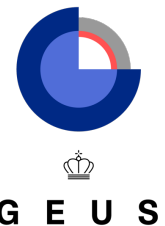


Grundvandsmodellering

Forskning og anvendelse – hvor er vi og hvor er vi på vej hen

Simon Stisen

- og hydrologisk afdeling på GEUS



Grundvandsmodellering

Forskning og anvendelse – hvor er vi og hvor er vi på vej hen

Udviklingen de sidste 10-20 år

- Hvilke spørgsmål anvender vi grundvandsmodeller til at besvare i dag?
- Hvad kræver det af vores grundvandsmodeller?
- Hvordan håndterer vi de krav?

De næste 10 år

- Machine learning og grundvandsmodellering
- Hvilke muligheder giver det os?



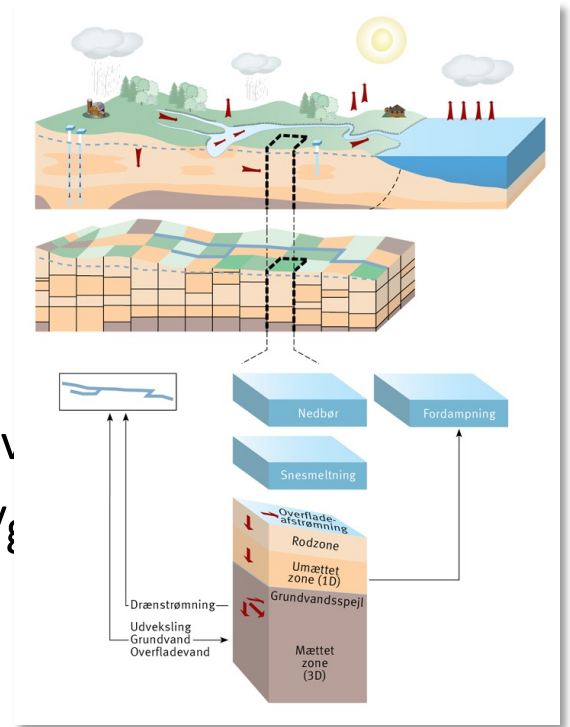
GEUS

Grundvandsmodeller

Hvilke spørgsmål hjælper de med at besvare?

- Traditionelle spørgsmål
 - Grundvandsænkning ved vandindvinding
 - Indvindingsoplande
 - Grundvandsbeskyttelse
- Nye komplekse spørgsmål
 - Klimaforandringer – grundvand og overfladevand
 - Effekt af vandindvinding på økosystemer
 - Tørke effekter på grundvand
 - Kvælstof transport og omsætning i grundvand og overfladevand
 - Højtstående/terrænnært grundvand og oversvømmelser –realtids modellering
 - Grundvands rolle i drivhusgas-emissioner fra lavbundslande

- “Rene” grundv
- Trykniveauer/
- Steady state

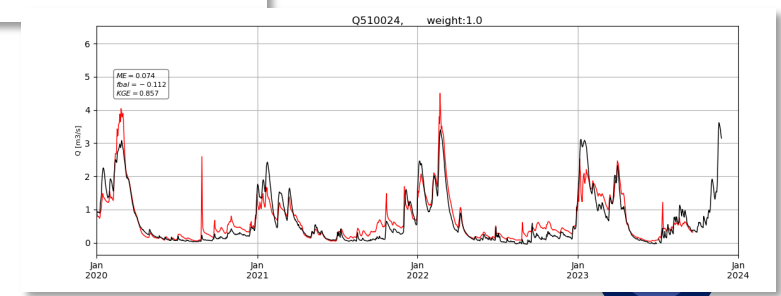
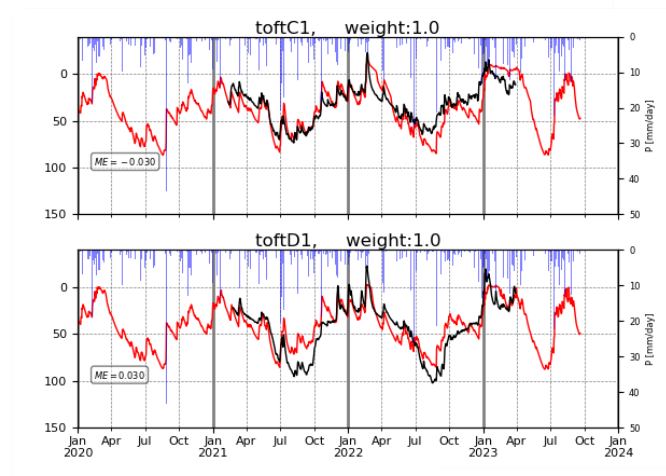
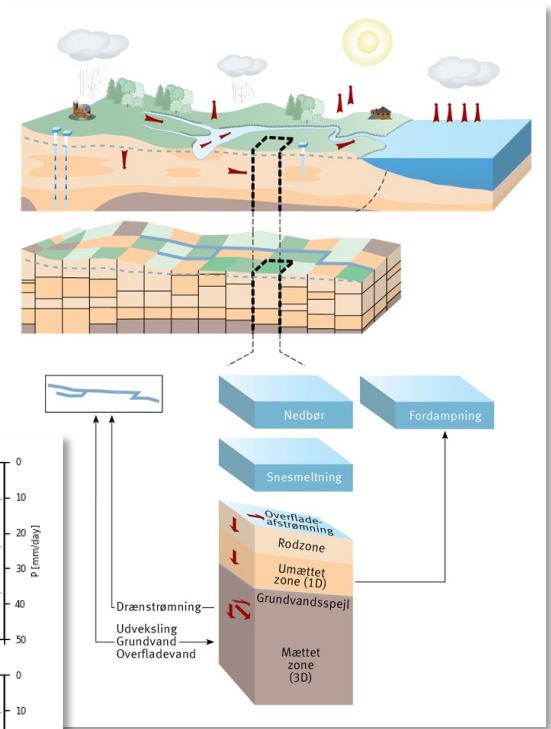


- Integrerede grundvandsmodeller
- Interaktionen mellem grundvand og overfladevand
- Transiente modelkørsler
- Høj rumlig opløsning
- Multiple output variable



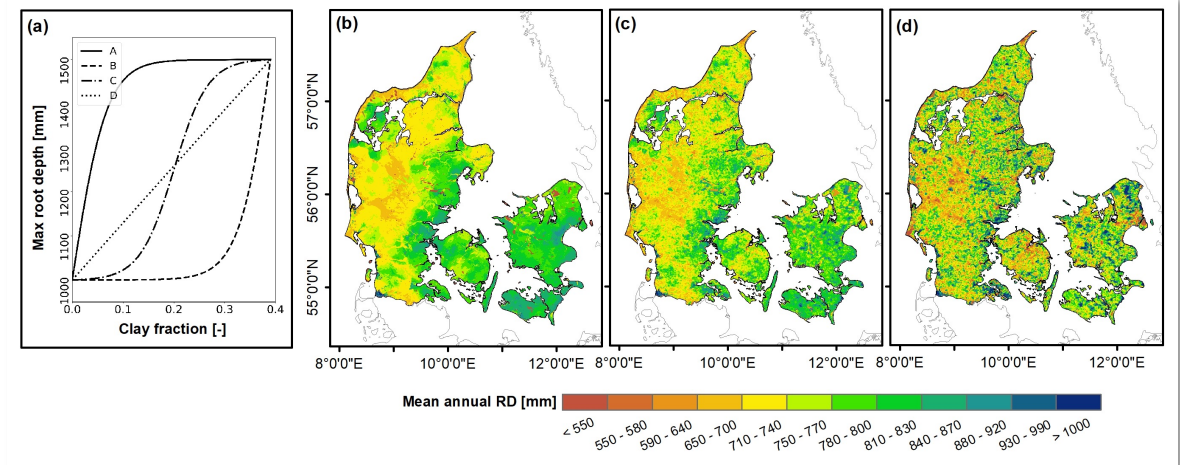
Grundvandsmodellering

- Integrerede transiente modeller
 - Mange hydrologiske variable
 - Høj opløsning (tid og rum)
 - Mange parametre
- Behov for multiple evalueringsmål/ objektive funktioner
- Behov for nye kalibreringsmetoder og usikkerhedsanalyser



Grundvandsmodellering

- Udnyttelse af nye data
 - Geofysik data
 - Satellit data
 - Detaljerede kortlægnings data
 - Nye typer observations data
- Regionalisering af model parameter
 - Rumlig detaljering, konsistens og få parametre



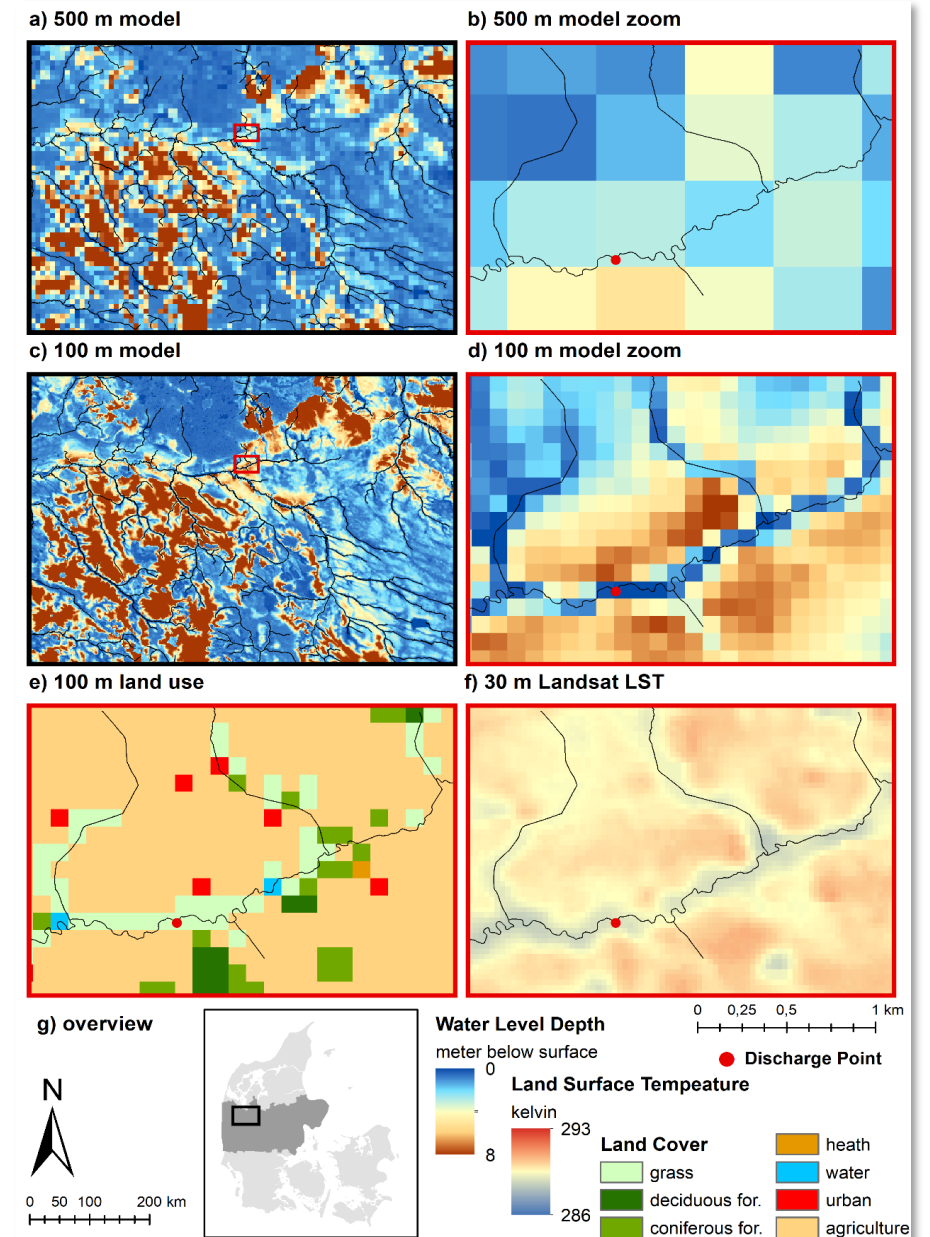
$$RD_{i,t} [mm] = (1 - w) \cdot RD_{max,i}(cf) + w \cdot RD_{max,i}(cf) \cdot NDVI_{scaled,i,t}$$

