnete opadrettede og nedadrettede vandfluxe igennem Furesø's bund og søbred, hvor de største værdier ses langs søbrinken.



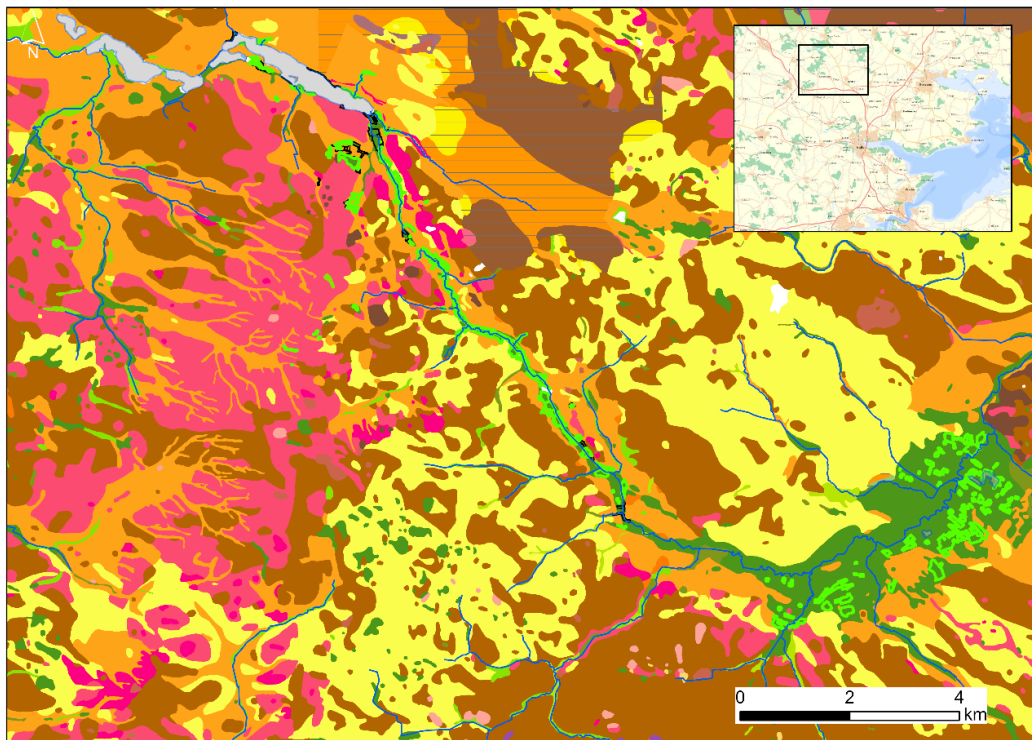
Figur 4: Grundvandsstrømning fra lag 1 til lag 2, positive værdier er nedadrettet flux (blå farver), i og omkring Furesø, Sjælland. Arealer med grundvandsindsivning til søen er vist med rød-brune farver.

3.5 GATØ

Grundvandsforekomsterne og GATØ er koblet efter samme principper som søerne med opgørelse af opadrettet flux indenfor kontaktarealet fra grundvandsforekomstlaget relativt til opadrettet flux for hele GATØ til øverste beregningslag. Identifikationen af de enkelte GATØ er angivet med et 'aktid' samt en naturtype. Aktid'et er i vores analyse sammenkoblet med en tekststreng "GDTES" til at unikt id (ov_id), og for overblikket skyld er der lavet hentet information om hvilken habitat afgrænsning fra Natura2000 tematet at GATØ'et ligger indenfor med angivelse af habitat id og navn for alle GATØ (Tabel 2). GATØ typisk er meget mindre end søer og at kontakt areal typisk er endnu

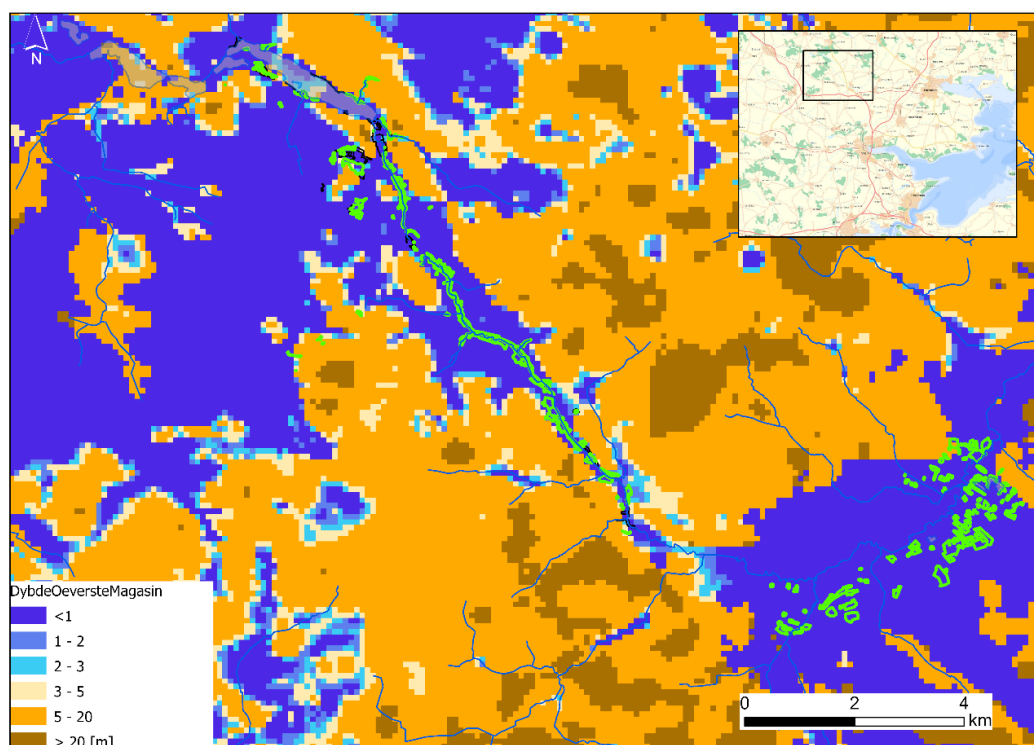
mindre, hvorved usikkerhederne på strømningsberegningerne formodentligt også er meget større både hvad angår beregnede kontakt areal, vertikale strømninger og relativ vandflux. Det er ikke i dette projekt testet i hvilket omfang disse beregninger kan relateres til virkelighedens forhold eller om disse kan relateres til vandpåvirkningen af GATØ. Ud over skala, GATØ områdefrænsningen typisk er meget under modelgrid skalaen, betyder er placeringen af GATØ, typisk indenfor ådale eller i kystnære områder, at den geologiske model som udgangspunkt ikke vil være støttet af højopløselige data. Samtidigt er især ådalene et område hvor der må forventes stor terrænnær geologisk heterogenitet.

En visuel gennemgang af nogle af de større GATØ viser imidlertid at en simpel kontakt beregninger (afstand + gradient) formodentligt ikke er tilstrækkelig til at vurdere om et GATØ modtager vand (eller er afhængig af vand) direkte eller indirekte fra en grundvandsforekomst. Yderligere er habitatarealet ikke nødvendigvis relateret til de (hydro-)geologiske forhold repræsenteret ved udpegning af grundvandsforekomsterne idet væsentlige dele af grundvandstilstrømningen ikke er defineret ved en grundvandsforekomst.

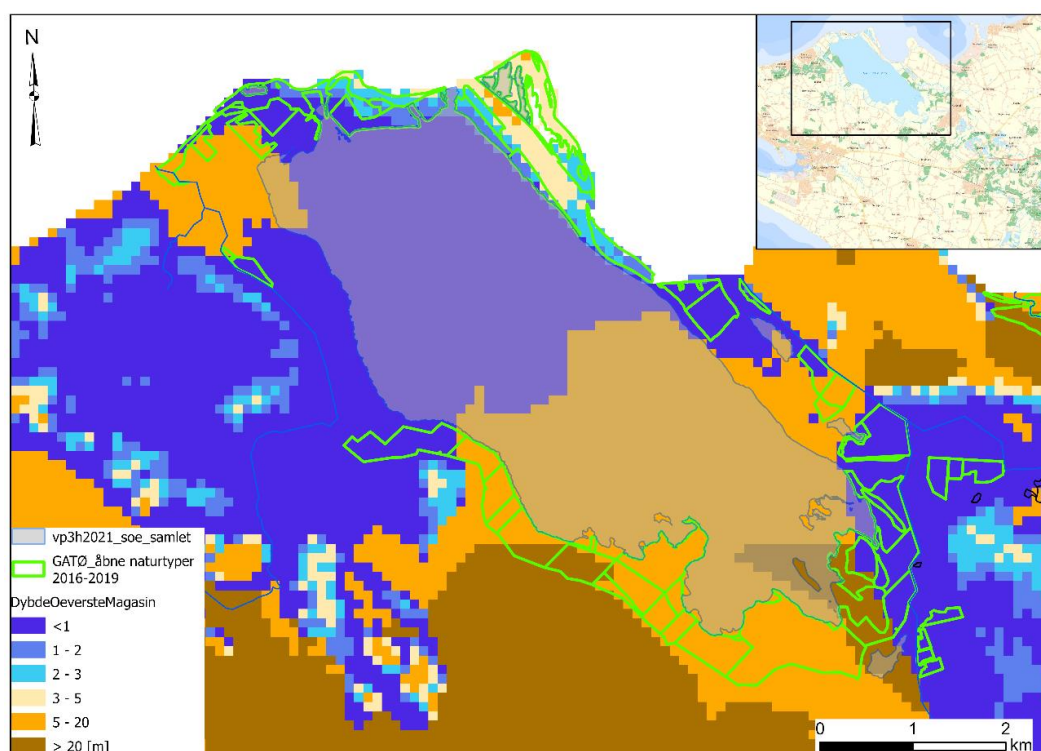


Figur 5: GATØ afgrænsninger i ådal nord for Vejle. GATØ afgrænsninger er angivet som grønne polygoner og grundvandsafhængige skov habitatområder med sorte polygoner.

I en ådal nord for Vejle er GATØ afgrænset primært i ådalen (Figur 5). Koblingen mellem den øverste grundvandsforekomst og GATØ i ådalen (Figur 6) viser at der er mindre end 1 m afstand mellem den øverste grundvandsforekomst og GATØ, hvorfor der pr. definition er god kontakt mellem grundvandsforekomst og GATØ.



