



NOTAT

Projekt	DCE – opsætning og drift af loggere på Mandø
Projektnummer	1321800165
Kundenavn	DCE – National Center
Emne	Hydraulisk MIKE SHE model for Mandø
Til	DCE
Fra	Michael Juul Lønborg
Projektleder	Hans-Martin Olsen
Kvalitetssikring	Hans-Martin Olsen
Revisionsnr.	0
Godkendt af	Hans-Martin Olsen
Udgivet	30-10-2018

Baggrund

Dette notat beskriver opstillingen af en hydrologisk model for Mandø og beregninger udført med MIKE SHE. Der er tidligere opstillet en model for den nordlige del af Mandø for perioden 1990-2010. En henvendelse fra Aarhus Universitet med ønske om en samlet model for hele Mandø samt en udvidelse af beregningsperioden frem til august 2018, har resulteret i dette notat.

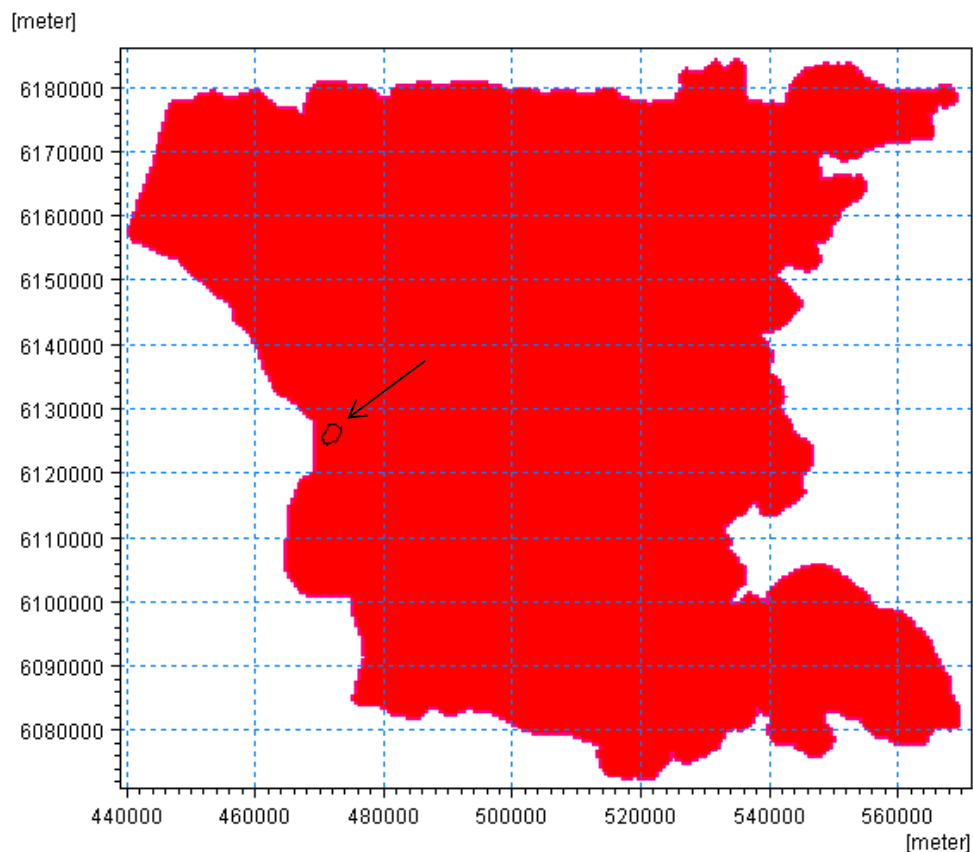
Formål

Formålet med modellen er at beregne den årlige variation i det terrænnære grundvandsspejl og dermed også afvandingsdybderne for området. Der er især med fokus på vadefuglenes udbredelse, at den årlige variation af vandstanden ønskes undersøgt. Desuden ønskes desuden beregnede snapshots af vandstanden på enge og i grøfter på Mandø 1. april, 1. maj, 1. juni, 1. juli, 1. august samt 31. august 2018.