Soltani et al 2021, JoH



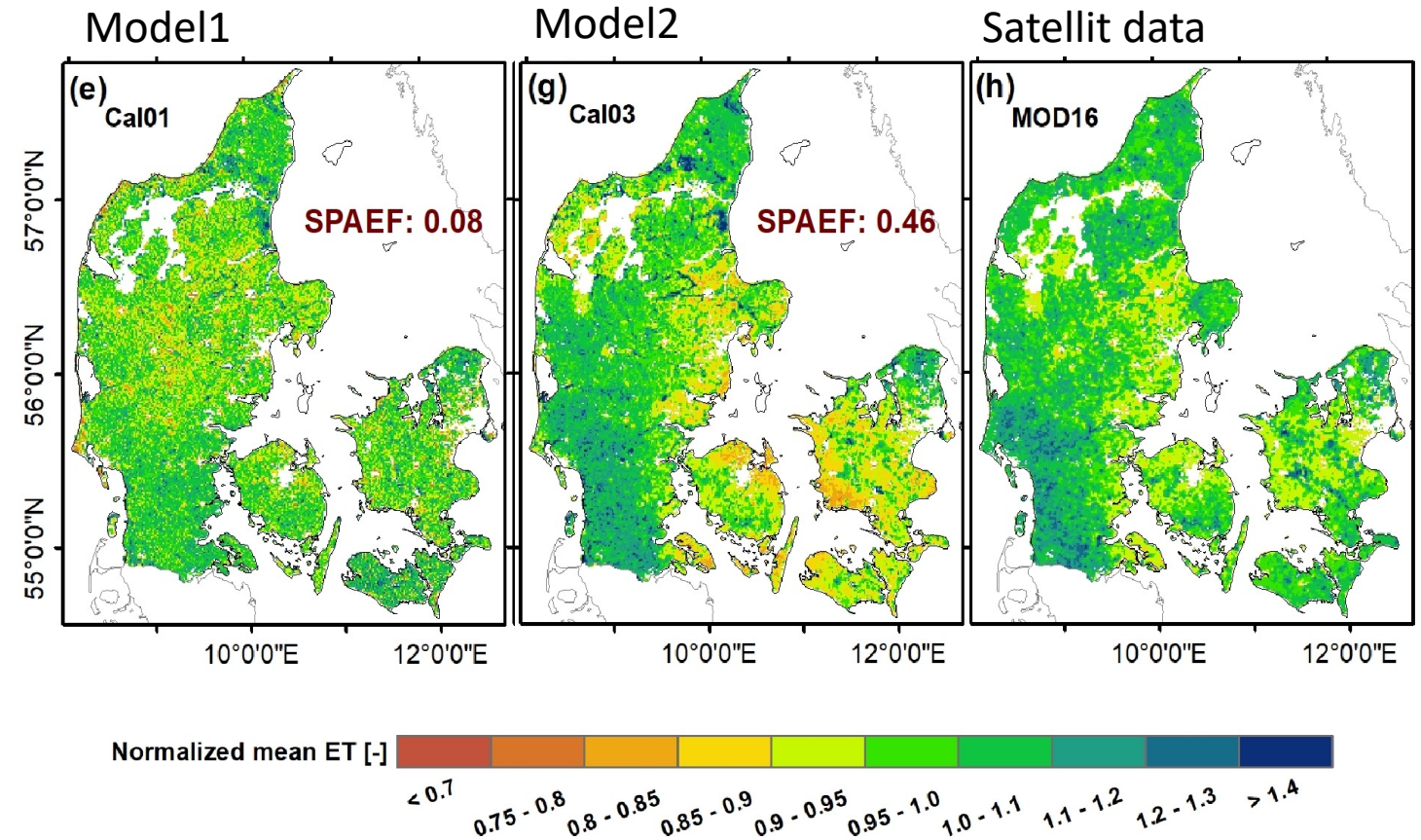
Grundvandsmodellering

- Udnyttelse af nye data
 - Geofysik data
 - Satellit data
 - Detaljerede kortlægnings data
 - Nye typer observations data
- Regionalisering af model parameter
 - Rumlig detaljering, konsistens og få parametre



Satellite data

- Anvendelse af satellit data til kalibrering af hydrologiske modeller
- Tilføje det rumlige mønster af aktuel fordampning til kalibreringen
- Klar forbedring af de simulerede rumlige mønstre af fordampning
- Ingen tradeoff med hensyn til trykniveau og vandføring



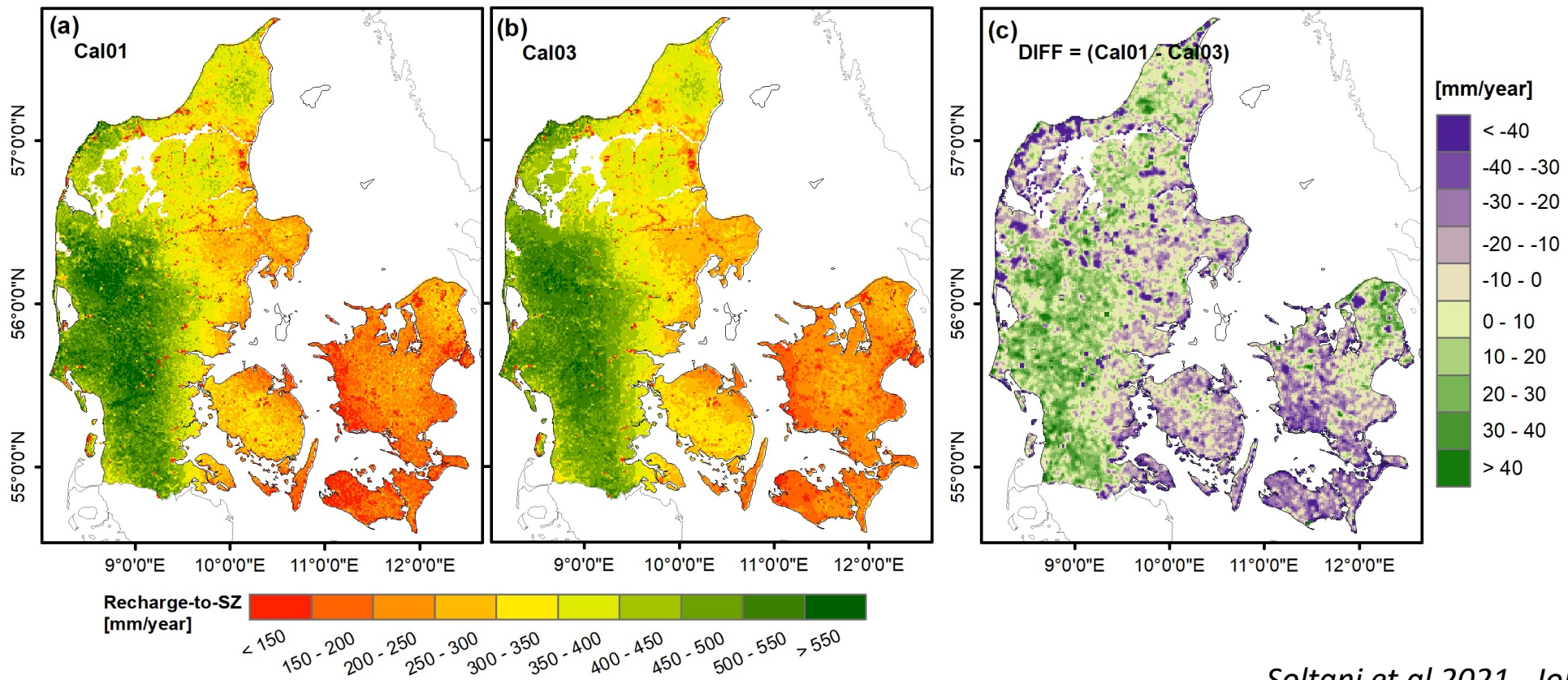
Soltani et al 2021, JoH



GEUS

Satellite data

- Effekten på simuleret grundvandsdannelse (Cal01-Cal03)