Figur 6: Dybde til øverste grundvandsforekomst og GATØ afgrænsninger i ådal nord for Vejle

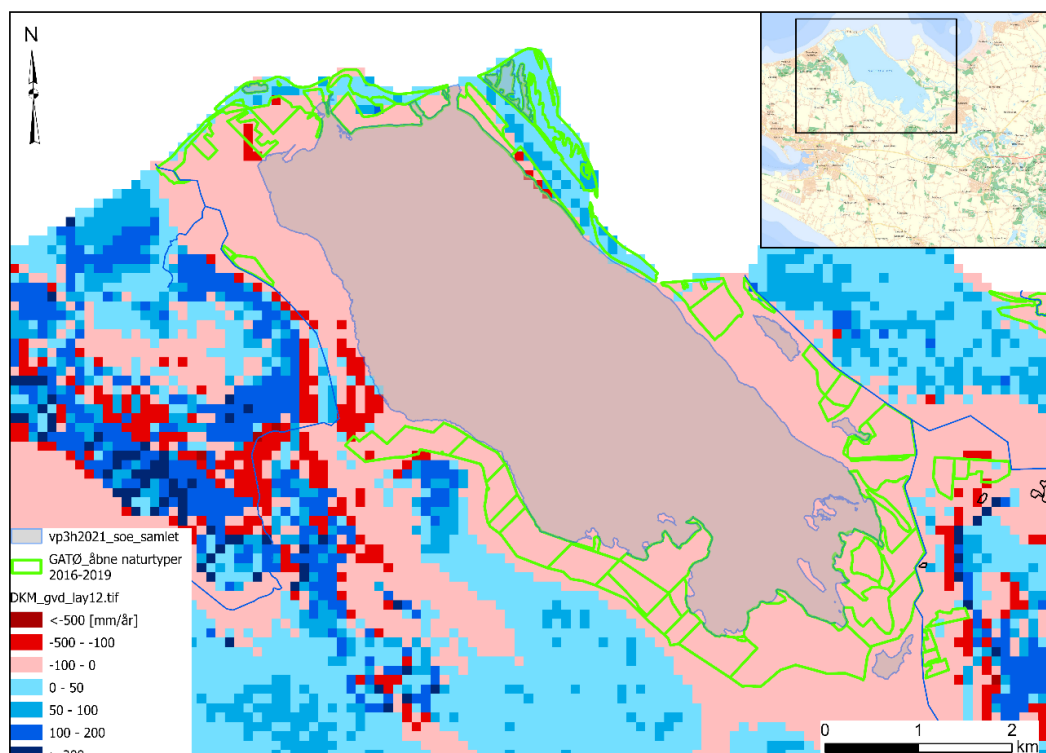


Figur 7: Dybde til øverste grundvandsforekomst for GATØ ved Kalundborg (grønne polygoner)

I Saltbæk Vig nær Kalundborg er vist et andet eksempel med forskellige GATØ naturtyper langs søbredden der er koblet til den øverste grundvandsforekomst. Figur 7 viser

den vestligste og østligste del af GATØ polygonen har god kontakt mellem grundvandsforekomsten og GATØ (<3 m vertikal afstand). I den centrale del af GATØ polygonen findes Danmarks største rigkær på 84 ha, som har en vertikal afstand på ca. 5 meter, hvilket pr. definition betyder at der tilsyneladende ikke er i kontakt med grundvandsforekomsten. Modellen beregner en opadrettet vandflux fra grundvandsforekomsten til det øverste beregningslag under GATØ og estimerer en vandflux på ca. 35 mm/år til GATØ (se Figur 8). Dette indikerer at selvom afstanden mellem GATØ og GVF er mere end 5 m kan det ikke udelukkes at der ved opadrettede gradientforhold er en vandflux fra grundvandsforekomst til GATØ.

Generelt må der forventes at være en betydelig geologisk usikkerhed knyttet til de områder hvor de fleste GATØ forekomster findes på særligt lavbundslande i ådale og kyststrækninger der fører til at vurderingen af gradientforholdene er forbundet med en vis usikkerhed i DK-model2023.



Figur 8: Grundvandsdannelse (flux) til øverste beregningslag (negative tal angiver opadrettet gradient) for GATØ beliggende ved Kalundborg

Den oprindelige plan for bestemmelse af kontakten og vandudvekslingen mellem grundvand og GATØ skulle følge den beskrevne identifikation af kontakt beskrevet under kapitel 2. Der arbejdes videre i GATØ projektet (*Kemisk og kvantitativ påvirkning af GATØ*) med koblingen af GATØ og grundvandsforekomsterne, herunder kvalitativ vurdering af DK-model koblingen, der afrapporteres ultimo 2024. GATØ-projektet udføres i samarbejde mellem GEUS og DCE/AU.

4. Vurdering af sø-konceptet

For at afgøre hvorvidt DK-model2023 er egnet til modelberegninger af kobling mellem grundvand - overfladevand og GATØ, efter implementering af VP3 vandløb, justeret sø-koncept og andre opdateringer af modelinput data blev der beregnet vandbalancer og udført performancetest af simuleringresultaterne fra DK-model2023 i 500m grid, og sammenlignet med DK-model2019 efter de opstillede nøjagtighedskriterier som afrapporteret i tilpasningsprojektet (jf. Ondracek med flere 2023, kapitel 5). Simuleringerne med DK-model2023 viste i første omgang resultater som ikke var tilfredsstillende og indikerede det behov for yderligere justering af søkonceptet, som er gennemført i forbindelse med nærværende rapport.

Justeringen af sø-konceptet inkluderede, ud over at der er indarbejdet en opdateret modelparametrisering baseret på Nret24 arbejdet, en flytning af søer fra at være repræsenteret i vandløbsmodellen (1D) til at være repræsenteret i overflademodellen (2D). Modellens sø koncept er her i dette koncept ikke en fastlåsning af vandspejlsniveauet, som tidligere forsøgt fx via Q/h relation med fastholdt vandspejl 'h' uanset vandløbstilstrømningen 'Q'. Vandspejlet kan i nærværende koncept variere frit i gennemsnit og på tværs af søerne, og vurderingen af modellens evne til at simulere vandspejlene er testet via to forskellige statistiske størrelser, dels modellens evne til at opretholde den initiale søvandstand i gennemsnit (taber eller vinder søen vand i modellen) og dels modellens evne til at holde søvandspejlet fladt, 'vandret' (fastholdes ikke modelteknisk i det valgte koncept).

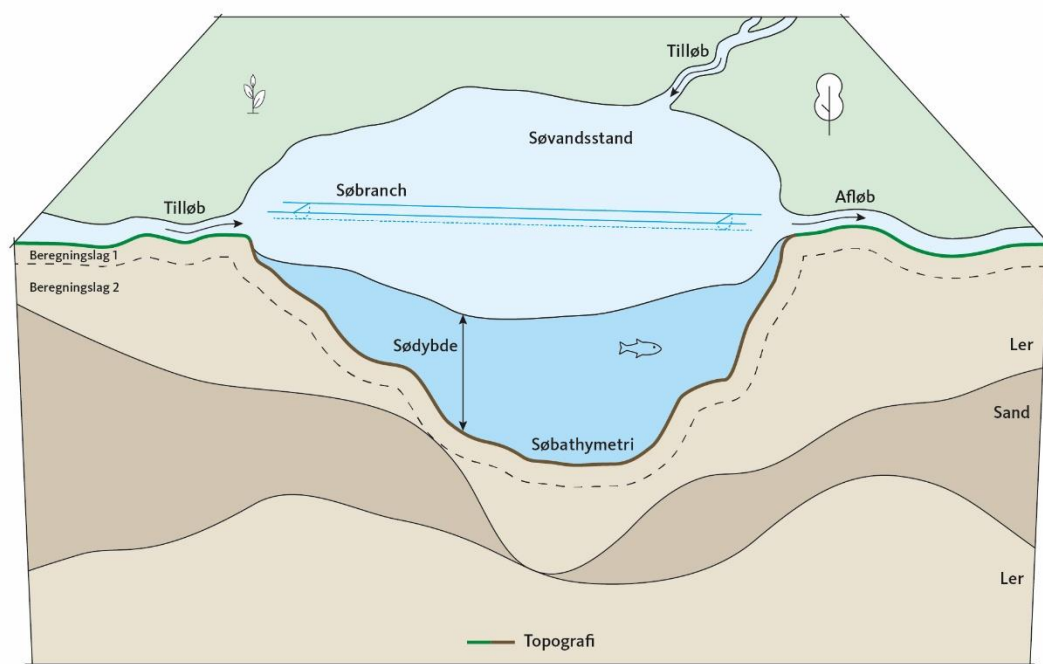
4.1 Kort beskrivelse af sø-konceptualisering

Det justerede søskoncept indebærer at søerne er indlagt i DK-modellens overfladevandskomponent (2D topografisk styret overfladestrømning i MIKE SHE). Søerne er indlagt på overfladen ved at topografien er justeret med "opmålt" bathymetri, alternativt med en bathymetri svarende til middel vanddybde for de søer hvor der ikke er opmålingsdata. Modelteknisk fyldes volumen mellem en topografi som ikke er justeret (GeoDanmark topografi) og den justerede topografi (Geodanmark topo – relativ sø dybde fordeling/bathymetri) initialt med vand svarende til sø volumen. For søarealerne sættes desuden en tærskelværdi for vand på terræn (svarende til sødybden) ift. hvornår 2D overfladestrømning aktiveres (overskridelse af 'detention storage'). Dette bevirker at 2D overfladevandsstrømningen indenfor søafgrænsningen først aktiveres når vandstanden overstiger den initiale vandstand.

Al strømning indenfor søens afgrænsning vil foregå vertikalt, mellem overfladevandkomponenten og grundvandskomponenten, så længe vanddybden er mindre end eller lig med den initiale vanddybde, mens en søvandstand over initial vanddybde bevirker at vandet vil kunne strømme (ovenpå søen) til vandløb eller sø brink (Figur 9).

På tværs af søen er der indlagt en vandløbsstrækning i MikeHydro (sø-”branch”) med et vandløbsprofil som kan modtage søvandet når søvandstanden stiger over initial søvandstand. Teknisk set er søbranchens tværsnitsprofiler justeret til at være 20m bredde og 0,5m dybe med brinken placeret umiddelbart over koten af initial søvandstanden. Langs bunden af søen er det anvendt en fast lækage koefficient ($1e-8$ m/s) indenfor søafgrænsningen, som reducerer udvekslingen mellem sø og grundvand, konceptuelt svarende til dynd og andet lavere permeabelt sediment i søbunden. I praksis vil tykkelsen og typen af søens bundmateriale nok variere noget fra sø til sø og indenfor de enkelte søer, men i modellen må usikkerheden relateret til denne variation være underordnet usikkerheden på lagfølgen og heterogeniteten af geologien under søen.

Udvekslingen mellem grundvand og søbunden styres herved dels af forskellen mellem grundvandspotentialet under søerne og søvandstanden, dels af lækagekoefficienten og dels af de hydrogeologiske forhold under søbunden. De hydrogeologiske forhold under søbunden er beskrevet ved den direkte grundvandstrømning til søen og/eller en eventuel udstrømning af søvand til grundvandszonen via søbunden. Dræn er ikke aktive i selve søarealet, men drænastrømning fra søens opland ender som tilstrømning til søen via vandløbstilløb og/eller direkte til søbranchen.



Figur 9: Justeret sø-koncept. Søbathymetrien er indbrændt i den topografiske model. Hver sø har egen vandløbsopsætning med en søbranch og op til flere vandløbstilløb. Vandspejlsdybder større end sødybden, bidrager med overfladestrømning

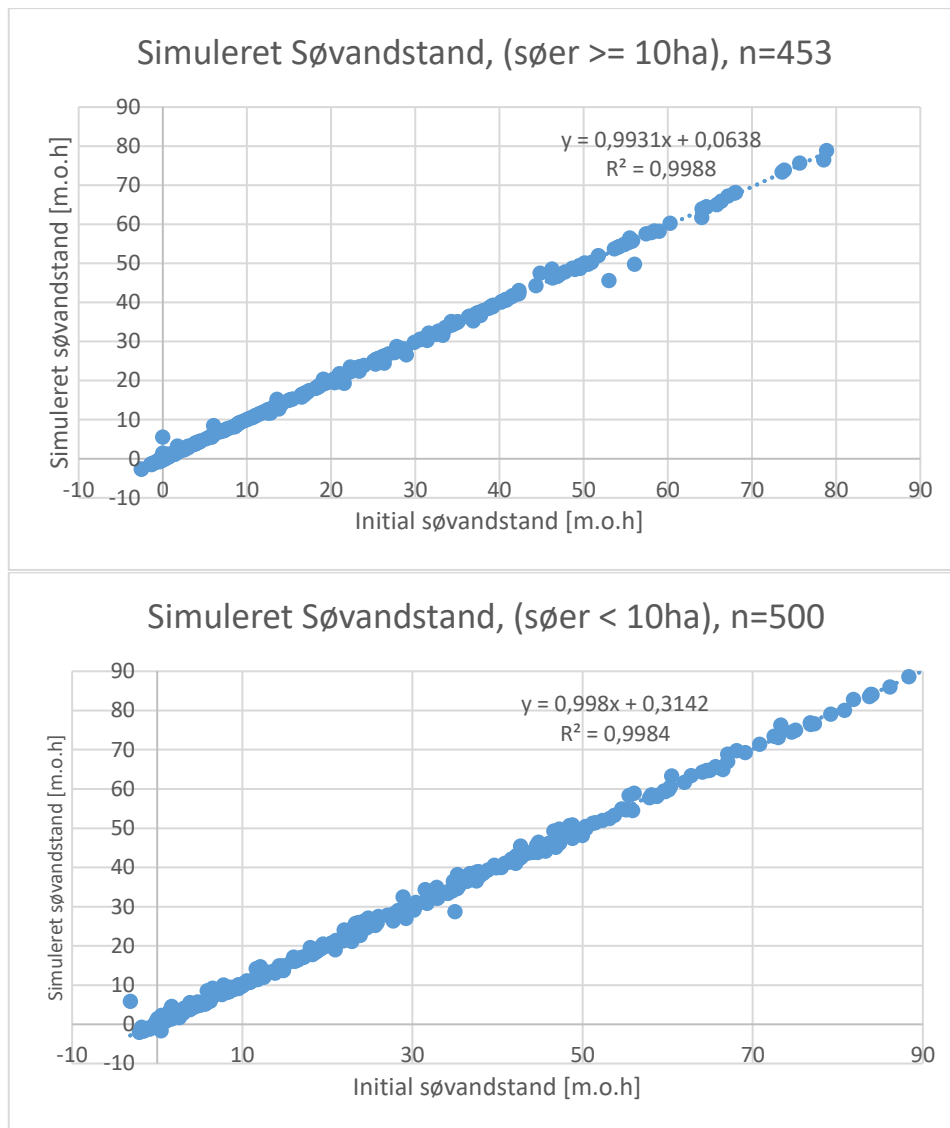
4.2 Vurdering af simulerede sø-vandstande