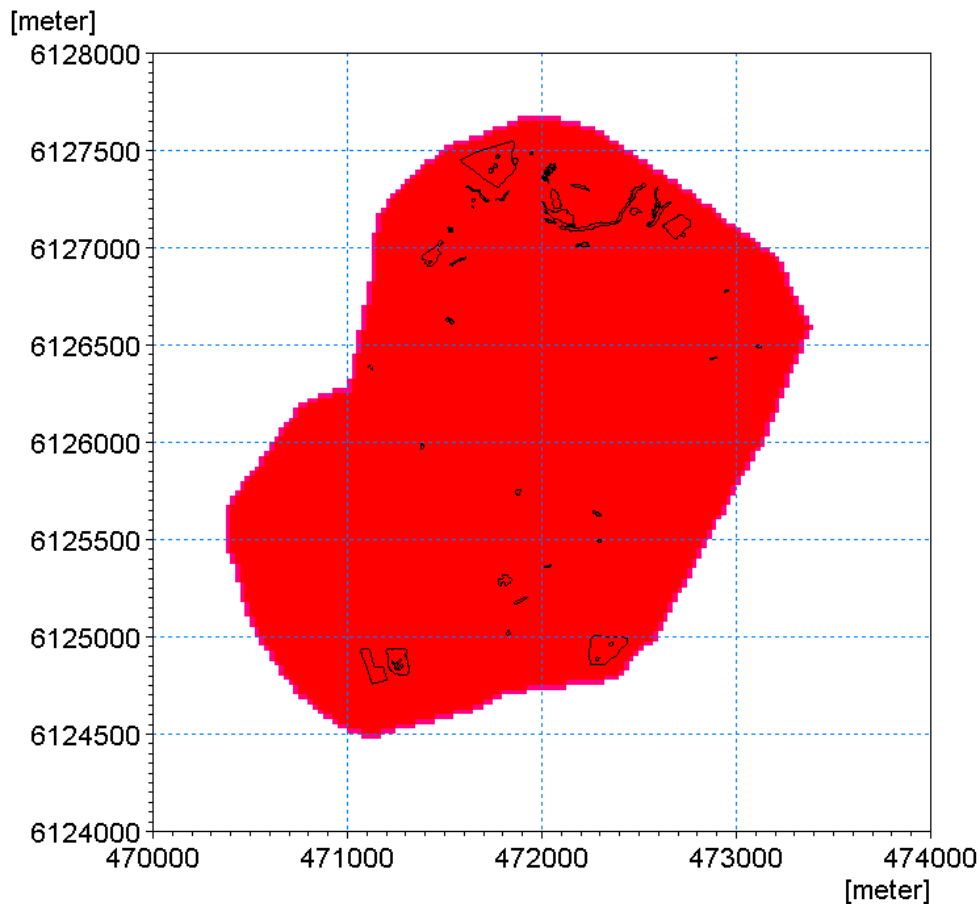
Modelopstilling

Modelområde og diskretisering

Modellen er opstillet som en lokalmodel på baggrund af DK-modellen for sub-område 4 (Sønderjylland), jf. Figur 1. Den regionale DK-model er opstillet af GEUS og anvender en diskretisering i horisontal retning på 500 x 500 m. Lokalmodellen for Mandø benytter en diskretisering på 25 x 25 m, jf. Figur 2.



Figur 1 DK-model for område 4 (Sønderjylland) med Mandø lokalmodel vist som sort polygon.



