

Modellering af grundvandsudstrømning til grundvandsafhængige naturtyper

Water and Environmental Engineering, Aalborg Universitet

Afgangsspeciale

Anna Rosenberg Pedersen og Helena Hjørringgaard

2022





Institut for Byggeri, By og Miljø

Water and Environmental Engineering

Thomas Manns Vej 23

9220 Aalborg Ø

Titel:

Modellering af grundvandsudstrømning
til grundvandsafhængige naturtyper

Projekt periode:

1. februar 2022 - 9. juni 2022

Deltagere:

Anna Rosenberg Pedersen
Helena Hjørringgaard

Vejledere:

Jacob Birk Jensen
Jesper Ellerbæk Nielsen
Ole Munch Johansen

Oplagstal: 5

Antal sider: 77

Appendiks: 10

Synopsis:

I dette projekt undersøges en metode til bestemmelse af grundvandsudstrømningen til grundvandsafhængige naturområder. Områderne er med deres høje artsdiversitet særlig vigtige, hvorfor der stilles strenge krav om at de ikke må forringes. Vurderingen af påvirkningerne ved at reducere grundvandsudstrømningen, som følge af vandindvinding, er i dag forbundet med usikkerheder. Der er et behov for at kunne kvantificere udstrømningen samt beregne hvordan en reduktion af denne påvirker vandstanden. Der er opstillet en boksmodel og en MIKE SHE model til bestemmelse af vandstanden og grundvandudstrømning. Ved stokastisk modellering beregnes vandstandstidsserier, hvortil grundvandsudstrømningen inverst bestemmes. Ved metoden GLUE udvælges de vandstande og udstrømninger, der ud fra acceptkriterier bedst beskriver den målte vandstand. Udstrømninger på mellem $1,1 \text{ mm dag}^{-1}$ og $2,5 \text{ mm dag}^{-1}$ er fundet for to områder, hvor boksmodellen bestemmer en lavere udstrømning end MIKE SHE modellen. Modellerne anvendes også til at bestemme vandstanden som følge af en 50 % reduceret grundvandsudstrømning. Her bestemmes en vandstand ned til 25 cm og 15 cm for hhv. boksmodellen og MIKE SHE modellen for den ene lokation samt 60 cm og 35 cm for den anden lokation.

Indholdsfortegnelse

Indholdsfortegnelse	iii
Forord	v
Abstract	vi
Kapitel 1 Introduktion til problemstillinger for grundvandsafhængige naturtyper	1
1.1 Grundvandsafhængige naturtyper som værdifulde økosystemer	1
1.2 Beskyttelse af grundvandsafhængige naturtyper	3
1.3 Tilstandsvurdering af de grundvandsafhængige naturtyper	4
1.4 Problemformulering	7
Kapitel 2 Grundvandsafhængige naturområder	8
2.1 Hydrologi i grundvandsafhængige naturområder	8
2.2 Karakterisering af lokationer til undersøgelse	13
Kapitel 3 Beskrivelse af anvendte modeller	17
3.1 Antagelser i modellerne til beskrivelse af grundvandsafhængige naturtyper . .	17
3.2 Modelopsætning af boksmodellen	18
3.3 Modelopsætning af MIKE SHE modellen	21
3.4 Inputs og observationer af vandstandstidsserier	25
Kapitel 4 Evalueringsmetode af modelsimuleringer	26
4.1 Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE)	26
4.2 Acceptkriterier og tildeling af likelihoods til simuleringer	26
Kapitel 5 Vurdering af acceptkriteriernes betydning for modelusikkerheden	31
5.1 Undersøgelse af accepterede simuleringer for de tre acceptkriterier	31
5.2 Undersøgelse af individuelle acceptkriterier for Ansø og Tingvad 1	33
5.3 Vandstandsbestemmelser med boksmodellen og MIKE SHE modellen	36
5.4 Diskussion af anvendelsen af acceptkriterierne	39
Kapitel 6 Bestemmelse af tilstrømning og analyse af parameterkombinationer	41

6.1	Undersøgelse af parameterkarakteristika for accepterede simuleringer for Ansø og Tingvad 1	41
6.2	Bestemmelse af tilstrømning og øvrige parametre for alle undersøgte lokationer	50
Kapitel 7	Reduktion af grundvandsudstrømning til grundvandsafhængige naturtyper	55
Kapitel 8	Vurdering af anvendelsesmuligheder for modellerne	59
Kapitel 9	Konklusion	60
Kapitel 10	Perspektivering og forslag til videre undersøgelser	62
	Litteratur	63
Appendiks A	Oversigt over målestationer for vandstandstidsserier	68
Appendiks B	Undersøgelse af lokationer med ingen accepterede simuleringer	70
Appendiks C	Vandstande og modelbestemmelser for alle lokationer	73
Appendiks D	Reduktion af grundvandsudstrømningen til Ansø og Tingvad 1	74
Appendiks E	Retentionskurve og indflydelsen af parametreændringer på denne	77

Forord

Dette speciale er udarbejdet af Anna Rosenberg Pedersen og Helena Hjørringgaard, kandidatstuderende i Water and Environmental Engineering ved Aalborg Universitet. Projektet er et kort (30 ECTS) afgangsspeciale udarbejdet i perioden d. 1. februar 2022 til 9. juni 2022. Specialet er udført i samarbejde med WatsonC under vejledning af Jacob Birk Jensen og Ole Munch Johansen samt vejleder fra Aalborg Universitet, Jesper Ellerbæk Nielsen. Vi vil gerne takke vejlederne for god vejledning, feedback og teknisk support. Der skal også lyde en tak til medarbejderne ved WatsonC for at være imødekommende og behjælpelige.

Læsevejledning

Rapporten er inddelt i 10 kapitler, hvor problemstillingen omkring vandindvinding og grundvandsafhængige naturtyper belyses i det første kapitel. Herefter beskrives systemet og hydrologien, der er en forudsætning for de grundvandsafhængige naturtyper. To forskellige modeller introduceres samt en præsentation af de metoder, der anvendes til evaluering af simulerede vandstande. Kapitel 5, 6, og 7 er en præsentation og diskussion af resultater af modellerne. Slutteligt diskuteres anvendelsesmulighederne for de to modeller.

I dette projekt anvendes ordene 'grundvandsudstrømning' og 'grundvandstilstrømning' om det samme, men ordene bruges afhængigt af hvilket udgangspunkt det ses i relation til. Hvis udgangspunktet er grundvandsmagasinet, er der tale om en udstrømning, men hvis udgangspunktet i stedet er det grundvandsafhængige naturområde, er der tale om en tilstrømning af grundvand.

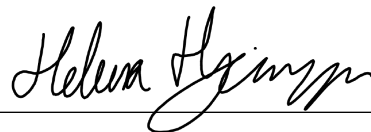
Hvis rapporten læses i pdf-format er der interaktive links, angivet med mørkeblå farve, når der bruges referencer.

Rapporten benytter sig af Harvard metoden til referencer.

Aalborg Universitet 9. juni 2022



Anna Rosenberg Pedersen
arpe17@student.aau.dk



Helena Hjørringgaard
hjarr17@student.aau.dk



Abstract

Groundwater dependent terrestrial ecosystems have a high species richness and are home for many endangered species. The ecosystems are sensitive to hydrological changes and are protected under strict regulation through different protection acts. In Denmark, most drinking water is abstracted from groundwater and it must be assessed if new groundwater abstractions affect the groundwater dependent terrestrial ecosystems. The groundwater models used today can provide an estimation of the reduction of the groundwater seepage. However, correlating it to an absolute change in water level remains difficult. Thus, a need exists for better solutions to quantify how a reduction in the groundwater seepage affects the ecological status of the groundwater dependent terrestrial ecosystems.

This thesis examines a method to determine groundwater seepage to the groundwater dependent terrestrial ecosystems. A simple box model and a MIKE SHE model are made for the unsaturated zone. The two models determine the water level by the use of stochastic modelling for different model parameters. One of the parameters is the seepage rate. The GLUE method are applied, where some of the model simulations are selected based on different likelihood measures. The models are used to examine 16 different locations in Denmark to evaluate their robustness and prediction abilities. The models are found to predict seepage rates with acceptable precision for all but three location. The seepage rate is found to be between $1,1 \text{ mm day}^{-1}$ and $2,5 \text{ mm day}^{-1}$ for two different groundwater dependent terrestrial ecosystems. The box model predicts a lower seepage rate than the MIKE SHE model. The models are used to evaluate the water levels given a 50 % reduction of the groundwater seepage. The water levels become 25 cm and 15 cm for the box model and MIKE SHE model, respectively, for one area. For another area they become 60 cm and 35 cm, respectively.

Introduktion til problemstillinger for grundvandsafhængige naturtyper

Tilladelser til vandindvinding på større almene vandværker i Danmark kræver bl.a. at det kan dokumenteres, at der ikke sker negative påvirkninger på grundvandsafhængig terrestrisk natur, der er beskyttet som enten Natura 2000 eller §3-områder (Naturstyrelsen, 2011; Naturbeskyttelsesloven, 2021). Særligt for Natura 2000-områder stilles der store dokumentationskrav for at de arter og naturtyper, som områderne er udpeget for at bevare, ikke påvirkes (Naturstyrelsen, 2011).

Påvirkningen af grundvandsafhængig natur er et område, hvor der mangler robuste metoder og retningslinjer (Nilsson et al., 2019). De grundvandsmodeller der benyttes har betydelige usikkerheder forbundet med vurderingen af påvirkning fra vandindvinding (Sonnenborg og Henriksen, 2005). Da forsyningsselskaber uden rimelig tvivl skal kunne dokumentere, at der ikke sker negativ påvirkning på beskyttede naturområder, er det en vanskelig opgave. Dette projekt har til formål at bidrage med yderligere viden til hvorledes påvirkninger på grundvandsafhængig natur bedre kan bestemmes.

1.1 Grundvandsafhængige naturtyper som værdifulde økosystemer

Gennem de seneste 200 år har en gennemgribende afvanding af vådbundsarealer i Danmark betydet at en stor del af de naturområder, der tidligere har fremstået som eng-, kær- og mosearealer, ikke længere findes. Flere faktorer har påvirket denne afvanding. Særligt grøftning og drænrørets introduktion i 1850-erne har haft stort betydning og har muliggjort dyrkning på tidligere våde jorde (Nilsson et al., 2019; van Diggelen et al., 2006). Samtidig fik de første danske byer også moderne vandværker, hvilket betød at der i den efterfølgende tid skete en forøgelse i grundvandsindvindingen (Nilsson et al., 2019). Den direkte omdannelse til landbrugsområder, den ændrede oplandshydrologi samt manglen på passende pleje har betydet at vådbundsarealer, særligt de grundvandsafhængige, i dag er stærkt truede (van Diggelen et al., 2006).

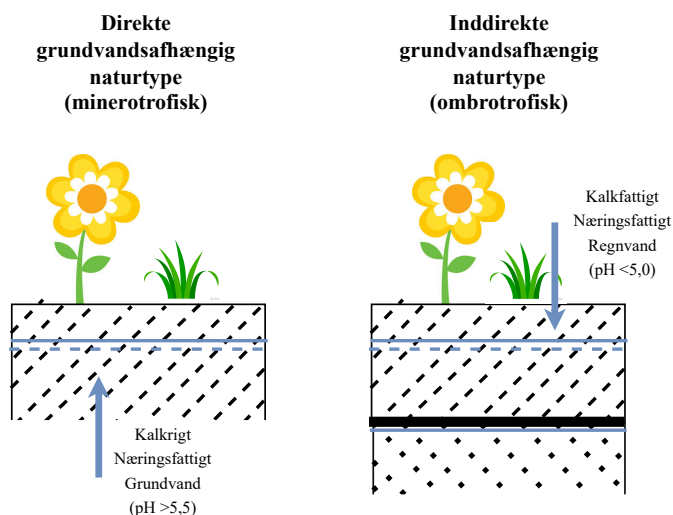
Vådbundsarealerne er vigtige biologiske systemer, som bidrager med et stort antal økosystemydelse, og spiller en vigtig rolle i verdens kulstofbalance (van Diggelen et al., 2006). Tørvedannende vådbundsarealer kan lagre mange tons karbon om året, og dræning af disse områder vil medføre, at der frigives store mængder af kuldioxid og andre drivhusgasser. Langt de fleste grundvandsafhængige naturtyper er karakteriseret ved at være tørvedannende (Miljøstyrelsen, 2022b).

Vådbundsarealer spiller også en vigtig rolle i den naturlige rensning af vand, og er med til at reducere tilførslen af kvælstof og fosfor til søer og fjorde (Miljøstyrelsen, 2022a). Ydermere dæmper områderne effekten af store variationer i nedbør, hvilket har særlig stor betydning i lavtliggende arealer. Derudover indeholder de et stort antal tilpassede organismer og særligt kalkrige vådbundsarealer, som ofte er grundvandsafhængige, er blandt de mest artsrige økosystemer i den tempererede zone og huser mange truede arter. Samtidig er det de grundvandsafhængige naturtyper, der oplever en mere intens nedgang i biodiversitet end i mange andre økosystemer, da organismerne er meget specialiserede og derfor sårbare overfor ændringer (van Diggelen et al., 2006).

De grundvandsafhængige naturtyper er områder hvor vegetationen enten direkte eller indirekte er afhængig af grundvand. Direkte afhængighed betyder, at naturtypen kun forekommer hvor kalkrigt, mineralrigt og næringsfattigt grundvand vælder frem eller trykkes ud/op i rodzonen. Dette er f.eks. gældende for naturtyperne rigkær og kalkrigt kildevæld. Indirekte afhængighed henviser til betydningen af en høj grundvandsstand under en vegetation, der ikke er i direkte kontakt med grundvandet. De indirekte grundvandsafhængige naturtyper er regnvandsbetingede og modtager kun nedbør på overfladen, hvor det underliggende grundvandstryk forhindrer dræning (Kløve et al., 2011). Dette er gældende for f.eks. højmoser (Nilsson et al., 2019).

Tre betydningsfulde parametre, som er styrende for vegetationen i de grundvandsafhængige naturtyper, er pH, næringsstoffer og vandstand. Grundvandsafhængige naturtyper har særlige forhold for disse tre parametre. Vandstanden og fugtigheden i jorden har bl.a. indflydelse på redoxforholdene og alkalinitet, der kontrollerer tilgængeligheden af næringsstoffer og oxygen (Dahl et al., 2007). Tilstrømning af ilt- og næringsfattigt grundvand, der er rigt på baseioner som calcium, jern og magnesium, er en forudsætning for de direkte grundvandsafhængige naturtyper. Baseionerne binder fosfor, så det bliver utilgængeligt.

Derudover medvirker de iltfattige forhold i rodzonen til at nedbrydningen af tørv hæmmes, hvilket også fastholder den lave næringstilgængelighed (Nilsson et al., 2019). De direkte grundvandsafhængige naturtyper (minerotrofiske) har ofte en høj pH ($\text{pH} > 5,5$) (van Diggelen et al., 2006). Regnvandspåvirkningen i de regnvandsbetingede naturtyper (ombrotrofiske) medfører en meget lav næringstilgængelighed, iltfattige forhold og en lav pH ($\text{pH} < 5,0$) (Hájek et al., 2006). Figur 1.1 illustrerer de direkte og inddirekte grundvandsafhængige naturtyper.



Figur 1.1. Simplificeret illustration af forskelle mellem direkte og inddirekte grundvandsafhængige naturtyper. Grundvandstrykket i det nedre spændte magasin for inddirekte naturtyper medvirker til at forhindre dræning af regnvand

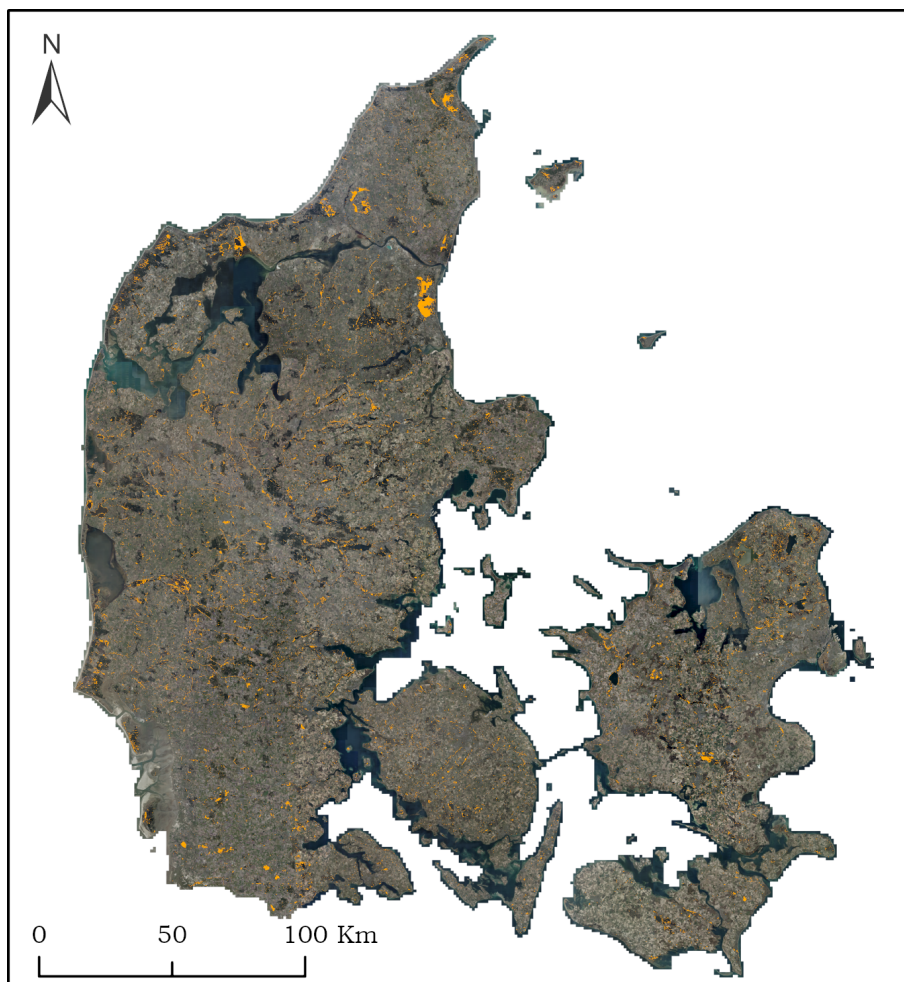
1.2 Beskyttelse af grundvandsafhængige naturtyper

Gennem flere EU-direktiver har Danmark forpligtet sig til at sikre god tilstand for og beskyttelse af de grundvandsafhængige naturtyper. Habitatdirektivet fra 1992 omfatter en række habitattyper, der forekommer på fugtig eller våd bund bl.a. højmoser og rigkær. Direktivets mål er at sikre genopretning eller opretholdelse af en gunstig tilstand, og områderne er udpeget med henblik på beskyttelse af truede dyre- og plantearter (Ejrnæs et al., 2010). Af Habitatdirektivet udspringer Natura 2000, hvilket dækker over habitatområder og fuglebeskyttelsesområder, der tilsammen danner et økologisk netværk af beskyttede naturområder gennem hele EU (Naturstyrelsen, 2011).

Vandrammedirektivet fra år 2000 sætter en ramme for beskyttelse og forvaltning af overfladevand og grundvand, som skal forebygge yderligere forringelse samt beskytte og forbedre vandøkosystemernes tilstand. Dette er også gældende for økosystemer og vådområder, der er direkte afhængige af vandøkosystemerne (Vandplanlægningsloven, 2017). Grundvandsdirektivet fra 2006 har til formål at beskytte grundvandsressourcer mod forringelse og kemisk forurening. Dette er særligt vigtigt i forbindelse med vandforsyning, men også for grundvandsafhængige naturtyper (Ejrnæs et al., 2010).

Derudover er de grundvandsafhængige naturtyper omfattet af bestemmelserne i Naturbeskyttelsesloven som 'Moser og lignende'. Dette betyder, at der ikke må foretages ændringer i tilstanden af naturtypen, når denne enkeltvis, tilsammen eller i forbindelse med søer er større end 2500 m². Det gælder også, at der ikke må foretages ændringer i tilstanden af moser og lignende, uafhængig af størrelsen, når de ligger i forbindelse med en sø eller et vandløb, der er udpeget som beskyttet (Naturbeskyttelsesloven, 2021).

Områder der gennem naturbeskyttelsesloven er karakteriseret som §3-beskyttede moser, kan ses på figur 1.2. Lovgivningen understreger vigtigheden af grundvandsafhængige naturtyper og de økosystemydelser de leverer (Kløve et al., 2011), hvorfor potentielle påvirkninger på naturtypen er vigtige at vurdere.



Figur 1.2. Gule områder angiver §3-beskyttede moser i Danmark. Der eksisterer mange relative små områder i hele landskabet, som ikke tydeligt fremgår af dette kort

1.3 Tilstandsvurdering af de grundvandsafhængige naturtyper

En landsdækkende analyse, hvor over 13.000 prøvelfelter der repræsenterer forskellige grundvandsafhængige naturtyper, er blevet udført. Analysen viste at 63 % af prøvelfelterne var forringet på grund af næringsstofbelastning og 41 % af prøvelfelterne var forringet på grund af vandmangel (Nilsson et al., 2019). Det er meget vanskeligt og ofte umuligt at genskabe de nødvendige forhold i grundvandsafhængige naturtyper, når først forholdene er blevet påvirket. Hydrologien i oplandet er ofte ændret og grundvand er erstattet af regn- eller overfladevand, hvormed de kritiske parametre som produktivitet, begrænset

nærigstilførsel, lys og pH også ændres og den karakteristiske artssammensætningen forsvinder (van Diggelen et al., 2006). Dette resulterer i at mere konkurrencestærke arter introduceres og udkonkurrerer de grundvandsafhængige arter (Andersen et al., 2015). Haapaetho et al. (2014) har fundet at flere årtier efter restaurering er koncentrationerne af nitrogen og fosfor i tidligere påvirkede vådområder mange gange større end ved upåvirkede vådområder. Dette skyldes at redoxgrænsen flyttes når vandstanden sænkes, hvormed nedbrydning af organisk materiale vil forøges, mens kalktilførslen formindskes, hvilket medfører at sammensætningen af fosfor, nitrogen, jern og sulfat ændres (Haapaetho et al., 2014; Kemmers et al., 2003).

Grundvandsindvinding kan medføre et fald i udstrømningen til vådområder selvom den foretages langt fra området. Selv hvis indvindingen ikke er synlig i vandstanden i vådområdet kan det medføre, at den relative betydning af regnvand stiger og forårsager en forsuring af toplagene (van Diggelen et al., 2006). Johansen et al. (2014) argumenterer, at hvis et strengt forsigtighedsprincip skal benyttes, til at undgå påvirkning af de grundvandsafhængige naturområder, så bør et stort antal af indvindingsboringer i Danmark lukkes. Derudover er det svært at bevise en sammenhæng mellem vandindvinding og en negativ effekt på tilstanden, da ændringer i vegetationen sker over en længere tidsperiode end hydrologiske og kemiske ændringer.

Det kan være udfordrende at kvantificere påvirkningen på det enkelte naturområde, da de modeller som ofte benyttes til vurderingen består af 'store' beregningsceller, som ikke kan beskrive de variationer i processer og parametre, der forekommer på både tidslig og stedslig lille skala (Johansen et al., 2014). Derudover er udstrømning fra grundvandet til grundvandsafhængige naturområder ofte en usikker parameter, og påvirkningen af denne ved vandindvinding er svær at kvantificere, da den ikke kan måles direkte. Hvis den inkluderes i modellerne er det oftest som en vertikalt opadgående strømning over et semipermeabelt lag, hvor udstrømningen er homogen i stedet for i hele beregningscellen, men den kan i virkeligheden variere betydeligt indenfor en celle (Cirkel et al., 2010).

Det er blevet undersøgt, om det er muligt at lave en kobling mellem forekomst og tilstand i sjællandske rigkær og DK-modellen, der simulerer grundvandsstanden i forskellige geologiske lag med en opløsning på 500 m x 500 m under vandindvinding. Det skulle afklare om en sænkning af grundvandsniveauet kan kobles med tilstanden i rigkærene. Det var ikke muligt at vise en sammenhæng mellem grundvandsniveauet, forekomst og tilstand af rigkærene. Det skyldes sandsynligvis, at modellens beregningsceller var for store (Nilsson et al., 2019). Når tilstanden for vegetationen i vådområder vurderes, beskrives de i størrelsesordenen 4-10 m², mens grundvandsmodellers beregningsceller kan være op mod 10³-10⁶ m² (Cirkel et al., 2010). Grundvandsmodellers beregningsceller kan nedsættes til en finere opløsning og processerne kan gøres meget komplekse, men i så fald øges usikkerheden og beregningstiden (Johansen et al., 2014).

I hydrologiske modeller kan usikkerheden være stor, da der kan være flere elementer med en usikkerhed f.eks. inputs, parametre, randbetingelser, modelstrukturen og de observationer som der evt. kalibreres ud fra. Derudover kan forskellige modeller ved statistisk evaluering give det samme resultat, selvom de fysiske parametre er forskellige, hvorfor det er

udfordrende at beskrive de reelle forhold (Beven og Binley, 2014).

Det kan derfor være vanskeligt direkte at kvantificere påvirkningen på de grundvandsafhængige naturtyper. Det fremgik også ved udarbejdelsen af vandområdeplanerne for anden planperiode. Her konkluderede Miljøstyrelsen, at der ikke var et tilstrækkeligt vidensgrundlag til at vurdere grundvandsforekomsters tilstand i tilknyttede målsatte overfladevandområder, og om de medførte en væsentlig skade på grundvandsafhængige naturtyper. Derfor kunne grundvandsforekomsternes samspil med bl.a. grundvandsafhængige naturtyper ikke indgå i vurderingen af grundvandsforekomsternes kemiske og kvalitative tilstand (Nilsson et al., 2019).

Ligeledes er der i følge Cirkel et al. (2010) ikke etableret en kvantitativ sammenhæng mellem grundvandsudstrømning og forekomsten af grundvandsafhængig vegetation. I stedet har Johansen et al. (2016) fundet en sammenhæng mellem vandstand og typiske grundvandsafhængige arter, som kan benyttes til at forudsige hvordan en vandstandsændring påvirker den økologiske tilstand. Modellen er dog bedst at benytte, hvis vandstanden har en lille sæsonvariation, da næringsstofindhold og redoxgrænsen får mere indflydelse jo større vandstandsvariationen er.

Et lavere vandspejl vil medføre en negativ påvirkning. Selv hvis der ikke ses en betydelig indvirkning på vandstanden ved en reduktion i udstrømningen, kan der stadig ske en påvirkning på det grundvandsafhængige naturområde, da udvekslingen af stoffer ændres (van Diggelen et al., 2006).

I dette projekt tages der udgangspunkt i at bestemme vandstanden og fokuset er at lave et værktøj til skridtet mellem at anvende en stor grundvandsmodel til at forudsige en reduktion af tilstrømningen af grundvand, og efterfølgende sammenhængen mellem vandstand og naturkvalitet.

1.4 Problemformulering

Der mangler viden om hvordan påvirkningen af grundvandsafhængige naturtyper kan bestemmes. De modeller, der benyttes i dag, kan med deres grove opløsning give viden om relative reduktioner af grundvandsudstrømningen, men er usikre ift. hvordan dette påvirker vandspejlet. Der mangler derfor et mellemled til omsættelse af hvordan de relative reduktioner påvirker vandspejlet i det tilhørende naturområde. Udstrømningen fra grundvandet til de grundvandsafhængige naturtyper er en forudsætning for opretholdelse af de karakteristiske forhold som f.eks. lave næringsstofkoncentrationer og høje koncentrationer af baseioner, og denne er derfor vigtig at kunne bestemme. Derfor ønskes det i dette projekt at bestemme denne, hvorfor følgende problemformulering er opstillet:

Kan der ved en simpel metode, baseret på vandstandstidsserier, opsættes modeller til beskrivelse af udstrømningen til grundvandsafhængige naturtyper, som gør det muligt at bestemme hvordan en reduktion i udstrømningen vil påvirke vandstanden i grundvandsafhængige naturtyper?

I dette projekt vil tilstrømningen til de grundvandsafhængige naturtyper fra grundvandet bestemmes ved to forskellige endimensionelle umættede zonemodeller, der begge bestemmer tilstrømningen. Da det ikke er muligt at måle udstrømningen, laves i stedet en invers bestemmelse, hvor simulerede vandstande sammenlignes med observerede vandstande. Eftersom ønsket er at lave simple generelle modeller, der kan bruges for alle grundvandsafhængige naturområder, er det en fordel at basere input på nemt tilgængeligt data såsom vandstandstidsserier. Der er indhentet vandstandstidsserier fra 16 forskellige lokationer i Danmark.