Generelt er der ingen sø med simuleret variation i søvandstand (årgennemsnit) som opretholder et helt vandret vandspejl igennem hele simuleringsperioden, hvilket sandsynligvis også er i god overensstemmelse med søers vandspejl under naturlige forhold.

I Tabel 4 præsenteres differencen mellem simuleret søvandspejl i forhold til initialt (opmålt) søvandspejl for de 953 målsatte søer i henholdsvis målsatte søer ≥ 10 ha og < 10 ha. Begge grupper af søer har en meget høj R^2 værdi på over 0,99 (Figur 10). Den simulerede ift. initial søvandstand i søer, viser en forskel i søvandstand på under 1m i ca. 83% af søer ≥ 10 ha (417 søer) og i ca. 85% af søer < 10 ha (358 søer), hvilket indikerer at det nuværende søkoncept for hovedparten af de målsatte søer er anvendeligt for disse søer med hensyn til modellering af søvandstand. Af alle de målsatte søer har kun 32 søer en negativ difference på simuleret og initial søvandstand, dvs. søen ”taber vand” – uden dog at søerne tørlægges helt. To nærtliggende søer på Midsjælland (Ulse Sø og Sørtorp Sø), og en lille sø i Nordjylland (Snæbum Sø) viser de største simulerede vandspejlstab (> 5 m). Der er væsentligt flere af de små søer som simulerer en forhøjet søvandstand (positiv difference i søvandstand) end de søer ≥ 10 ha. Placeringen af 24 målsatte søer ≥ 10 ha med mere end ± 1 m forskel mellem simuleret og initial søvandstand fremgår af Figur 13, og i Bilag 1 fremgår tallene.

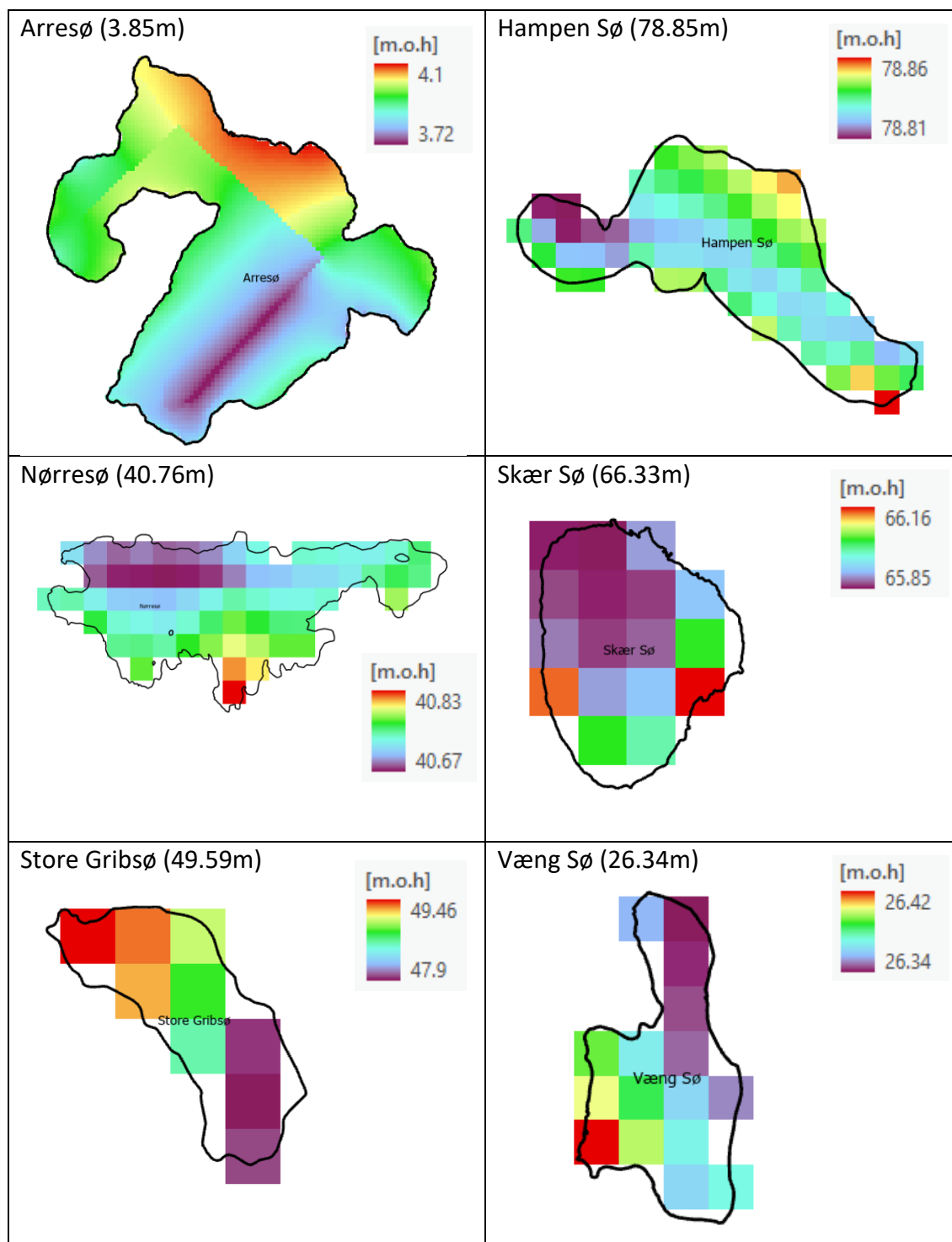
Tabel 4. Simuleret søvandstand minus initial søvandstand (Difference søvandstand) angivet som middel for hele søen i perioden 2001-2018. Venstre: søer ≥ 10 ha; højre: søer < 10 ha. En negativ difference betyder at søen taber vand.

Difference søvandstand i intervaller [m]	Antal målsatte søer ≥ 10 ha	procent	Difference søvandstand i intervaller [m]	Antal målsatte søer < 10 ha	procent
$\leq -10,0$	0	0%	$\leq -10,0$	0	0%
$\leq -5,0$ og $> -10,0$	2	0%	$\leq -5,0$ og $> -10,0$	1	0%
$\leq -2,0$ og $> -5,0$	4	1%	$\leq -2,0$ og $> -5,0$	2	0%
$\leq -1,0$ og $> -2,0$	9	2%	$\leq -1,0$ og $> -2,0$	14	3%
$\leq -0,5$ og $> -1,0$	14	3%	$\leq -0,5$ og $> -1,0$	23	5%
$\leq 0,5$ og $> -0,5$	402	80%	$\leq 0,5$ og $> -0,5$	335	67%
$> 0,5$ og $\leq 1,0$	13	3%	$> 0,5$ og $\leq 1,0$	64	13%
$> 1,0$ og $\leq 2,0$	5	1%	$> 1,0$ og $\leq 2,0$	35	7%
$> 2,0$ og $\leq 5,0$	3	1%	$> 2,0$ og $\leq 5,0$	25	5%
$> 5,0$ og $\leq 10,0$	1	0%	$> 5,0$ og $\leq 10,0$	1	0%
$> 10,0$	0	0%	$> 10,0$	0	0%
Antal	453		Antal	500	



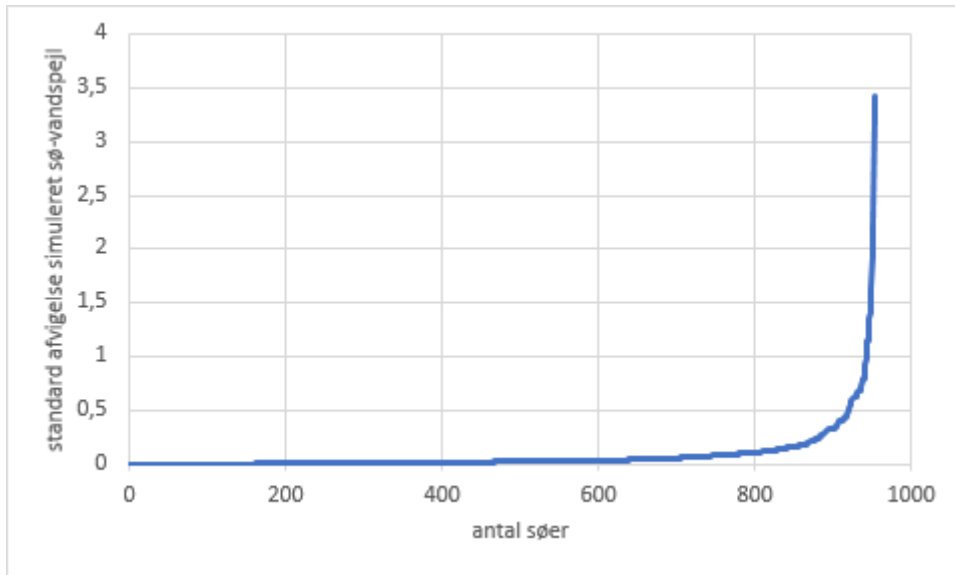
Figur 10: Simuleret søvandstand ift initial søvandstand.

Indenfor konceptet er søvandstanden ikke holdt vandret, hvilket åbner op for potentielle fejlagtige modelsimuleringer af gradienter og fluxe indenfor søen. Visualisering af simulerede søvandstands variationer hen over seks udvalgte søer er vist på Figur 11.