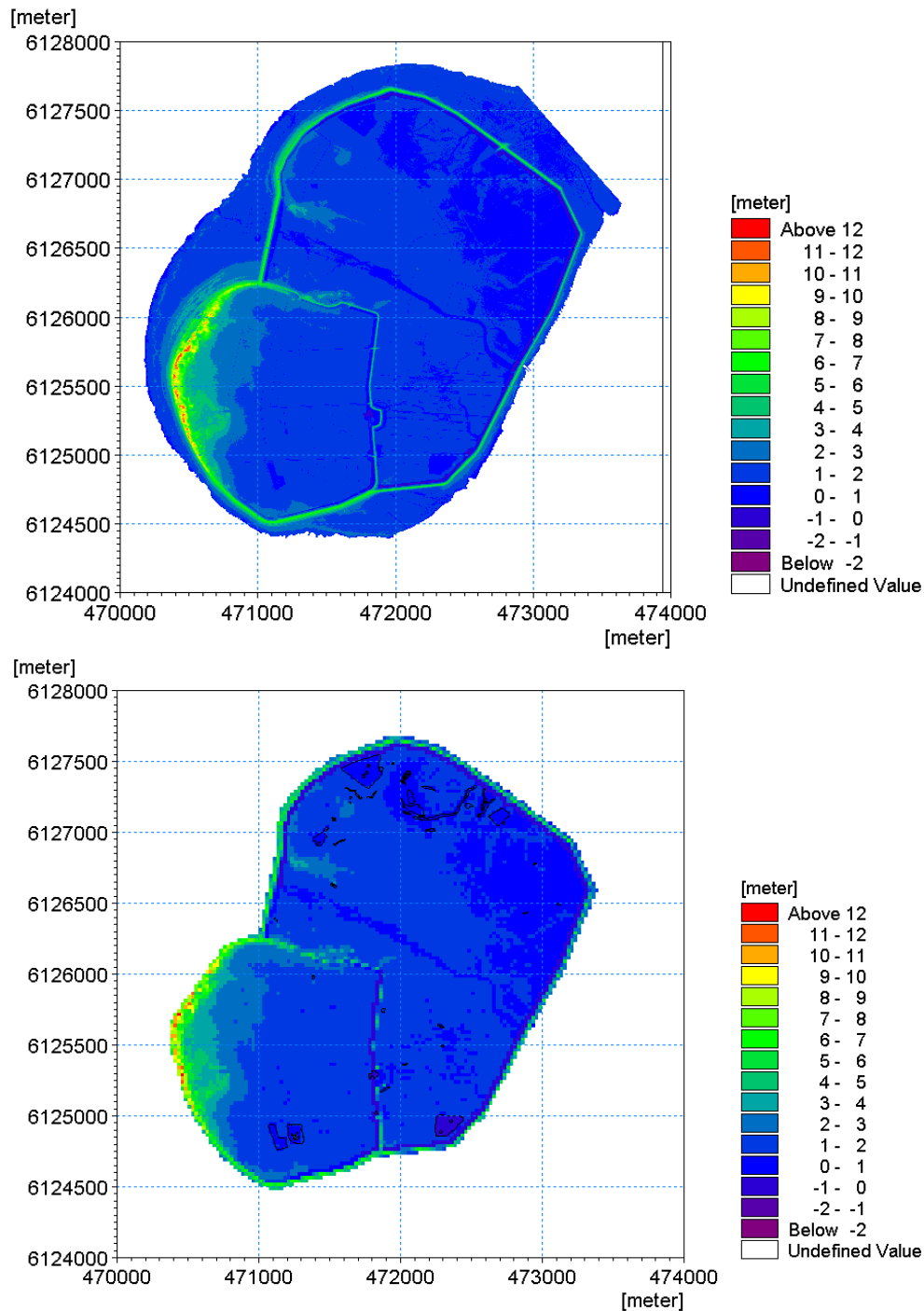
Figur 2 Mandø lokalmodel med angivelse af deloplande. De sorte polygoner er søer/vandhuller.

Terrænmodel

Der anvendes en digital terrænmodel for Mandø (Danmarks digitale terrænmodel fra 2015) med en diskretisering på 0,4 x 0,4 m, jf. Figur 3. Modellen midler imidlertid terrænkoten til beregningsgriddet på 25 x 25 m, men modellen er således forberedt på at kunne anvende et finere beregningsgrid.