Ofte er der store usikkerheder på inputs, parametre og selve modelstrukturen i hydrologiske modeller, hvorfor der i dette projekt er valgt ikke at bestemme én optimal model, men i stedet at lave stokastisk modellering med nogle af de parametre, der indgår i modellerne, hvorved der findes et udvalg af simuleringer. Simuleringerne udvælges på baggrund af forskellige acceptkriterier, efter GLUE-metoden opstillet af Beven og Binley (1992), og det undersøges ligeledes hvilke kriterier der er mest passende at anvende.

De to modeller der undersøges er en simpel boksmodel og et mere komplekst hydrologisk modelleringsystem i MIKE SHE (herefter benævnt MIKE SHE modellen). Det ønskes at undersøge, hvor stor en modelkompleksitet, der er nødvendig for at kunne simulere målte vandstandstidsserier for grundvandsafhængige naturtyper. En simpel model kan være fordelagtig, da den kræver færre parametre samt har en hurtigere beregningstid, hvorimod MIKE SHE modellen kan give større viden om de styrende parametre for vandindholdet i den umættede zone.

Modellerne vil blive benyttet til at beskrive de undersøgte grundvandsafhængige naturområder. Udvalgte områder undersøges yderligere for forskellige scenarier hvori grundvandsudstrømningen reduceres for at evaluere påvirkningen af vandspejlet.

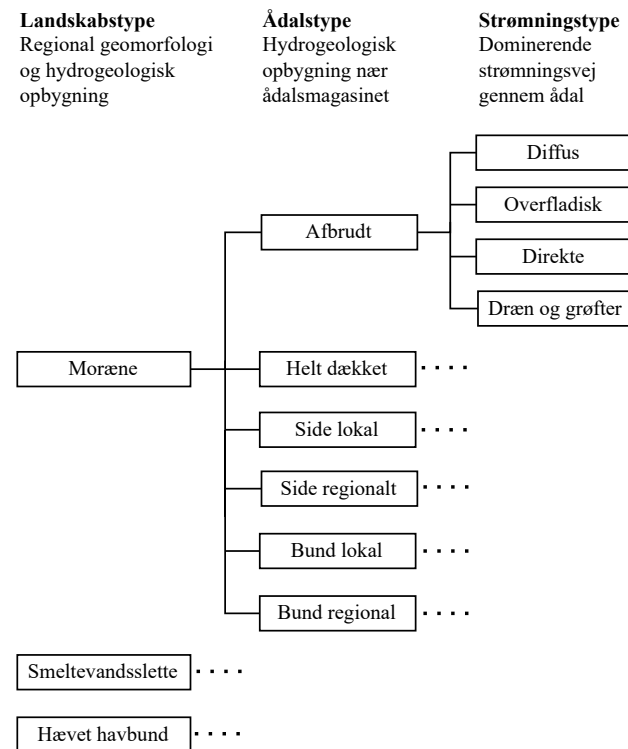
Grundvandsafhængige naturområder

I dette kapitel beskrives systemet og de processer der påvirker de grundvandsafhængige naturområder. Geomorfologi, geologi og hydrologi er vigtige aspekter i forståelsen af opbygningen af de grundvandsafhængige naturområder og er styrende for strømningsprocesser på forskellig skala. Dette beskrives i første del af kapitlet. I anden del af kapitlet præsenteres de grundvandsafhængige naturområder, der er udvalgt til undersøgelse med modellerne.

2.1 Hydrologi i grundvandsafhængige naturområder

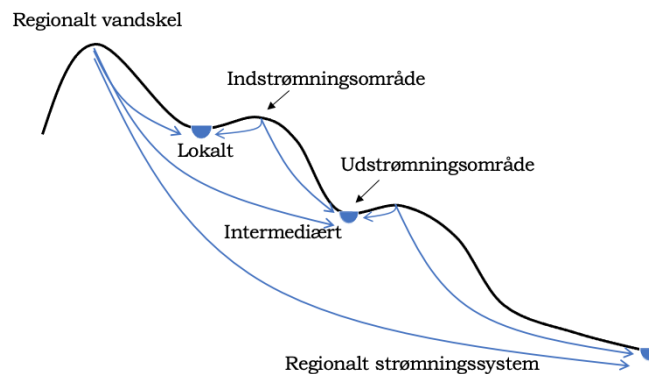
Grundvandsafhængige naturtyper findes ofte i relativt lavtliggende områder (Batzer og Baldwin, 2012). De topografiske variationer indenfor området vil have stor betydning for udstrømningsmønsteret til naturtypen. Udstrømningen sker i områder hvor vandstanden er lavere end det hydrauliske tryk i underliggende grundvandsmagasiner (Dahl et al., 2010; Johansen et al., 2014). Det sker som følge af at et højtydende magasin er begrænset af et lavpermeabelt lag, hvilket medfører en grundvandsudstrømning til de overliggende naturområder fremfor en direkte strømning til overfladevand (Maltby, 2009).

Til beskrivelse af interaktionen mellem et grundvandsmagasin og tilknyttede afhængige naturtyper, har Dahl et al. (2010) opstillet et konceptuelt værktøj til grundlæggende systemforståelse. Dette beskriver vandudvekslingen mellem grundvandsforekomsten, ådalsmagasin og overfladevand på forskellige niveauer, jf. figur 2.1, og konceptet benævnes GOI-typologien (typologi for Grundvand-Overfladevand Interaktion).



Figur 2.1. GOI-typologiens tredelte oplandsskala. Figur efter Dahl et al. (2010)

Landskabstypen karakteriserer forhold der på oplandsskala styrer grundvandsudstrømningen til de tilknyttede grundvandsafhængige naturtyper. Den regionale geomorfologi og hydrogeologi har indflydelse på hvilken skala af udstrømningssystemer, der udvikles indenfor et opland. Forskellige geologiske lag med vekslende permeabilitet vil påvirke strømningssystemet (Dahl et al., 2007). Arealer med en hældning vil domineres af strømningssystemer med indstrømningsområde på bakketoppen og udstrømningsområdet længere nedstrøms, jf. figur 2.2. Udstrømningsområder er klassificeret som områder hvor grundvandsstrømningen er opadrettet, og hvor det regionale potentiale ligger højere end det frie grundvandsspejl (Dahl et al., 2010).

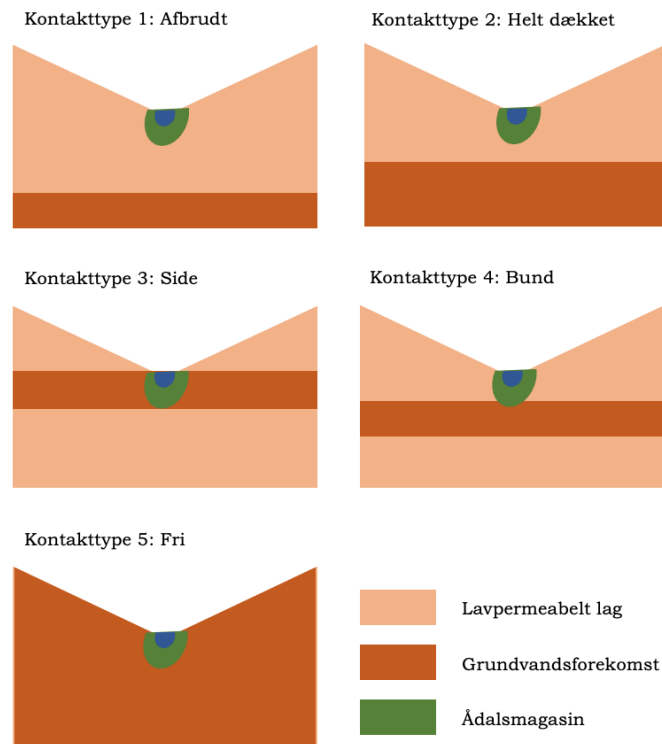


Figur 2.2. Indstrømnings- og udstrømningsområder for lokale, intermediære og regionale strømningssystemer. Figur efter Dahl et al. (2010)

Udvekslingen af grundvand mellem et udstrømningsområde og en grundvandsforekomst beskrives ved GOI-typologien af fem kontakttyper samt typen af grundvandsforekomst. For typer af grundvandsforekomst skelnes der mellem to - terrænnær og regional grundvandsforekomst. Den terrænnære grundvandsforekomst bidrager, gennem et lokalt strømningssystem, til det nærmest beliggende ådalsmagasin. Grundvandsmængden er årstidsvariabel, hvilket medfører en mindre baseflow udstrømning, der for nogle vandløb kan ophøre i tørre perioder. Den regionale grundvandsforekomst er en dybereliggende forekomst, der gennem et regionalt strømningssystem bidrager med grundvand til ådalen. Denne forekomst bidrager med en kontinuerlig og mere stabil grundvandsmængde (Dahl et al., 2007).

De fem kontakttyper karakteriserer den fysiske kontakt mellem grundvandsforekomsten og det overliggende afhængige naturområde. Kontakttyperne kan variere mellem ingen kontakt til fuld kontakt, jf. figur 2.3.

Ved kontakttipe 1 er der ingen grundvandsudstrømning, men der kan være en indirekte påvirkning fra grundvandet. I kontakttipe 2 er der ingen direkte kontakt, men det lavpermeable lag kan være tilstrækkelig permeabelt til at der kan forekomme en lille grundvandsudstrømning. Kontakttipe 3 og 4 har direkte kontakt fra hhv. siden og bunden af ådalen, og her kan der forekomme en større grundvandsudstrømning. Ved kontakttipe 5 er der fri kontakt mellem grundvandsforekomsten og ådalsmagasinet, der medfører en stor grundvandssudstrømning (Dahl et al., 2010).

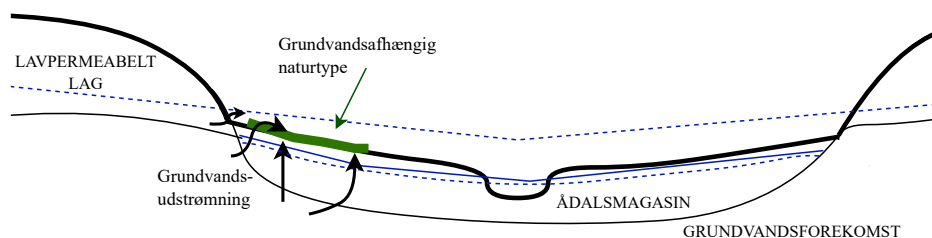


Figur 2.3. Kontakttypen mellem grundvandsmagasinet og den overliggende grundvandsafhængige natur. Figur efter Dahl et al. (2010)

På den mindste lokale skala karakteriserer strømningstypen, den måde strømmingen foregår på sin vej mod overfladen. Der er med GOI-typologien defineret fire strømningsveje.

Den første strømningsvej er en diffus strømning gennem ådalsmagasinet, hvor vandet kan strømme til nedefra eller fra skrænten af området, hvorfra det på vej mod vandløbet enten kan forblive i ådalsmagasinet eller sive ud på ådalens terrænoverflade. Den anden strømningsvej er overfladisk strømning henover ådalsmagasin. Vandet strømmer ud på overfladen ved skræntfoden eller trænger frem længere ude i skarpt afgrænsede kildevæld med sprækkestrømning. Vandet siver henover ådalsmagasiner og infiltrerer ikke igen. Den tredje strømningsvej er direkte strømning op gennem vandløbsbunden. Strømningen forløber lodret op i vandløbet, men kan undervejs passere gennem ådalsmagasinet. Den fjerde strømningsvej er strømning i dræn og grøfter. Strømningsvejen er defineret ved at vand via dræn og grøfter ledes helt til vandløbsbrinken og derfor ledes uden om ådalsmagasinet (Dahl et al., 2010).

Til de grundvandsafhængige naturtyper er det særligt den vertikale strømning der er dominerede, jf. figur 2.4 (Cirkel et al., 2010).



Figur 2.4. Illustration af trykpotentialer, geologiske lag og strømningsveje der muliggør grundvandsafhængige naturtyper. Figuren er simplificeret og vil variere afhængig af lokalitet

Hydrogeologi, kontaktype og type af grundvandsforekomst påvirker hvornår og med hvilken varighed udstrømningen fra grundvandsmagasinet sker. Fire forskellige typer for dette er foreslået af Kløve et al. (2011).

- Periodisk: Et tydeligt sæsonvarierende mønster, hvor den gennemsnitlige udstrømning er klimatisk kontrolleret af nedbør og fordampning
- Diskontinuerlig: Stor variation i strømningen
- Episodisk: Irregulær strømning, der kun sker ved høj vandstand i grundvandsmagasinet
- Konstant: Vedvarende strømning året rundt

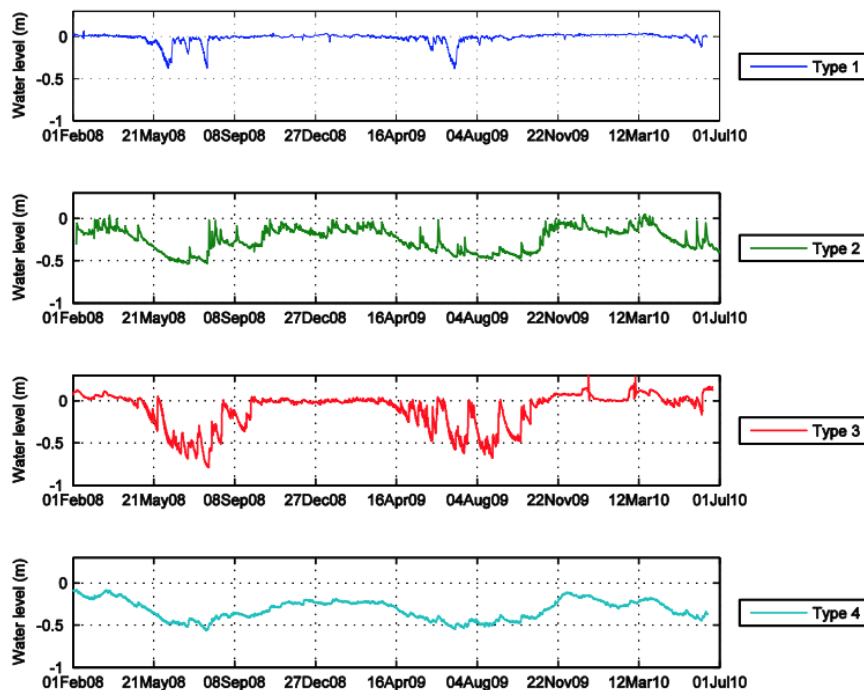
Grundvandsudstrømningen vil ofte være større i foråret, da trykket i grundvandsmagasinet på dette tidspunkt er større, da der i løbet af efteråret og vinteren er en større grundvandsdannelse. Grundvandsudstrømningen falder i løbet af sommeren, da trykket i grundvandsmagasinet falder, grundet en lavere grundvandsdannelse (Johansen et al., 2011; Thorling et al., 2021).

Udstrømningen fra grundvandet har indflydelse på årstidsvariationen i vandspejlet i det grundvandsafhængige naturområde, hvor der gennem året kan observeres forskellige fluktuationer. Johansen (2011) fandt fire forskellige typer af fluktuationsmønstre jf. figur 2.5. For type 1 er vandstanden ved terrænniveau størstedelen af året med mindre fald i sommerperioden. Overfladevand kan løbe af overfladen og oversvømmelse og opmagasinering vil ikke ske. Vandstanden observeres ofte i områder med en betydelig grundvandstilstrømning, der er højere end evapotranspirationen.

Type 2 har intet tydeligt maksimum i vandstanden. Mønsteret i vandspejlet skyldes en begrænset grundvandstilstrømning.

Type 3 har et vandspejl, der ligger ved terræn i vinterperioden og der kan periodevist være vand på overfladen. Typen observeres typisk i områder grænsende til vandløb med en begrænset eller ustabil grundvandstilstrømning.

Type 4 har årstidsmæssige fluktuationer, mens kortvarige påvirkninger fra nedbør og evapotranspiration er begrænset. Dette vandspejlsmønster findes i porøse jorde med en høj ledningsevne, og hvor vandstanden følger grundvandsniveauet eller vandstanden i et tilstødende vandløb eller sø.



Figur 2.5. Fire forskellige vandspejlmønstre observeret i danske vådområder (Johansen, 2011)

Grundvandsudstrømningen har en påvirkning på den vandstand, der kan måles i et grundvandsafhængigt naturområde. Det er denne sammenhæng, der benyttes i dette projekt, hvor grundvandsudstrømningen beregnes ud fra vandstandstidsserier. Derfor er et antal vandstandstidsserier, fra forskellige grundvandsafhængige områder i Jylland, udvalgt. Disse præsenteres i følgende afsnit.

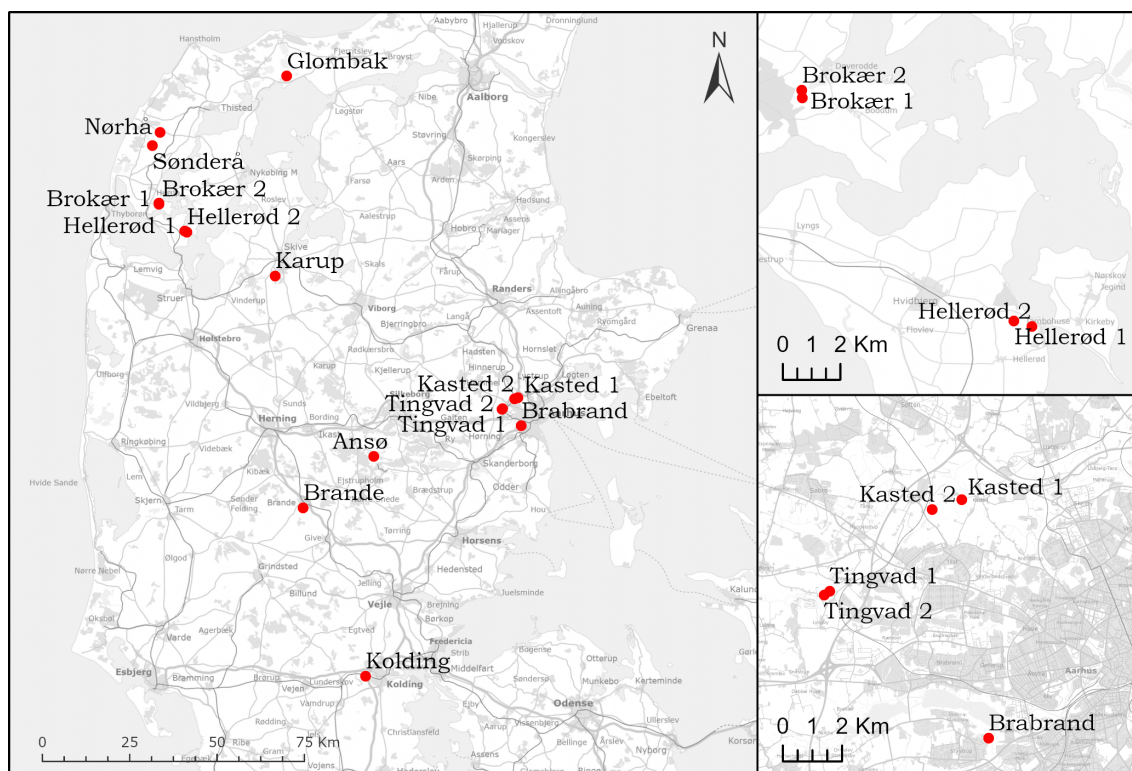
2.2 Karakterisering af lokationer til undersøgelse

De undersøgte områder er valgt på baggrund af at de enten er, eller formodes at være, grundvandsafhængige naturområder, og at de ikke er påvirket af ydre foranstaltninger som dræning. Hvis de er påvirket af vandindvinding, antages det at påvirkningen ikke varierer i løbet af året. Derudover skal der for området være en vandstandstidsserie, der dækker perioden fra 1. april til 30. september. Det skyldes, at det er i denne periode at vandsstanden i det grundvandsafhængige naturområde falder, jf. figur 2.5, og kan blive kritisk. 16 lokationer, der opfylder disse krav, blev udvalgt og kan ses på figur 2.6.

Fælles for lokationerne er at de ligger i områder, der er domineret af hældninger og i oplandet til overfladevand i form af en sø eller vandløb.

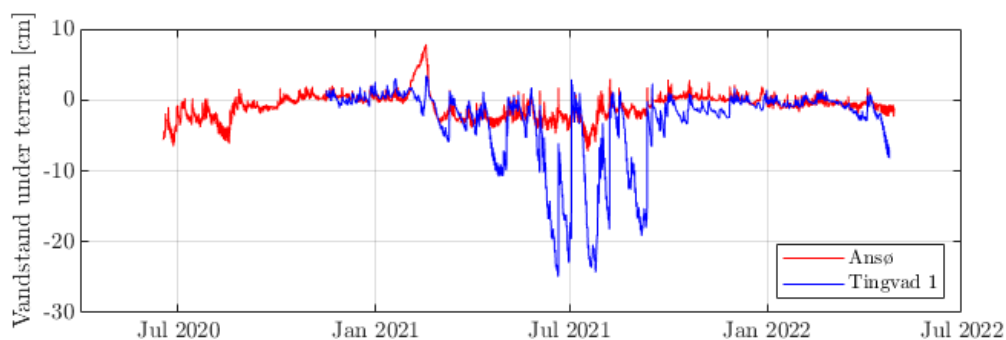
En kort lokationsbeskrivelse er givet i tabel A.2 i appendiks A.

2.2. Karakterisering af lokationer til undersøgelse



Figur 2.6. Lokationerne for de undersøgte grundvandsafhængige naturtyper. Data for lokationerne er fra databasen, Calypso, og stationsnavn samt -id kan ses i tabel A.1 appendiks A

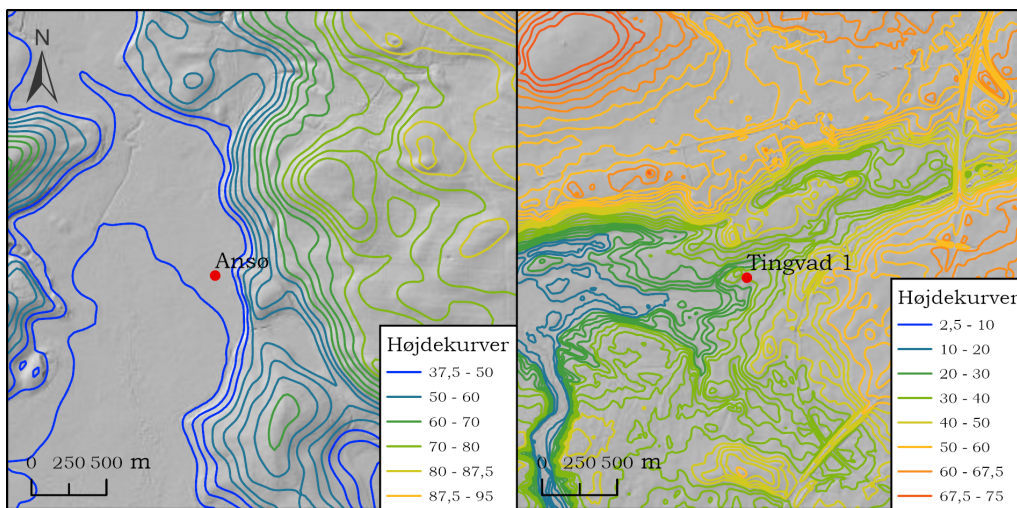
To af lokationerne er undersøgt yderligere. Disse lokationer er Ansø og Tingvad 1, som er udvalgt på baggrund af, at der er en væsentlig forskel på de vandsstandstidsserier, der er målt for lokationerne, hvilket kan ses af figur 2.7.



Figur 2.7. Vandstandstidsserier for Ansø og Tingvad 1. Terrænet er korrigeret således medianvandstanden for vintermånederne er antaget at være ved terræn. Vandstanden under terræn angives negativt

Ansø har et stabilt vandspejl gennem året med kun små fluktationer på omkring 5 cm i sommerperioden. For Tingvad 1 er der derimod karakteristiske fald i vandspejlet i løbet af sommeren, hvor vandspejlet falder ned til 25 cm. At vandspejlet for de to lokationer er forskelligt, skyldes formentlig at grundvandstilstrømningen ved Ansø er højere og mere stabil. Ved Tingvad 1 vil en formentlig lavere udstrømning bevirke faldet i vandstanden om sommeren når evapotranspirationen er høj.

På oplandsskala ligger både Ansø og Tingvad 1 i morænelandskab og i områder med store kuperinger. Ansø ligger i bunden af en dal, jf. figur 2.8, og er derfor formentlig en del af et større regionalt strømningssystem. Tingvad 1 ligger derimod på en dalskråning, og er formentlig ikke del af et stort strømningssystem som Ansø, men i stedet et lokalt eller intermediært strømningssystem. Disse forskelle i lokation kan betyde at Ansø, vil modtage en større grundvandstilstrømning. Dette underbygges ved at Ansø har et stabilt vandspejl tæt på terrænen i løbet af året, mens Tingvad 1 har sæsonmæssige udsving. Figur 2.9 viser området ved Tingvad 1.



Figur 2.8. Geomorfologien udtrykt ved højdekurver for lokationerne Ansø og Tingvad 1



Figur 2.9. Området ved Tingvad 1

Beskrivelse af anvendte modeller

I dette kapitel beskrives de to modeller som anvendes i projektet, samt de antagelser, parametre, inputs og beregningsteknikker, der benyttes i modellerne. Modellerne opstilles for at kunne bestemme en vandstand og grundvandstilstrømning til et grundvandsafhængigt naturområde. Først, præsenteres generelle antagelser for begge modeller, og efterfølgende præsenteres modellerne separat. De anvendte parametre, der benyttes til stokastisk modellering, og fordelingen af disse præsenteres i dette kapitel, mens det i afsnit 4.1 uddybes hvordan de anvendes til usikkerhedsanalysen.

3.1 Antagelser i modellerne til beskrivelse af grundvandsafhængige naturtyper

Der er lavet forskellige antagelser for modellerne for at simplificere dem, og fordi det ikke er muligt at bestemme individuelle parametre for forskellige områder. Der laves derfor stokastisk modellering, hvor mange kombinationer af parametre testes, således hele det potentielle modelrum kan undersøges. For begge modeller gælder følgende antagelser:

Den umættede zone er homogen i tid og sted

Modellerne består af én eller flere bokse der udgør den umættede zone, hvor hver parameter er antaget konstant. Dette er gjort, da den umættede zone i grundvandsafhængige naturområder ikke er 'særlig' stor. Denne antagelse er dog usikker, da der kan være stor variabilitet i det virkelige system, og den umættede zone kan for nogle områder blive relativ stor om sommeren.

Grundvandsudstrømningen er konstant i løbet af året

Det antages i modellerne at der ikke er årstidsvariationer i grundvandsudstrømningen. Dette gøres for at simplificere modellerne.

Grundvandsudstrømningen er endimensionel i vertikal retning

I virkelige systemer er grundvandsudstrømningen i flere dimensioner, men det er i modellerne antaget at den vertikale strømning er dominerende og udgør hele grundvandsudstrømningen. Cirkel et al. (2010), van Loon et al. (2009) og Johansen et al. (2011) enten fandt eller anvendte en vertikal strømning som grundvandskilde i modellering af grundvandsudstrømning til grundvandsafhængig natur. Ydermere reducerer en simplificering af antal dimensioner beregningstiden og antal parametre for modellerne.

Den umættede zone udgøres af tørv

Moser og rigkær er kendetegnet ved at være tørvedannende (Miljøstyrelsen, 2022b), da det høje vandspejl hæmmer en fuldstændig nedbrydning af organisk materiale. Derfor vil de parametre, der indgår i de to modeller afspejle værdier fundet for tørv.

Medianvandstanden i vintermånederne er ved terræn for grundvandsafhængige naturtyper

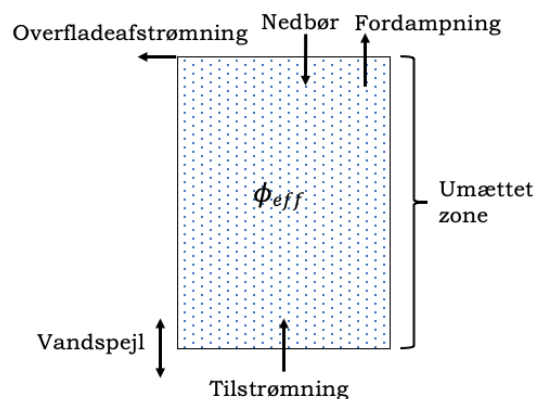
Koterne, der angiver hvor vandspejlet ligger i de undersøgte områder, kan være upræcise og grundvandsspejlet er derfor korrigeret. Dette skyldes, at det for vegetationen er vigtigt hvor dybt vandspejlet er, for hvorvidt vegetationen kan optage vand. Det er en typisk opfattelse at vandstanden er tæt ved terræn om vinteren i grundvandsafhængige naturområder (Johansen et al., 2011).