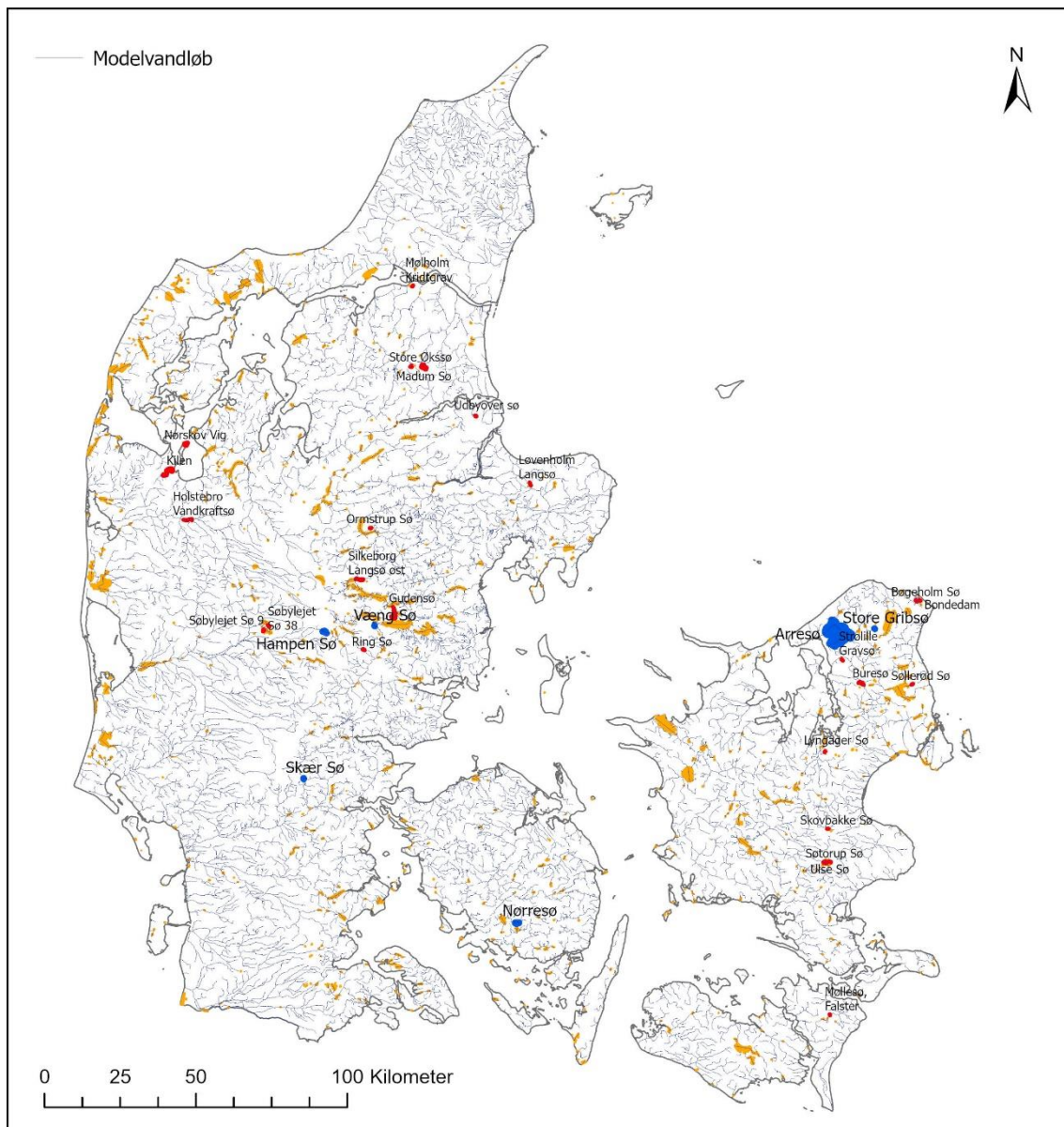
Figur 11: Simuleret vandstand i eksempel søer. Initial sø vandstandskote i parentes, simuleret vandstand som middel 2001-2018 indenfor modellens søareal. Søernes størrelse afspejles af antallet af beregningsgrids i hver sø.

Hvis en sø er simuleret med vandstand der har stor variation, vurderes det at være vanskelig at anvende de simulerede resultater for gradienter mellem sø og grundvand. For at vurdere i hvilket omfang modellen alligevel simulerer et fladt søvandspejl er der udregnet standard afvigelser af simuleret søvandspejl for alle søer (se Figur 12). Nogle få af de indarbejdede søer har en standard afvigelse større end 1m (se Figur 13 for placering), mens hovedparten af alle indarbejdede søer har en standard afvigelse på mindre end 0,1m.



Figur 12: Beregnede variationer af afvigelser fra simuleret 'vandret' søvandspejl.

Årsagen til at nogen søer simulerer store variationer i søvandstanden, kan skyldes søernes placering i topografien, den geologiske beskrivelse i modellen under og omkring søerne, det indarbejdede søvandløb osv. Bathymetri er beskrevet med stor detaljegrade ved opmåling i 235 målsatte søer (heraf 176 søer større end 10ha) og er inkluderet i modellens topografi i 100x100m grid (Ondracek med flere, 2023, Tabel 4).



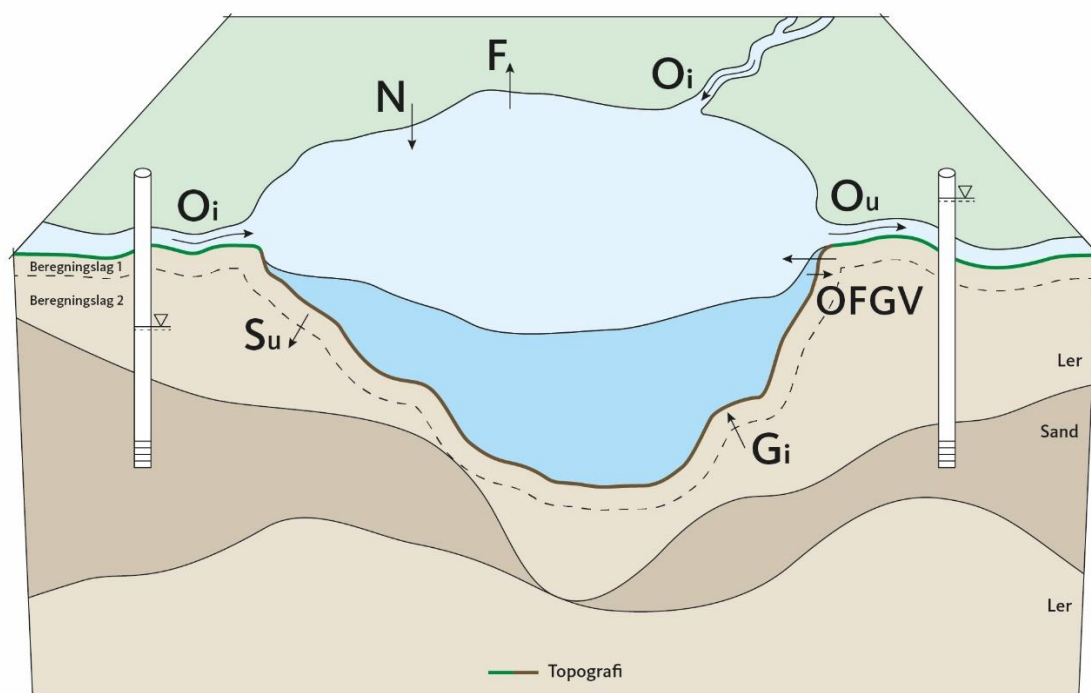
4.3 Søvandbalancer

Der er beregnet vandbalancer for alle de VP3 søer som er inkluderet i DK-model2023 med søbranches (tilløb og/eller afløb). Alle vandbalance komponenterne er årsmiddelværdier. Teknisk er vandbalance komponenterne, på nær overfladisk tilløb (O_i) og overfladisk afløb (O_u) samt overfaldenære grundvandskomponent (OFGV), beregnet ud fra modelresultaterne på gridformat, midlet for perioden 2001 – 2018, for et areal svarende til søarealet (for søpolygoner med et mst-ID). Dette gælder for Nedbør (N) og aktuel

fordampning (F), samt (dybt) grundvandsbidrag (Gi) og søudstrømning fra sø til grundvand (Su), der begge er beregnet som (opadrettet hhv nedadrettet) grundvandsflux mellem beregningslag 2 og 1 under søen.

Vandbalanceberegningernes opgørelse af overfladisk udstrømning fra søen (Ou) og overfladiske tilløb til søen (Oi) er hentet direkte fra vandløbsmodellen i DK-modellen, hvor hver af søerne er defineret med en søbranch, og vandløbsstrømningen er omregnet til mm/år ved at dividere afstrømningen (m^3/s) med søarealet (m^2) og gange med en omregningskonstant (1000mm/m). I vandbalanceopgørelserne er ind- og udstrømning specificeret hver for sig. Drænastrømning indenfor søoplandet er inkluderet i vandløbsafstrømningen via vandløbstilløb og/eller direkte til søbranchen.

Den overfladenære grundvandskomponent (OFGV) i vandbalancen er nærmere beskrevet i afsnit 5.2 og vist i Figur 14. Vandbalancens led er beskrevet i teksten ovenfor og principskitse i Figur 3. I alt udgør det 953 VP3 målsatte søer. Komponenterne der indgår i den modelberegnete vandbalance fremgår af Figur 14. Søtypologien for den skitserede sø, med både ind- og udstrømning, benævnes ”gennemstrømningssø” og er nærmere beskrevet i afsnit 5.2 og i Nilsson med flere (2023).



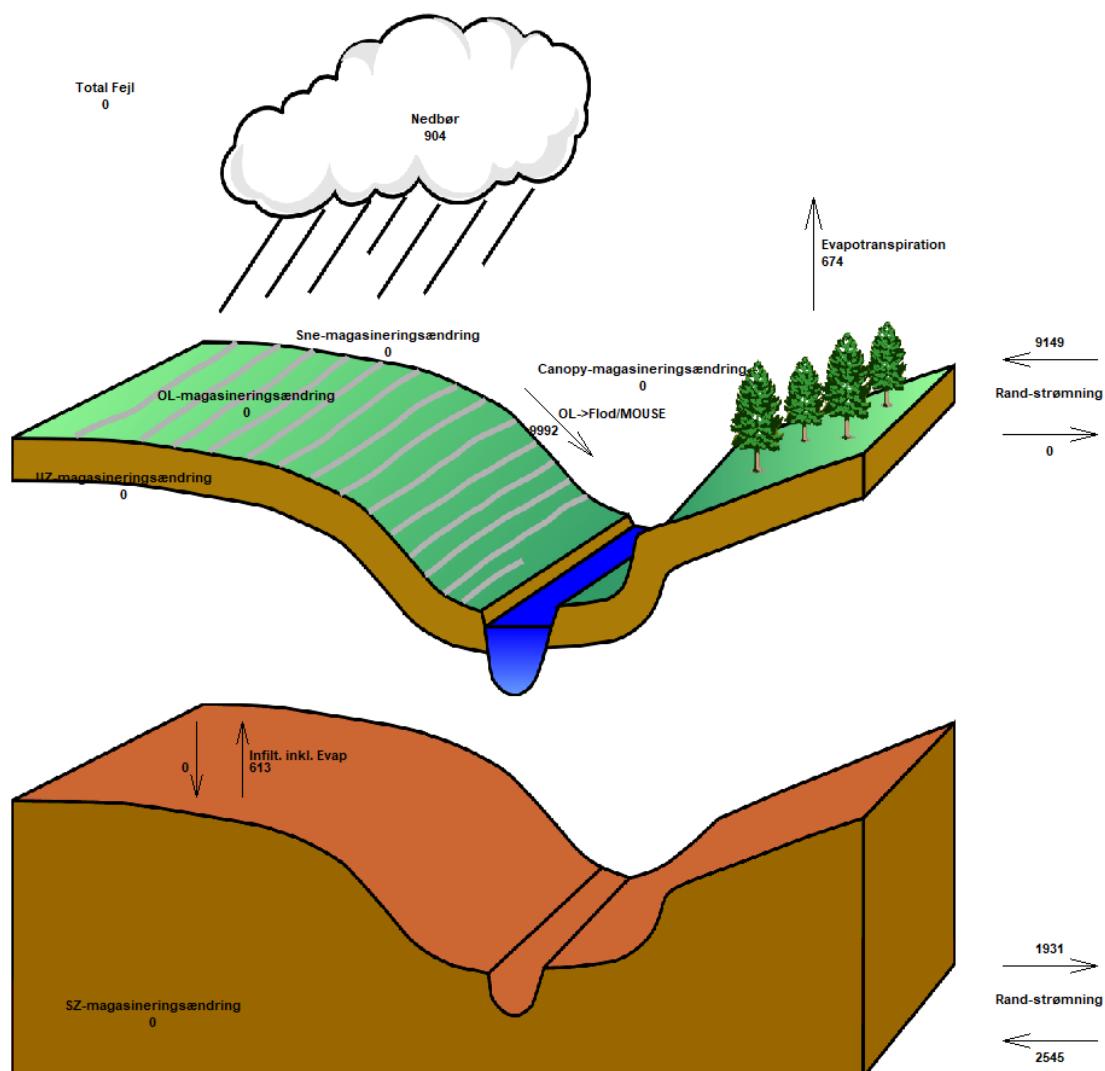
Figur 14: Konceptuel skitse af modelberegnet vandbalance med søkonceptet i DK-model2023. Forkortelser: Nedbør (N), fordampning (F), overfladisk indstrømning (O_i), overfladisk udstrømning (O_u), grundvandsindstrømning (G_i), udsivning af søvand til grundvand (S_u), overfladenær grundvandsindstrømning (OFGV).