Søer og større vandhuller er stemplet ned i terrænmodellen i 25 x 25 m griddet baseret på dybdemålinger af vandhullerne. Dermed beskriver terrænmodellen bunden af vandhullerne i stedet for vandspejlet på tidspunktet for overflyvningen i forbindelse med tilblivelsen af Danmark digitale højdemodel. Digegraven på indersiden af diget er stemplet ned til kote -0,75 m DVR90. Digegraven er sandsynligvis dybere, men i modellen fungerer digegraven som en randbetingelser for vandstanden, og det præcise volumen af graven er derfor ikke interessant at kende. Som

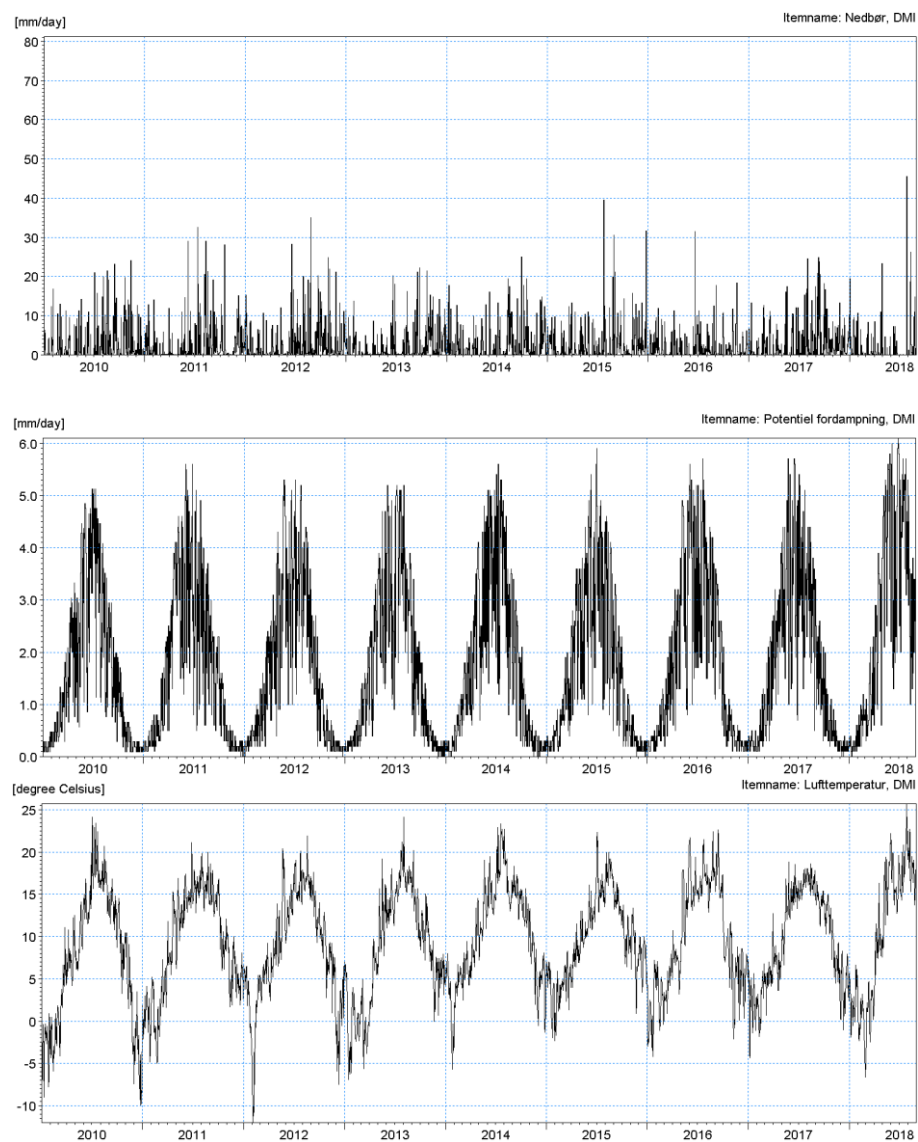
det fremgår af Figur 3 (nederst), er områderne uden for hoveddiget ikke inkluderet i den hydrologiske model.