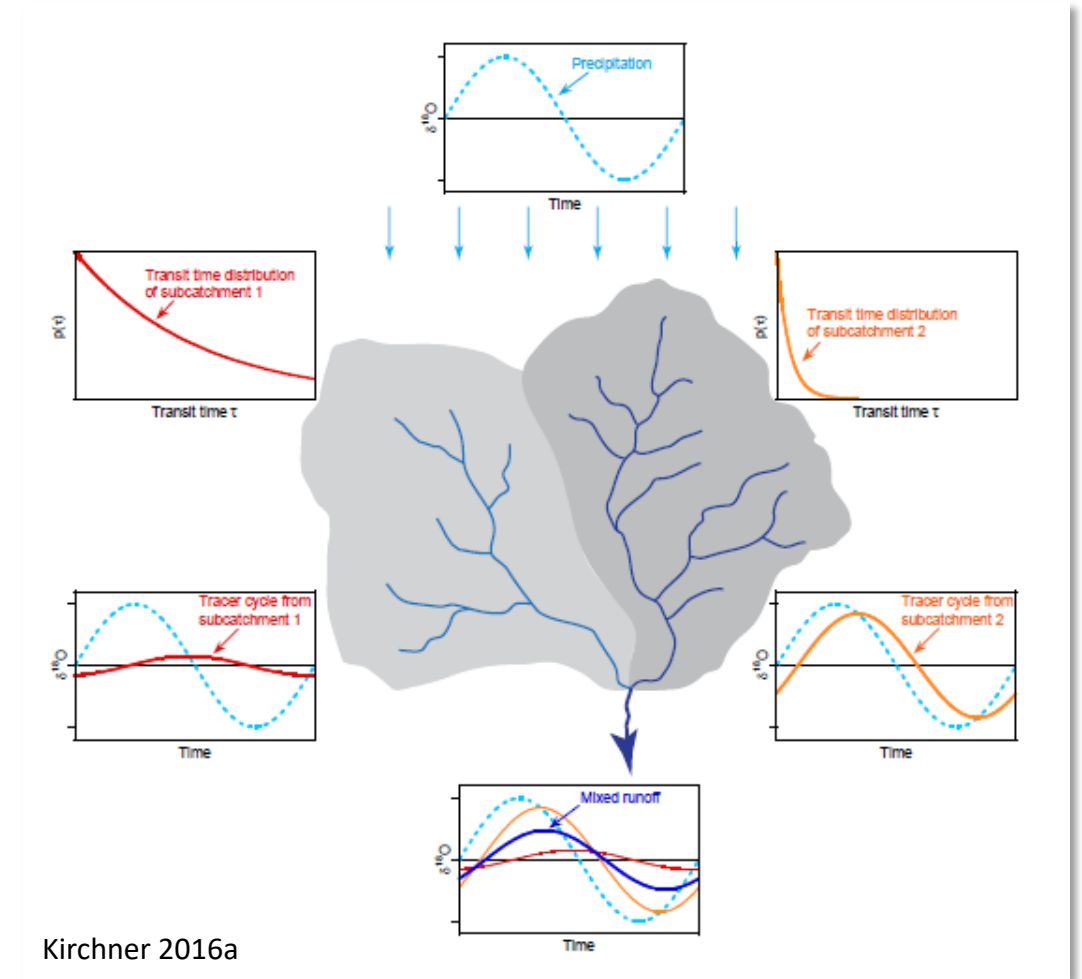
Soltani et al 2021, JoH



GEUS

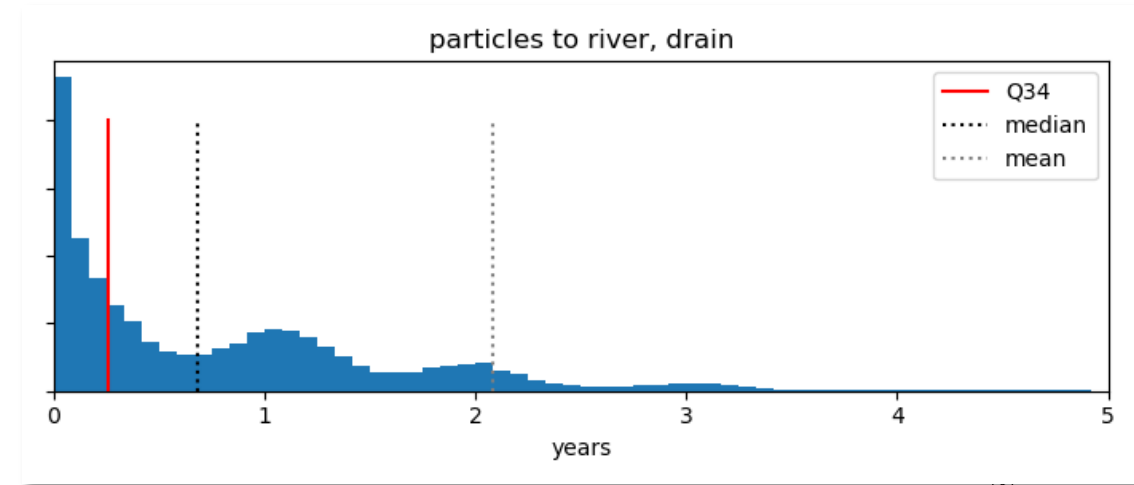
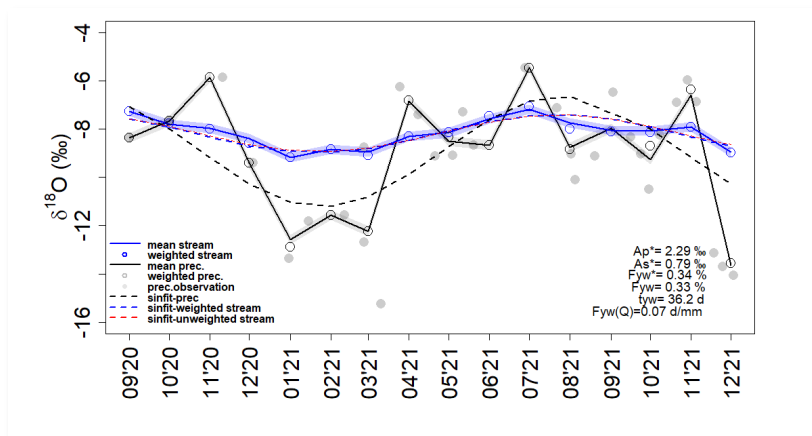
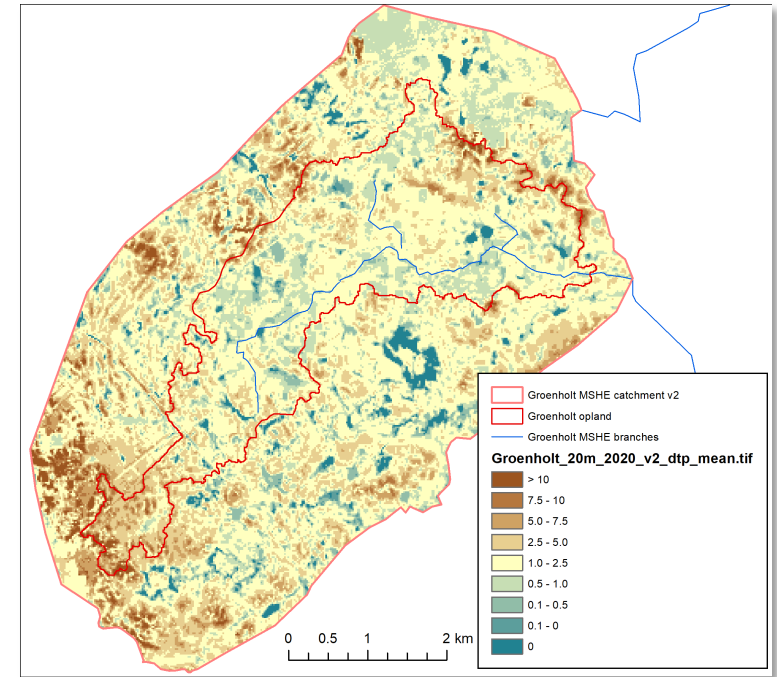
Isotop data

- Tidsserier af isotoper (som ^{18}O og ^2H) kan anvendes som tracere for både heterogene og ikke-stationære forhold (Kirchner 2016a)
- Kvantificere andelen af ungt vand (F_{YW}) i vandløb på oplandsskala
- Nye muligheder for at få indsigt i aldersfordeling, strømningsveje og deres relation til stofomsætning og vandkvalitet



Isotop data

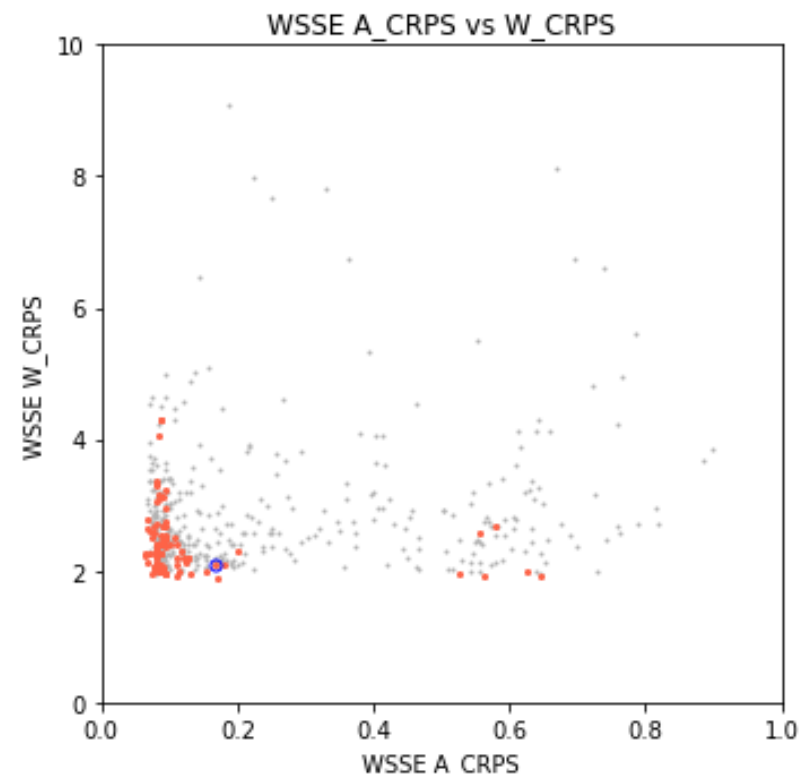
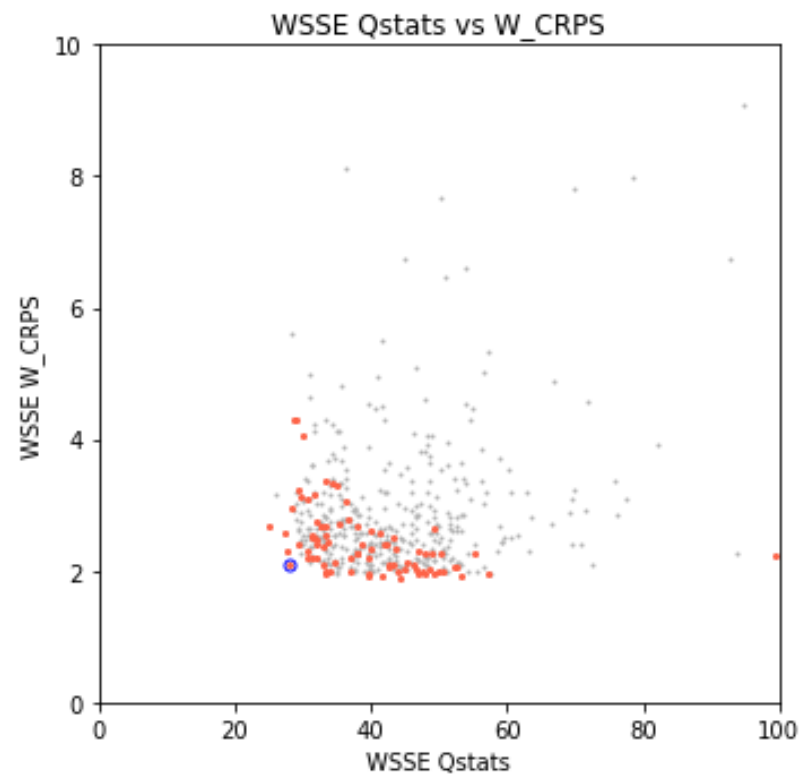
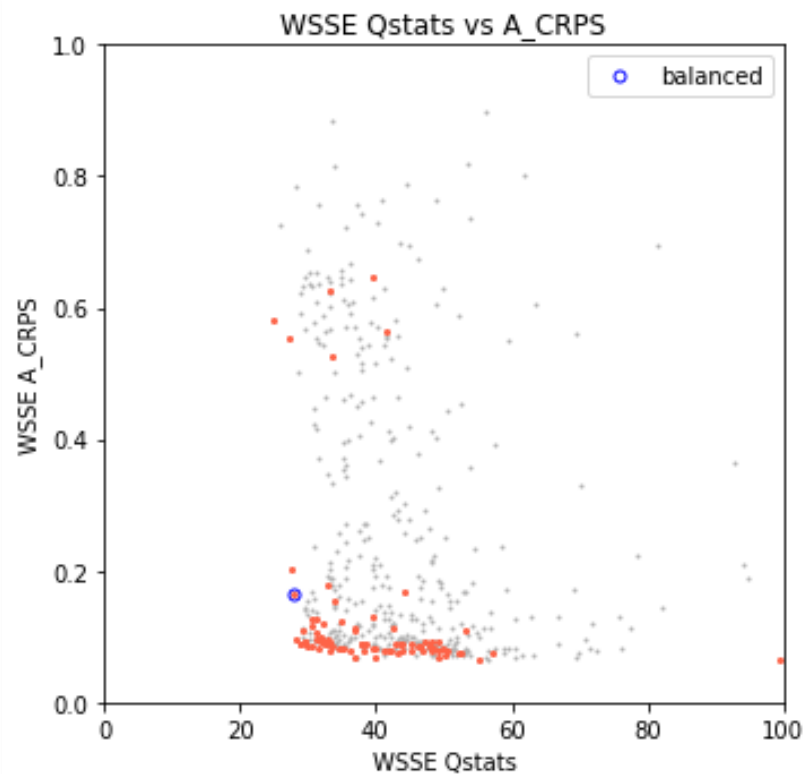
- Evaluering af 20 m MIKE SHE model for Grønholt å
- Isotop baseret måling af vand i vandløb yngre end 90 dage var 34% (F_{YW})
- Baseret partikelbase simulering med modellen var Q34 ca. 95 dage