Det overfladenære grundvand (OFGV) er summen af vand der strømmer til søen helt terrænnært via søbunden og søbredden samt fra overfladetilstrømning (ikke dræn eller vandløb, men fx vådområder og lignende fra nærområdet) til søen. Resultater for seks udvalgte søer er vist som eksempler på søvandbalancer i Tabel 5.

Tabel 5: Vandbalance i [mm/år] opgjort for seks eksempelsøer.

mst_id	Sø	Areal [km ²]	OL	Ou	Oi	Difference ($O_u - O_i$)	Nedbør (N)	Aktuel for-dampning (F)	Opadret-tet flux (G_i)	Nedadret-tet flux (S_u)
684	Arresø	39.55	48	1323	1211	112	777	751	39	1
724	Store Gribssø	0.1	495	0	0	0	807	725	0	577
197	Nørresø	0.68	194	1731	1281	450	826	718	147	0
144	Skær Sø	0.16	321	271	6	265	992	676	0	372
552	Væng Sø	0.16	12676	17221	3702	13518	903	674	613	0
597	Hampens Sø	0.72	121	1030	437	593	969	657	161	0

Søerne repræsenterer store forskelle i de fleste af parametrene der indgår i søens vandbalance. Eksempel på modelberegnet vandbalance for Vængsø i Figur 15, viser at det anvendte søkoncept ikke kan gøre rede for de overfladenære komponenter på et detaljeret niveau, men indgår samlet i det øverste lag sammen med nedbør og fordampning.



Figur 15: Vandbalance for Vængsø i mm/år som MikeSHE udtræk.

5. Validering af sø-vandbalancer ("proof of concept")

Til vurdering af usikkerhed på de strømningselementer der indgår i søernes kobling til grundvandsforekomster (flux) er der gennemført vandbalancesammenligninger mellem modelberegninger og søobservationer.

5.1 Vurdering af overflade vandbalance komponenter

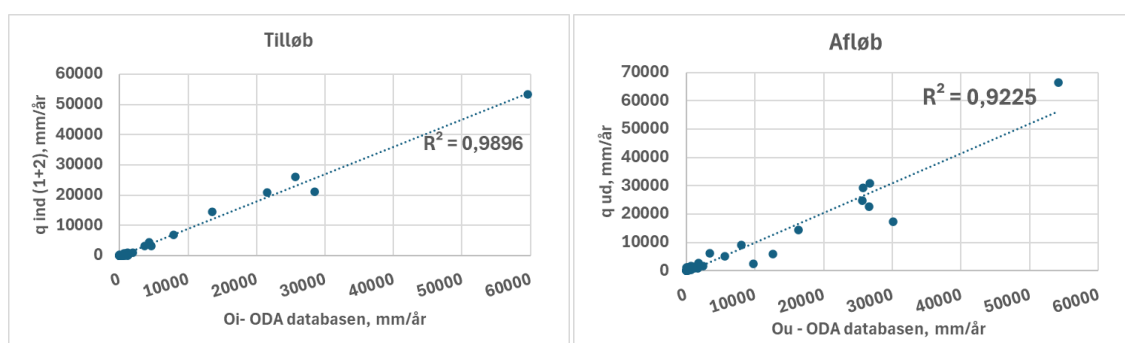
Overfladisk tilløb (Oi).

DK-modellens beregninger af overfladisk tilstrømning inddrager vandføringer i de tilstrømmende vandløb og drænvand. I nærværende sammenligning med udvalgte testsøer er tilløb og afløb målt enten som del af feltundersøgelser eller som tidsserier af målte vandføringer udtrukket fra ODA databasen.

Overfladiske afløb (Ou)

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 og definerer et 'afløb' som et udløb fra en målsat sø, hvor kravet er at afløbet er vandførende året rundt.

De modelberegne vandføringen i overfladiske tilløb og afløb er vist i Figur 16. I figuren sammenholdes de modelberegne vandføringer med 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> for 969 vandføringsstationer (Nilsson med flere 2023). Data er godkendt af MST, men der forekommer huller i visse tidsserier og der er også perioder, hvor data er interpoleret. Størstedelen af målestationerne har ingen relevans for dette projekt, da de er placeret i vandløbsnetværket med en afstand større end 1,5km fra søbredden. Både tilløb og afløb viser en god overensstemmelse mellem modelberegne vandføringer og målte vandføringer med henholdsvis en $R^2 = 0,96$ for tilløbene og $R^2 = 0,92$ for afløb til målsatte søer.



Figur 16: Modellerede versus målte vandføringer i tilløb (venstre) og afløb (højre) til målsatte søer.

5.2 Beskrivelse af vandbalance komponenter

Nedbør N (korrigeret nedbør).

Benyttes ikke korrigeret nedbør vil fordampningen typisk blive underestimeres med 20-30%, hvilket vil være væsentligt for de søer der primært er klimastyret (lille grundvandsbidrag).

Aktuel fordampning (F).

Tidligere er der til vurdering af fordampning fra danske søer benyttet DMI's reference fordampning, der opgives for 20x20km daglige gridværdier. Denne referencefordampning er defineret som den potentielle fordampning fra en kortklippet græsoverflade med frit tilgængeligt vand. Det antages at den aktuelle fordampning ved danske søer er 16% større end DMI's referencefordampning (Nilsson med flere 2023), og sammenlignelig med fordampningen der anvendes for søarealer i DK-modellen.

Grundvandsindsivning (G_i)

Nærmeste grundvandsforekomst er koblet til de målsatte søer og grundvandsindsivningen G_i igennem søens bund er beregnet som vandfluxen mellem lag 2 og 1 ved opadrettede vandfluxe i DK-modellen (Figur 14).

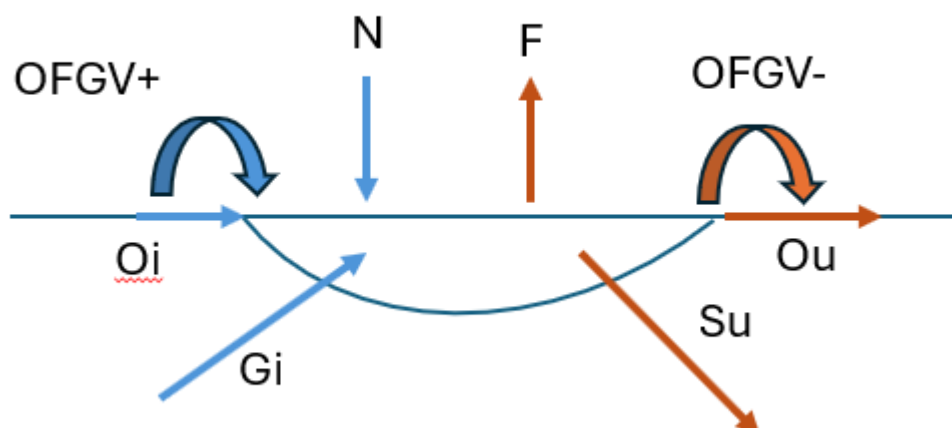
Overfladenær tilstrømning af grundvand (OFGV)

Modellens OFGV komponent repræsenterer nettoudstrømningen af overfladenært grundvand der udgør en blanding af helt terrænnært grundvand, kildevæld og grøfter. Oftest er de helt terrænnære grundvandmagasiner i sandede oplande kortlagt som den øverste grundvandsforekomst i DK-modellen. I de tilfælde det øverste vandførende lag ikke er afgrænset af en grundvandsforekomst repræsenterer det indstrømmende grundvand der kan være en vigtig del af vandbalance for en sø særligt i lerede oplande. OFGV komponenten er for alle målsatte søer beregnet med DK-modellen. I feltstudier er OFGV komponenten sjældent kvantificeret og i de tilfælde hvor grundvandsstrømningen i kildevæld eller igennem vådområder der støder til søbredden indregnes dette grundvandsbidrag i den samlede grundvandsindsivning G_i . Det er nyt at der kan beregnes separate grundvandsbidrag fra henholdsvis dybere og helt overfladenære grundvandsindsivninger. Med opdeling af grundvandsbidraget til søer i en OFGV og G_i komponent med DK-modellen forventes forbedret kvantitativ mulighed for at beregne vandflux fra terrænnære grundvandsforekomster til søerne, samt fra helt terrænnært grundvand der ikke er afgrænset i DK-modellens grundvandsforekomster (Troldborg 2020).

Udsivning af søvand til grundvand (S_u)

I DK-modellen beregnes udsivningen af søvand ved nedadrettet gradient forhold under søbunden som vandflux mellem model lag 1 og 2 under søen (jvf. Afsnit 3.4). Tidligere feltstudier viser at udsivningen af søvand via søbunden til grundvandszonen sker på et en meget lille del af det samlede søareal. Kun få feltstudier har kvantificeret udstrømningskomponenten i gennemstrømningssøer, da det er meget udfordrende at finde de præcise positioner hvor udsivningen finder sted (Kidmose med flere 2011; Rosenberry 2000).

Vandbalancens enkeltkomponenter er vist i principskiten Figur 17.

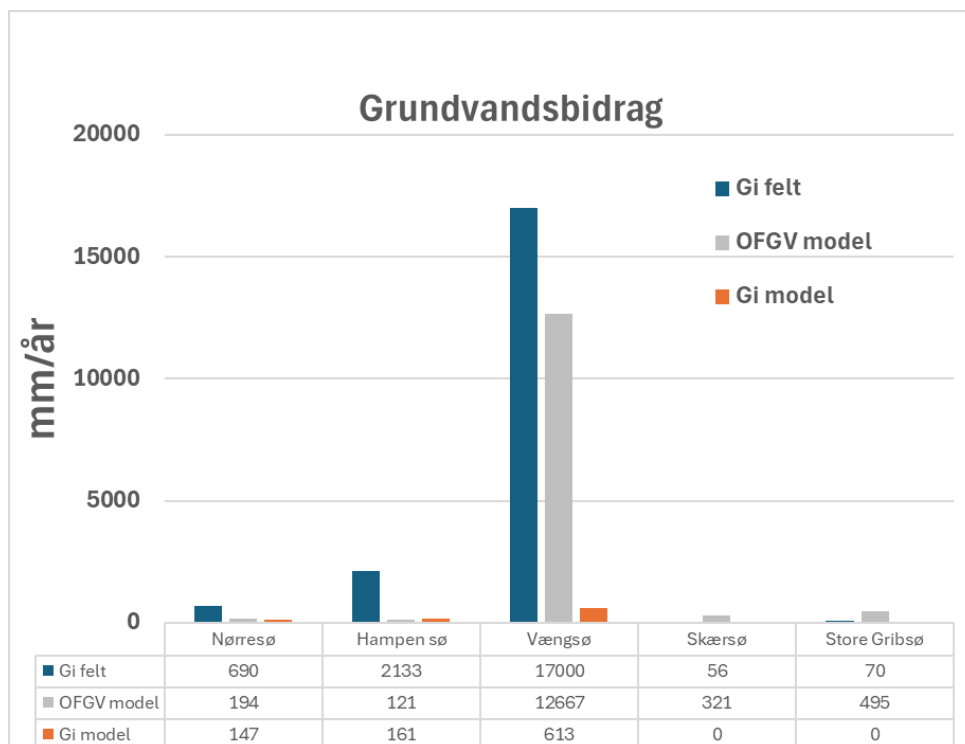


Figur 17: Vandbalancens komponenter. Modelteknisk udgør forskellen på OFGV+ og OFGV- den overfladenære grundvandstilstrømning.