Der kan ikke ske opmagasinering af vand på terræn og der tilføres ingen vand fra omkringliggende arealer

Grundvandsafhængige naturtyper ligger ofte hvor der er en hældning på terrænet (Batzer og Baldwin, 2012) således at vand på overfladen vil afstrømme (Johansen et al., 2011). Det kan dog ses på vandstandstidsserierne for flere af de undersøgte lokationer, at der forekommer nedbør på terræn ved større nedbørhændelser. Vand på terræn kan også skyldes at grundvandsudstrømningen er ustabil eller et nærliggende vandløb eller sø går over sine bredder, hvilket der ikke tages højde for. Antagelsen vil påvirke vandbalancen, da der ved vand på terræn vil være et større input af vand, og vandspejlet bliver således undervurderet.

3.2 Modelopsætning af boksmodellen

Boksmodellen er opstillet som en simpel én-boks model i MATLAB[®] (version 2020b) udviklet af *MathWorks*. Boksmodellen er forsøgt opstillet med få parametre for at opnå en hurtig simulationstid og undgå parameterusikkerheder. Der undersøges kombinationer af to parametre - tilstrømning og effektiv porøsitet. Figur 3.1 viser konceptet for hvorledes vandstanden af grundvandsspejlet beregnes.



Figur 3.1. Konceptuel figur af processer og parametre i boksmodellen. Φ_{eff} er den effektive porøsitet

Boksmodellen er en simpel massebalance, jf. [ligning 3.1](#), og er baseret på vandbalanceligningen hvor vandindvinding negliceres, og hvor det antages at overfladeafstrømning fjerner alt overskydende vand over terræn. I boksmodellen regnes vandpejlet under terræn som værende negativt.

$$h_t = h_{t-1} + \frac{N_t - E_t + T}{\Phi} \cdot t \quad \text{Hvis } h_t > 0 \Rightarrow h_t = 0 \quad (3.1)$$

Hvor

h	Vandstand [mm]
t	Tid [time]
N	Nedbør [mm time ⁻¹]
E	Potentiel/aktuel evapotranspiration [mm time ⁻¹]
T	Tilstrømning [mm time ⁻¹]
Φ	Effektiv porøsitet [cm ³ cm ⁻³]

I boksmodellen antages den aktuelle evapotranspiration at være lig den potentielle. Det vurderes som en rimelig antagelse, da aktuel evapotranspiration kan være omtrent eller lig potentiel evapotranspiration i vækstsperioden for vegetationen, og når vandspejlet er i rodzonen ([Batzer og Baldwin, 2012](#)). Der er lavet 10.000 simuleringer i boksmodellen for hver lokation. Tidsopløsningen for boksmodellen er en time og simuleringstiden er mellem 0,12-0,3 s per simulering, hvilket svarer til en samlet simuleringstid på 20-50 min for modellen afhængig af længden af vandstandstidsserien. Den korte simuleringstid gør modellen velegnet til at kunne undersøge mange lokationer.

Nedbør og fordampning samt initial vandstanden benyttes for den pågældende lokation der undersøges, mens det samme interval for tilstrømning og effektiv porøsitet undersøges for alle lokationer. Dette beskrives i følgende afsnit.

3.2.1 Parametre anvendt til bestemmelse af vandstanden med boksmodellen

Intervaller for tilstrømningen er bestemt således at to ekstreme situationer undersøges, jf. [tabel 3.1](#). En negativ tilstrømning vil betyde, at området er påvirket af eksempelvis dræn og/eller vandindvinding, eller at området ikke er en grundvandsafhængig naturtype. En høj tilstrømning på 10 mm dag⁻¹ betragtes også som ikke-forventeligt, da den potentielle evapotranspiration på varme sommerdage er omtrent 5-6 mm dag⁻¹, hvorfor der i så fald aldrig vil forekomme et fald i vandstanden. Der er dog inkluderet en 'buffer', da den aktuelle evapotranspiration kan være større end den potentielle i områder med terrænnær vandstand ([Batzer og Baldwin, 2012](#)).

Ved at undersøge et stort spænd i tilstrømningen kan modellens struktur testes. Hvis en høj tilstrømning findes kan det indikere at et område modtager et ekstra input af vand udover nedbør og tilstrømning. Det kan f.eks. være at et område ofte oversvømmes, hvilket vil bevirke at modellen forudsiger en højere tilstrømning end hvad den reelt er.

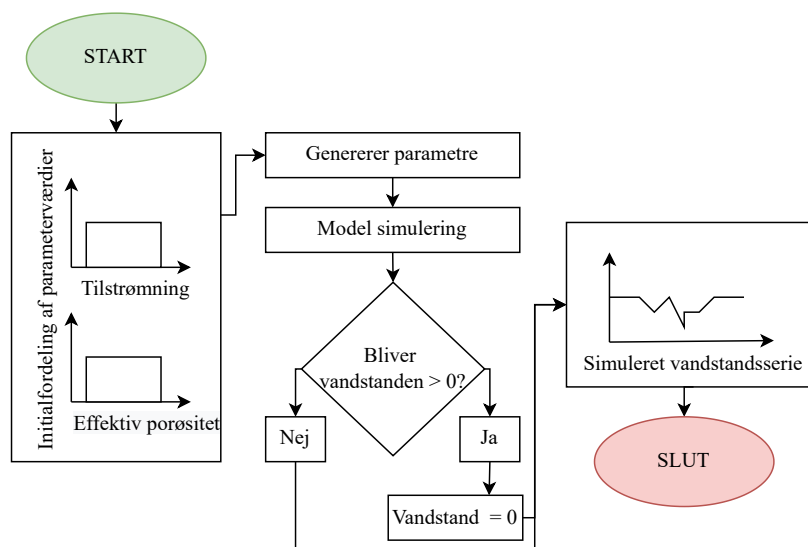
Dahl et al. (2010) angiver effektiv porøsitet for tørv op til $0,9 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, mens Hoag og Price (1997) har fundet en effektiv porøsitet mellem $0,8 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ved terræn og $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ omkring 0,3-0,6 m nede i jorden. Porøsiteten for tørvejorde er ofte høj i toplaget, hvor organismer forårsager en løs struktur med mange makroporer (Johansen, 2011). Typisk vil porøsitet falde med dybde (Hoag og Price, 1997), hvorfor det kunne være aktuelt at indkorporere dette i modellen. En eksponentiel faldende porøsitet er blevet testet i dette projekt, hvor det blev fundet, at det ikke var betydeligt bedre end en konstant effektiv porøsitet.

Eftersom det er den effektive porøsitet som er bestemmende for vandstandsændringen i boksmodellen, antager modellen at vandindholdet i tørv ikke kan blive mindre end markkapacitet. Dette vurderes som at være en rimelig antagelse, da grundvandsafhængige naturtyper er karakteriseret som generelt våde. For effektiv porøsitet og tilstrømning er deres initialfordeling antaget at være uniformt fordelt, jf. tabel 3.1.

Tabel 3.1. Parametre til boksmodellen, intervaller de undersøges i, og litteraturen de er fundet i

Parameter	Interval	Fordeling	Kilde(r)
Effektiv porøsitet [$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$]	0.1 - 0.9	Uniform	Dahl et al. (2010) Hoag og Price (1997)
Tilstrømning [mm dag^{-1}]	-2,5 - 10	Uniform	

Figur 3.2 viser hvordan vandstanden til hvert tidsskridt udregnes baseret på parametresæt-
tet af tilstrømning og effektiv porøsitet, og hvorledes overfladeafstrømning implementeres.



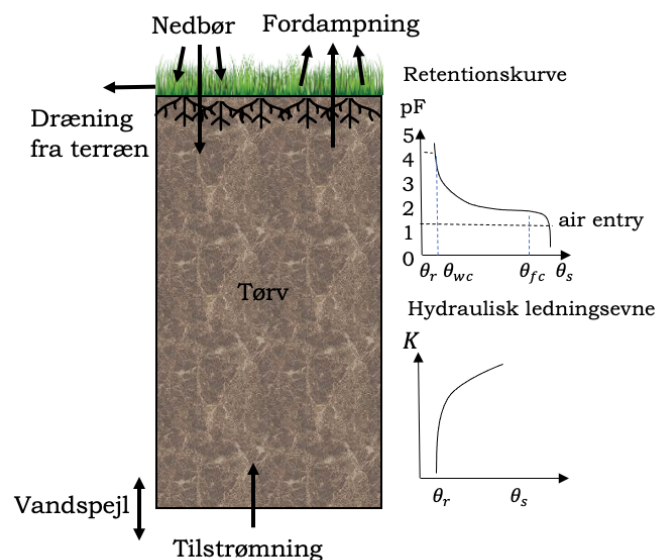
Figur 3.2. Opbygning af boksmodellen. Hvis vandstanden er > 0 betyder det, at der vil ligge vand på terræn, hvilket fjernes i modellen

3.3 Modelopsætning af MIKE SHE modellen

Til MIKE SHE modellen benyttes MIKE SHE (version 2021) udviklet af DHI, der inkluderer de væsentlige processer i det hydrologiske kredsløb og inkluderer procesmodeller for evapotranspiration, overfladestrømning, umættet zone, grundvandsstrømning og vandløbsflow samt interaktionerne mellem disse (DHI, 2017).

I modellen beregnes vandbalancen for den umættede zone. Den mættede zone er medtaget, da denne i modelopsætningen er bestemmende for niveauet af vandstanden. Derudover er tilstrømningen angivet som en strømning fra den mættede zone. Overfladeafstrømning er ikke medtaget i modellen, men der er tilføjet dræn i terrænniveau, hvorfra vand fjernes, så der ikke sker opmagasinerings på terræn.

Evapotranspiration er medtaget i modelopsætningen, hvor den baseret på arbejdet af Kristensen og Jensen (1975) (DHI, 2017). En væsentlig forskel mellem modellerne er, at MIKE SHE modellen inkluderer retentionskurve og hydrauliskledningsevne for den umættede zone, og der således opnås flere karakteristika for det pågældende område, jf. figur 3.3. I appendiks E er retentionskurver uddybet.



Figur 3.3. Konceptuel figur af processer og parametre i MIKE SHE modellen. θ_r er residual vandindhold, θ_{wc} er visnegrænsen, θ_{fc} er markkapacitet og θ_s er mættet vandindhold. pF er den logaritmiske værdi af trykpotentialet. Air-entry er det trykniveau, hvor de største porer begynder med at dræne. K er den hydrauliske ledningsevne

Modellen er ikke opsat for en specifik lokation, da det ønskes at den skal være stedsuafhængig. Det skyldes at modellen skal være general for grundvandsafhængige naturtyper. Den umættede zone er defineret til at kunne være ned til 2 m. Typisk vil den maksimalt blive 1 m (Dahl et al., 2010), men da det ønskes at lave en generel model er den umættede zone forøget, således at der er indlagt en buffer. Den vertikale diskretisering er 10 cm de første 40 cm, hvorefter diskretiseringen er 20 cm den resterende dybde. I modellen

benyttes et initial trykniveau fra den lokation der undersøges, samt nedbør og potentiel evapotranspiration.

Den endimensionelle strømning beskrives ved Richardsligning. Ligningen beskriver strømningen af vand i et umættet porøst medie, hvor strømningen skyldes tyngdekraften og kapilaritet (Loll og Moldrup, 2000). Richards ligning kan udlægges på forskellige måder, men er i DHI (2017) beskrevet som ligning 3.2.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} - S(z) \quad (3.2)$$

Hvor

θ	Volumetrisk vandindhold [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]
t	Tid [time]
z	Dybde [mm]
K	Hydraulisk ledningsevne [mm time^{-1}]
Ψ	Trykpotentiale [mm]
S	Tabsled for rodoptag [time^{-1}]

Til bestemmelse af Richardsligningen, er de hydrauliske funktioner for retentionskurven og den hydrauliske ledningsevne nødvendige. Disse er bestemt ved van Genuchten formen, der er den mest anvendte og ses af hhv. ligning 3.3 og ligning 3.4 (DHI, 2017). Retentionskurven beskriver hvor meget vand der tilbageholdes for en jord ved et givet trykpotentiale. Jordens sammensætning vil have en indflydelse på dette, f.eks. vil en grovstruktureret og velsorteret jord have en lille air entry-værdi. For umættede jorde er den hydrauliske ledningsevne ikke konstant, men vil falde med faldende vandindhold. Vandet vil nemmere drænes fra større porer end mindre porer, hvorved tværsnitsarealet for vandstrømning falder (Loll og Moldrup, 2000). Retentionskurven og den hydrauliske ledningsevne giver derfor mange informationer om karakteristikken af jorden.

Retentionskurve

$$\theta(\Psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^m} \quad (3.3)$$

Hydraulisk ledningsevne

$$K(\Psi) = K_s \frac{((1 + |\alpha\Psi|^n)^m - |\alpha\Psi|^{n-1})^2}{(1 + |\alpha\Psi|^n)^{m(l+2)}} \quad (3.4)$$

Hvor

θ_r	Residualt vandindhold [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]
θ_s	Mættet vandindhold [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]
α	Invers air-entry [mm^{-1}]
n	Porestørrelsesindeks [-]
m	$m = 1 - \frac{1}{n}$ [-]
K_s	Mættet hydraulisk ledningsevne [mm time^{-1}]
l	van Genuchten form faktor [-]

I de hydrauliske funktioner indgår forskellige parametre, der er beskrivende for vandindholdet i den umættede zone. Af disse er fire sammen med tilstrømningen udvalgt til stokastisk undersøgelse i forskellige intervaller. Dette præsenteres i følgende afsnit.

3.3.1 Parametre anvendt til bestemmelse af vandstanden med MIKE SHE modellen

De fem parametre der undersøges samt intervallet for den stokastiske modellering kan ses i tabel 3.2. Derudover er værdierne for det residuale vandindhold og van Genuchten form faktoren vist. Det er valgt at holde parameteren for det residuale vandindhold konstant, da det er intervallet mellem det mættede og residuale vandindhold, der har betydning for hvor vand jorden kan opfyldes og drænes med. For van Genuchten formfaktoren er det blevet testet, hvor stor en indflydelse denne har for den hydrauliske ledningsevne, men det blev vurderet, at den ikke har en væsentlig indflydelse, og standardindstillingen i MIKE SHE er derfor benyttet.

Værdier for parameterintervallerne er bestemt ud fra værdier fundet i andre undersøgelser og afspejler alle værdier for tørv. Bestemmelse af intervallerne er en opvejning mellem at dække et bredt interval uden at intervallet bliver så bredt, at der bruges unødvendig beregningstid. Intervallerne er testet ved først at undersøge et bredt interval, hvorefter dette er blevet indsnævret for nogle parametre såsom mættet hydraulisk ledningsevne og invers air-entry. Derudover er effekten af at benytte en konstant værdi for invers air-entry, mættet vandindhold, mættet hydraulisk ledningsevne og porestørrelsesindex undersøgt.

Tabel 3.2. Parametre der anvendes til MIKE SHE modellen, de intervaller de undersøges i, og litteraturen de er fundet i

Parameter	Interval	Fordeling	Kilde
Invers air-entry værdi [mm^{-1}]	1 - 1000	Uniform	Gnatowski et al. (2010) Wallor et al. (2018)
Residualt vandindhold [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]	0,1	Konstant	Gnatowski et al. (2010)
Mættet vandindhold [$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$]	0,5 - 0,98	Uniform	Batzer og Baldwin (2012) Gnatowski et al. (2010) Wallor et al. (2018)
Mættet hydraulisk ledningsevne [mm dag^{-1}]	8,6 - 8600	Uniform	Gnatowski et al. (2010) Mustamo et al. (2016)
Porestørrelsesindex [-]	1.1 - 3	Uniform	Gnatowski et al. (2010)
van Genuchten form formfaktor [-]	0,5	Konstant	Standardindstilling
Tilstrømning [mm dag^{-1}]	-2,5 - 10	Uniform	

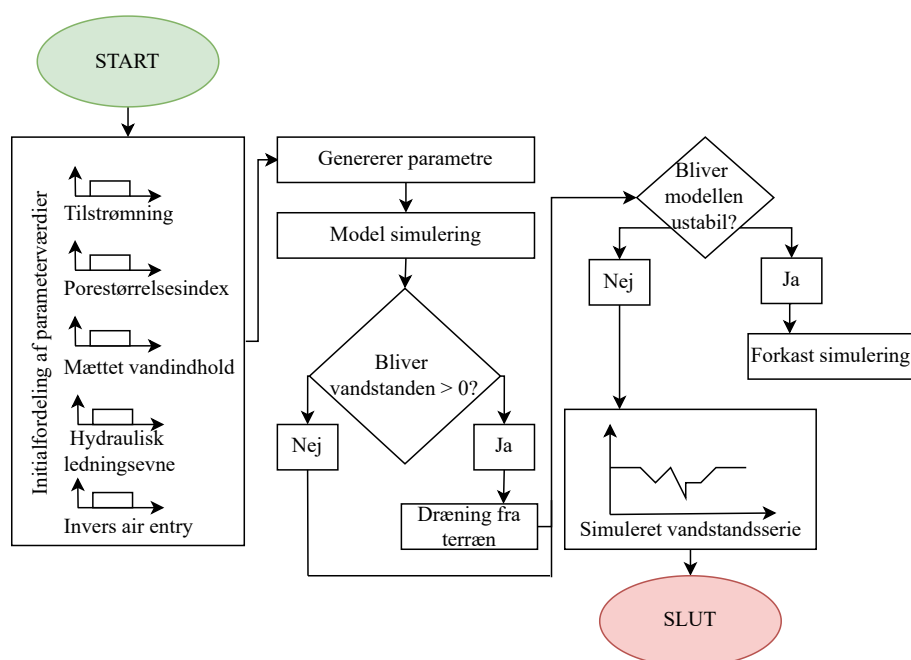
I modellen inkluderes udregning af den aktuelle evapotranspiration, som udregnes ud fra vegetationparametre. De parametre der indgår, samt værdierne for disse er angivet i tabel 3.3.

Tabel 3.3. Parametre til beregning af evapotranspiration i MIKE SHE modellen

Parameter	Værdi	Fordeling	Kilde
Bladarealindeks [$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$]	2,5	Konstant	Asner et al. (2003)
Roddybde [cm]	30	Konstant	Lott og Hunt (2001)
Canopy interception [mm]	0,05	Konstant	Standardindstilling

Parametre relateret til Kristensen og Jensen (1975) evapotranspirationsmodel			
C1 [-]	0,3	Konstant	Standardindstilling
C2 [-]	0,2	Konstant	Standardindstilling
C3 [cm dag^{-1}]	2	Konstant	Standardindstilling
A_{root} [cm^{-1}]	25	Konstant	Standardindstilling

Parametrene fra tabel 3.2 benyttes til den stokastiske modellering, hvor der for hver lokation laves 20.000 simuleringer, af en varighed på ca. 15 sekunder per simulering. En simulering kan blive ustabil, hvorved der vil mangle tidsskridt i simuleringen. Dette kan ske ved nogle parametersammensætninger og kan f.eks. skyldes at evapotranspirationen bliver større end vandindholdet i jorden. Hvis der mangler tidsskridt i en simulering, vil denne blive forkastet. På figur 3.4 er den overordnede modelopbygning vist.



Figur 3.4. Opbygning af MIKE SHE modellen. Hvis vandstanden er > 0 betyder det, at der vil ligge vand på terræn, hvilket fjernes i modellen. En ustabil simulering mangler tidsskridt

3.4 Inputs og observationer af vandstandstidsserier

Til både boksmodellen og MIKE SHE modellen anvendes potentiel evapotranspiration og nedbør som input. Nedbøren er hentet fra DMI Klimaatlas og anvendes på timebasis. Nedbøren er hentet fra det 10 x 10 km klimagrid hvori det grundvandafhængige naturområde ligger, jf. tabel A.1 i [appendiks A](#). Den potentielle evapotranspiration anvendes på timebasis og beregnes vha. Makkinks formel, hvor temperatur og solindstråling er hentet fra det 10x10km klimagrid hvori det grundvandafhængige naturområde ligger. Den benyttede formel for Makkink er fra [Plauborg et al. \(2002\)](#) med en kalibreringsfaktor på 0.7. Den beregnede evapotranspiration er blevet sammenlignet med DMI's beregnede pr. døgn, og er i overensstemmelse med denne.

Målinger af vandstand for naturområderne er fra WatsonC's database; *Calypso*. Ved hver vandstandstidsserie er den første uge efter installering af sensoren ignoreret for at sikre at forholdene i området er i ligevægt. Vandstandsmålingerne er på timebasis og er lineært interpoleret såfremt data har manglet, og hvis der er flere observationer indenfor en time er gennemsnittet fundet.

Evalueringsmetode af modelsimuleringer

I dette kapitel beskrives hvordan modelsimuleringer fra boksmodellen og MIKE SHE modellen evalueres for at finde de parametersæt hvor vandstanden bedst bestemmes. Dette gøres på baggrund af opstillede acceptskriterier som simuleringerne skal opfylde. I det første afsnit præsenteres metoden det beror på.

4.1 Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE)

De to modeller er forenklede beskrivelser af virkelige systemer, og der kan derfor være usikkerheder forbundet med modelstrukturen. Derudover er der usikkerheder forbundet med parametrebestemmelse, hvorfor det at lave deterministisk modellering ikke er optimalt. I stedet anvendes en stokastisk tilgang, hvor forskellige parametresæt analyseres og således tillader usikkerheder omkring antagelser og inputs i modellerne. Den anvendte metode er Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) af Beven og Binley (1992).

GLUE er en metode til kalibrerings- og usikkerhedsbestemmelse for modeller. Alle hydrologiske modeller, observationer og randbetingelser som modelkalibrering baseres på indeholder fejl. GLUE bygger på konceptet om 'equifinality', hvor ideen om et optimalt og sandt parametresæt forkastes. I stedet kan parametresæt i modellen beskrive observationer ved også at tage højde for fejl. Parametresættene genereres fra en initialfordeling, og Monte Carlo simuleringer udføres.

Da parametresættene vil indeholde fejl, tilskrives de en likelihood, der beskriver hvor godt simuleringen matcher observationer. Denne likelihood er bestemmende for hvorvidt simuleringer forkastes eller accepteres, og tildelingen af en likelihood til en simulering er baseret på et valgt acceptkriterie. Fordeling for parametre og modellerede vandstande kan efterfølgende laves ved at vægte likelihood. Hvilket likelihood der anvendes, og eventuelle sammensætninger, varierer og bør baseres på modeltype og observationer (Beven og Binley, 2014; Vázquez et al., 2008). I det følgende vil de acceptkriterier, som resulterer i likelihoods blive beskrevet.

4.2 Acceptkriterier og tildeling af likelihoods til simuleringer

Som mål for, om en simulering accepteres eller forkastes, er der opstillet tre kriterier hvoraf to skal være opfyldt for at modellen kan accepteres. Det første og andet kriterie er en sammenligning af de simulerede og observerede vandstande i perioden 1. april til og med

30. september. Denne periode er udvalgt fordi fordampningen her er højere end resten af året og der forekommer mindre nedbør, hvilket også kan ses i en faldende vandstand for lokationerne. Det er dermed i denne periode, at vandstanden kan blive kritisk for de grundvandsafhængige naturtyper.

4.2.1 Kriterie 1: Nash-Sutcliffe Efficiency

Til det første kriterie benyttes Nash-Sutcliffe efficiency (NSE). NSE er en normaliseret statistisk parameter, der bestemmer den relative størrelse af residualspreddningen sammenlignet med spredningen i observeret data, jf. ligning 4.1. NSE kan variere fra $-\infty$ til 1, hvor 1 betyder at simuleringen er lig observationerne. En NSE på 0 betyder at simuleringerne er lig middelværdien af observationerne. En negativ NSE betyder derfor at middelværdien af observationerne er en bedre indikator end simuleringen (McCuen et al., 2006). Det er valgt at NSE skal være over 0,4 for at en simulering kan accepteres, da det ønskes at simuleringen skal være en bedre indikator end middelværdien af observationerne.

$$L_1 = NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (h_o^t - h_m^t)^2}{\sum_{t=1}^T (h_o^t - \bar{h}_o)^2} \quad (4.1)$$

Hvor

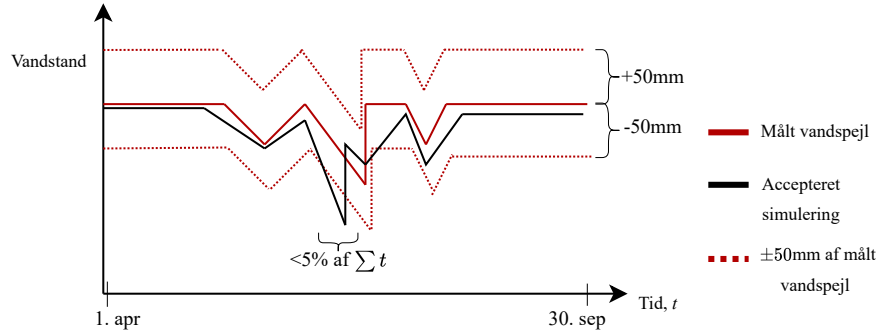
L_1	Likelihood for acceptkriterie 1 [-]
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency [-]
T	Antal timer i perioderne fra 1. april - 31. september [-]
h_o^t	Observeret vandstand til tiden t [mm]
h_m^t	Simuleret vandstand til tiden t [mm]
$\bar{h}_o$	Middelværdien af observerede vandstande [mm]

En lille spredning indenfor det observerede data kan betyde en lav eller negativ NSE-værdi. For nogle områder er vandstanden forholdsvis konstant året igennem og spredningen i det observerede data vil derfor være lille, hvorfor nævneren i ligning 4.1 bliver lille. Det betyder, at modellerne for områder med denne type vandstand vil have svært ved at opnå en høj NSE-værdi, selvom modellen har en god forudsigelsesgrad, og derfor vil blive forkastet på dette grundlag. For at imødekomme dette er der opsat et andet acceptkriterie.

4.2.2 Kriterie 2: Afvigelser fra observeret data og middelfejl

Kriteriet er opstillet som en generel sammenligningen mellem den observerede og simulerede vandstand, og består af to dele, der hver især skal være opfyldt før en simulering accepteres. Det første krav er, at den simulerede vandstand i 95 % af tidskridtene i perioden 1/4 til 30/9 ikke må afvige mere end 50 mm fra den målte. Simuleringer der afviger mindre end dette tildeles et likelihood over nul, jf. ligning 4.2, og hvis ikke de opfylder det tildeles de en likelihood på nul. Figur 4.1 illustrer den første del af kriterie 2.

$$L_2 > 0 \begin{cases} h_m^t < h_o^t + 50\text{mm} \\ h_m^t > h_o^t - 50\text{mm} \end{cases} \quad (4.2)$$



Figur 4.1. Eksempel på en simulering der vil accepteres med acceptkriterie 2. Den sorte streg (en simulering) er udenfor de røde stiplede linjer (± 50 mm af det målte vandspejl) i mindre end 5% af simuleringstiden. Ydermere kræver det at middelfejl mellem målt vandspejl og simuleringen er mindre end 30 mm før en simulering accepteres

Det andet krav er, at den absolutte middelfejl mellem simuleret og målt vandstand ikke må være mere end 30 mm for perioden 1. april til 30. september. En middelfejl på nul angiver at der ikke er en forskel mellem en simulering og observationerne, hvorfor den tildeles den højeste likelihood på 1. Denne likelihood falder lineært ned til en forskel på maksimalt 30 mm hvor likelihood vil være nul, jf. ligning 4.3.

$$L_2 = 1 - \frac{1}{30} \cdot MAE \quad (4.3)$$

Hvor

L_2	Likelihood for acceptkriterie 2 [-]
MAE	Absolut middelfejl mellem observerede og simulerede vandstande [mm]

Udover kriterie 1 og 2 opstilles også et tredje acceptkriterie, der benyttes i kombination med enten kriterie 1 eller 2.

4.2.3 Kriterie 3: Afvigelser fra minimumsvandstande

Dette kriterie er en bedømmelse af hvor god en simulering er til at bestemme minimumsvandstande. Ved minimumsvandstandene kan forholdende for den grundvandsafhængige natur være kritisk, hvorfor det er vigtigt at modellerne kan bestemme disse. De 20 dage, hvor dagsgennemsnittet for observerede vandstande er lavest, er udvalgt til sammenligning med dagsgennemsnittet af den simulerede vandstand til samme dag. 20 dage er valgt ud fra et ønske at dække mere end én tørkeperiode, der typisk ikke varer mere end 20 dage i Danmark (Pedersen og Fonseca, 2022). Ved sammenligningen tildeles simuleringerne en likelihood bestemt jf. ligning 4.4. Likelihood skal være over 0,6 for at en simulering accepteres, da dette tillader at simuleringerne må afvige med 40 % fra observationerne.

$$L_3 = 1 - \sum \frac{|\overline{h_{d,o}} - \overline{h_{d,m}}|}{|\overline{h_{d,o}}|} \cdot \frac{1}{n} \quad (4.4)$$

Hvor

L_3	Likelihood for acceptkriterie 3 [-]
$\overline{h_{d,o}}$	Minimumvandstand for de 20 mindste daglige vandstande observeret [mm]
$\overline{h_{d,m}}$	Vandstand simuleret for de 20 mindste daglige vandstande observeret [mm]
n	Antal dage = 20 dage

Dette acceptkriterie er valgt, da en simulering som er i overensstemmelse med observationerne, giver en likelihood på 1, hvilket er fordelagtigt ift. at udregne en samlet likelihood baseret på acceptkriterierne.