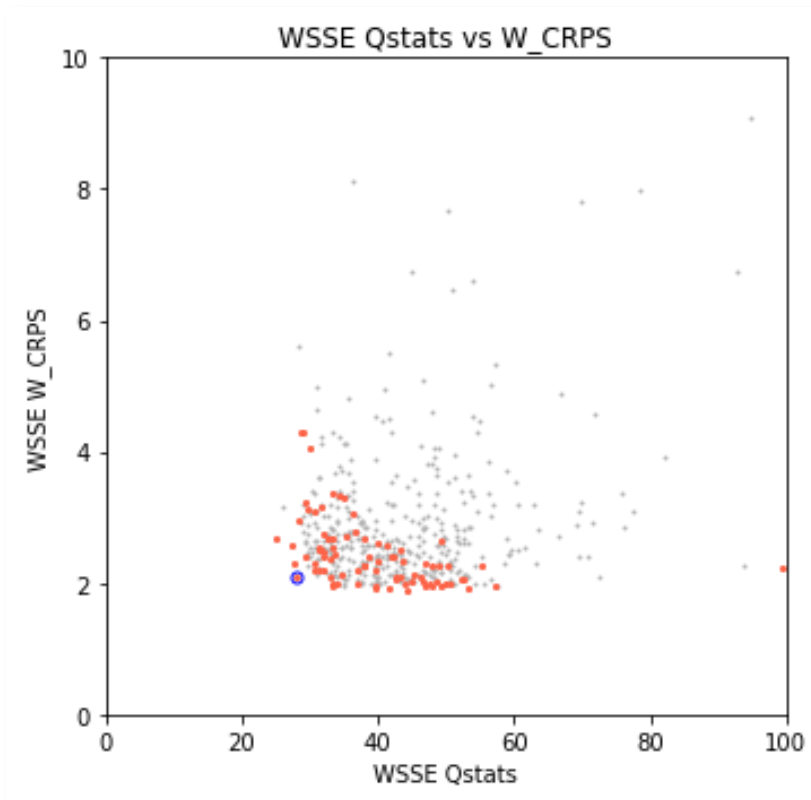
Sasha Müller og Raphael Schneider

Kalibrering – Pareto Achieving Dynamical Dimension Search (PADDS)

- Flere forskellige kalibreringsmål kræver en ny tilgang til parameter optimering
- Optimerer en pareto-front for alle objektiv funktions grupper (Tolson and Shoemaker, 2007, WRR)
- Ikke ét optimalt parametersæt og ikke behov for apriori vægtning af kalibreringsmål



Kalibrering – Pareto Achieving Dynamical Dimension Search (PADDS)

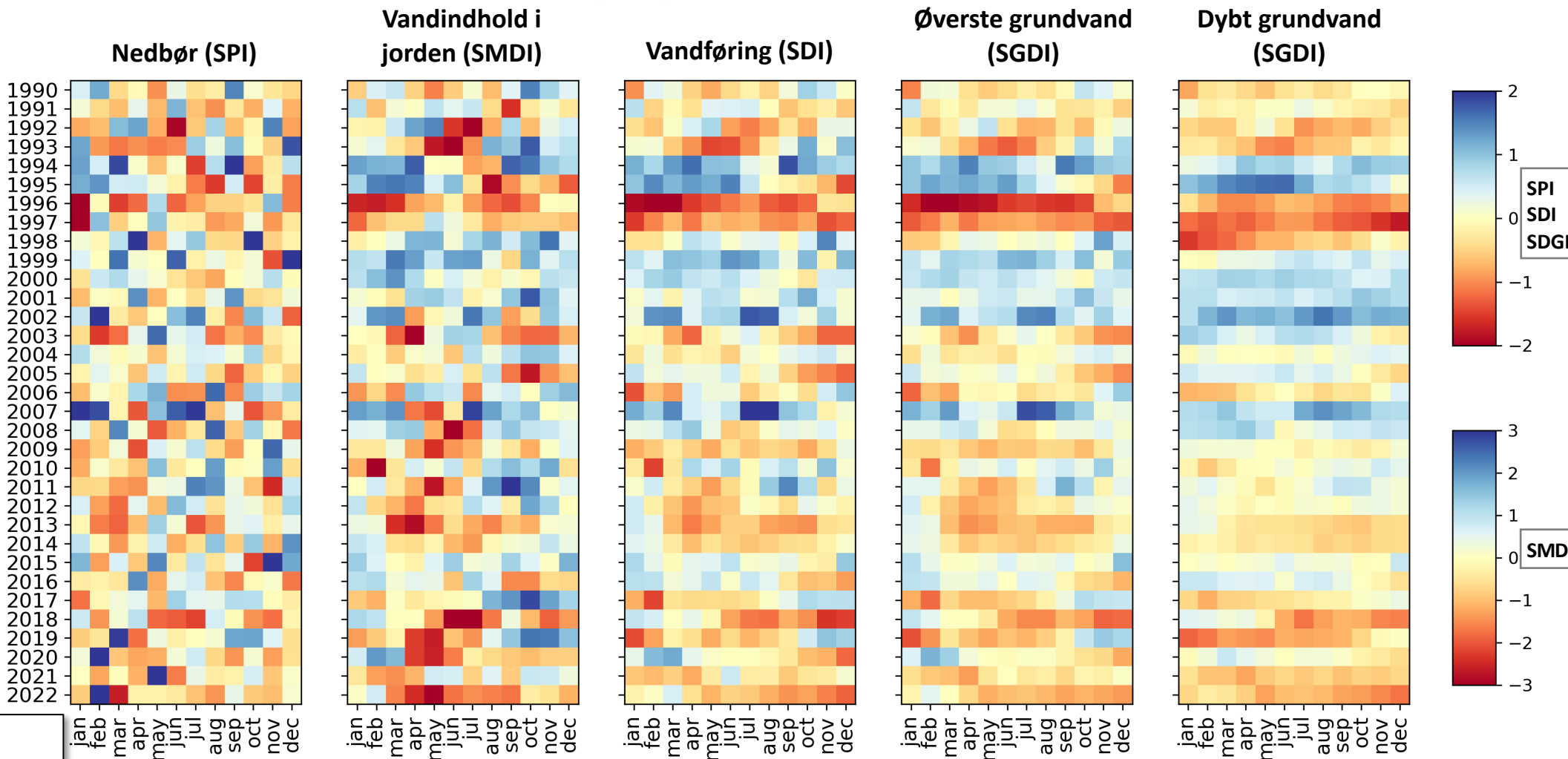


Hydrologiske indeks

gennemsnit på tværs af DK, for hver måned i årene 1990 til 2022

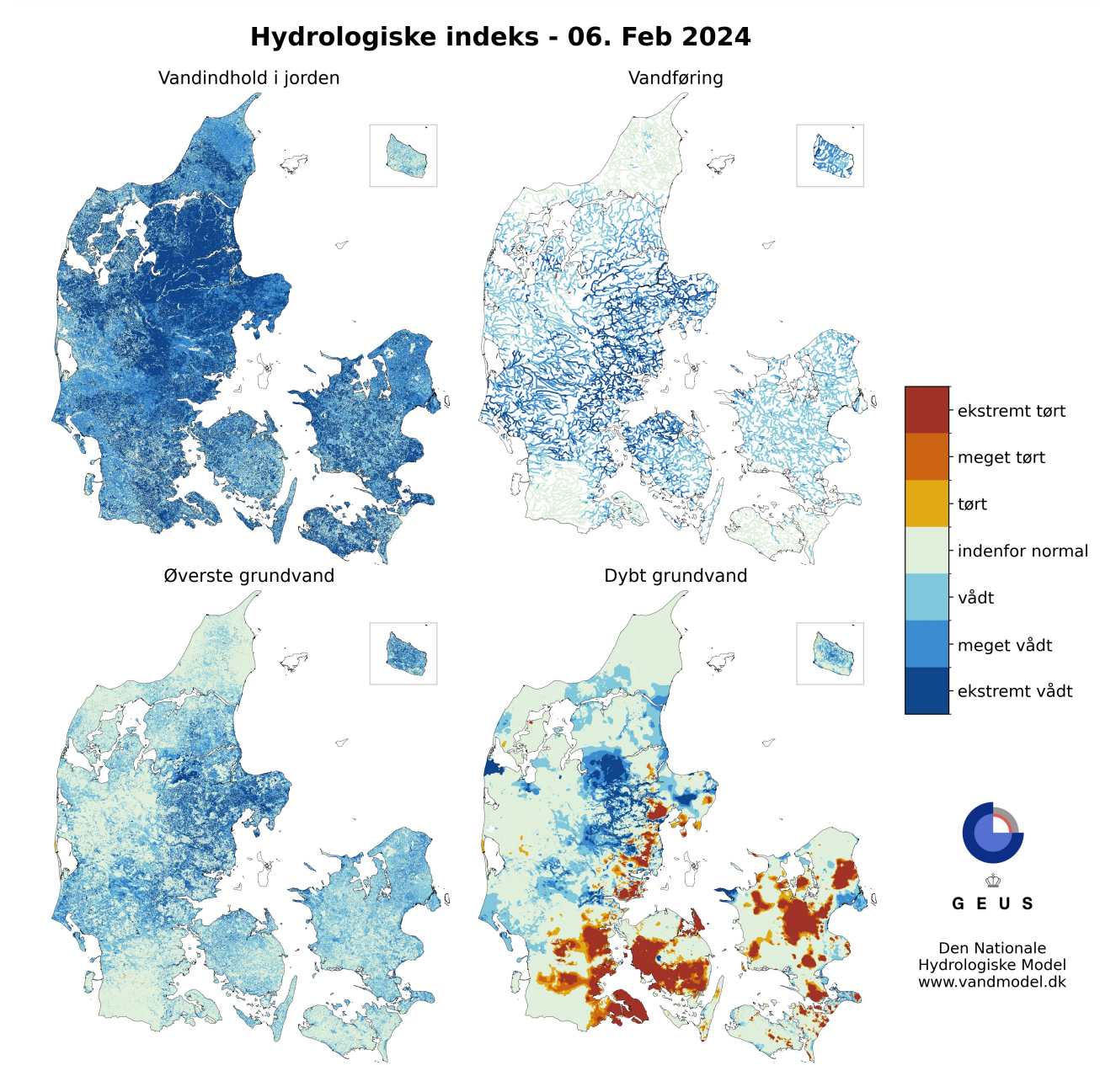
(Schneider et al 2022)