Figur 3 Topografi. Øverst: Input i 0,4 x 0,4 m terrænmodel. Nederst: Midlet terrænmodel anvendt i modellen i 25 x 25 m grid, hvor søer og vandhuller er stemplet ned. De sorte polygoner er søer/vandhuller.

Klimainput

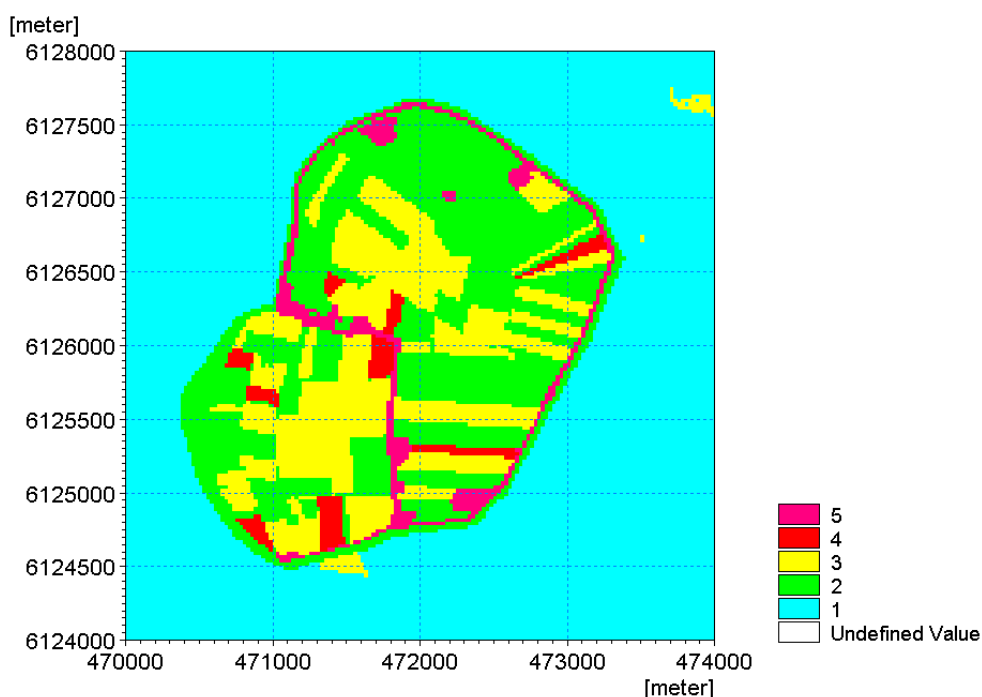
MIKE SHE benytter dynamiske tidsserier af klimavariablerne nedbør, potentiel fordampning og lufttemperatur. Temperaturen anvendes til at bestemme om nedbøren falder som sne eller regn. Sne magasineres på overfladen, hvor det kan fordampe eller smelte, når temperaturen stiger til over 0 gr. Den tidligere model for Mandø indeholdt kun klimadata for perioden 1990-2010, men i forbindelse med dette projekt har Aarhus Universitet leveret klimadata fra DMI for perioden 2011 til og med august 2018. Disse nye data ses af Figur 4.



Figur 4 Klimainput til modellen. Øverst: nedbør (mm/dag). I midten: Potentiel fordampning (mm/dag). Nederst: Døgnmiddeltemperatur (gr. C).