4.2.4 Samlet likelihood

Ud fra de enkelte kriterier beregnes en samlet likelihood. Det er gældende at enten kriterie 1 eller 2 skal være opfyldt og derudover skal kriterie 3 være opfyldt. Det tjekkes først om kriterie 1 er opfyldt, og hvis dette ikke er gældende tjekkes kriterie 2. Hvis hverken kriterie 1 eller 2 er opfyldt, vil det betyde at simuleringen ikke er god nok til at forudsige den observerede vandstand, og simuleringen kan derfor ikke anvendes til bestemmelse af tilstrømningen.

Hvis enten kriterie 1 eller 2 er opfyldt, undersøges det om simuleringerne også kan accepteres med kriterie 3. Hvis dette er tilfældet betyder det, at simuleringen med det tilhørende parametersæt kan benyttes til bestemmelse af tilstrømningen, jf figur 4.2.

For hver af acceptkriterierne er en accepteret simulering blevet tildelt en likelihood i relation til de observerede værdier. Ud fra de to individuelle likelihood-mål bestemmes en samlet likelihood for en simulering jf. ligning 4.5.

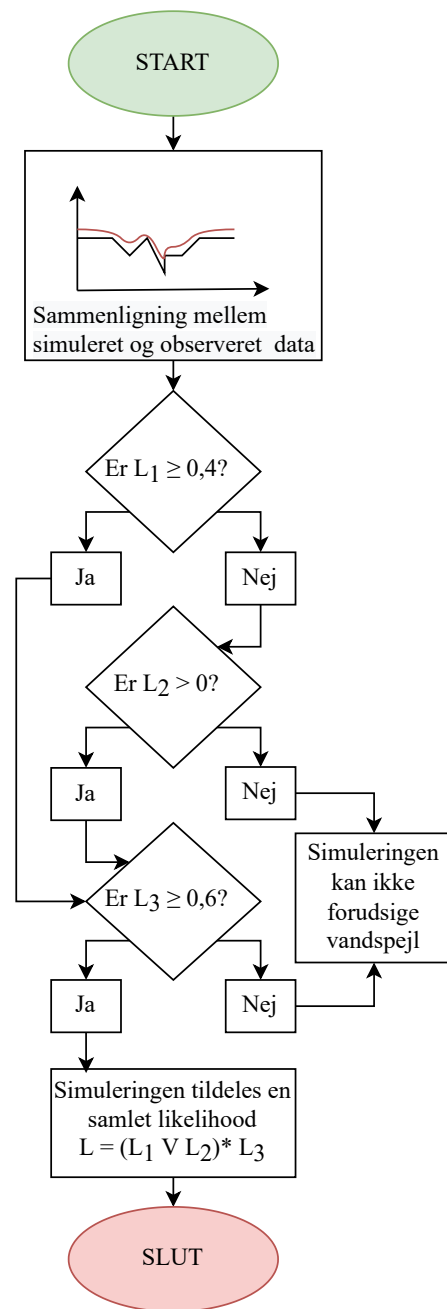
$$L(O/M(\theta, I)) = (L_1 \vee L_2) \cdot L_3 \quad (4.5)$$

Hvor

L	Samlet likelihood
O	Observationer
M	Modellen
θ	Parametre
I	Inputs

Den samlede likelihood vil for kriterie 1 og 3 ligge i intervallet $[0,24;1]$, mens den for kriterie 2 og 3 er $]0;1]$. Det er derfor heller ikke muligt at sammenligne likelihood når de er bestemt ud fra to forskellige kriterier. Det vil sige, at hvis f.eks. L_1 og L_2 begge er 0,5 og har samme L_3 så beskriver de ikke observationerne lige godt, og en direkte sammenligning skal undgås.

For at evaluere hvor godt et match der er mellem accepterede simuleringer og målte vandstande udregnes et vægtet konfidensinterval. Det er udregnet ved at sortere accepterede simuleringer til hvert tids-skidt efter vandstand. De tilhørende samlede likelihoods for simuleringerne summeres, og simuleringer med en vandstand der ligger over eller under de vandstande som korresponderer til 95 % og 5 % af summen af likelihood, fjernes. Ved at benytte et vægtet konfidensbånd får de simuleringer, der har bedst overensstemmelse med målt data, en større vægt end simuleringer med dårlig overensstemmelse. Der er valgt et 90 % konfidensinterval, da der for nogle af de undersøgte lokationer kun er få accepterede simuleringer. Et bredt konfidensinterval kan derfor gøre det svært at evaluere hvorledes simuleringer der performer godt ligger ift. observeret vandstande. Dog er det stadig relevant at undersøge et relativt bredt konfidensinterval, da det er vigtigt at kunne fastslå usikkerheden for modellerne.



Figur 4.2. Fremgangsmåde for acceptering af simuleringer baseret på de tre acceptkriterier

Vurdering af acceptkriteriernes betydning for modelusikkerheden

I dette kapitel analyseres de tre acceptkriterier. Først præsenteres en oversigt over hvor mange simuleringer, der for hvert kriterie er accepteret, samt hvordan disse simuleringer fordeler sig for de to udvalgte lokationer, Ansø og Tingvad. Derefter præsenteres vandstande, bestemt med den samlede likelihood, for de to lokationer samt 90 % konfidensinterval for vandstandene.

5.1 Undersøgelse af accepterede simuleringer for de tre acceptkriterier

Der blev fundet 16 forskellige lokationer med forventet grundvandsafhængig natur, som blev vurderet egnet til undersøgelse med modellerne. Alle lokationer er undersøgt med boksmodellen, mens fem er undersøgt med MIKE SHE modellen, hvilket skyldes dens lange simuleringstid. Der er for boksmodellen lavet 10.000 simuleringer, mens der for MIKE SHE modellen er lavet 20.000 simuleringer per lokation. De undersøgte lokationer kan, sammen med antallet af accepterede simuleringer for hvert acceptkriterie, ses i [tabel 5.1](#).

Det ses af [tabel 5.1](#) at for størstedelen af de lokationer, hvor der kan accepteres simuleringer, er disse accepteret på en kombination af acceptkriterie 1 og 3. Dette indikerer, at de fleste lokationer har en relativ stor variation i vandstanden. Kun tre lokationer accepteres ved kombinationen af acceptkriterie 2 og 3. For disse kan det af [figur C.1](#) i [appendiks C](#) ses, at de tre lokationer accepteres på sammensætningen af kriterie 2 og 3, da alle har en stabil vandstand. Det betyder, at der vil være en lille spredning indenfor det observerede data og simuleringerne kan derfor ikke få en høj L_1 , da denne baseres på Nash-Sutcliffe. I [appendiks C](#) kan alle undersøgte vandstandstidsserier med konfidensintervaller ses.

5.1. Undersøgelse af accepterede simuleringer for de tre acceptkriterier

Tabel 5.1. Antal og procentdel af accepterede simuleringer for hvert acceptkriterie, samt antallet af accepterede simuleringer når acceptkriterier kombineres. For boksmodellen er der lavet 10.000 simuleringer, mens der for MIKE SHE modellen er lavet 20.000 simuleringer for hver undersøgte lokation. L₁₋₃ angiver acceptkriterie 1-3 mens L angiver accepterede simuleringer baseret på en kombination af acceptkriterierne

		Boksmodel				MIKE SHE model			
		Accepterede simuleringer				Accepterede simuleringer			
No.	Lokation	L ₁	L ₂	L ₃	L [% (antal)]	L ₁	L ₂	L ₃	L [% (antal)]
1	Ansø	0	6672	1148	7,9 (785)	0	12666	1727	6,5 (1305)
2	Brabrand	0	0	976	0,0 (0)	92	0	677	0,2 (36)
3	Brande	5	0	499	0,1 (5)				
4	Brokær 1	0	0	249	0,0 (0)	110	0	3261	0,5 (110)
5	Brokær 2	0	2847	512	1,5 (146)				
6	Glømbak	0	0	734	0,0 (0)				
7	Hellerød 1	0	1612	1508	2,0 (198)				
8	Hellerød 2	788	0	890	5,1 (514)				
9	Karup	152	0	468	1,5 (152)				
10	Kasted 1	929	0	445	3,2 (319)				
11	Kasted 2	924	0	702	4,6 (456)				
12	Kolding	532	0	307	3,1 (307)				
13	Nørhå	0	0	357	0,0 (0)				
14	Sønderhå	0	0	362	0,0 (0)	0	0	908	0,0* (0)
15	Tingvad 1	885	0	438	3,4 (335)	589	0	2308	1,9 (377)
16	Tingvad 2	983	0	588	2,7 (271)				

*Baseret på 10.000 simuleringer

Der ses en relativ stor forskel på hvor mange simuleringer, der accepteres for de forskellige lokationer, og særligt med de forskellige acceptkriterier. Det ses at for acceptkriterie 2 accepteres flere simuleringer end ved acceptkriterie 1, hvilket kan tyde på at dette kriterie er mindre restriktivt. Det kan dog ses at ingen af de lokationer, hvor kriterie 1 er opfyldt også har simuleringer der opfylder kriterie 2. Det betyder derfor at de to acceptkriterier er meget specifikke til hvert sit scenarie af vandstandstidsserie.

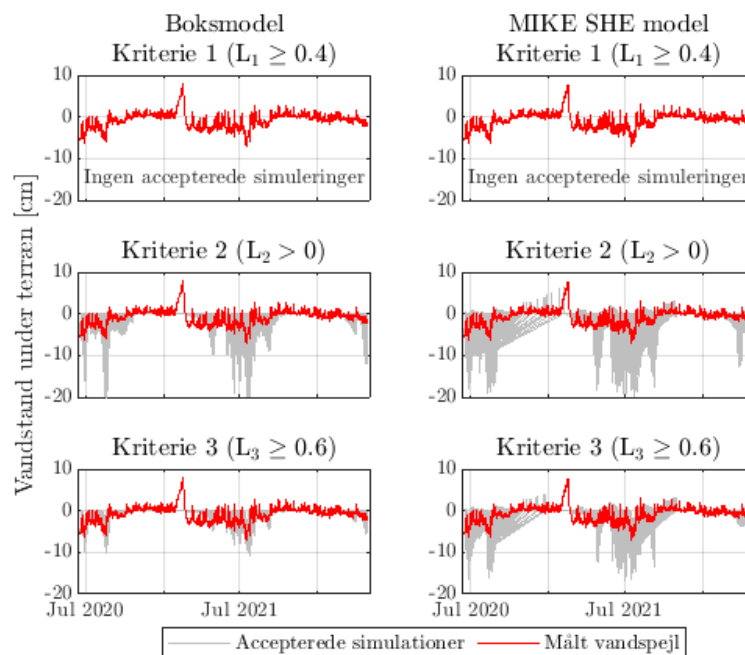
For kriterie 3 ses det, at der for alle lokationer accepteres simuleringer, hvilket indikerer, at dette kriterie er det mindst restriktive. Det er baseret på 20 dage, hvorimod kriterie 1 og 2 er for en længere periode (alle dage fra 1/4 til 30/9). Det er dog værd at bemærke, at de to simuleringer hvor der accepteres flest simuleringer med kriterie 3 for boksmodellen er Ansø og Hellerød 1. De accepteres også med kriterie 2, og har dermed et vandspejl tæt ved terræn og med lille variation. Det er uventet eftersom en 40 % afvigelse af vandstande tæt ved terræn ikke tillader meget variation i absolutte afstande. Det indikerer at mange parametresæt giver simuleringer der beregner vandstande nær terræn.

5.2 Undersøgelse af individuelle acceptkriterier for Ansø og Tingvad 1

I dette afsnit præsenteres simuleringerne der accepteres for de individuelle acceptkriterier. Dette præsenteres for de to udvalgte lokationer, Ansø og Tingvad 1, hvorved både kombinationen af hhv. acceptkriterie 2 og 3 samt kombinationen af 1 og 3, præsenteres.

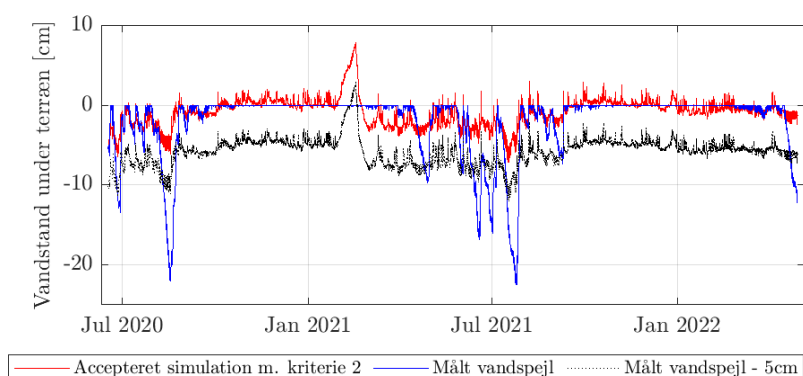
5.2.1 Ansø: Lokation med forventet høj udstrømning

Det ses at simuleringerne for Ansø accepteres baseret på kriterie 2 og 3, jf. figur 5.1 og tabel 5.1. Alle vandstande er regnet negativt når de er under terræn.



Figur 5.1. Alle accepterede simuleringer for hvert af acceptkriterierne for Ansø. Der er ingen accepterede simuleringer for kriterie 1

Det ses for begge modeller for kriterie 2, at der særligt, til de tidspunkter hvor der er relativ store fald i vandstanden, er nogle vandstande, der ligger ned til 15 cm fra det målte vandspejl. Kriterie 2 tillader at den modellerede vandstand må ligge mere end 5 cm udenfor den observerede vandstand i 5 % af tiden, svarende til 16 dage for Ansø. Det betyder altså at vandstanden har en høj afvigelse til nogle tidspunkter, så længe den i 95% af tiden ligger indenfor 5 cm. Eftersom kriterie 2 også baseres på middelfejlen, der skal være <3 cm, må de simuleringer som har en høj afvigelse i enkelte perioder være tæt på de observerede vandstande i resten af evalueringsperioden 1/4 til 30/9. Figur 5.2 illustrer dette hvor en simulering, der har en høj afvigelse til nogle tidspunkter er accepteret.



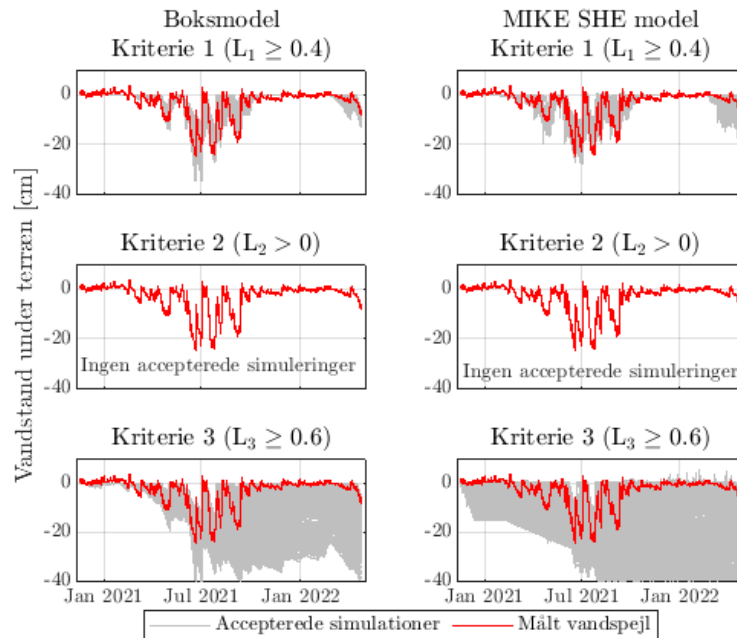
Figur 5.2. En simulering accepteret på kriterie 2 for Ansø med en høj afvigelse i enkelte perioder. Simuleringen er vist med det interval hvori kriterie 2 opfyldes hvis simuleringen er indenfor intervallet i 95 % af tiden

For kriterie 3 ses det i stedet, for boksmodellen, at de accepterede simuleringer kun ligger få cm under det målte vandspejl. Selvom dette kriterie er opstillet for at sikre at modellen kan forudsige de mest kritiske vandstande, så ses det at de simuleringer der accepteres overordnet ligger tæt på de observerede. Det betyder, at kriterie 3 for boksmodellen for Ansø er et bedre acceptkriterie end kriterie 2 og måske kunne have været anvendt alene.

For MIKE SHE modellen ses der dog også ved kriterie 3 vandstande der ligger op mod 10 cm fra den målte vandstand. Det må betyde at de simuleringer, hvor der ses store afvigelser for en dag, må afvige i lille grad fra de observerede vandstande de resterende dage eller at 40 % afvigelse tillader for stor en spredning.

5.2.2 Tingvad 1: Lokation med forventet lav udstrømning

Det ses at simuleringerne for Tingvad 1 accepteres baseret på kriterie 1 og 3, jf. figur 5.3 og tabel 5.1.

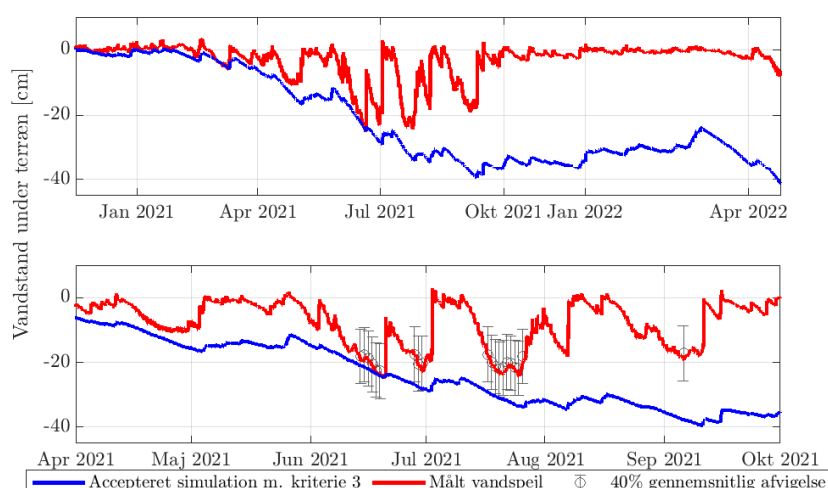


Figur 5.3. Alle accepterede simuleringer for hvert enkelt acceptkriterie for Tingvad 1. Der er ingen accepterede for kriterie 1

For både boksmodellen og MIKE SHE modellen ses det for kriterie 1, at de accepterede simuleringer fanger dynamikken i vandspejlet der flukturer mellem 0 og 20 cm. Ved boksmodellen accepteres simuleringer med større afvigelser for de laveste vandstande end for MIKE SHE modellen.

Når kriterie 3 benyttes til en lokation hvor vandspejlet fluktuerer, som ved Tingvad 1, medfører det at der accepteres simuleringer, der i høj grad overestimerer vandspejlet. Der accepteres simuleringer, der i vinterperioden ligger op mod 40 cm fra det observerede vandspejl. Dette skyldes at det udelukkende er de 20 dage med lavest vandstand, som dikterer om en simulering accepteres. Figur 5.4 illustrer hvorledes en simulering der afviger 'væsentligt' stadig accepteres.

I en af de 20 dage sidst i september overestimerer simuleringen med 35 cm, men da den i midt juni minimalt afviger fra det målte, er den gennemsnitlige afvigelse mindre end 40 %. Det indikerer, at der accepteres simuleringer hvor parametrekombinationer medfører, at vandstanden stiger meget lidt ved nedbørshændelser, hvilket skyldes at parametrekombinationerne giver en høj porøsitet i jorden og/eller en negativ tilstrømning.



Figur 5.4. En simulering accepteret på kriterie 3 for Tingvad 1 med en høj afvigelse i store dele af simuleringsperioden. Simuleringen er vist med det interval hvori kriterie 3 opfyldes, hvilket er 40 % af den gennemsnitlige vandstand for de 20 dage med lavest vandstand

Generelt er kriterie 1 mere restriktivt end kriterie 3 og formår at fange de laveste kritiske vandstande. Dog er kriterie 3 med til at nedjustere antallet af accepterede simuleringer, som justeres fra 885 for kriterie 1 til 335 for kombinationen af kriterie 1 og 3 i boksmodellen, jf. tabel 5.1. Det er ca. 25 % af simuleringerne der alene accepteres for kriterie 3 som ikke accepteres for kriterie 1, og det må antages at det er disse der har lave vandstande i både sommer- og vinterperioden på figur 5.3. Det bekræfter at en kombination af både kriterie 1 og 3 er nødvendig.

5.3 Vandstandsbestemmelser med boksmodellen og MIKE SHE modellen

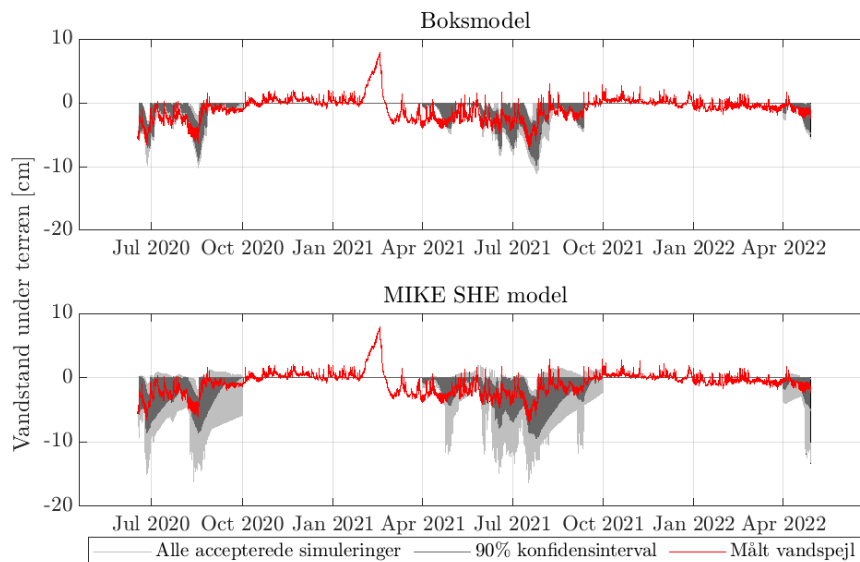
I dette afsnit præsenteres vandstandene bestemt ud fra det samlede likelihood. Til vandstandstidsserierne er et 90 % vægtet konfidensinterval beregnet for perioden 1/4 til 30/9, for at kunne vise om modellen med 90 % sandsynlighed har et interval, hvori det målte vandspejl befinder sig.

5.3.1 Ansø: Lokation med forventet høj udstrømning

Ansø er den lokation, hvor der for både boks- og MIKE SHE modellen accepteres flest simuleringer (>6 %) baseret på den samlede likelihood. Af figur 5.5 ses alle accepterede simuleringer, det målte vandspejl, samt 90 % konfidensinterval for boks- og MIKE SHE modellen. For boksmodellen ligger de observerede vandstande indenfor konfidensintervallet i 42 % af tiden, mens det for MIKE SHE modellen er 70 % af tiden. Visuelt ligner det dog, at det målte vandspejl er indenfor intervallet i en større del af tiden. Dette er undersøgt, og hvis en lille variation fra konfidensintervallet tillades (< 1 cm), ligger en betragtelig del af

tidsskridtene indenfor dette nyt interval, hvorfor afvigelserne fra 90 % konfidensintervallet er små.

For begge modeller fjernes vand fra terræn. Det kan ses at dræningen i MIKE SHE modellen ikke har været så høj, at alt vand på terræn er blevet fjernet i alle tidsskridt, dog ligger konfidensintervallet ikke over terræn. Da hverken konfidensintervallet for boks- og MIKE SHE modellen forudsiger vand på terræn, kan det betyde at de perioder, hvor den observerede vandstand er over terræn, medfører en lavere procentvis dækning af konfidensintervallet. Hvis der i disse tidspunkter bliver sammenlignet med nul i stedet for vandstanden over terræn, ligger boksmodellen indefor konfidensintervallet i 46 % af tiden, mens MIKE SHE modellen gør i 73 % af tiden. Der ses for begge modeller derfor kun en lille forbedring i bestemmelsesgraden ved at tage højde for at vandstanden ikke kan stige over terræn.



Figur 5.5. Alle accepterede simuleringer, 90 % vægtede konfidensinterval for accepterede simuleringer samt observerede vandstande for Ansø

Konfidensintervallet for vandstandene beregnet med MIKE SHE modellen er bredere end for boksmodellen i særligt september 2020 og 2021, men ellers er der overensstemmelse mellem de to modeller, jf. figur 5.5. Et bredere konfidensinterval betyder, at spredningen af vandstande er større for MIKE SHE modellen end for boksmodellen. Det er særligt den 95. percentil, der er større for MIKE SHE modellen, hvilket betyder, at det er simuleringer med en relativ lav likelihood som overestimerer vandstanden.

Dette ses også ved en stor forskel mellem vandstande for alle accepterede simuleringer og det vægtede konfidensinterval. Det indikerer en større usikkerhed ved at benytte MIKE SHE modellen. Der er en større risiko for at accepterede simuleringer har en dårlig forudsigelsesevne til et tidspunkt for MIKE SHE modellen end for boksmodellen.

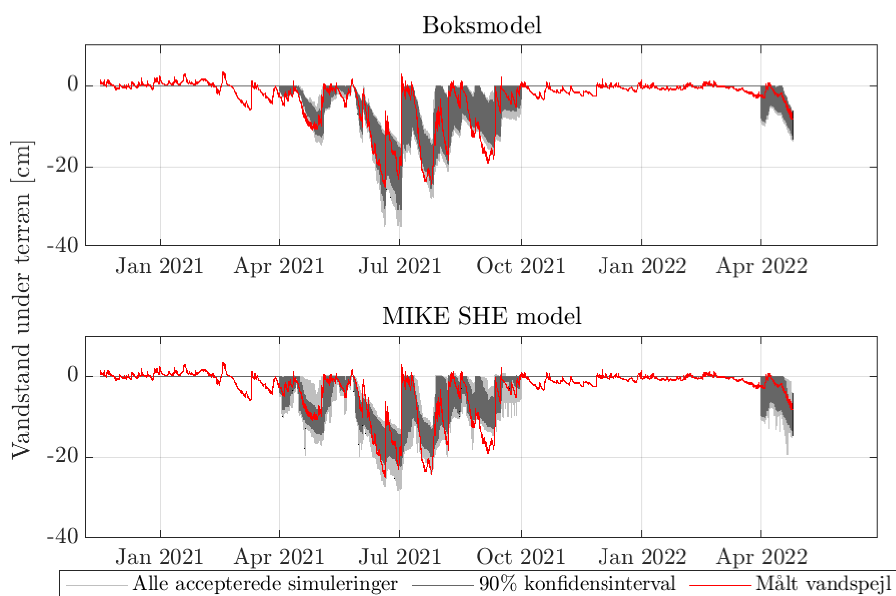
For MIKE SHE modellen ses der større forskelle mellem observerede og simulerede vandstande for alle accepterede end ved boksmodellen. Det skyldes at der ved kriterie

3 for MIKE SHE modellen, som forklaret i forrige afsnit, kan være simuleringer der afviger relativt meget for en dag, men ikke de resterende 19 dage. Boksmodellen ses at være mere præcis i sin simulering af vandstanden, da der er relativ lille forskel mellem alle accepterede simuleringer og konfidensintervallet.

Sammenlignes figur 5.1 og 5.5 fremgår det at en kombination af kriterie 2 og 3 for boksmodellen giver accepterede simuleringer der med rimelighed afspejler vandstanden i Ansø. Det tilskrives i høj grad kriterie 3, som sikrer at simuleringer accepteret alene på kriterie 2, som overestimerer vandstanden i sommerperioden, ikke får indflydelse på den endelige forudsigelse af vandspejlet. For MIKE SHE modellen ses samme tendens dog i mindre grad, da både kriterie 2 og 3 overestimerer vandstanden.

5.3.2 Tingvad 1: Lokation med forventet lav udstrømning

For boksmodellen ligger de observerede vandstande indenfor konfidensintervallet i 64 % af tiden, mens det for MIKE SHE modellen er 59 % af tiden. Hvis de observerede vandstande der ligger over terræn i stedet sættes til nul, ligger boksmodellen indefor konfidensintervallet i 68 % af tiden, mens MIKE SHE ligger indenfor i 62 % af tiden.