Hydrological indices for DK

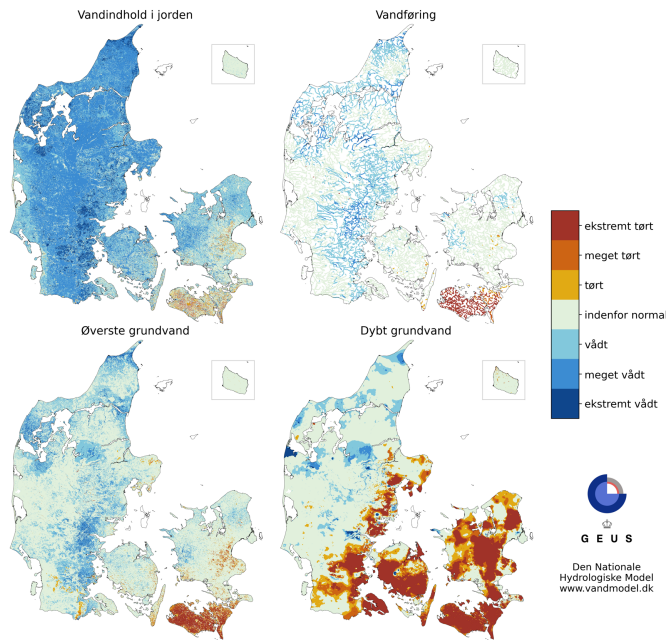


Grundvandsmodeller i realtid

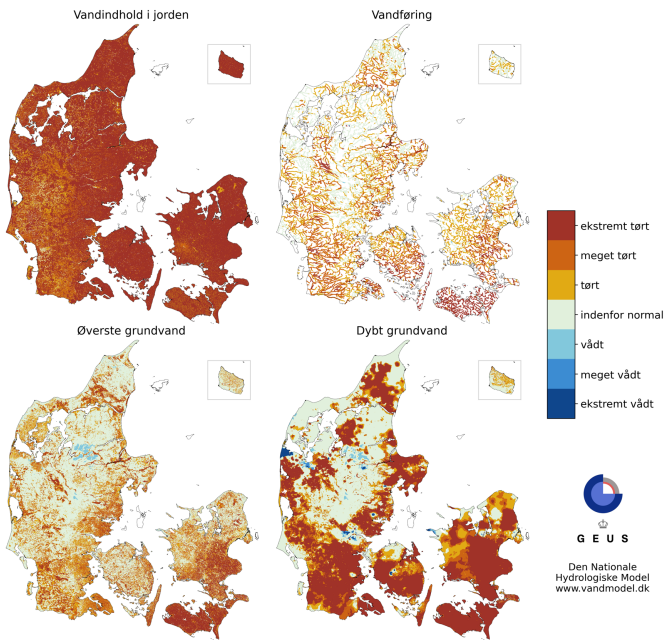
- Sammenhængende analyser af den hydrologiske tilstand
- På tværs af landet
- På tværs af tid
- På tværs af det hydrologiske system



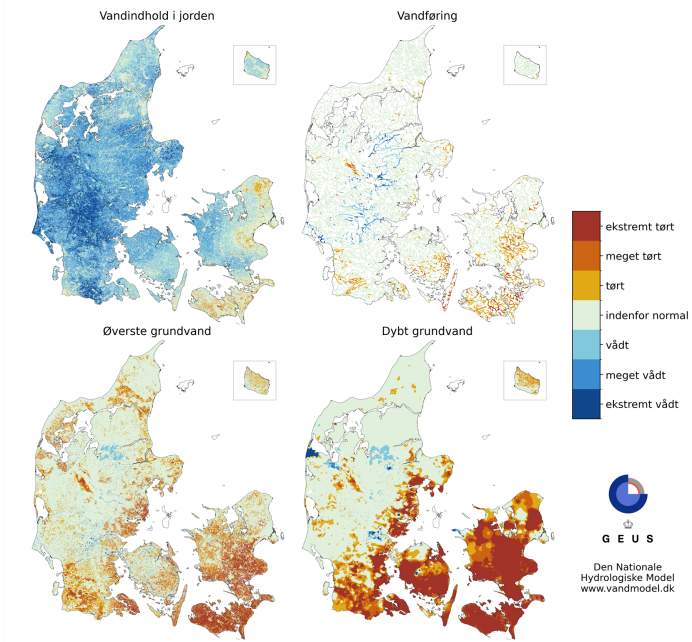
Hydrologiske indeks - 16. Apr 2023



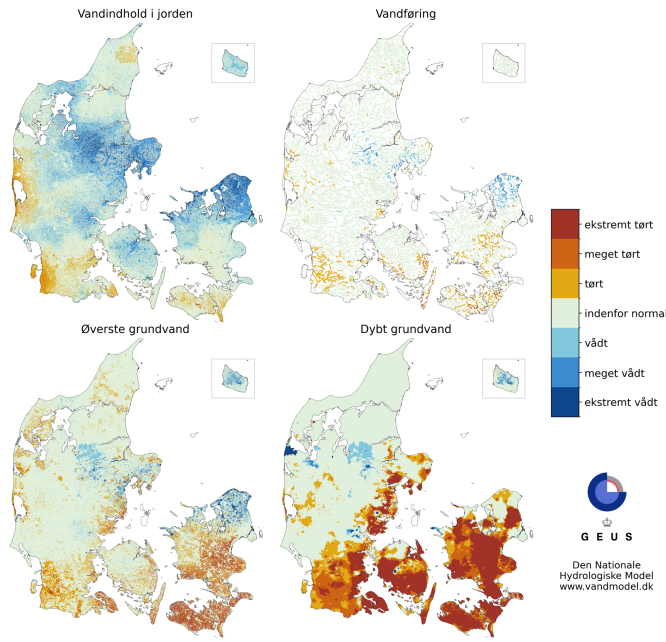
Hydrologiske indeks - 19. Jun 2023



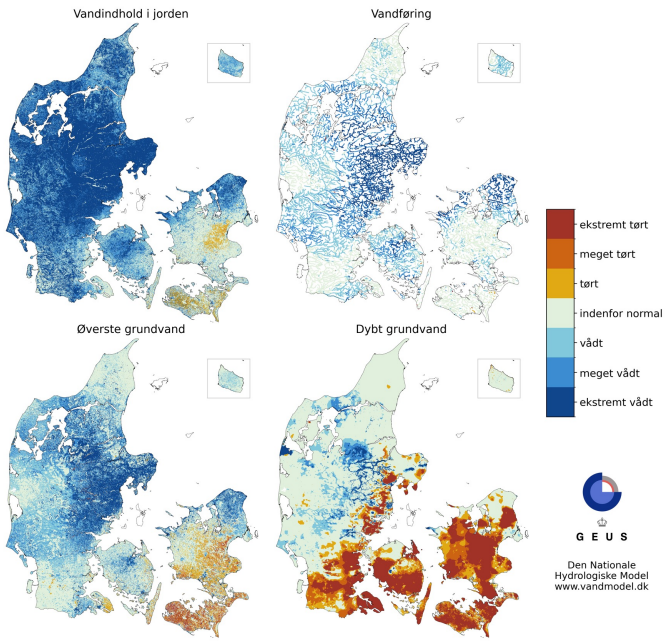
Hydrologiske indeks - 25. Jul 2023



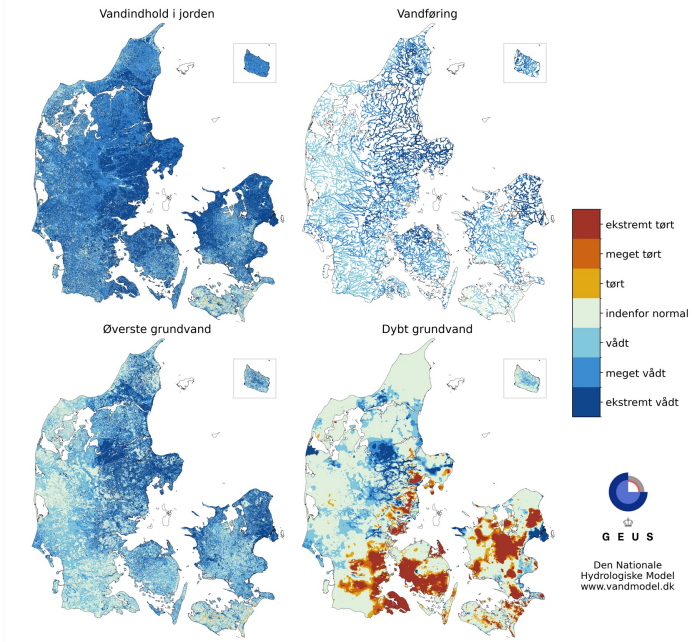
Hydrologiske indeks - 10. Sep 2023



Hydrologiske indeks - 01. Nov 2023



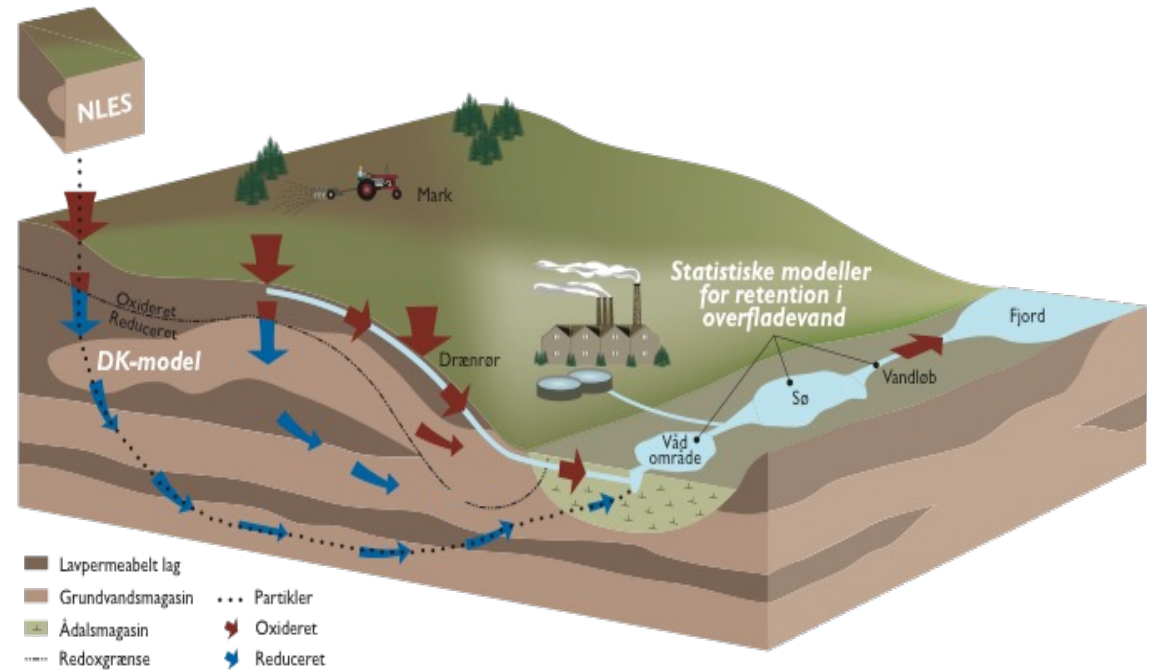
Hydrologiske indeks - 03. Jan 2024



Kvælstof retention

Grundvand

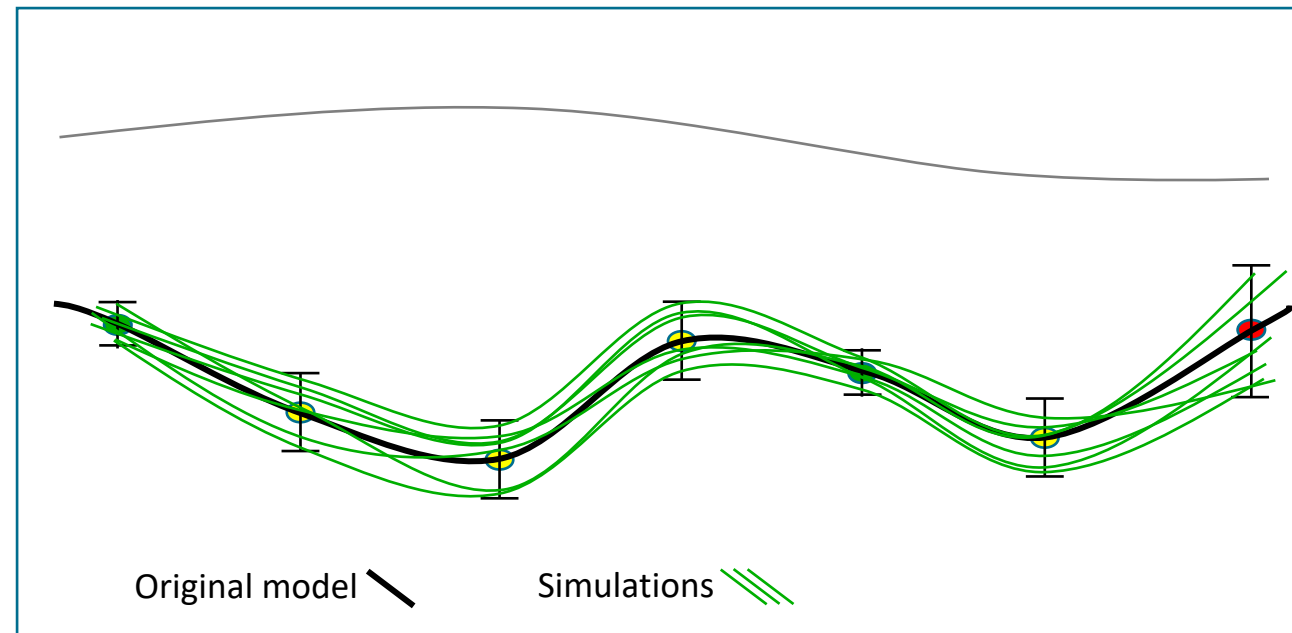
- Bidrag
 - Transport via dræn
 - Transport via grundvandsstrømning
- Rumlig variation i reduktion af kvælstof i grundvand
 - Transportveje (partikelbane simuleringer)
 - Geokemisk model



Kvælstof retension

Grundvand

- Usikkerhed
 - Hydrostrategrafisk model
 - Ensemble af mulige laggrænseflader
 - Baseret på estimeret usikkerhed for hvert interpolationspunkt
 - Geofysik, boringer etc.
 - Model parametre
 - Andre..