5.3 Modelberegne vandbalancer sammenholdt med udvalgte testsøer

I dette afsnit sammenlignes modelberegne vandbalancer med vandbalancer bestemt ved feltundersøgelser i de fem testsøer Nørresø, Hampen sø, Vængsø, Skærsø og Store Gribssø (≥ 10 ha). Parametrene nedbør, fordampning, overfladisk indstrømning og udstrømning er næsten ens for de fem søer i model- og i feltvandbalancen.

For at vurdere hvor godt grundvandsbidraget bestemmes med modellen i forhold til feltnmålingerne skal grundvandsbidraget G_i bestemt i felten sammenlignes med summen af den modelbestemte grundvandsindsivning (G_i) og OFGV-komponenten (Figur 18). Sammenligningen viser at for ingen af de fem testsøer er feltnmålinger og modelopgørelser i perfekt overensstemmelse. I vandbalancen for Hampen sø, Nørresø og Vængsø udgør den modelbestemt grundvandsindsivning (G_i -model + OL-model) hhv. 13,2% (Hampen sø), 49,4% (Nørresø) og 78,1% (Vængsø) af den feltbestemte grundvandsindsivning. Det modelberegne grundvandsbidrag til de mindste søer Skærsø og Store Gribssø (begge 10 ha) er beregnet til at være 6-7 gange højere end grundvandsbidraget bestemt med feltnmetoder.



Figur 18: Grundvandsbidraget til de fem testsøer kvantificeret med feltmålinger og DK-model2023.

For Vængsø udgør næsten hele grundvandsbidraget, estimeret med DK-modellen, fra den overfladenære grundvandskomponent, hvilket er i god overensstemmelse med felt-iagttagelser (Nilsson med flere. 2009; Staehr med flere 2010), der indikerer at en meget stor del af grundvandet siver ind i søens tilstødende våde arealer som en blanding af helt terrænnært grundvand, grøfter og kildevæld. Kazmierczak med flere (2016) har vist at der er en stor udstrømning af grundvand i vådområder på både vest- og østsiden af Vængsø, som overfladenært afstrømmende grundvand, men de har ikke kvantificeret bidraget fra vådområder for hele søens tilstrømningsareal.

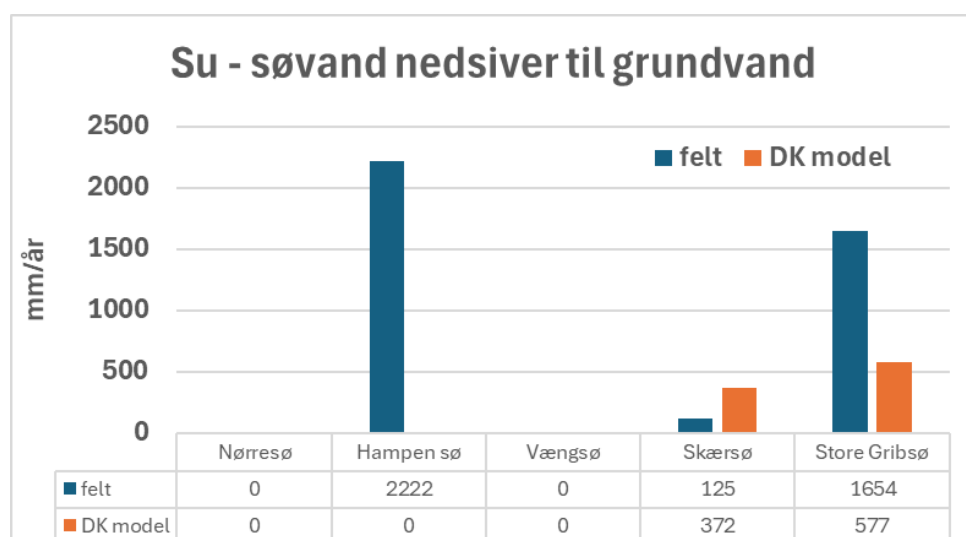
Samlet set viser sammenligningen mellem model og feltstudier at modellen viser den rigtige tendens med strømningsretningen (gradient forhold) til søerne mens størrelsen af vandfluxen til Nørresø og Vængsø er tolerabel (Kazmierczak med flere 2016; Nisbeth med flere 2019), mens der underestimeres i forhold til Hampen sø. Omvendt overestimerer modellen ganske væsentligt for de to mindre søer Store Gribbsø og Skærsø beliggende i lerede oplande.

Forskellen på opgørelsen af grundvandsbidraget med feltdata og model kan skyldes at grundvandsbidraget til søerne bliver opgjort forskelligt. I felten måles oftest kun den direkte grundvandstilstrømning til forskel fra modellen der udover den direkte grundvandstilstrømning (Gi) også beregner hele den overfladiske grundvandstilstrømning via vådområder, kildevæld, mm. Vandbalancen bestemt i felten repræsenterer typisk 1-3 års feltdata mens de modelbestemte vandbalancer baseres på årsmiddel af perioden 2001-

2018, hvilket yderligere kan medvirke til en fejlkilde. Det er således ikke umiddelbart muligt med den anvendte metode at vurdere usikkerheden på modelberegningerne af grundvandsbidraget.

Det anbefales i et kommende projekt at undersøge om forskellen i grundvandsbidrag bestemt i felt og med model alene kan forklares med modelusikkerhed eller om det er muligt med den nuværende viden at ekstrapolere til søer uden data og ud fra den nuværende viden at vurdere om modellen performer bedre for nogle søtyper end for andre.

Figur 19 viser at udstrømning af søvand til grundvandszonen i nogen grad er acceptabel for Skærsø og Store Grib sø i modsætning til Hampen sø hvor det nuværende søkoncept ikke adresserer en udsivning af søvand til grundvandszonen. Det relativt lille udstrømningsareal i søbunden af Hampen sø er identificeret ved feltstudier (Kidmose med flere 2011) så vi ved med sikkerhed at denne zone eksisterer. Størrelsen af udstrømningsarealet er nok højest 100 x 100m og kan derfor ikke forventes at DK-model2023 kan estimere udsivning fra dette areal selv med sin nye opløsning i 100 x 100m beregningsceller. Endelig er der god overensstemmelse mellem feltmålinger og model simuleringer for Nørresø og Vængsø hvor ingen af disse søer har kendte udsivningsforhold.



Figur 19: Udsivning af søvand til grundvandszonen kvantificeret med feltmålinger og DK-model2023.

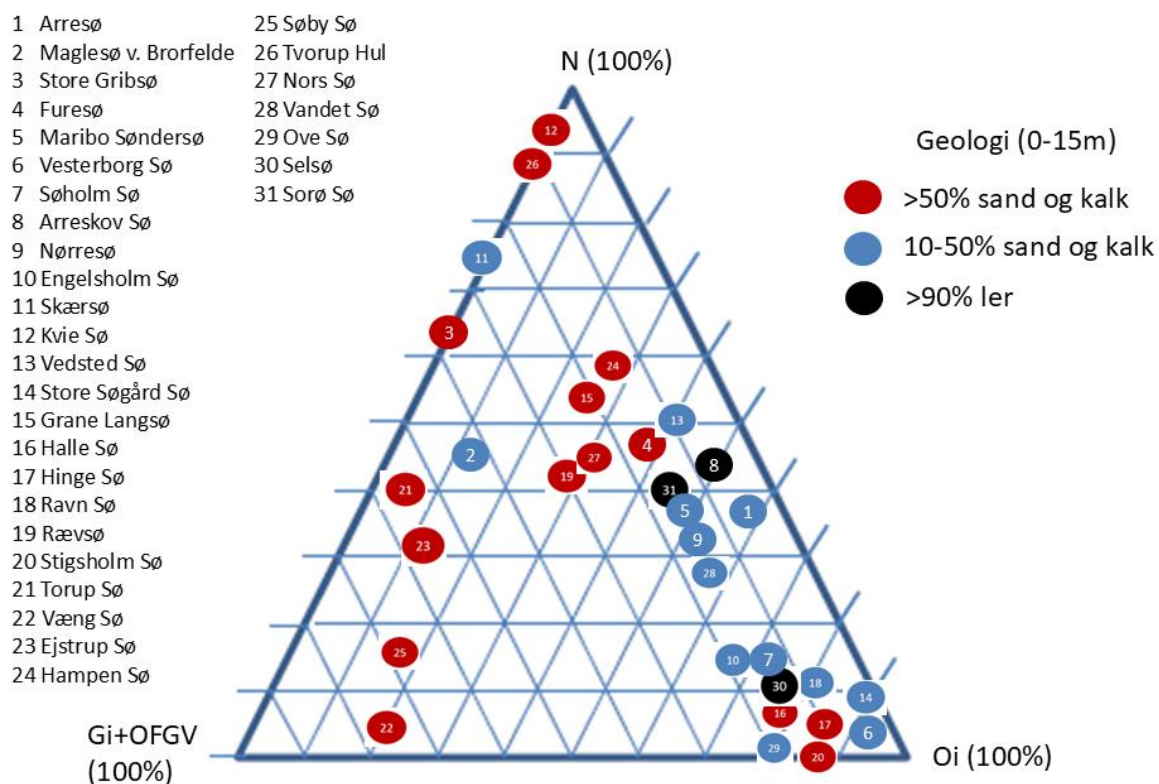
5.4 Sammenhæng mellem vandbalance, søgeologi og søtype

I flere omgange er der foretaget en evaluering af vandudvekslingen mellem grundvand og testsøer. I 2019 blev "Værktøjskassen 2019" udviklet for målsatte søer > 100ha (Nilsson med flere 2019) og senest i 2023 blev sandsynligheder for kontakt mellem grundvand og målsatte søer med særlig fokus på søer < 10ha (Nilsson med flere 2023).

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 15m af undergrunden udtrukket med fordelingen af sand, kalk og ler i %, opsummeret til 100%. I dette projekt 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).