Figur 5.6. Alle accepterede simuleringer, 90% vægtet konfidensinterval for accepterede simuleringer samt observerede vandstande for Tingvad 1

Sammenlignes modellernes evne til at forudsige vandstanden ses det, at boksmodellen har tendens til at overestimere vandstanden i de perioder hvor den er lavest. MIKE SHE modellen underestimerer i stedet vandstanden i disse perioder. Det betyder at ingen af de to modeller bestemmer vandstanden til de mest kritiske tidspunkter nøjagtigt. Men, som det også ses af figur 5.3, er kriterie 3, der tager højde for dette ikke særlig restriktivt for lokationer, hvor der observeres relativ store fluktuationer i vandspejlet.

Det ses også af figur 5.6 at der for MIKE SHE modellen er en større variation i vandstanden mellem alle accepterede simuleringer og konfidensintervallet end for boksmodellen. Forskellen mellem alle accepterede og konfidensintervallet korresponderer nogenlunde til den samme som for Ansø med op til 10 cm.

Forskelle mellem modellerne kan skyldes, at der i MIKE SHE modellen er inkluderet en evapotranspirationsmodel, hvorimod der i boksmodellen antages at den aktuelle evapotranspiration svarer til den potentielle evapotranspiration. Evapotranspirationen er derfor måske større i boksmodellen end den reelt er i det virkelige system, hvilket medfører den lavere vandstand.

Batzer og Baldwin (2012) beskriver at den aktuelle evapotranspiration er omtrent den potentielle evapotranspiration i vækstsæsonen og når vandstanden er i rodzonen, dog kan evapotranspirationen for rigkær (direkte grundvandsafhængige) være op til 60 % større end for højmoser (inddirekte grundvandsafhængig). Det er derfor ikke sikkert at denne antagelse altid er i overensstemmelse med de reelle forhold. I MIKE SHE modellen hvor evapotranspirationen muligvis er underestimeret, kan det skyldes at de parametre der defineres i evapotranspirationsmodellen, f.eks. roddeybde, er bestemt på baggrund af studier og derfor ikke afspejler de forhold, der reelt er på lokationen.

5.4 Diskussion af anvendelsen af acceptkriterierne

I de ovenstående afsnit er accepterede simuleringer blevet præsenteret og diskuteret. Det er relevant at belyse hvordan valgene af acceptkriterier påvirker modellernes performance. Andelen af accepterede simuleringer giver en indikation på hvor godt modellerne performer, men kriterierne som simuleringerne skal opfylde er subjektivt valgt. Dette er en af ulemperne ved GLUE, og er en ting metoden er blevet kritiseret for (Beven og Binley, 2014). Der er dog også fordele ved at metoden ikke nødvendigvis er baseret på en 'formal likelihood', hvor residualer antages at følge en statistisk fordeling. Ved brug af 'informal likelihood', som der gøres i GLUE, åbnes der op for muligheden for at residualer ikke følger en fordeling, hvilket de ofte ikke gør ved hydrologiske modeller (Nourali et al., 2016). En anden fordel er at der kan anvendes 'fuzzy measures', som kan være med til at sikre at accepterede simuleringer repræsenterer det virkelige system baseret på kvalitative mål (Beven, 2009).

Det kan diskuteres om en simulering er uacceptabel fordi L_1 er 0,35, men er egnet når L_1 er 0,4. Det er blevet undersøgt om en sænkelse af kravet for kriterie 1 vil bevirke at der for de tre lokationer, hvor ingen simuleringer accepteres, ville kunne accepteres simuleringer. I appendiks B undersøges Brokær 1, Nørhå og Sønderhå hvor $L_1 \geq 0$ og det ses, at modellerne stadig i noget omfang kan simulere de målte vandstande. Der er dog få accepterede simuleringer og med stedsvis store afvigelser over 20 cm.

Målet er dog ikke i sig selv at acceptere mange simuleringer, men at acceptere simuleringer der kan beskrive systemet, og uden at usikkerheden for modellen bliver for stor. I ovenstående afsnit fremgår det, at kriterie 1 muligvis kan stå alene hvis lokationen har variation i vandspejlet, men at kombinationen med kriterie 3 stadig ses at spille en rolle

i antallet af accepterede simuleringer. Det er tydeligt at kriterie 3 ikke udelukkende kan udgøre den samlede likelihood.

Legates og McCabe (1999) argumenterer dog, at Nash-Sutcliffe efficiency ikke bør bruges som den eneste parametre til evalueringen af hydrologiske modeller, men at den bør bruges i kombination med andre metoder, der tager højde for absolutte fejl. En ulempe ved at benytte kriterie 1 er, at den er følsom overfor ekstremhændelser i observeret data, hvor en stor afvigelse vægter mere, da fejlene kvadreres i udregningen af L_1 . Ydermere er den ufølsom overfor systemiske fejl (Legates og McCabe, 1999; Moriasi et al., 2015).

Helt omvendt ses det for lokationen Ansø med et stabilt vandspejl, hvor kriterie 3 muligvis kan udgøre den samlede likelihood alene for boksmodellen. Både kriterie 2 og 3 er ikke baseret på hele tidsserien, og tillader at simuleringen til nogle tidspunkter kan afvige meget. Det kan derfor være nødvendigt at kombinere flere kriterier for at minimere risikoen for at acceptere simuleringer i nogle tidsskridt ikke stemmer overens med observeret data. Selvom det visuelt ligner nogle kriterier kan anvendes alene, viser tabel 5.1 at der ved alle lokationer sker en reduktion af antallet af accepterede simuleringer, og således indikerer at en kombination af kriterierne sikrer at de bedst passende simuleringer accepteres.

Kriterie 2 læner sig op ad en ofte benyttet metode ved GLUE - 'limits of acceptability'. Forskellen er at likelihood for L_2 er baseret på den gennemsnitlige fejl, og ikke en likelihood tildelt hver observation, hvor gennemsnittet efterfølgende findes. For kriterie 2 er det valgt at likelihood vægtes symmetrisk omkring observationen, hvilket er gjort da denne metode er mest simpel, men andre distributioner for likelihood-fordelingen kunne have været anvendt (Beven, 2009). Evalueringsmetoden for kriterie 2 blev valgt da middelfejlen kan anvendes, hvis det forventes at der ikke er mange fluktuationer eller ekstremhændelser.

Baseret på figur 5.4 kan det diskuteres hvorvidt antallet af kritiske dage for kriterie 3 er passende. Valget af 20 dage er begrundet med at det skal dække mere end en tørkeperiode. Færre dage vil forårsage, at de dage hvor vandstanden ikke ligger tæt på den observerede, vil vægte mere i udregningen af gennemsnittet, men risikoen for at basere det på én tørkeperiode er større. Mange dage bevirker at der kan evalueres på ikke-kritiske perioder. Det kan dog ses, at når kriterie 3 anvendes i kombination med kriterie 1 og 2, så er accepterede simuleringer passende, og beskriver observationerne med rimelighed.

Eftersom det samlede likelihood multipliceres vægtes hvert kriterie ligeligt. Der er dog forskel på hvor 'nemt' en simulering kan opnå den samme score. Kriterie 1 har 'sværere' ved at opnå høje værdier, og vægtes således inddirekte mindre end kriterie 3. Men eftersom de simuleringer der accepteres med kriterie 1 generelt afspejler den målte vandstand, vil de simuleringer som opfylder både kriterie 1 og 3 være passende, selvom kriterie 3 ikke altid afspejler målt data. At kriterie 3 vægter mere i det samlede likelihood bevirker, at de simuleringer som vægter mest, er gode til at simulere kritiske tidspunkter hvilket er fordelagtigt.

Bestemmelse af tilstrømning og analyse af parameterkombinationer

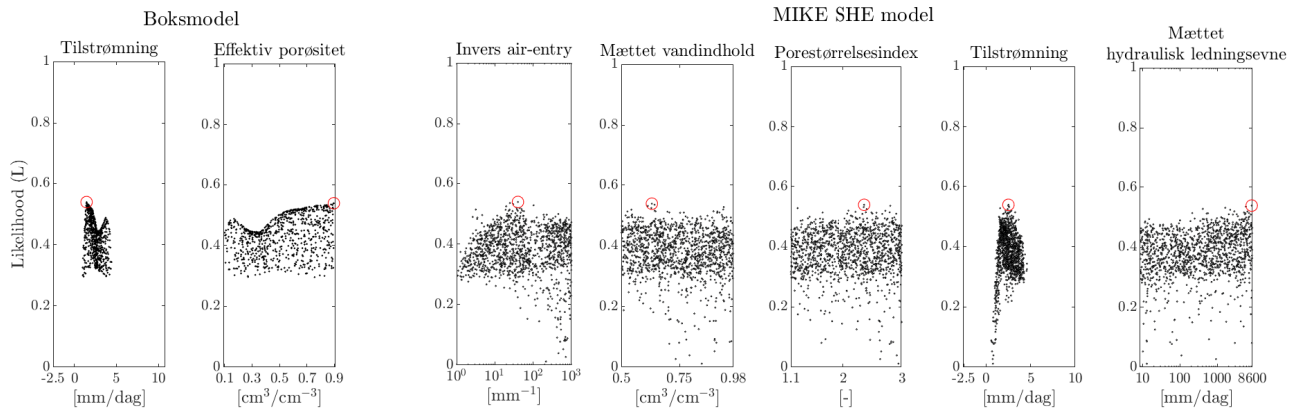
I dette kapitel præsenteres resultaterne af alle accepterede simuleringer beregnet med boksmodellen og MIKE SHE modellen. I første del af afsnittet præsenteres tilstrømning samt de andre parametre, der er bestemt med boks- og MIKE SHE modellen for de to udvalgte lokationer, Ansø og Tingvad 1. Parametrene, deres sensitivitet og afhængighed undersøges nærmere. I sidste del af kapitlet præsenteres tilstrømning samt de resterende parametre for alle undersøgte lokationer.

6.1 Undersøgelse af parameterkarakteristika for accepterede simuleringer for Ansø og Tingvad 1

Ved bestemmelse af vandstanden ved Ansø og Tingvad 1 med boks- og MIKE SHE modellen blev der samtidig bestemt hhv. to og fem forskellige parametre, hvoraf tilstrømningen er en af dem. De parametre der bestemmes med MIKE SHE modellen kan benyttes til bestemmelse af en retentionskurve for jorden. En retentionskurve beskriver sammenhængen mellem effekten af de kræfter, der tilbageholder vand i jorden og jordens vandindhold (Loll og Moldrup, 2000). En nærmere beskrivelse af retentionskurven, samt hvordan enkelte parametre påvirker kurvens forløb, kan ses i [appendiks E](#).

6.1.1 Ansø: Lokation med forventet høj udstrømning

En måde at præsentere resultaterne af parametrene på er ved dotted plots. Disse kan for Ansø ses på [figur 6.1](#). Det ses at der for tilstrømningen er et tydeligt optimum. Simuleringerne med de højeste likelihoods findes ved en høj effektiv porøsitet og en lav tilstrømning på omtrent $1,5 \text{ mm dag}^{-1}$ for boksmodellen. Simuleringerne med den højeste likelihood for MIKE SHE modellen har en større tilstrømning end boksmodellen med en tilstrømning på $2,5 \text{ mm dag}^{-1}$.

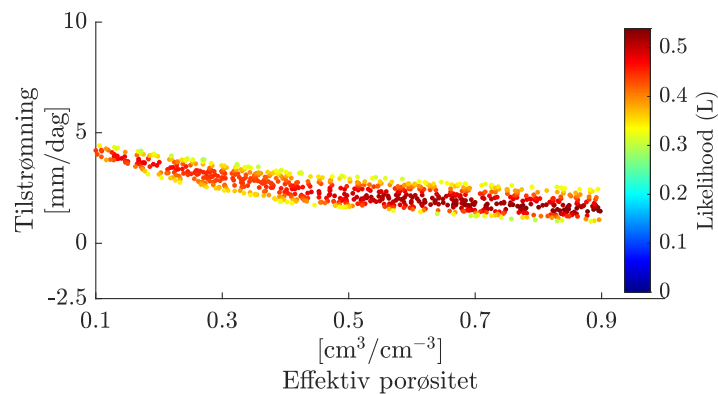


Figur 6.1. Dotty plots af accepterede simuleringer for Ansø. Rød cirkel angiver simuleringen med højest likelihood

For de øvrige parametre i MIKE SHE modellen er der ikke et tydeligt optimum, hvilket indikerer at forskellige kombinationer af de øvrige parametre kan give samme likelihood. Det kan betyde at nogle parametre enten ikke er styrende for forudsigelsen af vandspejlet eller at nogle parametre kan opveje hinanden, hvis den ene f.eks. er lav og den anden høj og vice versa. Der ses dog en tendens til at en høj invers air-entry kan give et lavt likelihood og at færre simuleringer accepteres ved en lav invers air-entry omkring $1-10 \text{ mm}^{-1}$.

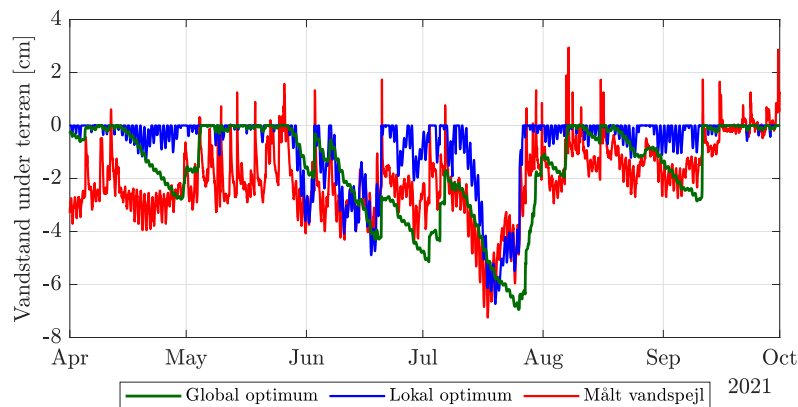
Christiaens og Feyen (2002) undersøgte også parametrene mættet vandindhold, porestrørrelsesindeks og mættet hydraulisk ledningsevne i deres undersøgelse af et vandløbsopland med MIKE SHE ved brug af GLUE. De fandt også, at der ikke var et tydeligt optimum for porestrørrelsesindeks, men fandt tilgængeligt at det mættede vandindhold og den mættede hydrauliske ledningsevne begge var mere sensitive parametre, hvor der ved nogle værdier blev forkastet mange simuleringer.

For boksmodellen ses der udover det globale optimum også et lokalt optimum for både tilstrømningen og effektiv porøsitet. En lav tilstrømning og høj porøsitet giver det globale optimum, og det omvendte giver det lokale optimum, hvilket også ses af figur 6.2.



Figur 6.2. Sammenligning mellem de to parametre i boksmodellen for Ansø. Farverne angiver hvilken likelihood kombinationen af de to parametre har fået

Simuleringen med den højeste likelihood fra hhv. det globale og lokale optimum er undersøgt nærmere. Dette kan ses i figur 6.3.

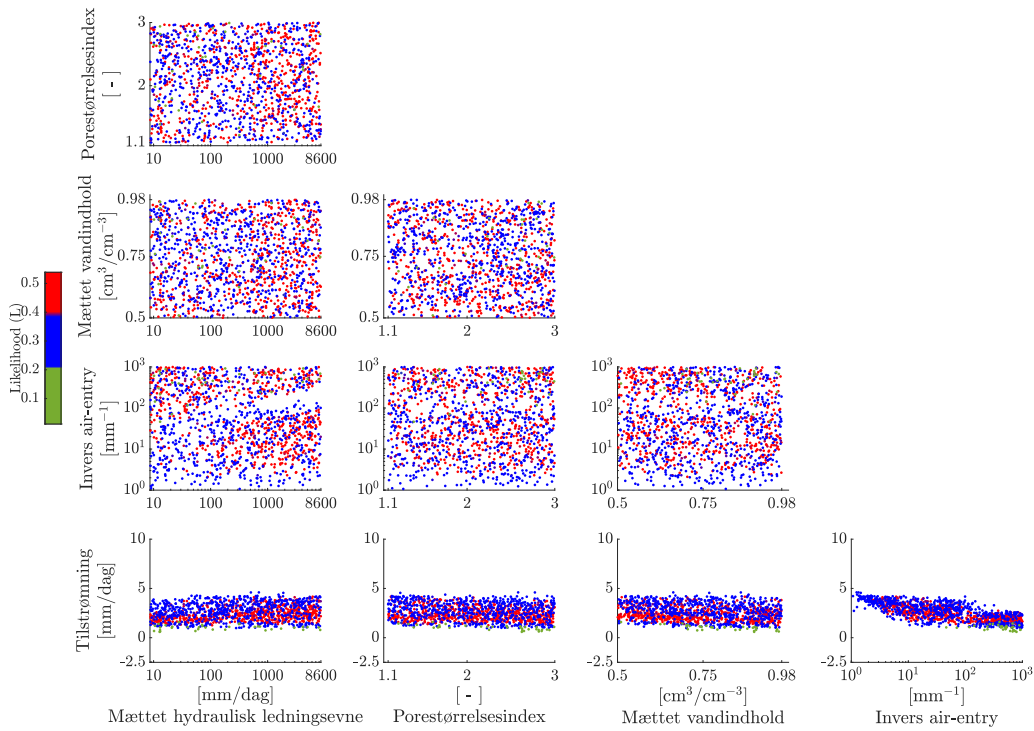


Figur 6.3. Vandstanden for den simulering med den højeste likelihood fra hhv. det globale og lokale optimum for Ansø for perioden 1/4-2021 til 30/9-2021

Det ses at der ved det globale optimum er et større fald i vandstanden og at vandstanden er mindre i størstedelen af perioden. Dette skyldes at en høj porøsitet kræver en større mængde nedbør for at vandstande kan stige til terræn. For det lokale optimum ses i stedet at vandstanden hurtigt stiger til terræn. Samtidig er der mange små fluktuationer i vandstanden som skyldes en lav porøsitet, hvor jorden hurtigt mister vand ved evapotranspiration og fyldes op ved nedbørshændelser.

Simuleringen med det globale optimum overestimerer vandspejlet i juli måned, hvorimod simuleringen med det lokale optimum underestimerer. Afstanden fra de to til det målte vandspejl er nogenlunde det samme, og eftersom kriterie 2 benytter den absolutte middelfejl, kan dette give samme resultat. Ydermere vil simuleringen med det lokale optimum opnå en højere likelihood ved at den er tættere på terræn, når der er vand på terræn ved Ansø, selvom simuleringen med det globale optimum passer bedre med det målte vandspejl i august til september.

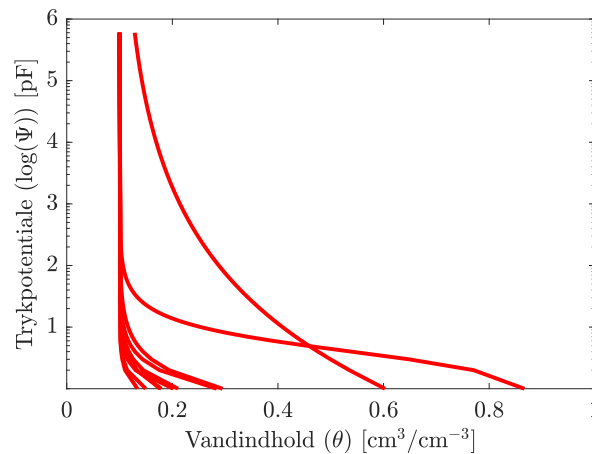
For MIKE SHE modellen er der også lavet en sammenligning mellem de undersøgte parametre for at undersøge hvorvidt der er sammenhæng mellem to parametre og deres korresponderende likelihood. Dette viser figur 6.4.



Figur 6.4. Sammenligning mellem de fem parametre i MIKE SHE modellen for Ansø. x-aksen aflæses ved de nederste plots, mens y-aksen aflæses yderst til venstre. Farverne angiver hvilken likelihood kombinationen af de to parametre har

Der ses ikke umiddelbart nogle tydelige sammenhænge mellem parametrene undtagen for tilstrømning og invers air-entry. De største likelihood for tilstrømningen findes generelt i midten af intervallet for de accepterede simuleringer. Der ses en sammenhæng mellem mættet hydraulisk ledningsevne og invers air-entry, da der er et område i udfaldsrummet hvor ingen kombinationer er accepteret. Dette er når invers air-entry er omkring 100 mm^{-1} . Ligeledes ses der en svag tendens ved samme air-entry værdi, hvor færre simuleringer accepteres, når der sammenlignes med porestørrelsesindex og mættet vandindhold. Dette skyldes at ved en høj invers air-entry bliver kurven for den hydrauliske ledningsevne stejl, og den hydrauliske ledningsevne bliver lav. Det er dog usikkert, da det ses at en invers air-entry op mod 1000 mm dag^{-1} stadig accepteres.

Invers air-entry er betydende for hvor hurtigt jorden drænes. En høj invers air-entry medfører at jorden ikke holder særlig godt på vandet, da et lille tryk (sugning) bevirker at vandindholdet falder. Dette kan også ses af retentionskurverne for jorden. Retentionskurver for de 10 simuleringer med den højeste likelihood er fundet jf. figur 6.5.



Figur 6.5. Retentionskurve for de 10 simuleringer med størst likelihood for Ansø med MIKE SHE modellen

Det mættede vandindhold for de 10 simuleringer med højest likelihood fordeler sig mellem $0,5 - 0,95 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (ses ikke af figur), men vandindholdet falder drastisk til $0,1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ for de fleste af kurverne, når jorden påvirkes af et trykpotentiale fordi invers air-entry er høj. Ud fra disse retentionskurver betyder det, at jorden for Ansø ikke er god til at holde på dens vandindhold.

Word et al. (2022) undersøgte de øvre og nedre lag i en tørvejord i et drænet vådområde i Virginia, USA og fandt at jordens evne til at tilbageholde vand var lavere i de øvre lag end de nedre. Dette skyldes en højere makroporøsitet. Selvom jordens tilbageholdelsesevne var lavere i det øvre jordlag, fandt de at både retentionskurven for det øvre og nedre jordlag havde en lav air-entry værdi, hvilket de fleste af retentionskurverne i figur 6.5 har.

For en af kurverne på figur 6.5 ses der et langsomt fald i vandholdet, der falder til $0,2 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ men har et relativt lille mættet vandindhold for en tørvjord. Retentionskurven længste til højre har et højt mættet vandindhold, men dens markkapacitet (pF 2) er lig det residue vandindhold.

Denne retentionskurve stemmer i nogen grad overens med de retentionskurver som Gnatowski et al. (2010) fandt i deres studie af tørvejorde i Polen. Her undersøgte de 87 jordprøver der repræsenterede tre typer tørv - en mostørv med en fibrøs struktur, en urteagtig tørv og en træørv med amorf struktur med højt humusindhold. De fandt at det gennemsnitlige mættede vandindhold er $0,9 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ og at det mættede vandindhold er højere for de områder hvor mostørv er dominerende.

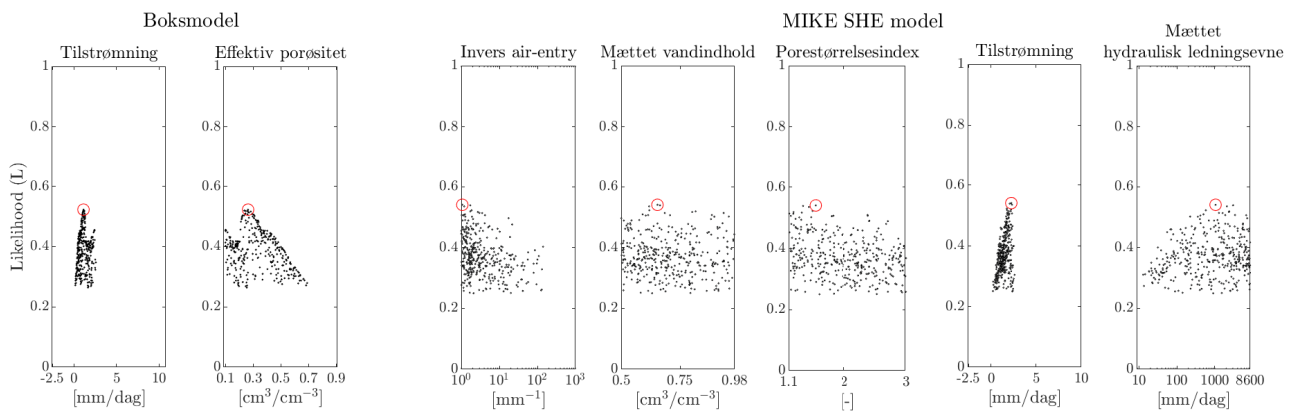
I overvægten af de retentionskurver som Gnatowski et al. (2010) bestemmer, er air-entry på ca. 30 cm (invers air-entry = $0,3 \text{ mm}^{-1}$) mens en retentionskurve havde en air-entry på 0,5 cm (invers air-entry = 20 mm^{-1}). For retentionskurverne for Ansø er den laveste invers air-entry 3 mm^{-1} , hvilket er kurven til højre, jf figur 6.5. De fleste af de øvrige inverse air-entry for Ansø er mellem $25-50 \text{ mm}^{-1}$ og vil således generelt være dårligere til at holde på vandet end de jorde der er fundet i Gnatowski et al. (2010). Der er således få overensstemmelser mellem de fundne retentionskurver for Ansø og dem fra studiet. Det er

dog værd at bemærke, at der er stor forskel på de ti simuleringer med størst likelihood.

6.1.2 Tingvad 1: Lokation med forventet lav udstrømning

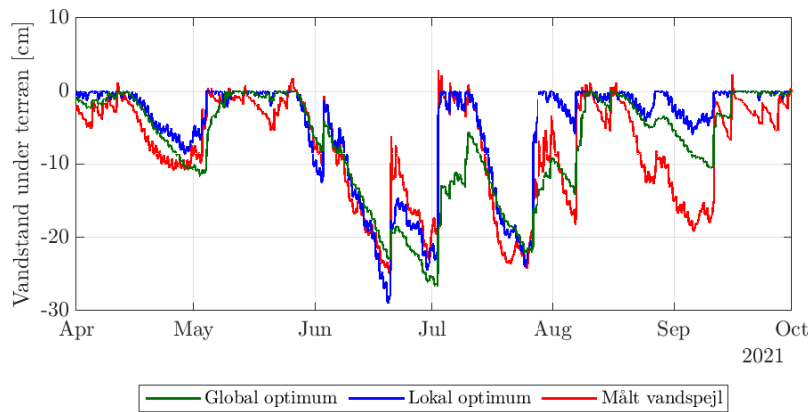
Dotty plots for accepterede simuleringer for Tingvad 1 viser at tilstrømningen har et optimum ved en likelihood på omkring 0,5, jf. figur 6.6. Boksmodellen har ved denne likelihood en tilstrømning på $1,1 \text{ mm dag}^{-1}$, mens MIKE SHE modellen har en tilstrømning på 2 mm dag^{-1} . Det betyder derfor, at begge modellerne bestemmer en lavere tilstrømning ved Tingvad 1 end ved Ansø, jf. tabel 6.1. Forventningen om at der var en højere tilstrømning ved Ansø, stemmer derfor overens med hvad modellerne finder.

Det skal bemærkes, at fordi simuleringerne for Tingvad 1 accepteres med kriterie 1 og kriterie 3 som hhv. skal være $>0,4$ og $>0,6$, vil den laveste samlede likelihood være 0,24.



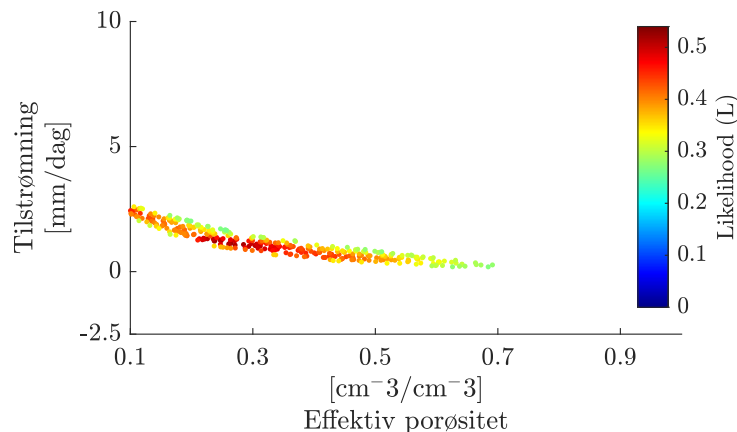
Figur 6.6. Dotty plots af accepterede simuleringer for Tingvad 1. Rød cirkel angiver simuleringen med højest likelihood

Som for Ansø ses der for boksmodellen ved Tingvad 1 både et globalt og lokalt optimum. Ydermere ses det at likelihood bliver lavere jo større den effektive porøsitet er, jf. figur 6.8. Simuleringerne med de højeste likelihood for det globale og lokale optimum er undersøgt nærmere i figur 6.7.