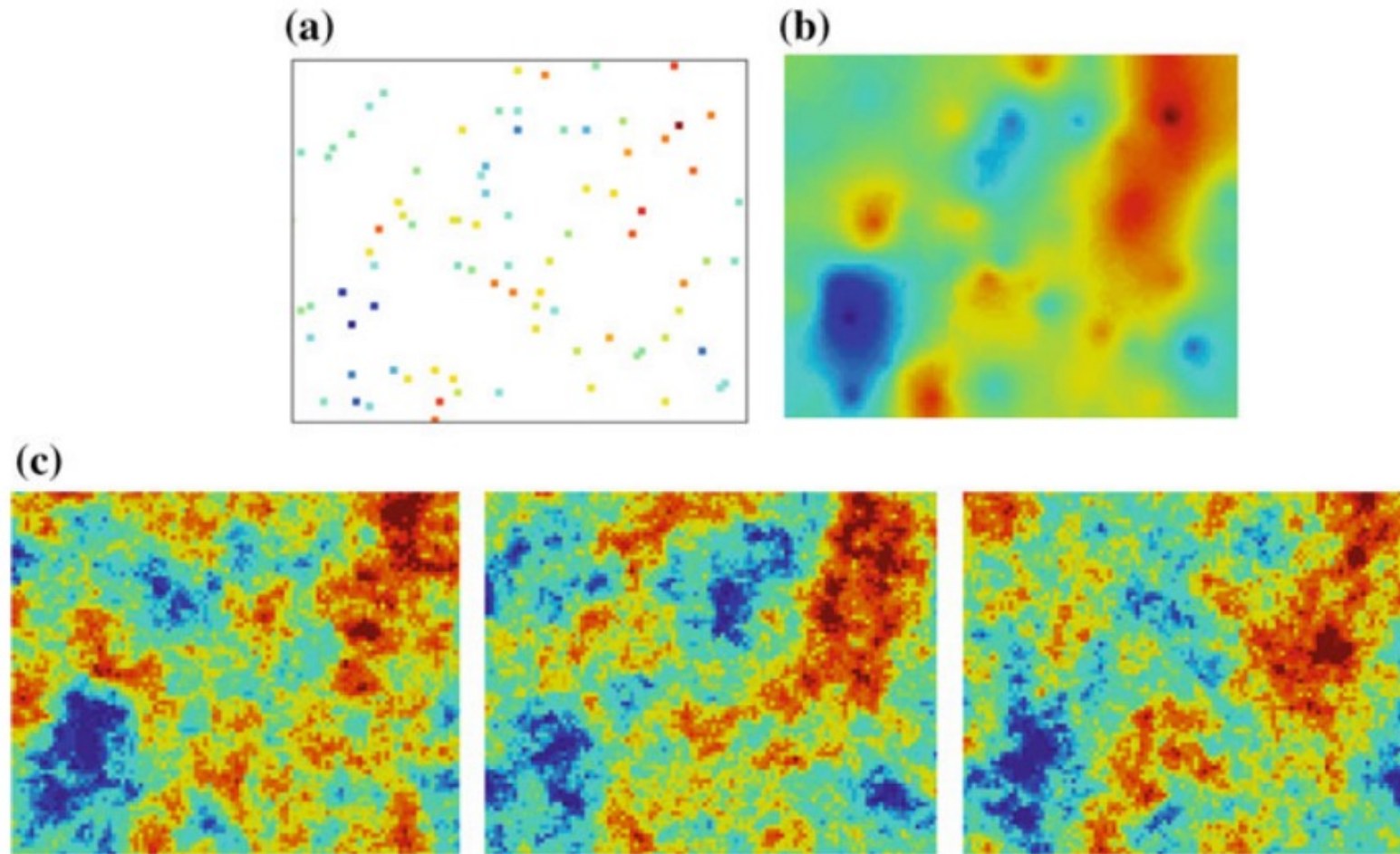


Rasmus Bødker Madsen



GEUS

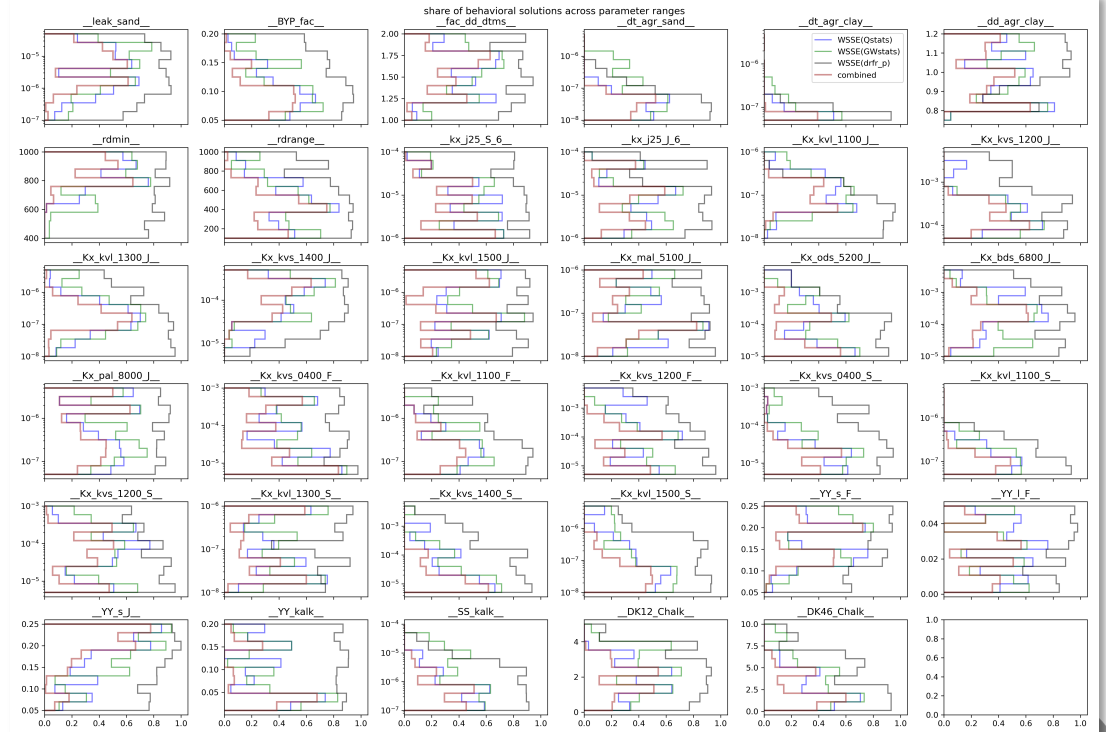
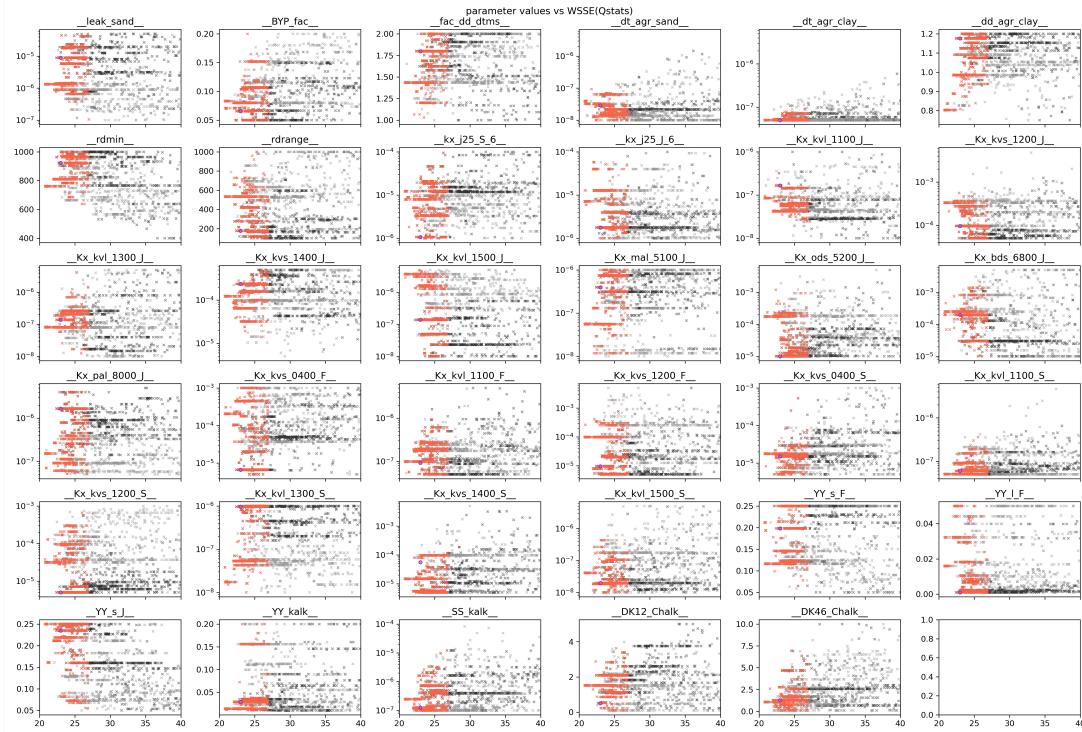
Fra enkel model til probabilistisk model