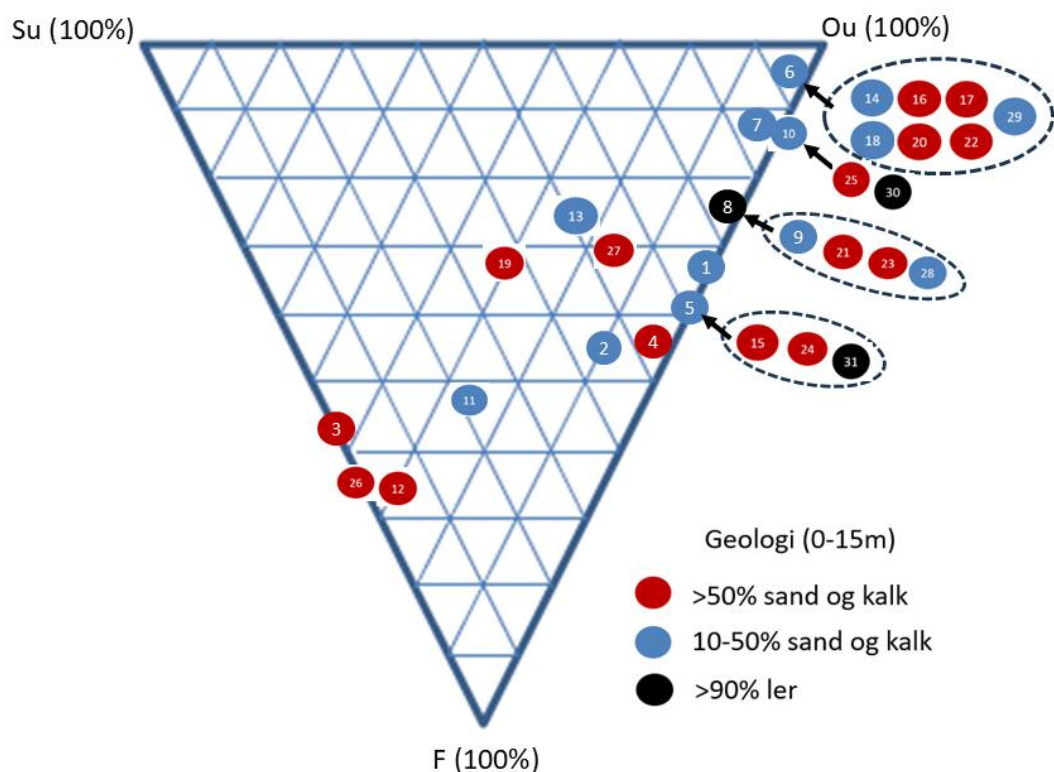
I alt er geologi udtrukket for 974 søer (ex. Bornholm) til projektet "*Metode til kategorisering af søer i forhold til deres kontakt med grundvandet*" (Nilsson med flere 2023). Det betyder at der mangler at blive udtrukket geologi for de bornholmske søer (ca. 20 søer), hvor grundfjeld også indgår som både højermeabelt grundvandsmagasin og lav permeabel barriere. 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. Sidstnævnte gruppering af søer antages at have bedst kontakt til grundvandsforekomsterne, mens søer omgivet af > 90% ler alene får bidrag via hydrauliske vinduer fra sandlinser eller glacialtektoniske flager (fx Nørresø på Fyn).

Vandbalancen for NOVANA intensivt overvågede søer (N=13), Hydrologi søer (N=13), samt supplerende søer Ove sø, Vandet sø, Søndersø Maribo, Selsø og Sorø Sø (N=5) er vist i trekantsdiagrammerne for ind- og ud-budgettet fordelt på de tre søgeologier: >50% sand og kalk; 10-50% sand og kalk, og > 90 % ler (Figur 20 og Figur 21). Bilag 2 viser søernes vandbalance. Ind-budgettet for søernes vandbalance viser at for søer med mere end 50% sand (og kalk) i en bufferzone omkring søerne på 100m i 0-15 meters dybde viser at disse søer (røde cirkler i figuren) fordeler sig over hele trekantens areal, hvilket betyder at søer med disse geologiske forhold kan være både klimadominerede, grundvandsdominerede og vandløbsdominerede. De af testsøerne der har > 50% grundvandsbidrag er udelukkende knyttet til søgeologi med > 50% sand og kalk. Søer i kontakt med geologiske aflejringer med 10-50% sand og kalk er karakteriseret ved en lavere komponent af grundvandsindsivning (< 20% grundvandsbidrag) i de fleste søer og en overvægt af overfladiske tilstrømning via tilløb (Oi). Søer omgivet af mere end 90% ler udgør kun en mindre del af de valgte testsøer (3 ud af 31 testsøer), hvorfor det er vanskeligere at udlede mere generelle karakteristika ved denne gruppe testsøer.



Figur 20: Ind-budgettet for 31 testsøer beregnet med DK-model2023.

Test søerne fordeler sig i ud-budgettet i to grupperinger (Figur 21). Den ene gruppe er styret af lige dele fordampning og udsivning af søvand til grundvandszonen. Den anden gruppe er domineret af 50-100% overfladisk afløb og 0-50% fordampning. Søer med søgeologi > 50% sand og kalk og 10-50% sand og kalk optræder i begge disse grupper for søer med > 90% ler kun findes i gruppen domineret af overfladisk afstrømning via afløb.



Figur 21: Ud-budgettet for 31 testsøer beregnet med DK-model2023. Sønumre er vist i legende til Figur 20.

Tabel 6 giver den forholdsmæssige fordeling af de tre vandbalanceled overfladiske til- løb (inkl. drænvand) (Oi), grundvandsindsivning (Gi) direkte i søbunden, samt det helt overfladenære grundvandsindsivning til søen (OFGV) via vådområder nær søbredden, grøfter og kildevæld. Derved opnås bedre indsigt i om søerne modtager grundvand fra helt overfladenære eller dybere grundvandsmagasiner. Tabellen viser at i langt hoved- parten af søerne er indstrømningen enten domineret af > 70% overfladiske indstrømning (OFGV) eller af > 70% overfladisk afstrømning via tilløb (Oi). Modelberegningerne vi- ser at færre søer har mere end 10% grundvandsindsivning via søbunden og kun en en- kelt har ca. 50% grundindsivning via søbunden. Hvis de udvalgte testsøer er repræsen- tative for alle målsatte søer større end 10 ha så betyder hovedparten af grundvandsbidra- get siver ind fra helt terrænnære grundvandsmagasiner og kun i få af søerne siver grund- vand ind fra større dybde. Er de geologiske forhold under søerne præget af vandførende aflejringer med enten 10-50% eller > 50% sand og kalk vil disse fremme de overflade- nære grundvandsafstrømninger.

Det er som diskuteret i afsnit 5.3 ikke muligt at vurdere usikkerheden på modelbereg- nede vandbalancer ved at sammenligne direkte med feltbestemte vandbalancer. Den

største usikkerhed er antageligt knyttet til grundvandsbidraget til søerne, mens der forekommer relativt gode oplysninger om usikkerheden på nedbørsdata (N) og tilstrømning via overfladiske tilløb (Oi).

Tabel 6: Forholdet mellem overfladisk indløb (Oi), helt overfladenært indstrømning af grundvand (OFGV) og indstrømning af lidt dybere grundvandsindsivning (Gi) beregnet med DK-model2023 i målsatte testsøer større end 10 ha. Søgeologi 0-5m og 0-15m: Rød (> 50% sand og kalk), blå (10-50% sand og kalk) og sort (> 90% ler).

mst_id	Sønavn	Sø #	Søgeologi		mm/år			%		
			0-5m	0-15m	Oi	Gi	OFGV	Oi	Gi	OFGV
684	Arresø	1			1211	39	48	93	3	4
714	Maglesø v. Brorfelde	2			188	1	694	21	0	79
724	Store Gribsø	3			0	0	495	0	0	100
754	Furesø	4			662	35	248	70	4	26
868	Maribo Søndersø	5			967	49	233	77	4	19
913	Vesterborg Sø	6			28502	90	733	97	0	2
179	Søholm Sø	7			4286	0	859	83	0	17
187	Arreskov Sø	8			784	36	976	44	2	54
197	Nørresø	9			1281	147	194	79	9	12
106	Engelsholm Sø	10			4639	858	187	82	15	3
144	Skær Sø	11			6	0	321	2	0	98
58	Kvie Sø	12			3	0	15	19	0	81
90	Vedsted Sø	13			60	0	164	27	0	73
985	Store Søgård Sø	14			13553	241	300	96	2	2
466	Grane Langsø	15			427	352	-12	56	46	-2
471	Halle Sø	16			25663	656	4299	84	2	14
473	Hinge Sø	17			19992	441	1920	89	2	9
504	Ravn Sø	18			7881	231	745	89	3	8
507	Rævsø	19			0	0	405	0	0	100
522	Stigsholm Sø	20			59656	430	6032	90	1	9
532	Torup Sø	21			86	415	929	6	29	65
552	Væng Sø	22			3702	613	12676	22	4	75
593	Ejstrup Sø	23			364	438	1408	16	20	64
597	Hampen Sø	24			437	161	121	61	22	17
632	Søby Sø	25			1132	412	4167	20	7	73
1117	Tvorup Hul	26			0	0	111	0	0	100
14	Nors Sø	27			738	0	510	59	0	41
26	Vandet Sø	28			1894	407	79	80	17	3
343	Ove Sø	29			21583	235	2629	88	1	11
718	Selsø Sø	30			5327	190	674	86	3	11
889	Sorø Sø	31			843	38	199	78	4	18

I Tabel 7 sammenstilles evalueringen af søkoncepterne fra 2019, 2023 med nærværende evaluering. Søtyperne er inddelt efter en søtypologi beskrevet indgående i Nilsson med flere (2019). I denne sammenhæng er det søkoncepterne gennemstrømningssø (søkoncept C) og grundvandstilstrømningssøer (søkoncept D), som er relevant for at vurdere grundvandsbidrag til søerne. Tabellen viser generel god overensstemmelse mellem søkoncepterne underbygget ved feltstudier og modelberegnete søkoncepter bestemt med DK-model 2023. Undtagelsen er Hampen Sø, hvor der er stor uoverensstemmelse mellem feltmålinger og simuleret udsivning af søvand til grundvandszonen.

Der er flere testsøer som ved en tidligere evaluering i 2019 blev klassificeret som gennemstrømningssøer (Furesø, Arreskov Sø, Grane Langsø, Torup Sø). Ingen af disse kan imidlertid valideres mod feltstudier. Det ser ud til at DK-model2023 konceptet har vanskeligt ved at identificere udstrømning via søbunden fra disse søer. Vandbalancerne der bestemmes for mange af testsøerne er imidlertid i god overensstemmelse med evalueringerne fra 2019 og 2023 (Nilsson med flere 2019, 2023).

Tabel 7: Inddeling i konceptuelle søtyper og evaluering af kontakten mellem grundvand og søer. Røde bogstaver er fremhævet, hvor der er ændret opfattelse af søtypologi fra 2019 og 2023 arbejdet til nuværende rapportering.

mst_id	Sønavn	Sø #	Søkoncept		Feltstudier
			Nilsson med flere 2019;2023	DK-model2023	
684	Arresø	1	C	C	
714	Maglesø v. Brorfelde	2	C/D	C	
724	Store Gribsø	3	C/D	C	C
754	Furesø	4	C	D	
868	Maribo Søndersø	5	C/D	D	
913	Vesterborg Sø	6	C/D	B	
179	Søholm Sø	7	C	C	
187	Arreskov Sø	8	C	D	
197	Nørresø	9		D	D
106	Engelsholm Sø	10	C/D	D	
144	Skær Sø	11	C	C	C
58	Kvie Sø	12	A/B/E	A/E	
90	Vedsted Sø	13	A/B/E	C	C
985	Store Søgård Sø	14	C/D	B	
466	Grane Langsø	15	C	D	D
471	Halle Sø	16	D	D	
473	Hinge Sø	17	C/D	D	
504	Ravn Sø	18	C	D	
507	Rævsø	19	C	C	C
522	Stigsholm Sø	20	D	D	
532	Torup Sø	21	C	D	
552	Væng Sø	22	D	D	D
593	Ejstrup Sø	23	D	D	D
597	Hampen Sø	24	C	D	C
632	Søby Sø	25	C/D	D	
1117	Tvorup Hul	26		C	C
14	Nors Sø	27	C/D	C	
26	Vandet Sø	28	C/D	D	
343	Ove Sø	29	C/D	D	
718	Selsø Sø	30		D	
889	Sorø Sø	31		D	

6. Opsummering

Modellens evne til at håndtere nogle af de efterspurgte beregninger efter tilpasning af DK-modellen er opsummeret i Tabel 8. Nærværende rapportering viser at antallet af VP3 målsatte vandløb, søer og GATØ, som der kan laves beregninger for er udvidet væsentligt med den tilpassede DK-model. Det vurderes at der nu kan laves en væsentlig forbedret kvantificering af vandudvekslingen mellem grundvand og søvand. Endelig mangler der data til kvantitativ vurdering af modelusikkerheden. Der er stor usikkerhed på anvendeligheden af resultaterne for kystområder da der stadig mangler en geologisk model for havområder.