Figur 6.7. Vandstanden for den simulering med den højeste likelihood fra hhv. det globale og lokale maksimum for Tingvad 1 for perioden 1/5-2021 til 30/9-2021

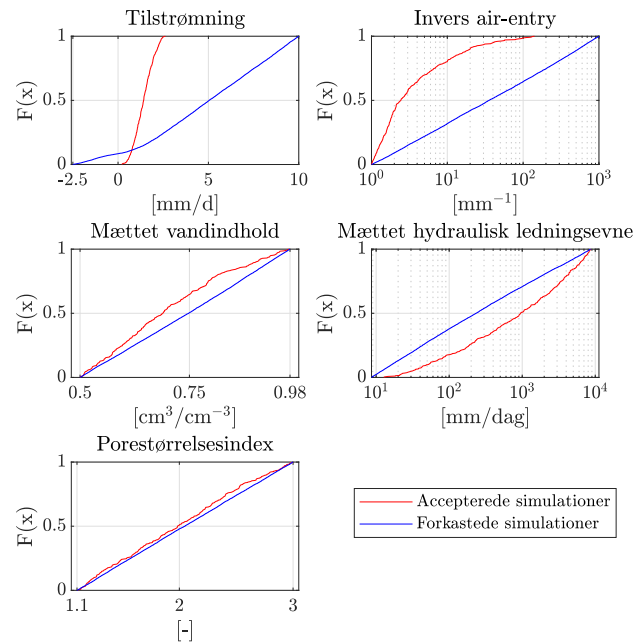
Det ses at vandstanden for det globale og lokale optimum i størstedelen af tiden er nogenlunde ens, men at vandstanden for det lokale optimum oftere stiger til terræn på grund af den højere tilstrømning og lavere porøsitet. De opnår begge lignende likelihood, da simuleringen med det globale optimum passer dårligere i juli, men bedre i september end simuleringen med det lokale optimum, og således kan de opveje hinanden.



Figur 6.8. Sammenligning mellem de to parametre i boksmodellen for Tingvad 1. Farverne angiver hvilken likelihood kombinationen af de to parametre har fået

For MIKE SHE modellen er der, jf. figur 6.6, ikke et specifikt optimum for alle undersøgte parametre, men for tilstrømningen er der. Ydermere ses det at invers air-entry for at størstedelen af de accepterede simuleringer er lav. Den mættede hydrauliske ledningsevne har flest accepterede simuleringer, og en højere likelihood, når den er høj. Det ses altså, at det har betydning for modellen at nogle af parametrene ligger inde for et bestemt interval. Sensitiviteten af parametrene er derfor undersøgt ved at bestemme en akkumuleret fordelingskurve for hhv. de accepterede og afviste simuleringer. Hældningen og forskellen mellem de kumulerede fordelingskurver indikerer sensitiviteten. En stor

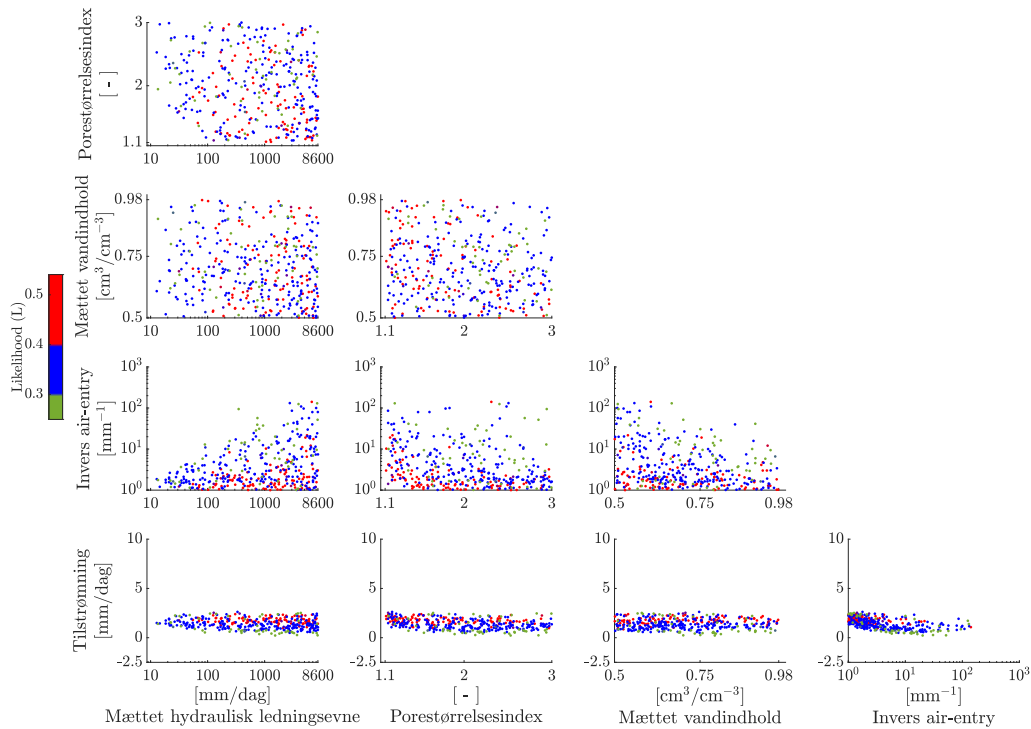
hældning betyder at nogle værdier indenfor parameterintervallet har en bedre performance og at de accepteres.



Figur 6.9. Sensitivitetsplot for accepterede og afviste simuleringer for Tingvad 1 for de fem parametre undersøgt med MIKE SHE modellen

Sensitivitetsplottene viser at flere af parametrene i højere eller mindre grad er sensitive. Særligt tilstrømningen, hvor der også er et tydeligt optimum i dotted plottet, har en høj sensitivitet. Mættet vandindhold viste ikke en klar fordeling i dotted plottet, men det ses at denne parameter er sensitiv, og at nogle af dens værdier derfor har en bedre performance. Den eneste parameter, der er forholdsvis ikke-sensitiv er porestørrelsesindeks. Det er kun for tilstrømningen, at der ses et område, hvor der forkastes færre simuleringer. For de andre parametre ses en lineær stigning i forkastede simuleringer, hvilket indikerer, at der ikke forkastes færre parametre i nogle intervaller end andre.

De accepterede simuleringers parameterfordeling kan skyldes, at de i sammenhæng med de andre parametre begrænses til et bestemt interval. Det er derfor undersøgt om der er en sammenhæng mellem parametrene for MIKE SHE modellen jf. figur 6.10.

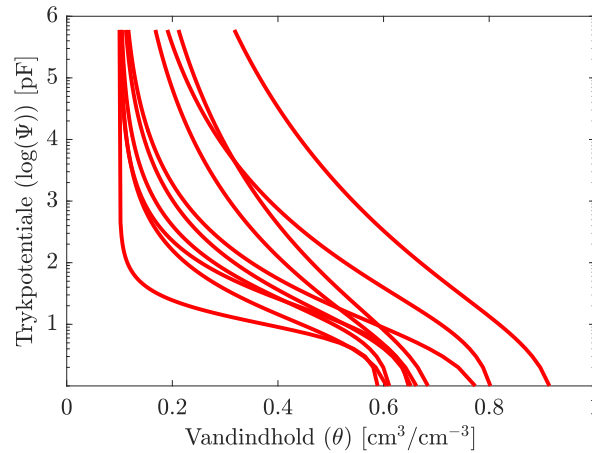


Figur 6.10. Sammenligning mellem de fem parametre i MIKE SHE modellen for Tingvad 1. x-aksen aflæses ved de nederste plots, mens y-aksen aflæses yderst til venstre. Farverne angiver hvilken likelihood kombinationen af de to parametre har fået

Ved sammenligningen af de fem parametre fra MIKE SHE modellen ses ingen tydelig sammenhæng mellem mættet hydraulisk ledningsevne og hhv. porestørrelsesindeks og mættet vandindhold. Dog ses det at mættet hydraulisk ledningsevne har flere accepterede simuleringer i den høje del af dens interval. De to parametre, invers air-entry og mættet hydraulisk ledningsevne, viser en afhængighed. Jo højere den mættede hydrauliske ledningsevne bliver, jo højere kan den inverse air-entry blive, men ved en høj invers air-entry bliver likelihood lavere. Både den mættede hydrauliske ledningsevne og invers air-entry er parametre, der er bestemmende for den hydrauliske ledningsevne i jorden, jf. [ligning 3.4](#). Hvis den mættede hydrauliske ledningsevne er høj og den inverse-air entry er lav vil kurven for den hydrauliske ledningsevne blive mere flad og den hydrauliske ledningsevne vil relativt langsomt falde med faldende vandindhold.

For invers air-entry og porestørrelsesindeks ses det, at ved et lavt porestørrelsesindeks tillades en højere værdi af invers air-entry, men at når porestørrelsesindex stiger bliver likelihood og antallet af accepterede simuleringer mindre. For den inverse air-entry og det mættede vandindhold ses samme tendens i mindre grad med en højere invers air-entry ved et lavt mættet vandindhold. Dette viser at forskellige kombinationer af parametrene giver simuleringer med en højere likelihood. Nogle af parametrene relateres til hinanden ved retentionskurven for jorden. Eftersom de fleste simuleringer med en høj likelihood har en

lav invers air-entry, indikerer dette at jorden holder meget på vandet. Retentionskurverne for de 10 simuleringer med højest likelihood er også fundet for Tingvad 1, jf. figur 6.11.



Figur 6.11. Retentionskurverne for de 10 simuleringer med størst likelihood for Tingvad 1 med MIKE SHE modellen

Gnatowski et al. (2010) fandt for 87 forskellige tørvejerde et gennemsnitligt mættet vandindhold på $0,91 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ og residualt vandindhold på $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, hvilket giver et aktivt poreområde på $0,73 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Det ses at poreområdet for alle retentionskurverne for Tingvad 1 er mindre og maksimalt $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. jf. figur 6.11.

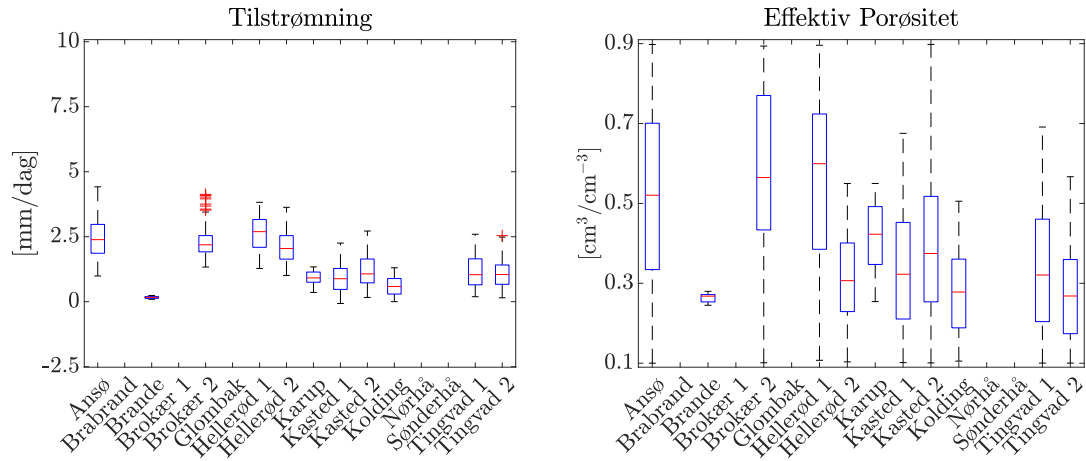
Wallor et al. (2018) fandt i deres studie af dræned og dyrkede tørvejerde, at det mættede vandindhold er mellem $0,68$ og $0,90 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, mens vandindholdet ved pF 4,2, som de antager er svarende til det residuale vandindhold, er mellem $0,10$ og $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Dette beskriver også de fleste af retentionskurverne for Tingvad 1. Det skal bemærkes at for alle ti retentionskurver er det gældende at det aktive poreområde er nogleleunde lige stort, hvilket kan indikerer at det er et poreområde på $0,5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ som er styrende for om en simulering kan beskrive målte vandstande. Der vil således accepteres parametre der giver en sammensætning, hvor dette aktive poreområde er gældende.

6.2 Bestemmelse af tilstrømning og øvrige parametre for alle undersøgte lokationer

Boksmodellen og MIKE SHE modellen er hhv. benyttet på 16 og fem lokationer, hvorfor ikke den samme detaljerede gennemgang af hver lokation, som for Ansø og Tingvad 1, er præsenteret. I stedet gives et overblik hvor de undersøgte parametre fra hver model præsenteres. Alle vandstandstidsserier og tilhørende konfidensinterval for accepterede simuleringer kan ses i figur C.1 i appendiks C.

6.2.1 Parameterbestemmelser for boksmodellen

Fordelingen af de to parametre der er undersøgt med boksmodellen for de 16 lokationer er vist på figur 6.12.



Figur 6.12. Tilstrømning og effektiv porøsitet for de 16 undersøgte lokationer med boksmodellen. Manglende boksplots indikerer at ingen simuleringer er accepteret. Røde kryds er outliers

For boksmodellen er der fem af de undersøgte lokationer, hvor der ikke kan accepteres nogle simuleringer på baggrund af de tre acceptkriterier. For lokation 2, Brabrand, er vandspejlet lavt om sommeren, og stiger først til terræn midt vinter. Denne sæsonmæssige forsinkelse kan skyldes, at tilstrømningen er sæsonbetinget, og er lavere om efteråret pga. en lavere grundvandsdannelse i løbet af foråret og sommeren. Dette medfører at boksmodellen ikke er i stand til at forudsige vandspejlet, da modellens input er nedbør, fordampning og en konstant grundvandstilstrømning.

For at kunne simulere vandstande ved lokationer, hvor der sandsynligvis er en sæsonbetinget tilstrømning, kan det være nødvendigt at ændre modelstrukturen for modellerne.

Lokation 4, Brønde 1, har heller ingen accepterede simuleringer med boksmodellen. Denne lokations vandspejl har ikke store fald i vandstanden, men har mange små fluktuationer. For lokation 6, Glønbak, falder vandstanden meget i løbet af sommeren samtidig med at der i denne periode er store fluktuationer, hvor vandstanden kan stige til terræn på kort tid. Boksmodellen kan ikke forudsige denne dynamik og derfor er der ingen accepterede simuleringer for denne lokation. Det samme er gældende for Nørhå og særligt Sønderhå har også store fluktuationer i vandspejlet.

Det ses af figur 6.12 at for de lokationer, hvor det har været muligt at bestemme tilstrømningen, ligger næsten alle accepterede tilstrømninger over nul og det vurderes derfor at alle lokationerne modtager en tilførsel af grundvand. Dog har Kasted 1 to accepterede simuleringer hvor tilstrømningen er negativ ($-0,07 \text{ mm dag}^{-1}$). Tallet er dog så lille, at det i praksis svarer til at der ingen udveksling er mellem grundvandet og naturområdet for de to simuleringer.

Tilførslen for alle lokationer ligger mellem 0 mm dag^{-1} og $4,4 \text{ mm dag}^{-1}$, hvor Brande har den laveste median tilstrømning og færrest accepterede simuleringer. Vandstanden for Brande har store udsving med dyk ned til 50 cm i sommeren 2021, jf. figur C.1 i appendiks C. Den lave tilstrømning er medvirkende til at disse dyk opleves, da høj evapotranspiration i sommeren fordamper mere vand end hvad tilstrømningen kan levere. Det skal dog bemærkes, at der for Brande kun er fem accepterede simuleringer, hvorved denne bestemmelse bygger på at begrænset grundlag.

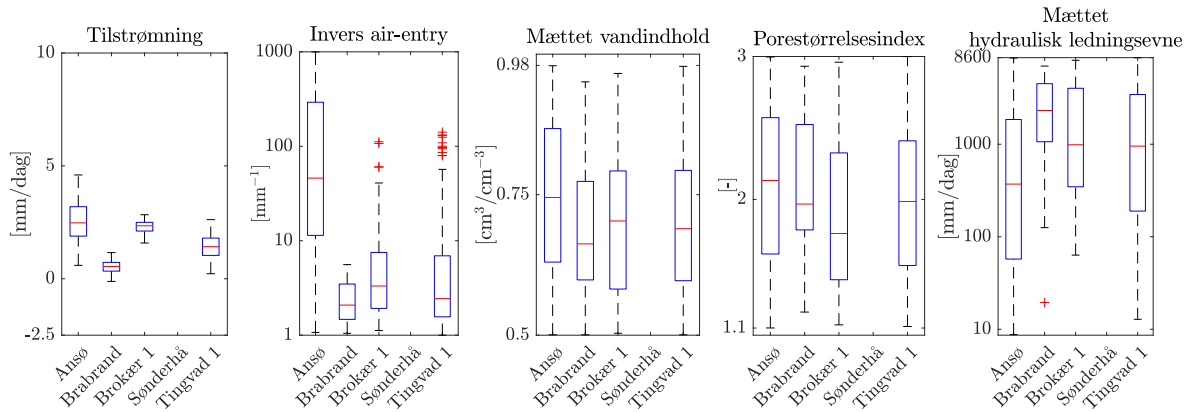
Lokationen med den højeste mediantilstrømning er Hellerød 1 hvorefter Ansø har næsthøjest. Både Ansø og Hellerød 1 har en stabil vandstand gennem året med udsving på under 10 cm i sommerperioden, jf. figur C.1 i appendiks C. Dette understreger at en høj tilstrømning er vigtig ift. opretholdelse af en stabil vandstand. Det ses også, at lokationer med en høj tilstrømning ofte har en høj effektiv porøsitet, men også et bredere interval af mulige effektive porøsiteter. Det skyldes, at der i boksmodellen tillades en stor grundvandsudstrømning, hvor alt overskydende vand fjernes fra terræn.

Ved lokationer med et konstant vandspejl tæt ved terræn og kun små fald i vandstanden, kan det betyde, at simuleringer kan accepteres på kriterie 2 og tilstrømningen derfor overestimeres. Det er vigtigt at kriterie 3 er med, da det sikrer at simuleringer, hvor der er en stor tilstrømning og konstant vandstand ved terræn, skæres fra.

For nogle af de lokationer, der ligger i samme område, f.eks. Hellerød 1 og 2 og Kasted 1 og 2, ses der en forskel i den tilstrømning, der bestemmes. Dette indikerer at der inden for korte afstande kan være forskelle i grundvandsudstrømningen. Som det blev præsenteret i kapitel 2, er der flere forskellige grunde til at dette kan observeres. Det kan f.eks. skyldes at der for lokationerne er forskellige kontakttyper, der bestemmer hvor meget grundvand der kan udstrømme eller strømningstypen er forskellig mellem lokationerne. Det kan være relevant at undersøge flere målestationer indenfor samme naturområde for at undersøge om tilstrømningen varierer, eller om modellerne er sensitive overfor små ændringer i et vandspejl, og således estimerer forskellige tilstrømninger for samme område.

6.2.2 Parameterbestemmelser for MIKE SHE model

Fordelingen af parametrene fra MIKE SHE modellen for de fem undersøgte lokationer er vist på figur 6.13.



Figur 6.13. Tilstrømning, invers air-entry, mættet vandindhold, porestørrelsesindex og mættet hydraulisk ledningsevne for de fem undersøgte lokationer med MIKE SHE modellen. Manglende boksplots indikerer at ingen simuleringer er accepteret. Røde kryds er outliers

For lokationen Sønderhå kan MIKE SHE modellen ikke forudsige et vandspejl, ligesom det heller ikke var muligt for boksmodellen. Med MIKE SHE modellen var det tilgængeligt muligt at bestemme vandspejlet for både Brabrand og Brækær 1, hvilket ikke var muligt med boksmodellen. Dette skyldes formentlig, at MIKE SHE modellen er mere detaljeret i udregningen af vandindholdet samt evapotranspiration, og derved kan bestemme de fluktuationer i vandspejlet som boksmodellen ikke er i stand til.

Det ses af figur 6.13 at accepterede tilstrømninger næsten altid ligger over nul og at alle lokationerne formentlig modtager en tilførsel af grundvand. For Brabrand er der to simuleringer med en negativ tilstrømning ($-0,12 \text{ mm dag}^{-1}$), der accepteres. Tilførslen ligger mellem $-0,12 \text{ mm dag}^{-1}$ og $4,6 \text{ mm dag}^{-1}$ for alle lokaliteter.

Det ses, at den højeste tilstrømning også har den højeste inverse air-entry, mættet vandindhold og porestørrelsesindex. Dette skyldes at der f.eks. ved højere værdier af det mættede vandindhold tillades et højere vandindhold i jorden og en højere tilstrømning kan derfor også tillades. Generelt ses det, at mange af parameterintervallerne er forholdsvis brede, hvilket formentlig skyldes, at der med fem parametre er mange forskellige kombinationer.

I tabel 6.1 vises tilstrømningerne med højest likelihood. For enkelte lokationer er dog også et lokalt optimum hvilket også vises. Det ses at Hellerød 1 og 2 har de højeste tilstrømninger og Brande har den laveste. Ydermere ses det at for lokationer med to optima er der relativ stor forskel mellem tilstrømningen, der kan være op mod dobbelt så stor. Det ses også at MIKE SHE modellen forudsiger tilstrømninger der ligger i mellem de to optima for Ansø og Tingvad. Det er værd at benævne, at når der eksisterer flere optima øger det usikkerheden for modellen, men at det ikke altid forekommer for boksmodellen. Det vurderes at der ikke er lavet nok undersøgelser med MIKE SHE modellen til at kunne

estimere om samme fænomen vil kunne ske for den.

Table 6.1. Tilstrømninger med højest likelihood (globalt optimum) og for lokalt optimum, såfremt det forekommer, for alle lokaliteter med accepterede simuleringer

Lokation	Tilstrømning for boksmode		Tilstrømning for MIKE SHE model
	Global optimum [mm dag ⁻¹]	Lokal optimum [mm dag ⁻¹]	Global optimum [mm dag ⁻¹]
Ansø	1,5	3,8	2,5
Brabrand			0,8
Brande	0,2*		
Brokær 1			2,3
Brokær 2	1,8		
Glombak			
Hellerød 1	2,5		
Hellerød 2	3,2		
Karup	0,9		
Kasted 1	1,1		
Kasted 2	1,1		
Kolding	0,9		
Nørhå			
Sønderhå			
Tingvad 1	1,1	2,4	2,0
Tingvad 2	1,1	2,0	

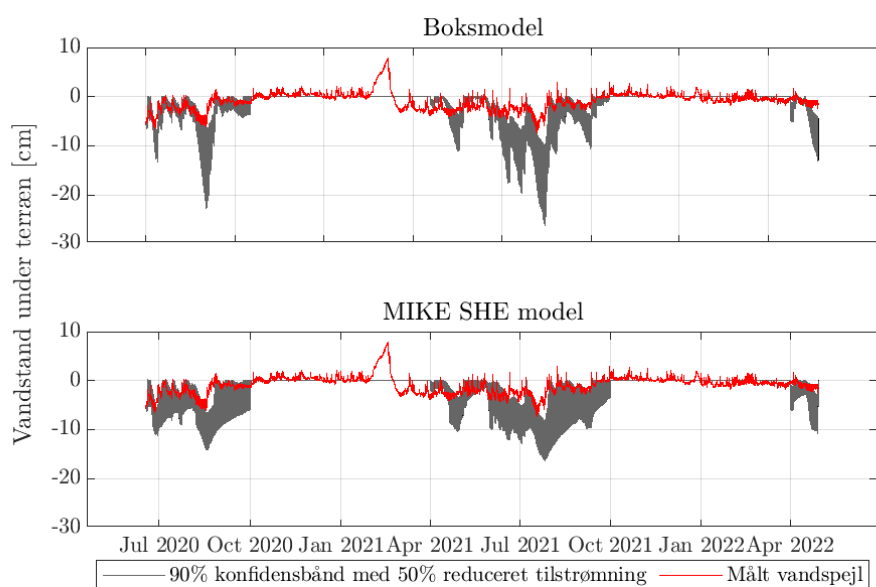
*Baseret på 5 simuleringer

Reduktion af grundvandsudstrømning til grundvandsafhængige naturtyper

Det er undersøgt, hvordan vandstanden for Ansø og Tingvad 1 vil påvirkes, hvis der sker en reduktion af tilstrømningen. Reduktionen kan skyldes vandindvinding af området. Reduktionen er beregnet ved at benytte parametersættene for alle accepterede simuleringer til at beregne en ny vandstand, men med en reduktion i tilstrømning på enten 25 %, 50 %, 75 % og 100 %. Det 90 % vægtede konfidensinterval er vist, hvor de tildelte likelihoods fra de oprindelige simuleringer er benyttet, således at simuleringer der før havde en god overensstemmelse med observeret vandstand stadig vægter mest. Det antages således at tilstrømningen er uafhængig af de øvrige parametre. Resultaterne i det følgende afsnit viser reduktionen af tilstrømningen på 50 % mens de øvrige reduktioner kan ses i [appendiks D](#). Enkelte simuleringer i MIKE SHE modellen bliver ustabile og kan ikke beregnes når tilstrømningen kraftigt reduceres.

7.1 Ansø: Lokation med forventet høj udstrømning

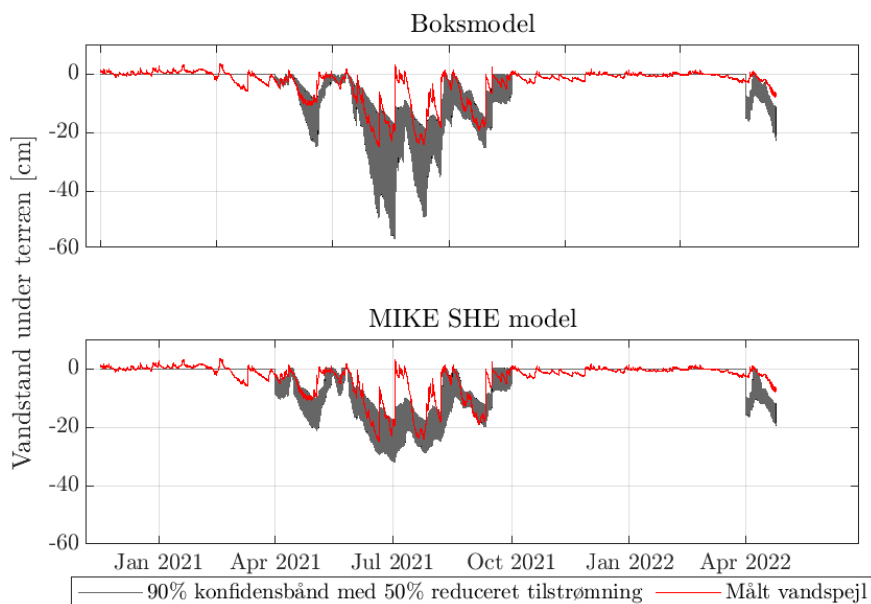
Det ses, at boksmodellen og MIKE SHE modellen bestemmer den reducerede vandstand for Ansø forskelligt, hvor det ses, at boksmodellen bestemmer en vandstand ned til 25 cm, mens MIKE SHE modellen bestemmer en vandstand ned til 15 cm.



Figur 7.1. Vandstanden for Ansø med reduktioner på 50 % i tilstrømningen bestemt med boksmodellen og MIKE SHE modellen

7.2 Tingvad 1: Lokation med forventet lav udstrømning

For Tingvad 1 ses det igen at boksmodellen bestemmer en lavere vandstand end MIKE SHE modellen ned til 60 cm, mens MIKE SHE modellen bestemmer en vandstand ned til 30 cm.



Figur 7.2. Vandstanden for Tingvad 1 med reduktioner på 50 % i tilstrømningen bestemt med boksmodellen og MIKE SHE modellen

Særligt vandstanden ved Tingvad 1, der i forvejen er lav i sommermånederne får et endnu lavere vandspejl, når der sker en reduktion i tilstrømningen. Det kan diskuteres om det grundvandsafhængige naturområde ved Ansø vil være mindre påvirket ved reduceringen af grundvandsudstrømningen end Tingvad 1 vil være. Ilomets et al. (2010) fandt at antallet og dækket af arter i et kalkrigt kær faldt betydeligt, når det sæsonmæssige vandspejl faldt ned til 25 cm. Det kan dermed betyde at for Tingvad 1, og Ansø iflg. boksmodellen, har en reduktion på 50 % i tilstrømningen stor betydning for antallet af arter.

For begge lokationer ses det at boksmodellen har en større variation i vandstandene ved en 50 % reduktion. Det skyldes at boksmodellen har to optima af tilstrømning, hvorved en høj tilstrømning giver højere vandstande, og små tilstrømninger forårsager lave vandstande. Dette 'strækker' konfidensintervallet for modellen da begge typer af tilstrømning vægter højt. Det ses f.eks. at boksmodellen for Tingvad 1 ved en 50 % reduktion i tilstrømningen bestemmer vandstande der varierer mellem 20 cm og 50 cm ved de mest kritiske tidspunkter. I følge undersøgelsen af Ilomets et al. (2010) vil der ved bestemmelsen af vandstanden på 20 cm ikke være en påvirkning af de grundvandsafhængige arter, mens der ved vandstanden på 50 cm vil kunne opleves en fald i dækket og antallet af arter. Usikkerheden for vandstandsbestemmelserne med boksmodellen vil derfor have stor betydning for hvordan påvirkningen af dette område bedømmes.