Rasmus Bødker Madsen

Parameter usikkerhed

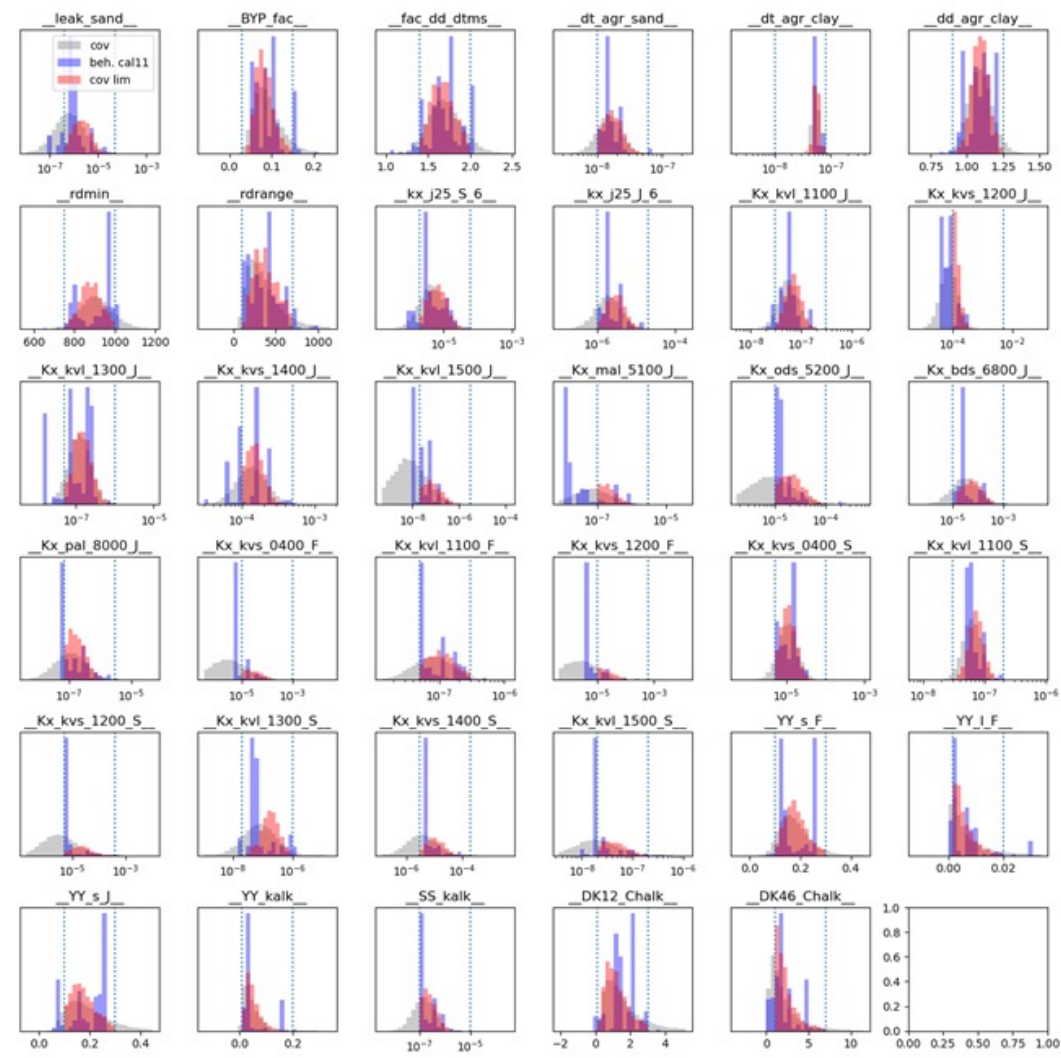
Alternativ til random sampling



2000 model kørsler – gemmer alle parametersæt og alle residualer (OF's) – identificere “behavioral” parametersæt

Parameter usikkerhed

- Bestemmer parameter intervaller for mulige “behavioral” parametersæt
- Testet i 175, 500m modeller kombineret med ensemble af mulige hydrostratigrafiske modeller
- 137 “behavioral”



Usikkerhedsanalyse

- 100 stokastiske modeller
 - Kombination af probabilistisk hydrostrategrafi og parametersæt
- 100m opløsning hele landet
- 120 processorer
- 60 dages beregningstid
- Tungt “brute force” metode

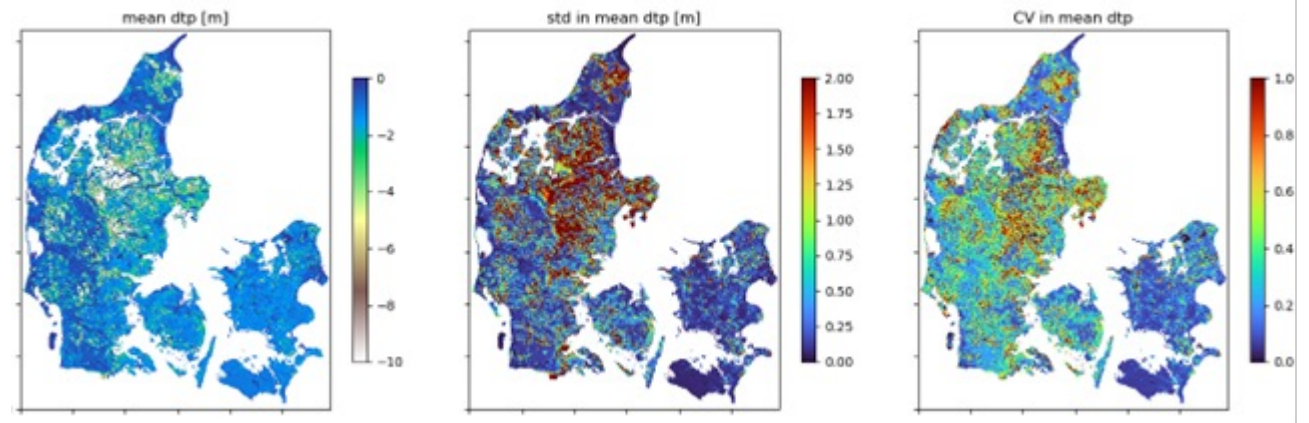


Figure 10. Resulting uncertainty in depth to phreatic, based on 137 behavioral solutions.

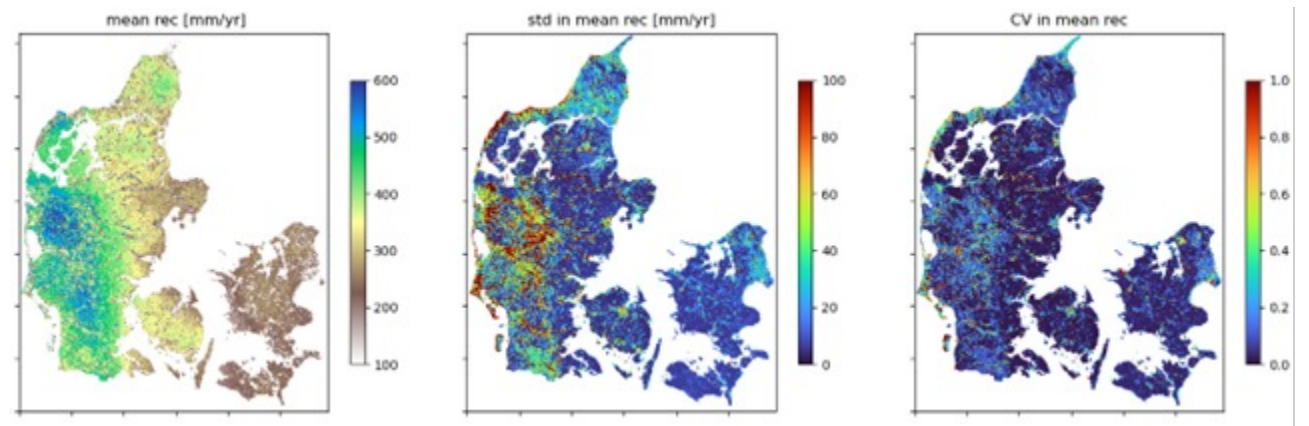


Figure 11. Resulting uncertainty in total recharge to SZ, based on 137 behavioral solutions.

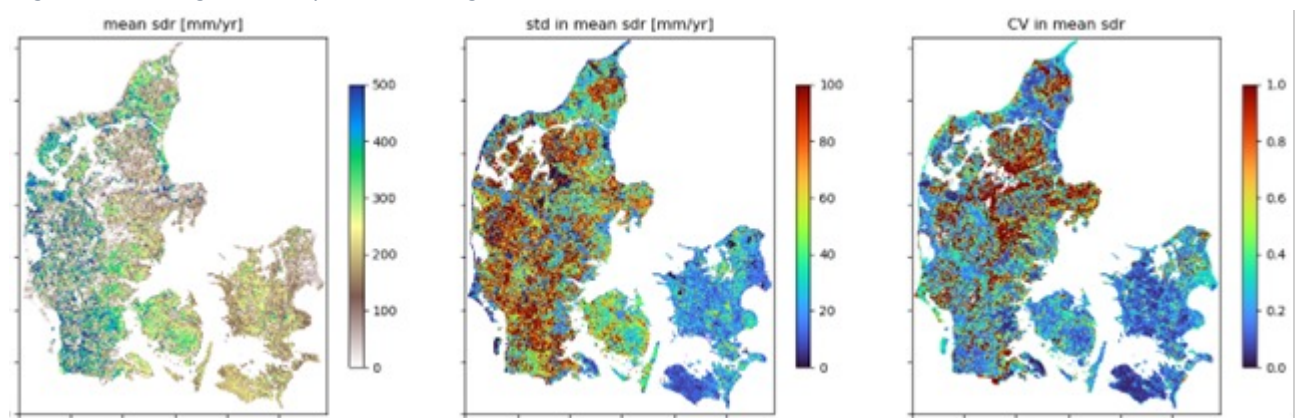
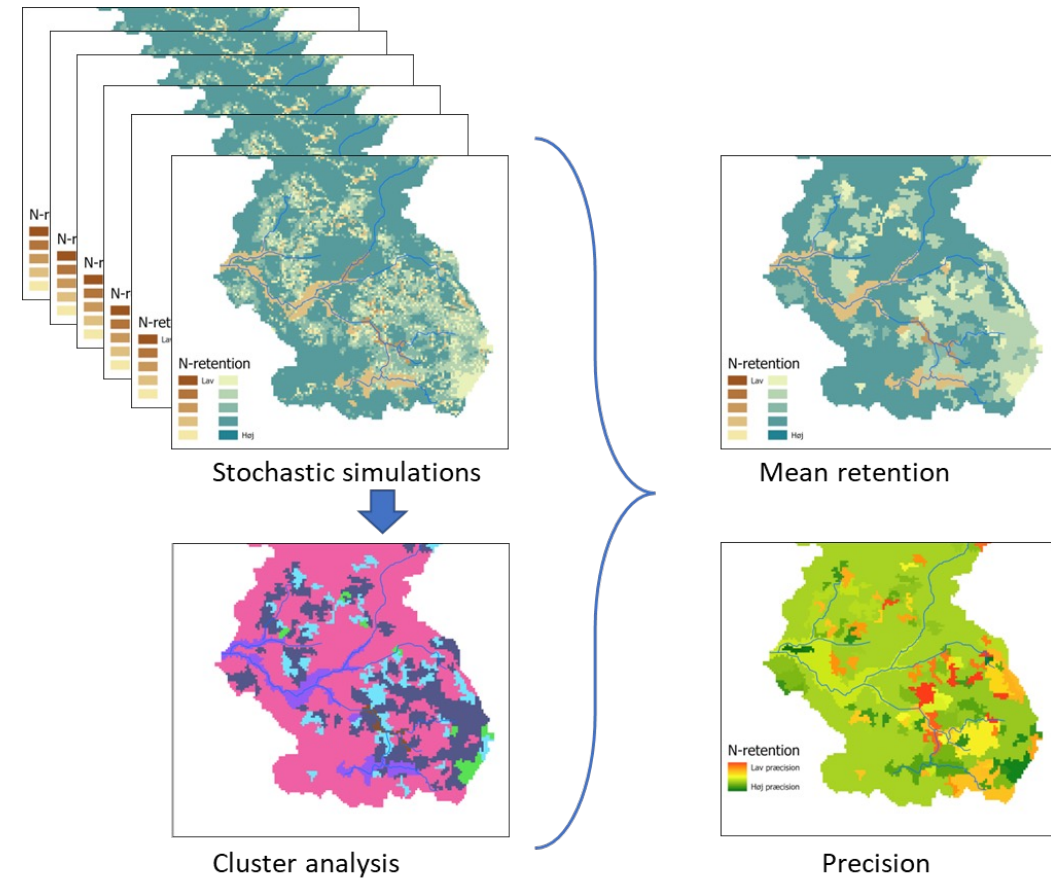


Figure 12. Resulting uncertainty in SZ drainage, based on 137 behavioral solutions.