Tabel 8: Vidensniveau hvad angår estimering/skøn af tilknyttede målsatte overfladevandområder og GATØ for så vidt angår potentiel kontakt, gradientforhold og vandudveksling af grundvand med vandløb, søer, kystvande og GATØ.

	Vandløb	Søer	GATØ	Kystvande
Vurdering af kontakt	Afstand mindre end 1m til GVF	Samme som vandløb + sandsynlighedsvurdering ud fra geologi og sødybder for søer < 10 ha. Direkte kontakt ikke nødvendigvis relevant ift. påvirkninger	Samme som vandløb. Uafklaret om den direkte kontakt er relevant ift. påvirkninger	Simpel overlap test (for 100m buffer område, da der ikke er afgrænset grundvandsforekomster under havområde)
Vurdering af gradient	Opadrettet vandstrømning indenfor buffer	Opadrettet strømning til sø-arealet	Opadrettet strømning til GATØ arealer	Ikke muligt, evt. opadrettet strømning indenfor buffer
Vurdering af vandflux	Specifik tilstrømning samt relativ flux indenfor buffer	Relativ flux. Vandbalance komponenter kan bestemmes med nogen usikkerhed for søer > 10ha	Relativ flux. Usikkerheden på den beregnede vandflux til GATØ formentligt meget stor (uafklaret)	Indirekte via overordnet vandbalance, evt. relativ flux indenfor buffer + havområde

7. Konklusion

Med det ny søkoncept viser beregningen af gradient/vandflux i kontakten mellem grundvand og søer og af vandbalancer for søer god overensstemmelse mellem modelberegninger med DK-model2023 og feltmålinger/-analyser. Bedst overensstemmelse observeres i bestemmelsen af den opadrettede vandbevægelsen mellem grundvand og sø. Lidt mere usikkerhed ses for visse søer ved bestemmelsen af udsivning af søvand til grundvandszonen. Dog skal det nævnes at for hovedparten af testsøerne beregner modellen udsivning i de søer med en vis usikkerhed (størst for Hampen Sø).

Projektet er nået længere end forventet ved bestemmelse af vandbalancer for målsatte søer idet der nu foreligger modelberegnete vandbalancer for samtlige målsatte søer større end 10 ha. Dertil kommer at der også foreligger vandbalancer for søer på 5-10 ha som dog vurderes at være de mest usikre. Den sammenlignende analyse viser at der ofte er rimelig overensstemmelse mellem modelberegnete vandbalancer og vandbalancer bestemt ved feltundersøgelser. Usikkerheden er næsten udelukkende knyttet til bestemmelsen af grundvandsindsivningen eller søvandsudsivningen da alle øvrige vandbalancekomponenter er næsten ens for model og feltberegningerne (dvs. nedbør, aktuel fordampning, overfladisk til- og afstrømning). Størst usikkerhed er knyttet vandbalancen for de søer der er domineret af udsivende søvand til grundvandszonen: gennemstrømningssøer (søtype C) og udstrømningssøer eller losing lakes (søtype E).

Yderligere kan modellen i rimelig grad kvantificere forholdet mellem den helt overfladenære tilstrømning af grundvand i søens bredzonen og opadrette strømning af grundvand fra større dybde. Det betyder at ved koblingen af grundvandsforekomster med de målsatte søer kan der sandsynligvis skelnes mellem indsivning fra grundvandsforekomster og grundvand der siver ind fra magasiner der ikke er afgrænset af grundvandsforekomsterne. For de søer med en søgeologi domineret af sand og kalk vil det indstrømmende vand sandsynligvis være afgrænset af den øverste grundvandsforekomst, men i alle de søer hvor kontakten mellem grundvand og sø er ringere kan det ikke udelukkes at det helt terrænnære grundvand ikke af afgrænset af en grundvandsforekomst.

Koblingen af grundvandsforekomsterne og det ny målsatte vandløbsnetværk har givet mulighed for at beregne specifik tilstrømning af grundvand (sommersituation) til alle vandløbsstrækninger i modellen i enheden l/s/km. Den specifikke tilstrømning kan løst oversættes til tilvækst i baseflow og er brugt i vandkvalitetspåvirkningsberegninger som et konservativt bud på grundvandsfluxen. Koblingen er betinget af et afstandskrav mellem toppen af grundvandsforekomsten skal være mindre end 1 m og en beregnet opadrettet gradient / potentiel vandbevægelse. Der er desuden beregnet to vandbalancekomponenter for vandløbene, dels grundvandstilstrømningen til ådalen og dels grundvandsudstrømningen fra øverste magasinlag, samt forholdet mellem disse.

Grundvandsforekomsterne og GATØ er blevet koblet indenfor en 100m buffer til grundvandsforekomsterne ud fra et afstands- og gradientkrav. Hertil er der beregnet relativ vandflux til de enkelte GATØ indenfor samme buffer. Kontakt og relativ fluxberegningerne må forventes behæftet med meget stor usikkerhed.

7.1 anbefalinger

Forbedret dokumentation af indstrømningsforholdene i søer uden feltundersøgelser med etablering af midlertidig monitoringsnet af borer til bestemmelse af vandstand, gradientforhold og udtagning af stabile iltisotoper til vurdering vandets oprindelse (nedbør, grundvand, overfladevand).

Bedre beskrivelse af søer med varierende vandstandsforhold.

Det anbefales i et fremtidigt projekt at undersøge om forskellen i grundvandsbidrag bestemt i felt og med model alene kan forklares med modelusikkerhed eller om det er muligt med den nuværende viden at ekstrapolere til søer uden måledata og ud fra den nuværende viden vurdere om modellen performer bedre for nogle søtyper end for andre.

Det anbefales at gennemføre en egentlig vurderingen af kontakt- og vandstrømningsregninger for GATØ med særlig fokus på skalaproblematikken og vandbalance komponenten det terrænnære grundvand.

8. Referencer

Anon., 2023. HIP. <https://hip.dataforsyningen.dk/>

Henriksen, H. et al., 2021. Udvikling af landsdækkende modelberegninger af terrænnære hydrologiske forhold i 100m grid ved anvendelse af DK-modellen: Dokumentationsrapport vedr. modelleverancer til Hydrologisk Informations- og Prognosesystem, s.l.: GEUS. DOI: 10.22008/gpub/38113.

Højberg AL, Thodsen H, Børgesen CD, Tornbjerg H, Nordstrøm BO, Troldborg L, Hoffmann CC, Kjeldgaard A, Holm H, Audet J, Ellermann T, Christensen JH, Bach EO, Pedersen BF (2021). National kvælstofmodel – version 2020, Metode rapport. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland. GEUS Specialrapport.

Kazmierczak J, Müller S, Nilsson B, Postma D, Czekaj J, Sebk E, Jessen S, Karan S, Jensen CS, Edelvang K, Engesgaard P (2016). Groundwater flow and heterogeneous discharge into a seepage lake: Combined use of physical methods and hydrochemical tracers, Water Resour. Res., 52, 9109–9130, doi:10.1002/2016WR019326.

Karan, S., Stenvig Jensen, C., Edelvang, K., & Engesgaard, P. (2016). Groundwater flow and heterogeneous discharge into a seepage lake: Combined use of physical methods and hydrochemical tracers. Water Resources Research, 52, 9109–9130. <https://doi.org/10.1002/2016WR019326>

Kidmose J, Engesgaard P, Nilsson B, Laier T, and Looms MC (2011). Spatial distribution of seepage at a flow through lake: Lake Hampen, Western Denmark, Vadose Zone Journal, HOBE Special Issue, 10, 110-124.

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

Nilsson B, Engesgaard P, Kidmose P, Karan S, Looms MC, Frandsen MCS (2009). Water budget of Skærsø, a lake in south-east Jylland, Denmark: exchange between groundwater and lake water. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 17, 45–48.

Nilsson, B. et al., 2019c. Vurdering af grundvandets kemiske og kvantitative påvirkning af søer. GEUS Rapport 2019/3, <https://doi.org/10.22008/gpub/32603>

Nilsson, B., Troldborg, L., Koch, J. & Kidmose, J., 2023. Metode til kategorisering af søer i forhold til deres kontakt med grundvandet. GEUS Rapport 2023/32

Ondracek M, Troldborg L, Hansen MFT, Chstiansen DT, Molis M, Schneider RJM, Kidmose JB, Nilsson B, 2023. Tilpasning DK-model med VP3 målsatte vandløb og søer. GEUS rapport 2023/52

Rosenberry, D.O. 2000. Unsaturated-zone wedge beneath a large, natural lake. *Water Resour. Res.* 36:3401–3409.

Staehr P, Sand-Jensen K, Raun AL, Nilsson B, Kidmose P (2010). Drivers of metabolism and net heterotrophy in contrasting lakes. *Limnol. Oceanogr.*, 55(2), 2010, 817–830.

Stisen, S. et al., 2019. National Vandressource Model. Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019, s.l.: GEUS Rapport 2019/31.

Troldborg, L., Sørensen, B.L., Kristensen, M., Mielby, S. (2014): Afgrænsning af grundvandsforekomster. Tredje revision af grundvandsforekomster i Danmark. GEUS rapport, nr. 58.

Troldborg L (2020). Afgrænsning af de danske grundvandsforekomster. GEUS rapport 2020/1.

Bilag 1

Middelværdier for perioden 2001-2018 for 24 søer med mere end 1m vandspejlsændring.

mst_id	Sø	Størrelse, km2 (MST shape fil)	Difference - Sø vandstand [m]	Initialt Sø vandstand [kote]	Simuleret SøVandstand [kote]
827	Ulse Sø	0.5	-7.36	52.99	45.63
904	Søtorup Sø	0.68	-6.28	56.03	49.75
564	Løvenholm Langsø	0.17	-2.34	28.94	26.60
372	Store Økssø	0.33	-2.29	64.01	61.72
786	Søllerød Sø	0.13	-2.27	21.55	19.28
506	Ring Sø	0.22	-2.06	78.53	76.47
688	Buresø	0.75	-1.84	26.29	24.45
501	Ormstrup Sø	0.13	-1.68	33.27	31.59
328	Madum Sø	2.04	-1.58	36.86	35.28
742	Bondedam	0.12	-1.24	20.91	19.67
823	Skovbakke Sø	0.1	-1.13	37.77	36.63
423	Udbyover sø	0.18	-1.11	12.79	11.68
2206	Lyngager Sø	0.13	-1.10	31.40	30.31
744	Bøgeholm Sø	0.27	-1.03	25.28	24.25
870	Møllesø, Falster	0.1	-1.02	13.78	12.76
469	Gudensø	1.68	1.23	22.28	23.50
513	Silkeborg Langsø øst	0.92	1.27	19.08	20.35
342	Nørskov Vig	1.11	1.40	0.00	1.40
332	Mølholm Kridtgrav	0.13	1.47	1.75	3.22
429	Holstebro Vandkraftsø	0.59	1.65	13.57	15.22
638	Søbylejet Sø 38	0.1	2.34	46.22	48.56
728	Strøllille Gravsø	0.14	2.49	6.02	8.51
640	Søbylejet Sø 9	0.16	2.65	44.81	47.45
309	Kilen	3.26	5.52	0.00	5.52

Bilag 2

Vandbalance for NOVANA intensivt overvågede søer (N=13), Hydrologi-søer (N=13) samt de supplerende søer, Ove Sø, Vandet Sø, Søndersø Maribo, Selsø og Sorø Sø (N=5). Venstre kolonne: NOVANA søer (lys gule); supplerende søer (mørkere gule); Hydrologi-søerne (grønne). Alle tal er opgivet i mm/år (Fra Nilsson med flere 2023).

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
Hinge Sø	ingen data	26601	859	606	-253	-	-
Ravn Sø	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
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
Ejstrup Sø	0	9759	981	684	-297	9759	9462
Hampens 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. Gribso	141	0	803	727	-76	-141	-217
Tvorup hul	0	0	993	718	-275	0	-275
Nørresø	162	705	815	751	-64	543	479