I appendiks D vises yderligere reduktioner i tilstrømningen. Her ses det, at vandstanden kan falde ned til en meter for begge lokationer med boksmodellen og ned til 30 cm og 50 cm for hhv. Ansø og Tingvad 1 med MIKE SHE modellen ved et ophør af grundvandsudstrømning. Hvis tilstrømningen for Ansø reduceres med 75 % i MIKE SHE modellen, falder de laveste vandstande til hvad der korresponderer med vandstandene ved Tingvad 1 uden en reduktion. Hvis lave vandstande er den eneste styrende parametre for naturkvalitet, indikerer det, at Ansø med en 75 % reduktion i tilstrømningen, vil have samme naturkvalitet som Tingvad 1 har uden en reduceret tilstrømning.

Udover den direkte indflydelse på vegetationen vil en vandstand tæt på terræn med vandmættede forhold også modvirke at der sker en iltning af organisk materiale i jorden. Iltningen kan lede til forsuring og mineralisering af næringsstoffer i jorden. Disse ændrede forhold vil kunne betyde at mere konkurrencedygtige arter kan kolonisere og derved ændre artsammensætningen i et område. Et fald i vandstanden vil betyde at topjorden periodevist kan fyldes med nedbør, der også kan øge risikoen for forsuring og øget mineralisering af næringsstoffer (Hájek et al., 2006; van Diggelen et al., 2006). Tilstrømning af vand med et højt indhold af baseioner medfører en høj bufferkapacitet i sedimenter og porevand, der forhindrer forsuring og tilgængeligheden af fosfor (Johansen et al., 2016).

Det kan diskuteres hvorvidt vandstanden er den vigtigste parameter for bestemmelse af naturkvaliteten. Schaffers og Sýkora (2000) fandt en større korrelation mellem vandindholdet i jorden og vegetationen end mellem dybden af vandspejlet og vegetationen for et bredt interval af plantesamfund fra tørre til våde jorde. Det kapillære vandspejl vil have en påvirkning på dette. Price og Whitehead (2004) bestemte et kapillært vandspejl på op til 26 cm fra vandspejlet for en tørvejord. Denne bestemmelse kan indikere at lave vandstande formentlig vil være mindre kritiske når den kapillære stighøjde tages i betragtning.

Vandspejlet er dog en nemmere og mere robust parameter at bestemme, hvorfor det er denne der er fokuseret på i dette projekt.

Johansen et al. (2016) undersøgte sammenhængen mellem vegetationen og vandstanden i 35 vådområder i Danmark. De fandt et signifikant forhold mellem vandstand og antallet af typiske grundvandsafhængige arter, og at artsrigdommen falder med stigende årlige udsving i vandstanden. I deres studie opsatte de modeller til beskrivelse af sammenhængen mellem vandstandsparametre og vegetationsparametre. Modellerne kan bestemme ændringer i artsrigdom ved ændringer i vandstandsforhold og kan derved benyttes som værktøj til at vurdere naturkvaliteten samt bestemme om vandstanden er begrænsende for artsdiversiteten.

Vandstandene bestemt med boks- og MIKE SHE modellen kan benyttes som input til modellerne fra Johansen et al. (2016), hvorved det kan bestemmes om vandstanden, med en reduktion i tilstrømningen, er begrænsende for artsdiversiteten i et område. På denne måde kan modellerne i dette projekt sammen med modellerne fundet af Johansen et al. (2016) kombineres, hvorved der vil være et langt større datagrundlag til vurdering af påvirkningen på de grundvandsafhængige naturtyper.

Johansen et al. (2016) fandt dog at næringstofkoncentrationen også har indflydelse på artsrigdommen. Særligt ved store fald i vandstanden vil næringstoftilgængeligheden ændres betydeligt på grund af en intern eutrofiering. Derfor er en ratio af næringsstoffer også inkluderet i deres modeller. Det kan betyde at det også vil være nødvendigt at bestemme næringstofkoncentrationen for de grundvandsafhængige områder for at kunne relatere dette til en naturkvalitet med modellerne af Johansen et al. (2016).

Vurdering af anvendelsesmuligheder for modellerne

Der blev i projektet opstillet to forskellige modeller for at undersøge hvor komplekse modeller der behøves for at kunne beregne tilstrømningen til grundvandsafhængige naturområder. Både boks- og MIKE SHE modellen kan med rimelighed simulere målte vandstande for Ansø, Tingvad 1 og de fleste øvrige lokationer.

Det ses at MIKE SHE modellen kan forudsige vandstanden ved to lokationer som boksmodellen ikke er i stand til. Det kan derfor indikere at MIKE SHE modellen er bedre egnet til at simulere vandstandstidsserier generelt for grundvandsafhængige naturområder. Det vil dog kræve at det blev testet på flere lokationer for at kunne siges med sikkerhed. For lokationer hvor der ikke kan forudsiges en vandstand, vil andre eller mindre restriktive acceptkriterier skulle benyttes. Det skal dog altid opvejes mod kvaliteten og usikkerheden af modelbestemmelserne.

Boksmodellen for både Ansø og Tingvad 1 har to optima af tilstrømninger, hvor optimum for MIKE SHE modellen ligger mellem det lokale og globale optimum for boksmodellen. Selvom det ene optimum har en højere likelihood end det andet for boksmodellen, er det med til at gøre bestemmelsen for tilstrømningen usikker, hvilket tydeliggøres når tilstrømningen reduceres for boksmodellen. Her bliver konfidensintervallet meget stort. Det vil derfor være en fordel at benytte MIKE SHE modellen da den har et tydeligt optimum. Det har dog ikke været muligt at verificere de to modeller med en vandstandstidsserie hvor tilstrømningen kendes og efter en kendt reduktion, hvorfor det ikke vides hvad den præcise vandstandsændring vil være, og hvilken model der er bedst egnet.

MIKE SHE modellen er fordelagtig ift. boksmodellen, da den kan beskrive flere karakteristika for de pågældende grundvandsafhængige naturområder. Det blev fundet, at de retentionskurver modellen bestemmer, i høj grad afspejler tørvejord fra andre studier, hvilket bevirker at MIKE SHE modellen også kan benyttes til beskrivelse af det virkelige system. På trods af usikkerheder ved modellerne, vurderes det dog alligevel at der er anvendelsespotentiale for begge modeller, og at de kan anvendes som et værktøj til at bestemme grundvandsudstrømningen, og en ændring i vandspejlet ved en reducere af udstrømningen.

Hovedformålet med dette projekt har været at opstille to modeller, der kan bestemme grundvandsudstrømningen til grundvandsafhængige naturtyper. De to modeller benyttes til at forudsige hvordan en reduktion i grundvandsudstrømningen f.eks. ved vandindvining påvirker vandspejlet. Dette motiveres af at tilladelser til vandindvinding kræver, at det uden rimelig tvivl kan dokumenteres, at der ikke vil forekomme negative påvirkninger på beskyttede områder såsom grundvandsafhængige naturtyper. Det er ofte vanskeligt, da der generelt mangler robuste metoder til at kvantificere en direkte sammenhæng mellem en reduktion af grundvandsudstrømningen og naturkvaliteten. De to opstillede modeller agerer som mellem-værktøj, der kan estimere hvor stor grundvandsudstrømningen er, og hvordan en reduktion påvirker vandspejlet.

I begge modeller laves stokastisk modellering, hvor grundvandsudstrømningen og andre modelparametre, der beskriver jordens karakteristik, indgår i bestemmelsen af en vandstandstidsserie. Ved anvendelse af GLUE-metodologien udviklet af Beven og Binley (1992) har det været muligt at undersøge parameter- og modelusikkerheder. De acceptkriterier der anvendes har betydning for hvilke resultater der accepteres. Kriterierne har både fordele og ulemper, og det er fundet at en kombination af kriterierne er bedre til at bestemme simuleringer, der er i overensstemmelse med det målte data.

Boksmodellen har accepterede vandstandstidsserier ved 11 ud af 16 undersøgte lokationer, mens MIKE SHE modellen har fire ud af fem. Dog kan MIKE SHE modellen anvendes til nogle af de lokationer hvor boksmodellen ikke kan, hvilket indikerer, at en model med større kompleksitet kan anvendes, når dynamikken i vandstanden bliver mere kompleks.

Det målte vandspejl ligger mellem 46 og 73 % af tiden indenfor 90 % konfidensintervallet. Det er også fundet, at MIKE SHE modellen giver et entydigt resultat for grundvandsudstrømningen på hhv. $2,5 \text{ mm dag}^{-1}$ og 2 mm dag^{-1} for lokationerne Ansø og Tingvad 1. Boksmodellen forudsiger to optima af udstrømningen, hvor det globale er $1,5 \text{ mm dag}^{-1}$ og $1,1 \text{ mm dag}^{-1}$ for hhv. Ansø og Tingvad, mens det lokale optimum er $3,8 \text{ mm dag}^{-1}$ og $2,4 \text{ mm dag}^{-1}$. Det øger usikkerheden for boksmodellen, at den ikke kan forudsige et klart resultat.

Det konkluderes, at begge modeller forudsiger grundvandsudstrømninger der stemmer overens med hypotesen om at en lokation med et stabilt vandspejl nær terræn (Ansø) har en højere tilstrømning af grundvand end en lokation med variationer i vandspejlet, hvor vandspejlet falder i sommermånederne (Tingvad 1).

Ydermere konkluderes det, at MIKE SHE modellen for Tingvad 1 kan give indikationer om jorden, mens det er mere usikkert for Ansø, og at der er en vis variation iblandt retentionskurverne, som dermed ikke altid giver et entydigt resultat.

Det er også undersøgt, hvordan modellerne forudsiger vandstanden ved en reduktion i tilstrømningen af grundvand. Her er det fundet, at boksmodellen forudsiger lavere vandstande end MIKE SHE modellen, og vandstandene generelt er behæftet med en større usikkerhed for boksmodellen - i høj grad ved reduktioner større end 50 %. Det er dog usikkert hvorledes de fundne vandstande ved reduktion af tilstrømningen er repræsentative for det virkelige system, da det ikke har været muligt at verificere resultaterne.

Slutteligt konkluderes det, at der er fremtidsmuligheder i at anvende metoden fra dette projekt til kvantificering af påvirkninger på grundvandsafhængige naturområder, men at det kræver videre udvikling og undersøgelse af de to modeller.

Perspektivering og forslag til videre undersøgelser

I dette projekt er grundvandsudstrømningen til grundvandsafhængige naturområder bestemt. For nogle af lokationerne var det dog ikke muligt at bestemme udstrømningen. En forklaring på dette kan være, at grundvandsudstrømningen ikke er konstant hele året, som det antages i dette projekt. Udstrømningen kan variere i løbet af året og kan i perioder helt ophøre (Dahl et al., 2010). Det vil derfor være af stor vigtighed, at kunne bestemme disse perioder, da det kan betyde, at der i nogle perioder vil være en lavere tilstrømning, og dermed større påvirkning af vandstanden, mens tilstrømningen i andre perioder er højere og derfor ikke har en negativ påvirkning på vandstanden.

Selv hvis der ikke opleves en reduktion i grundvandsstanden, vil en reduktion af grundvandsudstrømningen kunne bevirke at forsyningen med næringsfattigt grundvand med et højt indhold af baseioner vil påvirkes. Det vil have en stor indflydelse på artssammensætningen i et område, da andre konkurrencedygtige arter får bedre forhold. At kunne bestemme en varierende grundvandsudstrømning vil derfor bidrage med et endnu større vidensgrundlag til vurderingen af påvirkningen på de grundvandsafhængige naturområder.

Det er ønsket at modellerne, anvendt i dette projekt, skal benyttes som værktøj til at kunne forudsige fremtidige påvirkninger af udstrømningen til grundvandsafhængige naturområder. En faktor, der er vigtig at indtænke, er påvirkningen fra klimaforandringer. Klimaforandringer vil medføre flere ekstreme hændelser med kraftig regn og længere tørkeperioder (DMI, 2018).

Særligt de længere tørkeperioder vil have en indflydelse på vandbalancen i de grundvandsafhængige naturområder, hvor vandspejlet kan falde yderligere end der observeres i dag. Perioderne vil både direkte kunne påvirke vandstanden, men også have en indflydelse på grundvandsdannelsen og dermed hvor stor en mængde grundvand der kan udstrømme. Klimaændringer kan i sig selv derfor være en belastning for de grundvandsafhængige naturområder.

En indtænkning af klimaforandringer kræver ikke en ændring af modellernes opsætning, men i stedet en klimafremskrivning af det nedbørs- og evapotranspirationsdata, der benyttes i modellerne. For at kunne anvende modellerne til en vurdering af påvirkningen fra en reduceret grundvandsudstrømning i fremtiden, er det derfor vigtigt også at betragte fremtidige klimaændringer, så modellernes forudsigelsesevne kan anvendes på lang sigt.



Litteratur

- Andersen, D. K., Ejrnæs, R., Vinther, E., Svendsen, A., Bruun, H. H., Buchwald, E. og Vikstrøm, T., 2015. *Forvaltning af rigkær*. Teknisk rapport. DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, nr. 150.
- Asner, G. P., Scurlock, J. M. O. og Hicke, J. A., 2003. *Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies*. Global Ecology & Biogeography, 12, 191–205.
- Batzer, D. P og Baldwin, A. H., 2012. *Wetland Habitats of North America: Ecology and Conservation Concerns*, kapitel 9: Inland Waters. Berkeley: University of California Press, 1. udgave. ISBN 0520271645.
- Beven, K., 2009. *Environmental Modelling: An Uncertain Future*, kapitel 4. Routledge. ISBN 0-415-46302-5.
- Beven, K. og Binley, A., 1992. *The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction*. Hydrological processes: an international journal, 6, 279–298.
- Beven, K. og Binley, A., 2014. *GLUE: 20 years on*. Hydrological processes, 28, 5897–5918.
- Christiaens, K. og Feyen, J., 2002. *Constraining soil hydraulic parameter and output uncertainty of the distributed hydrological MIKE SHE model using the GLUE framework*. Hydrological Processes, 16.
- Cirkel, D. G., Witte, J. M. og van der Zee Sjoerd, E. A. T. M., 2010. *Estimating seepage intensities from groundwater level time series by inverse modelling: A sensitivity analysis on wet meadow scenarios*. Journal of Hydrology, 385, 132–142.
- Dahl, M., Nielsson, B., Langhoff, J. H. og Refsgaard, J. C., 2007. *Review of classification systems and new multi-scale typology of groundwater-surface water interaction*. Journal of Hydrology, 344, 1–16.
- Dahl, M., Hinsby, K. og Refsgaard, J. C., 2010. *GOI typologiens anvendelsesmuligheder - med fokus på beskyttelse af overfladevand og økosystemer i relation til vand- og naturplaner*. Teknisk rapport. GEUS.
- DHI, 2017. *MIKE SHE Volume1: User Guide*. DHI.

- DMI, 2018. *Klimaforandringer påvirker ikke sommer og vinter ens*. URL <https://www.dmi.dk/klima/temaforside-fremtidens-klima/klimaforandringer-pavirker-ikke-sommer-og-vinter-ens/>, Downloadet d. 6/6/2022.
- Ejrnæs, R., Andersen, D. K., Baattrup-Pedersen, A., Damgaard, C., Nygaard, B., Dybkjær, J. B., Christensen, B. S., Nilsson, B. og Johansen, O. M., 2010. *Hydrologiske og vandkemiske forudsætninger for en god naturtilstand i grundvandsafhængige terrestriske økosystemer*. Teknisk rapport. DMU.
- Gnatowski, T., Szatylowicz, J., Brandyk, T. og Kechavarzi, C., 2010. *Hydraulic properties of fen peat soils in Poland*. Geoderma, 154, 188–195.
- Haapalehto, T., Kotiaho, J. S., Matilainen, R. og Tahvanainen, T., 2014. *The effects of long-term drainage and subsequent restoration on water table level and pore water chemistry in boreal peatlands*. Journal of Hydrology, 519, 1493–1505.
- Hoag, R. S. og Price, J. S., 1997. *The effects of matrix diffusion on solute transport and retardation in undistributed peat in laboratory columns*. Journal of Contaminant Hydrology, 28(3), 193–205.
- Hájek, M., Horsák, M., Hájková, P. og Dítě, D., 2006. *Habitat diversity of central European fens in relation to environmental gradients and an effort to standardise fen terminology in ecological studies*. Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics, 8(2), 97–114.
- Ilomets, M., Truus, L., Pajula, R. og Sepp, K., 2010. *Species composition and structure of vascular plants and bryophytes on the water level gradient within a calcareous fen in North Estonia*. Estonian Journal of Ecology, 57, 19–38.
- Johansen, O. M. Eco-hydrological modelling of stream valleys. PhD thesis, Department of Civil Engineering, Aalborg University, Sohngaardsholmvej 57, 9000 Aalborg, Denmark, 2011.
- Johansen, O. M., Jensen, J. B. og Pedersen, M. L., 2011. *Effect of groundwater abstraction on fen ecosystems*. Journal of Hydrology, 402, 357–366.
- Johansen, O. M., Jensen, J. B. og Pedersen, M. L., 2014. *From groundwater abstraction to vegetative response in fen ecosystems*. Hydrological Processes, 28, 2396–2410.
- Johansen, O. M., Andersen, D. K., Ejrnæs, R. og Pedersen, M. L., 2016. *Relations between vegetation and water level in groundwater dependent terrestrial ecosystems (GWDTEs)*. Limnologica, 68, 130–141.
- Kemmers, R. H., van Delft, S. P. J. og Jansen, P. C., 2003. *Iron and sulphate as possible key factors in the restoration ecology of rich fens in discharge areas*. Wetlands ecology and management, 11, 367–381.

- Kløve, B., Ala-aho, P., Bertrand, G., Boukalova, Z., Ertürk, A., Goldscheider, N., Ilmonen, J., Karakaya, N., Kupfersberg, H., Kværner, J., Lundberg, A., Mileusnic, M., Moszczynska, A., Muotka, T., Preda, E., Rossi, P., Siergieiev, D., Simek, J., Wachniew, P., Angheluta, V. og Widerlund, A., 2011. *Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends*. Environmental science & policy, 14(7), 770–781.
- Kristensen, K. J. og Jensen, S. E., 1975. *A model for estimating actual evapotranspiration from potential evapotranspiration*. Nordic Hydrology, 6, 170–188.
- Legates, D. R. og McCabe, G. J., 1999. *Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation*. Water Resources Research, 35, 233–241.
- Loll, P. og Moldrup, P., 2000. *Soil Characterization and Polluted Soil Assessment*. Aalborg University, Aalborg, kapitel 2 og 3.
- Lott, R. B. og Hunt, R. J., 2001. *Estimating evapotranspiration in natural and constructed wetlands*. Wetlands, 21, 614–628.
- Maltby, E., 2009. *Functional Assessment of Wetlands Towards Evaluation of Ecosystem Services*, kapitel 3. Woodhead Publishing. ISBN 978-1-85573-834-8.
- McCuen, R. H., Knight, Z. og Cutter, A. G., 2006. *Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index*. Journal of Hydrologic Engineering, 11, 597–602.
- Miljøstyrelsen, 2022a. *Kvælstof- og fosforvådområder*. MST. URL <https://mst.dk/natur-vand/vandmiljoe/tilskud-til-vand-og-klimaprojekter/kvaelstof-og-fosforvaadomraader/>, Downloadet d. 06/06/2022.
- Miljøstyrelsen, 2022b. *Moser og kær*. <https://mst.dk/natur-vand/natur/national-naturbeskyttelse/naturpleje/naturplejeportalen/naturtyper-og-deres-pleje/moser-og-kaer/>, Downloadet d. 23/4/2022.
- Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N. og Daggupati, P., 2015. *Hydrological and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria*. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 58, 1763–1785.
- Mustamo, P., Hyvärinen, M., Ronkanen, A. K. og Kløve, B., 2016. *Physical properties of peat soils under different land use options*. Soil Use and Management, 32, 400–410.
- Naturbeskyttelsesloven, 2021. *Bekendtgørelse af lov om naturbeskyttelse (LBK nr 1986 af 27/10/2021)*. URL <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2021/1986>.
- Naturstyrelsen, 2011. *Vejledning til bekendtgørelse nr. 408 af 1. maj 2007 om udpegning og administration af internationale naturbeskyttelsesområder samt beskyttelse af visse arter*. Teknisk rapport. Naturstyrelsen, miljøministeriet.
- Nilsson, B., Ejrnæs, R., Andersen, D.K., Kazmierczak, J., Troldborg, L. og Thorling, L., 2019. *Vurdering af grundvandsforekomsters påvirkning af tilknyttede*

- grundvandsafhængige terrestriske økosystemer i natura 2000 områder*. Teknisk rapport. GEUS.
- Nourali, M., Ghahraman, B., Pourreza-Bilondi, M. og Davary, K., 2016. *Effect of formal and informal likelihood functions on uncertainty assessment in a single event rainfall-runoff model*. Journal of Hydrology, 540, 549–564.
- Pedersen, R. A. og Fonseca, A., 2022. *Den danske sommer bliver mere ekstrem – mere tørke og kraftigere regnvejr*. DMI. URL <https://www.dmi.dk/nyheder/2020/den-danske-sommer-bliver-mere-ekstrem-mere-torke-og-kraftigere/>, Downloadet d. 06/06/2022.
- Plauborg, F., Refsgaard, J. C., Henriksen, H. J., Blicher-Mathiesen, G. og Kern-Hansen, C., 2002. *Vandbalance på mark- og oplandsskala*. Teknisk rapport. DJF rapport, nr. 70.
- Price, J. S. og Whitehead, G. S., 2004. *The influence of past and present hydrological conditions on Sphagnum recolonization and succession in a block-cut bog, Québec*. Hydrological Processes, 18.
- Schaffers, A. P. og Sýkora, K. V., 2000. *Reliability of Ellenberg indicator values for moisture, nitrogen and soil reaction: a comparison with field measurements*. Journal of Vegetation Science, 11, 225–244.
- Sonnenborg, T. O. og Henriksen, H. J., 2005. *Håndbog i grundvandsmodellering*. Teknisk rapport. GEUS.
- Thorling, L., Albers, C. N., Ditlefsen, C., Hansen, B., Johnsen, A. R., Mortensen, M. H. og Troldborg, L., 2021. *Grundvandsovervågning 1989-2020*. Teknisk rapport. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland.
- van Diggelen, R., Middleton, B., Bakker, J., Grootjans, A. og Wassen, M., 2006. *Fens and floodplains of the temperate zone: Present status, threats, conservation and restoration*. Applied Vegetation Science, 9(2), 157–162.
- van Loon, A. H., Schot, P. P., Griffion, J., Bierkens, M. F. P., Batelaan, O. og Wassen, M. J., 2009. *Throughflow as a determining factor for habitat contiguity in a near-natural fen*. Journal of Hydrology, 379(1-2), 30–40.
- Vandplanlægningsloven, 2017. *Bekendtgørelse af lov om vandplanlægning (LBK nr 126 af 26/01/2017)*. URL <https://www.retsinformation.dk/eli/lta/2017/126#idccc7e4f2-b518-473c-bb6e-14caee371432>.
- Vázquez, R. F., Beven, K. og Feyen, J., 2008. *GLUE Based Assessment on the Overall Predictions of a MIKE SHE Application*. Water Resources Mangagement, 23, 1325–1349.
- Wallor, E., Roskopf, N. og Zeitz, J., 2018. *Hydraulic properties of drained and cultivated fen soils part I - Horizon- based evaluation of van Genuchten parameters considering the state of moorsh-forming process*. Geoderma, 313, 69–81.

Word, C. S., McLaughlin, D. L., Strahm, B. D., Stewart, R. D., Varner, J. M., Wurster, F. C., Amestoy, T. J. og Link, N. T., 2022. *Peatland drainage alters soil structure and water retention properties: Implications for ecosystem function and management*. Hydrological Processes, 36.

A

Oversigt over målestationer for vandstandstidsserier

I dette appendiks kan oplysninger om de 16 undersøgte lokationer findes.

I tabel A.1 findes simuleringsperioden for de 16 forskellige lokationer. Derudover kan det stationsnavn og -id som lokaliteten har i databasen Calypso også ses samt hvilket af DMIs klimagrid lokationen ligger i.

I tabel A.2 er en kort beskrivelse af de 16 lokaliteter, hvor det bl.a. kan ses om området er §3-beskyttet eller ligger i et Natura 2000 område.

Table A.1. Nummer, navn og simuleringsperiode for lokationen, der benyttes i projektet samt stationsnavne og id i databasen Calypso samt det tilhørende klimagrid brugt i DMI Klimaatlas

No.	Lokalitetsnavn	Simuleringsperiode	Stationsnavn i Calypso	Stationsid	Klimagrid
1	Ansø	17/06/2020 - 29/01/2022	Ansø 2	589	621-52
2	Brabrand	26/05/2020* - 16/11/2021	Brabrand 3	6	622-57
3	Brande	11/06/2020 - 30/04/2022	Brande Mose	584	619-50
4	Brokær 1	02/08/2018* - 31/12/2019	Brokær 5	19	628-46
5	Brokær 2	20/08/2019 - 30/04/2022	Brokær 23	157	628-46
6	Glombak	02/08/2018* - 05/01/2022	Glombak 4	31	632-50
7	Hellerød 1	16/06/2018* - 05/01/2021	Hellerød 6	98	627-47
8	Hellerød 2	07/07/2017 - 05/01/2021	Hellerød 18	104	627-47
9	Karup	03/11/2020 - 25/03/2022	Karup Å Riggær	668	626-49
10	Kasted 1	23/11/2020 - 24/04/2022	Kasted 1	688	622-56
11	Kasted 2	26/11/2020 - 24/04/2022	Kasted 2	690	622-56
12	Kolding	15/07/2020 - 09/11/2021	Kolding Riggær	597	615-52
13	Nørhå	04/09/2018 - 28/04/2022	Nørhå 5	62	630-46
14	Sønderhå	18/09/2019 - 30/04/2022	Sønderhå 9	175	630-46
15	Tingvad 1	16/11/2020 - 24/04/2022	Tingvad 1	674	622-56
16	Tingvad 2	16/11/2020 - 24/04/2022	Tingvad 2	676	622-56

*En del af vandstandstidsserien er skåret fra ift. hele måleperioden tilgængelig fra Calypso

Tabel A.2. Beskrivelse af de 16 undersøgte lokaliteter

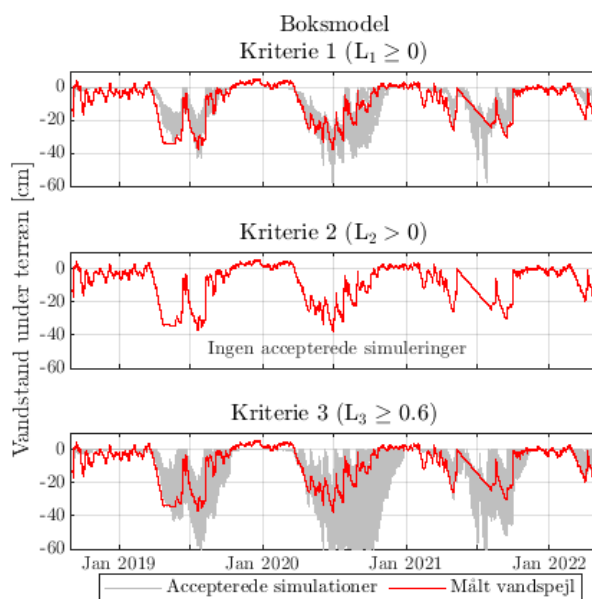
No.	Lokalitet	Lokationsbeskrivelse
1	Ansø	Ligger i bunden af skråning og ca. 40 m fra vandløb. Karakteriseret som §3-beskyttet mose og Natura-2000 område.
2	Brabrand	Ligger nedenfor skråning og 140 m fra vandløb. Karakteriseret som §3-beskyttet mose og Natura-2000 område.
3	Brande	Ligger på skråning og ca. 17 m fra vandløb. Karakteriseret som §3-beskyttet mose.
4	Brokær 1	Ligger nedenfor skråning og 10 m fra vandløb. Karakteriseret som §3-beskyttet mose og Natura-2000 område.
5	Brokær 2	Ligger nedenfor skråning og 26 m fra vandløb. Karakteriseret som §3-beskyttet mose og Natura-2000 område.
6	Glombak	Ligger i bunden af skråning og 11 m fra vandløb. Karakteriseret som §3-beskyttet eng og Natura-200 område.
7	Hellerød 1	Ligger i bunden af skråning og 48 m fra vandløb. Karakteriseret som §3-beskyttet mose og Natura-2000 område.
8	Hellerød 2	Ligger på skråning og ca. 90 m fra vandløb. Karakteriseret som §3-beskyttet mose og Natura-2000 område.
9	Karup	Ligger 32 m fra vandløb, men med forhøjning i mellem. Karakteriseret som §3-beskyttet eng og Natura-2000 område.
10	Kasted 1	Ligger i bunden af skråning og 15 m fra sø. Karakteriseret som §3-beskyttet mose.
11	Kasted 2	Ligger nedenfor skråning og ca. 62 m fra vandløb. Karakteriseret som §3-beskyttet mose.
12	Kolding	Ligger nedenfor skråning og ca. 30 m fra vandløb. Karakteriseret som §3-beskyttet eng.
13	Nørhå	Ligger nedenfor skråning og ca. 22 m fra sø. Karakteriseret som §3-beskyttet eng og ca. 60 m fra Natura-2000 område.
14	Sønderhå	Ligger i bunden af skråning og ca. 40 m fra sø. Karakteriseret som §-3 beskyttet eng og Natura-2000 område.
15	Tingvad 1	Ligger på skråning og ca. 70 m fra vandløb. Karakteriseret som §3-beskyttet mose.
16	Tingvad 2	Ligger i bunden af skråning og ca. 27 m fra vandløb. Karakteriseret som §3-beskyttet mose.