Arealanvendelse

I MIKE SHE er det muligt at definere en arealanvendelsestype i hvert enkelt grid og desuden at benytte en tidsvariende arealanvendelse, dvs. afgrødetypen på den enkelte mark skifter fra år til år. Arealanvendelsen er opdateret i forhold til DK-modellen efter markblokke baseret på 2017-data, dvs. der benyttes samme afgrødetype for hele beregningsperioden. For Mandø anvendes nedenstående afgrødetyper, jf. Figur 5. Som det fremgår af figuren er kortet for arealanvendelse lavet i et 25 x 25 m grid.

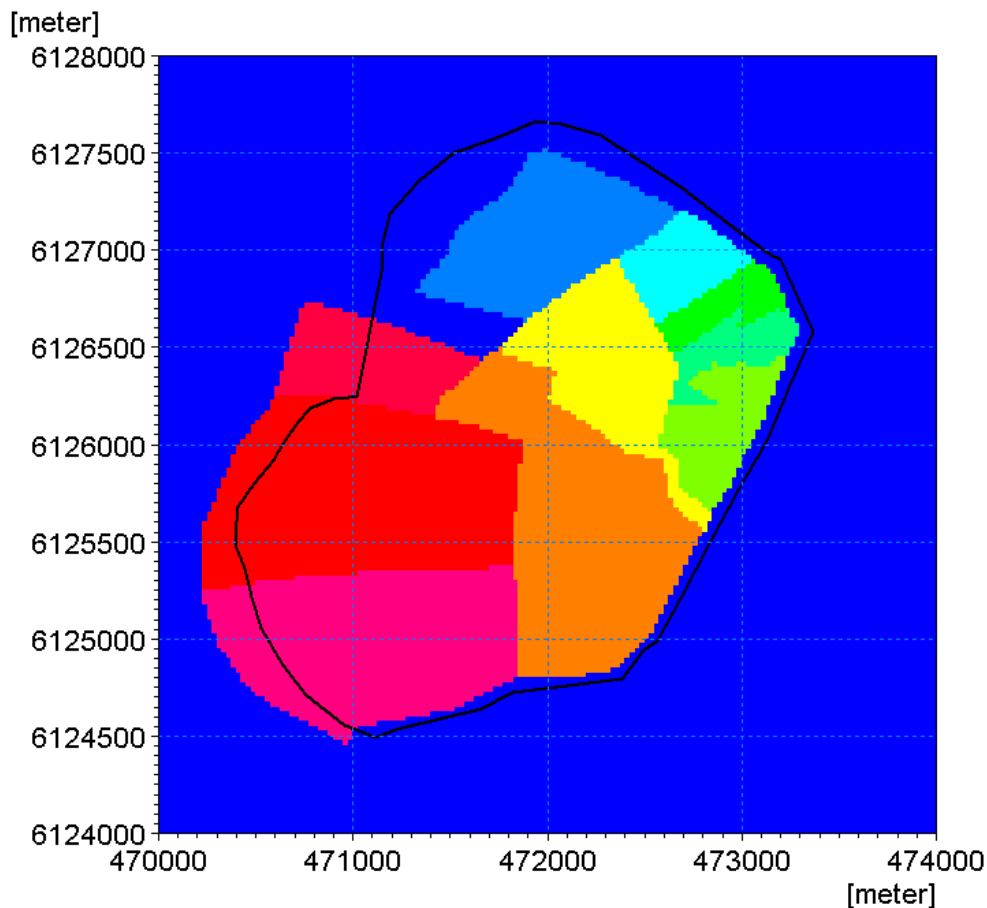


Figur 5 Arealanvendelse på Mandø. Blå = hav, Grøn = permanent græs. Gul = græs (omdrift). Rød = vårbyg. Lyserød = vådområder.

Overfladisk afstrømning

Den overfladiske afstrømning i modellen beskrives ved et Manningtal på $M=5$, svarende til en ru overflade – jo lavere Manningtal jo større ruhed. På overfladen benyttes en magasinering på 6 mm (detention storage), der bevirker, at vandet på overfladen først begynder at strømme, når der står mere end 6 mm vand på terrænet. Manningtal og magasinering er det samme som i DK-modellen.