Usikkerhedsanalyse

- 100 stokastiske modeller
 - Kombination af probabilistisk hydrostrategrafi og parametersæt
- 100m opløsning hele landet
- 120 processorer
- 60 dages beregningstid
- Tungt “brute force” metode



(Højberg et al 2022)



Grundvandsmodellering

Hvor bevæger vi os hen?

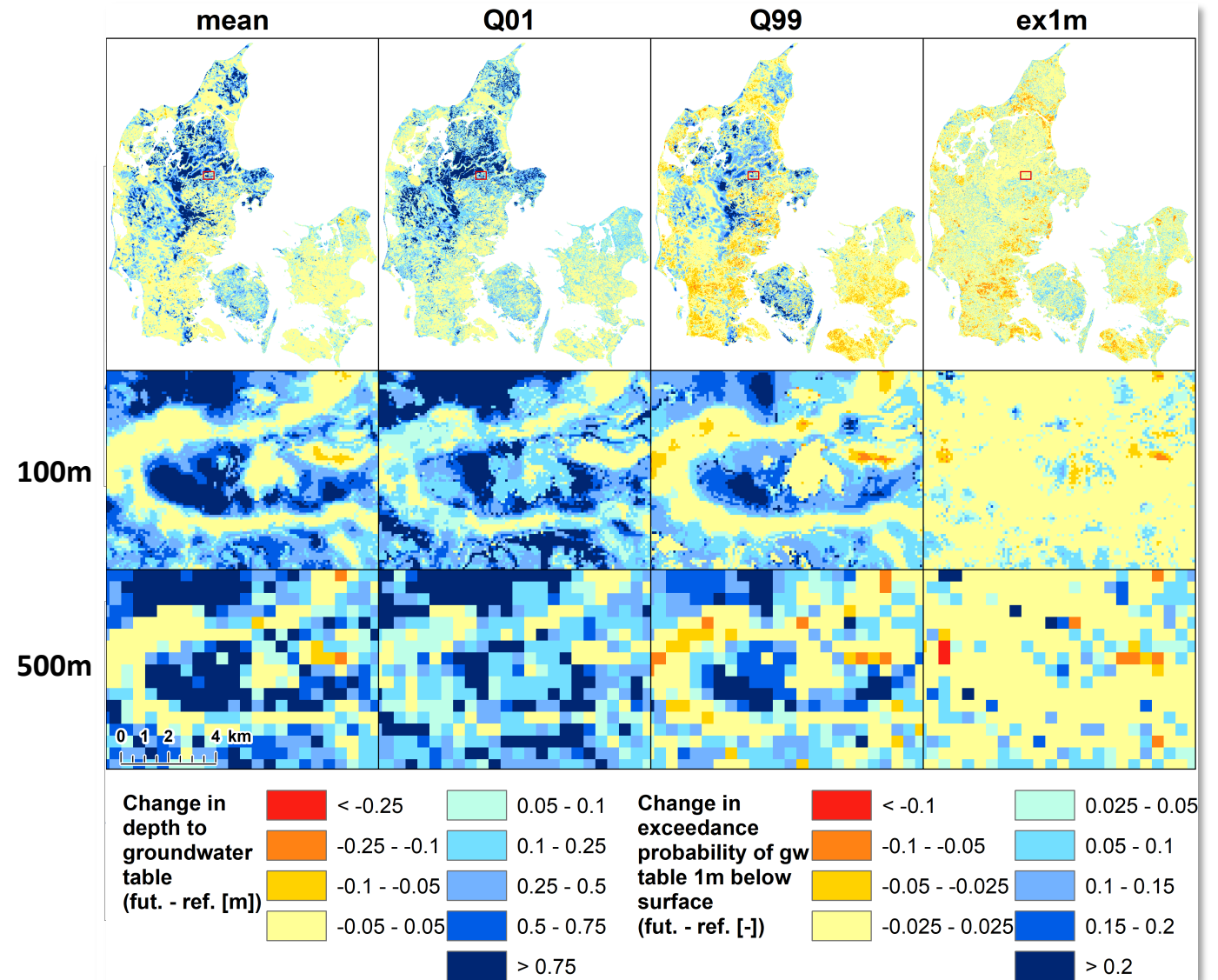
- Kan vi imødekomme ulemperne ved de tunge koblede modelsystemer med høj opløsning i tid og rum?
- Hvilken rolle kan Machine learning/deep learning spille?
 - Downscaling
 - Upscaling
 - Surrogat modeller og emulatorer



Grundvandsmodellering

Hvor bevæger vi os hen?

- Downscaling
- Ensemble af klimafremskrivninger for grundvand i 100m
- Enorm beregningsmæssig byrde – reduceret med ML
- Træningsdata udgør 3%

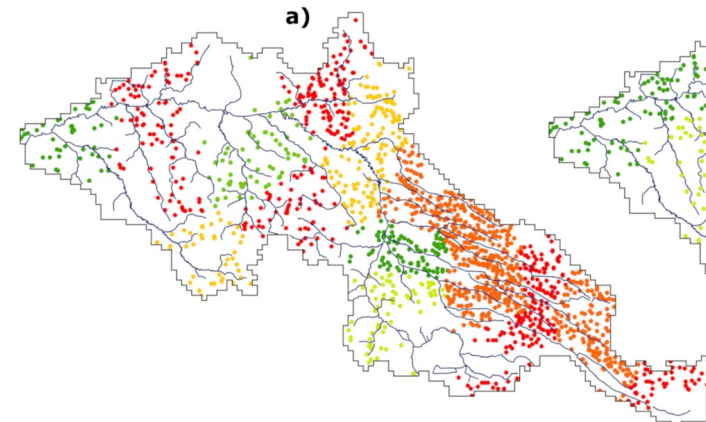


Grundvandsmodellering

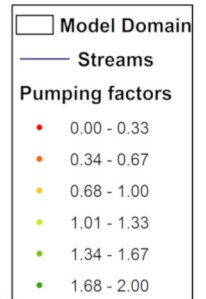
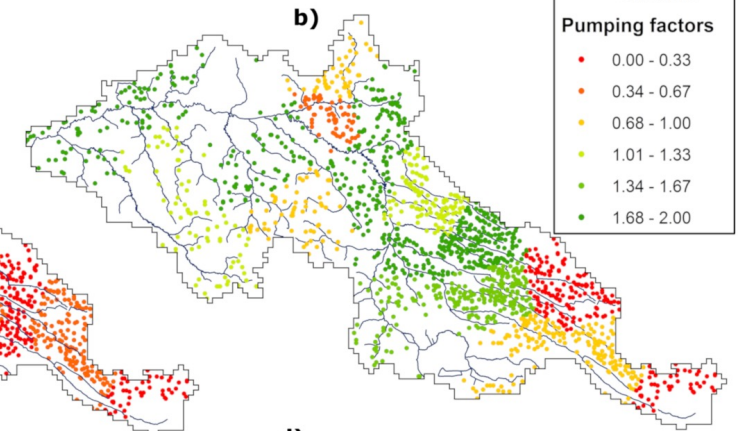
Hvor bevæger vi os hen?

- Surrogat modeller
- Etablere en simple lineær model af grundvandsmodellens simulerede vandløbs-responds på vandindvinding
- Maksimere vandindvinding til accepteret effekt på kritiske lave vandføringer (alle vandløbspunkter)

Max 20% reduktion på Q95



Max 40% reduktion på Q95



(Danapour et al 2021)

Max 40% reduktion på Q95 I det tørreste år

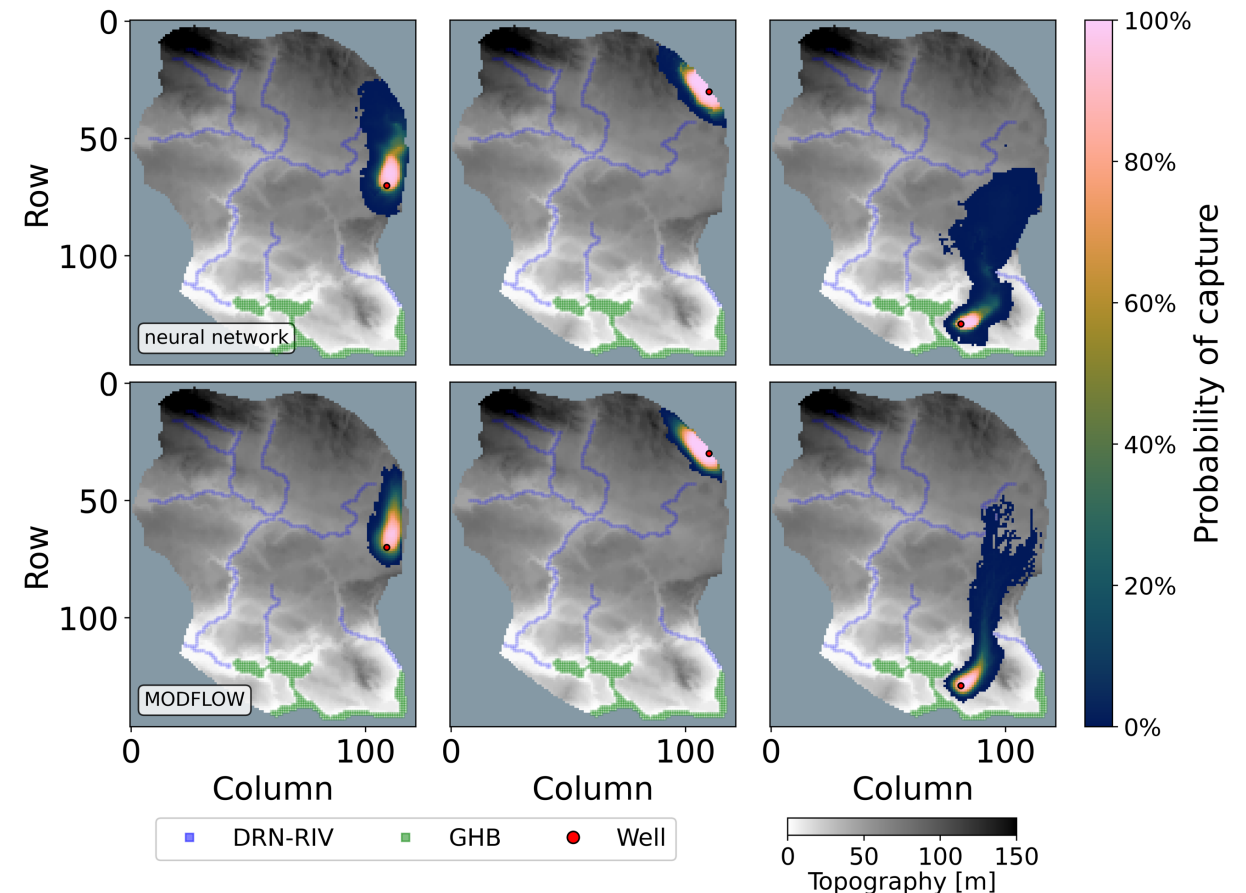
Grundvandsmodellering

Hvor bevæger vi os hen?

Mathias Busk Dahl, 2023 NIRAS / AU

- Surrogat modeller
- MODFLOW model med stokastisk model for hydrostratigrafisk usikkerhed (200 realisationer)
- Deep learning med Neural Network
- Prædiktere det stokastiske indvindingsopland
- > 10.000 gange hurtigere end MODFLOW modellen
- Hurtige værktøjer til effekt screening af indvindings- placering og volumen

Stochastic recharge areas



Opsummering

- Nye komplekse spørgsmål
- Behov for komplekse koblede grundvandsmodeller
- Krav om høj opløsning i tid og rum
- Muligheder i anvendelse af nye data til modelparametrisering og kalibrering
- Muligheder for at minimere beregningstiden med machine learning