B

Undersøgelse af lokationer med ingen accepterede simuleringer

I dette appendiks vises resultater af tre udvalgte lokationer hvor enten boks- og/eller MIKE SHE modellen ikke har nogle accepterede simuleringer med kriterie 1 eller 2. Fælles for dem alle er, at de undersøges ved at sænke acceptkriterie 1, der er baseret på Nash-Sutcliff, til $L_1 \geq 0$ i stedet for $\geq 0,4$.

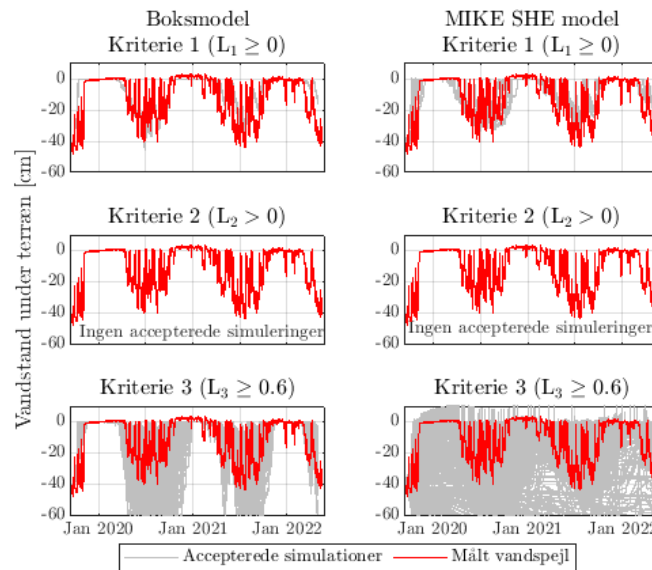
For den første lokation, Nørhå, er den kun undersøgt med boksmodellen. Det ses at hvis L_1 justeres accepteres der simuleringer. Der er afvigelse på over 20 cm i sommeren 2020 og 2021 ved lave vandstande, samtidig med at modellen forudsiger vandstande omkring 20 cm nede i jorden hvor den målte er nær terræn i efteråret 2020.



Figur B.1. Accepterede simuleringer hvis kravet for kriterie 1 sænkes til $L_1 \geq 0$ for lokationen Nørhå

Sønderhå er undersøgt med begge modeller hvor der for ingen af modellerne har været accepterede simuleringer med kriterie 1 og 2. Hvis L_1 sænkes bliver der for boksmodellen accepteret seks simuleringer og 21 for MIKE SHE modellen. Fælles for dem er, at simuleringerne nogenlunde fanger de mindste vandstande, men at de ikke stiger til terræn så hurtigt og ofte, som det målte vandspejl. En væsentlig forskel mellem modellerne er, at ved kriterie 3 stiger vandspejlet til terræn i vinterperioden for alle accepterede simuleringer, mens det for MIKE SHE modellen kan forblive op mod 60 cm nede i jorden. Dette viser,

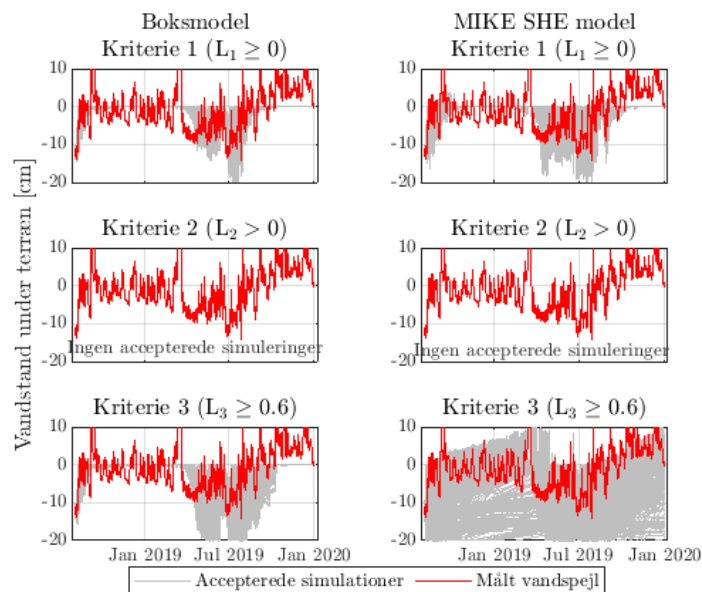
at der med kriterie 3 kan accepteres simuleringer der ligger langt fra det målte data.



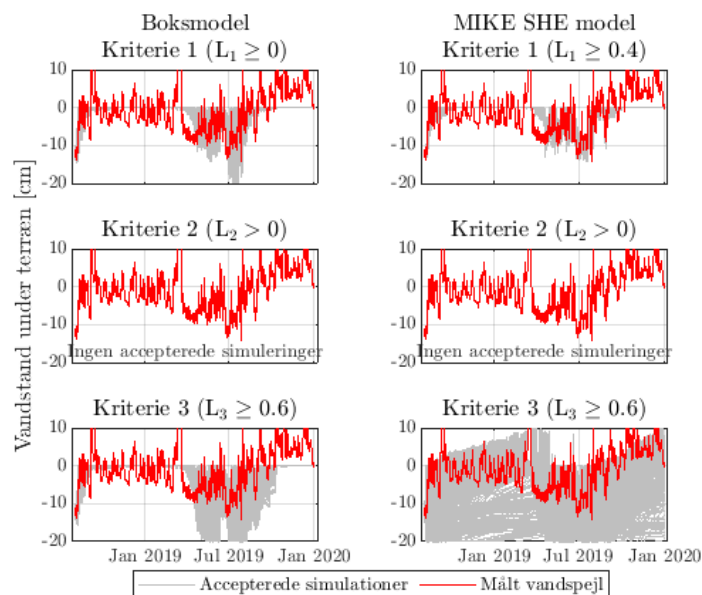
Figur B.2. Accepterede simuleringer hvis kravet for kriterie 1 sænkes til $L_1 \geq 0$ for lokationen Sønderhå

For Brokær 1 kan boksmodellen ikke acceptere simuleringer, mens MIKE SHE modellen kan hvor kriterierne ikke er nedjusteret. Der er lavet to figurer over Brokær 1, hvor figur B.3 viser accepterede simuleringer når $L_1 \geq 0$, og figur B.4 viser accepterede simuleringer for MIKE SHE modellen, med det 'oprindelige' kriterie 1 ($L_1 \geq 0,4$), og for boksmodellen når $L_1 \geq 0$.

Det ses af figur B.3, at der accepteres simuleringer hvis kriterie 1 sænkes for boksmodellen. Der ses en afvigelse på omkring 10 cm fra målt data i sommeren 2019. Der ligger vand på terræn i store dele af vandstandstidsserien for målt data, hvilket kan skyldes et forkert korrigeret terræn fra modellerne, men også fordi Brokær 1 er 10 m fra et vandløb, jf. tabel A.2. Det har dog ikke indflydelse på evalueringen af modellerne eftersom det kun baseres på perioden 1/4 til 30/9. Sammenlignes accepterede simuleringer for MIKE SHE modellen når L_1 er ≥ 0 og $\geq 0,4$ kan det ses, at der er en væsentlig forskel, jf. figur B.4. Når $L_1 \geq 0,4$ er der ingen overestimering af vandstanden i juli 2019.



Figur B.3. Accepterede simuleringer hvis kravet for kriterie 1 sænkes til $L_1 \geq 0$ for lokationen Brokær 1

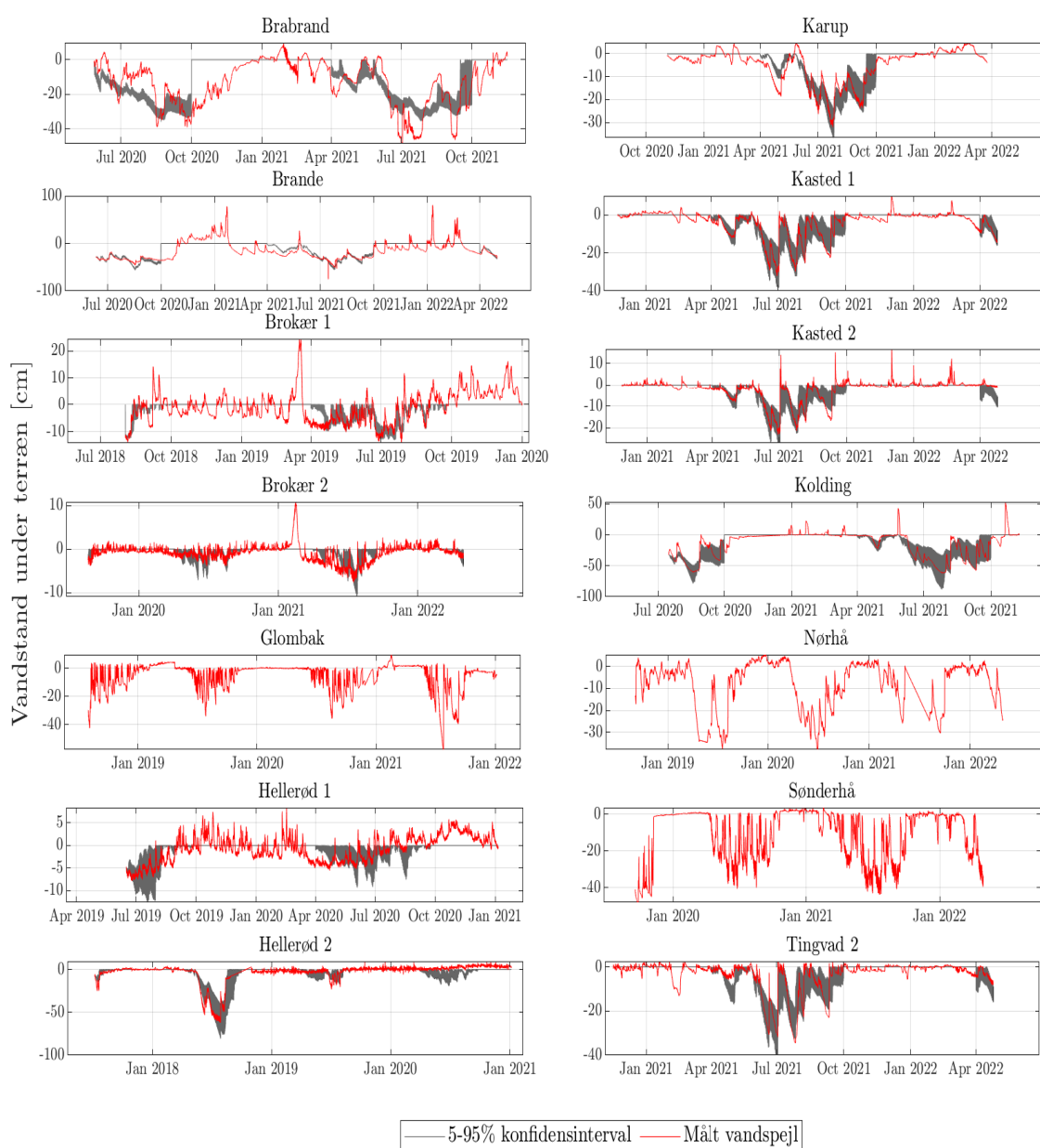


Figur B.4. Accepterede simuleringer hvis kravet for boksmodekens kriterie 1 sænkes til $L_1 \geq 0$ for lokationen Brokær 1. MIKE SHE modellen kan godt acceptere simuleringer når $L_1 \geq 0.4$

Der kan accepteres simuleringer for lokationer når kriterierne sættes ned til at simuleringen skal være bedre til at beskrive vandstanden end gennemsnittet af observationerne ($L_1 > 0$). Det kan dog ses af Nørhå, at usikkerheden vokser og at accepterede simuleringer ikke afspejler det målte vandspejl. Sønderhå viser dog, at hvis kriteriet sænkes, kan der accepteres simuleringer som med rimelighed forudsiger lave vandstande om sommeren, men som ikke kan beskrive dynamikken ved hurtige vandstandsændringer.

Vandstande og modelbestemmelser for alle lokationer

I dette appendiks vises vandstandsmålingerne samt 90 % konfidensinterval for accepterede modelsimuleringer for alle lokationer med undtagelse af Ansø og Tingvad 1. Hvilken model der er benyttet samt acceptkriterie kan ses i tabel 5.1.



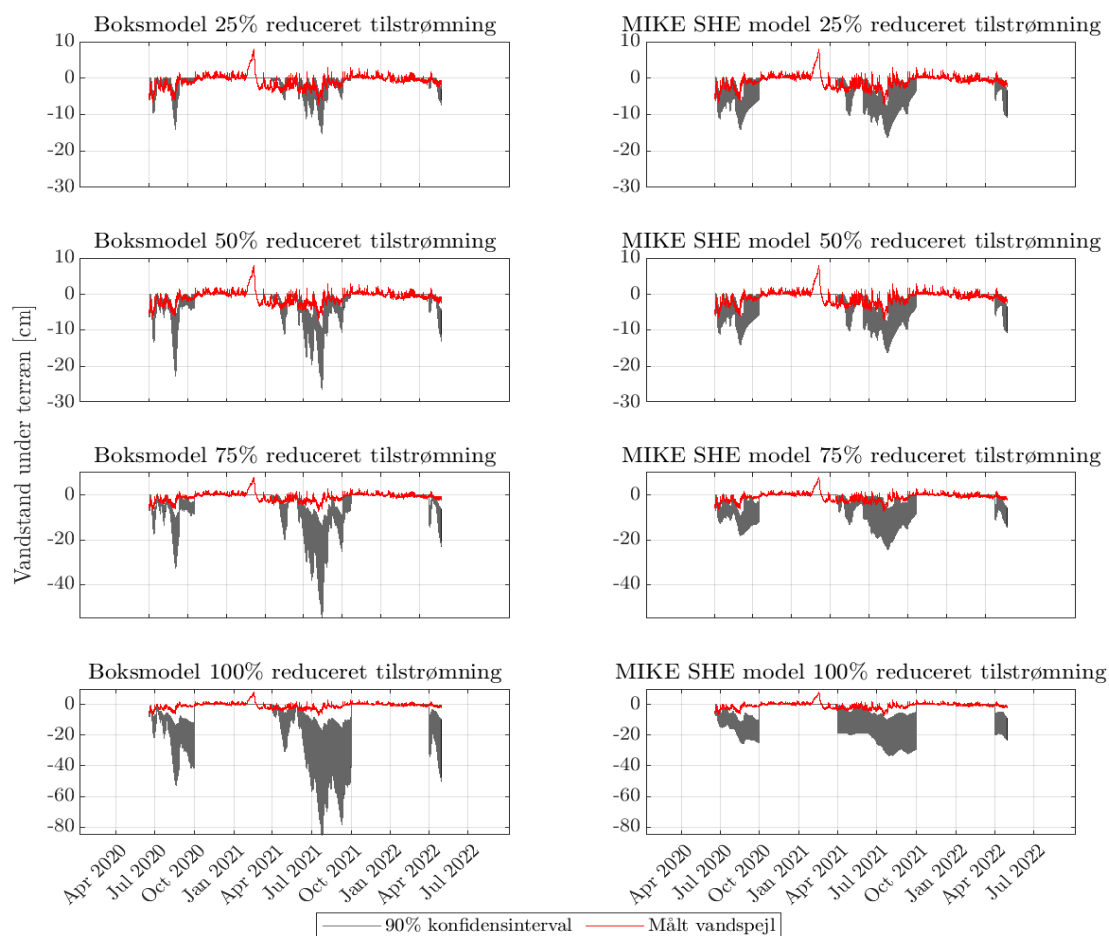
Figur C.1. Vandstanden for alle lokationer ekskl. Ansø og Tingvad 1. Bemærk forskellige akser. Konfidensinterval er bestemt for alle accepterede simulering, der er bestemt med enten boksmodellen eller MIKE SHE modellen. Se tabel 5.1

D

Reduktion af grundvandsudstrømningen til Ansø og Tingvad 1

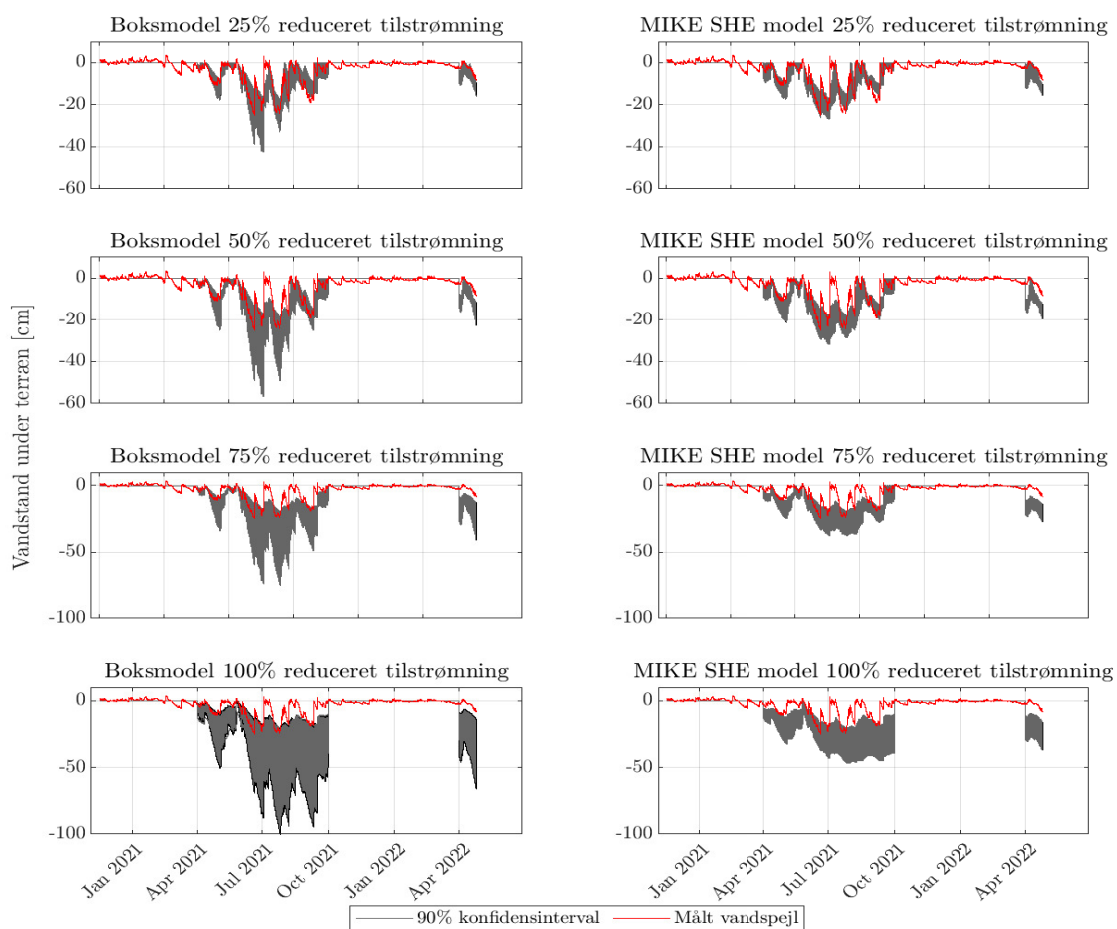
For Ansø og Tingvad 1 er der undersøgt en reduktion af tilstrømningen på 25%, 50%, 75% og 100%. Parametersættene for alle accepterede simuleringer er benyttet til at beregne en ny vandstand med en reduceret tilstrømning. Det 90 % vægtede konfidensinterval vises på figur D.1 og D.2, hvor de tildelte likelihoods fra de oprindelige simuleringer er benyttet, således at simuleringer der før havde en god overensstemmelse med observeret vandstand stadig vægter mest.

Figur D.1 viser, at hvis der ingen tilstrømning er til Ansø vil vandstanden for boksmodellen falde ned mod 80 cm i sommeren 2021, og at vandspejlet ikke vil ligge nær terræn i løbet af sommeren. For MIKE SHE modellen falder vandstanden ned mod 30 cm. Der er stor forskel på modellerne når tilstrømningen reduceres med 50% eller mere, hvor boksmodellen forudsiger lavere vandstande end MIKE SHE modellen. Generelt er der stor usikkerhed for hvad vandstanden bliver når tilstrømningen kraftigt reduceres, hvilket betyder, at det kan være svært at kvantificere påvirkningen på de grundvandsafhængige naturområder hvis vandindvinding forårsager en kraftig reduktion.



Figur D.1. Scenarier hvor tilstrømningen er reduceret med 25%, 50%, 75% og 100% for Ansø. Ved udregning af konfidensinterval er der anvendt det vægtede likelihood baseret på simuleringerne uden reduktioner. Bemærk forskellige y-akser

Figur D.2 viser at når tilstrømning for Tingvad 1 reduceres falder det ned mod 1 m for boksmode og 45 cm for boksmode. Der ses generelt de samme tendenser for Tingvad 1 som for Ansø. Der er dog modsat for Ansø en forskel på minimumsvandstanden for de to modeller ved en reduktion med 25% af tilstrømningen på omkring 20 cm om sommeren.

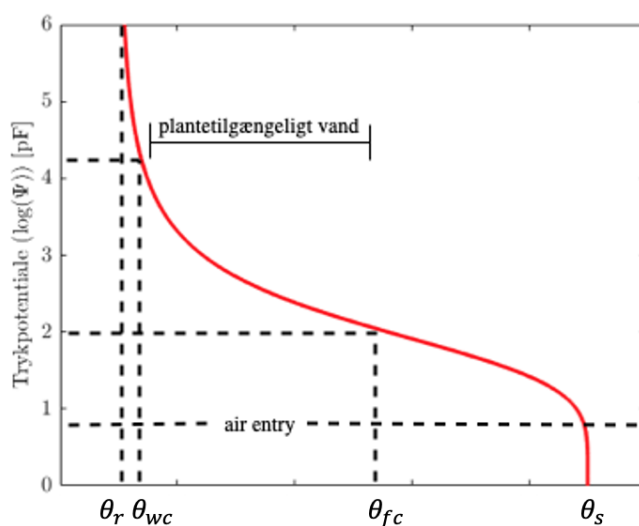


Figur D.2. Scenarier hvor tilstrømningen er reduceret med 25%, 50%, 75% og 100% for Tingvad 1. Ved udregning af konfidensinterval er der anvendt det vægtede likelihood baseret på simuleringerne uden reduktioner. Bemærk en større y-akse for ved 75% og 100% reduktion

E

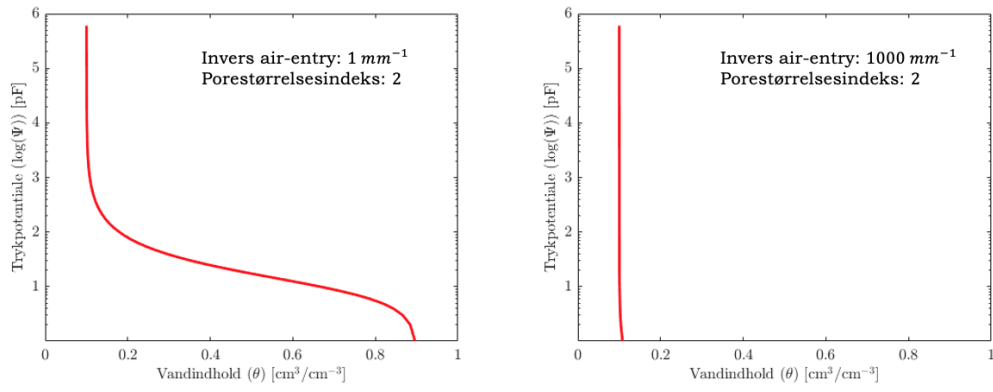
Retentionskurve og indflydelsen af parametreændringer på denne

På figur E.1 ses et eksempel på en retentionskurve, hvor vigtige parametre er betegnet. Air-entry er det trykniveau, hvor de største porer begynder at dræne. Markkapacitet definerer det vandindhold der er tilbage efter fri dræning ved tyngdekraften. Dette punkt defineres ved pF 2. Visnegrænsen definerer det vandindhold hvor planterne ikke længere kan trække vand ud af jorden. Dette punkt defineres ved pF 4,2. Det residuale vandindhold og det mættede vandindhold definerer hhv. det vand der naturligt ikke kan fjernes fra jorden og vandindholdet når jorden er mættet. Forskellen mellem markkapacitet og visnegrænsen er det plantetilgængelige vand (Loll og Moldrup, 2000).

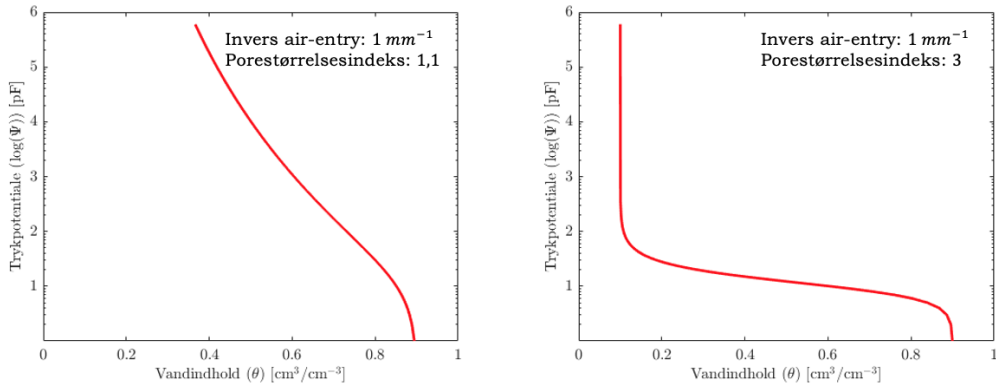


Figur E.1. Parametre på retentionskurven. θ_r er det residuale vandindhold, θ_{wc} er visnegrænsen, θ_{fc} er markkapacitet og θ_s er mættet vandindhold

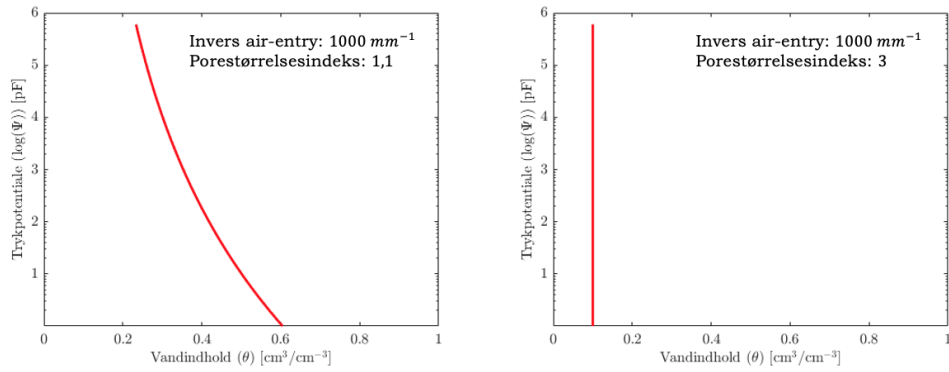
Parametrene invers air-entry og porestørrelsesindex indgår i retentionskurven og de undersøges også ved stokastisk modellering, hvorfor deres effekt på retentionskurven er undersøgt i figur E.2, E.3 og E.4.



Figur E.2. Effekten af en lav og høj invers air-entry



Figur E.3. Effekten af et lavt og højt porestørrelsesindex ved lav invers air-entry



Figur E.4. Effekten af et lavt og højt porestørrelsesindex ved høj invers air-entry