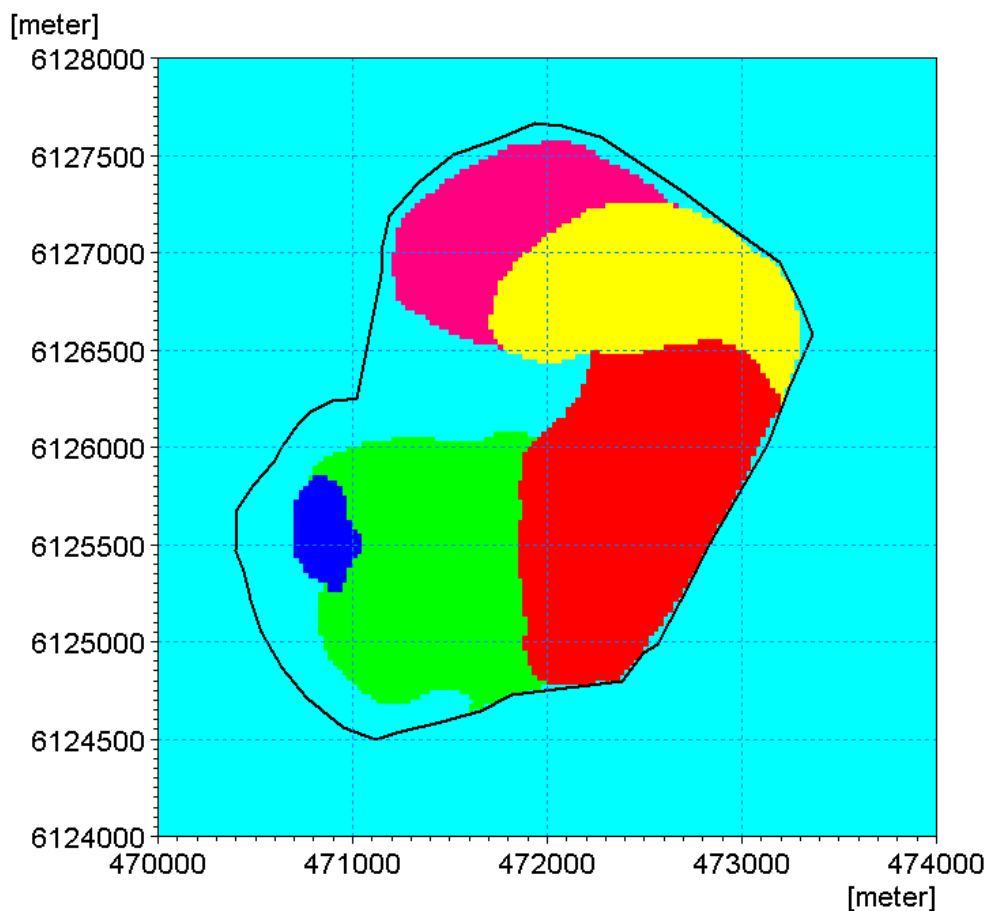
Desuden opdeles de forskellige deloplande i de såkaldte "separated overland flow areas", jf. Figur 6, hvilket betyder, at vandet på overfladen kun kan strømme indenfor de enkelte deloplande og således ikke strømme fra et delopland til et andet. Deloplandene afgrænses af indre diger og større grøfter.



Figur 6 Opdeling af oplande til overfladisk afstrømning (separated overland flow areas).

Umættet zone strømning

Den umættede zone beskrives ved en række forskellige jordtyper, der med unikke egenskaber definerer den vertikale strømning fra overfladen til grundvandsspejlet, dvs. den mættede zone. De forskellige jordtyper fremgår af Figur 7 og er ændret i forhold til DK-modellen. Parametrene for den umættede zone er justeret som en del af kalibreringen (se næste afsnit), og de endelige parameterværdier fremgår af Tabel 1.



Figur 7 Jordtyper i den umættede zone. Mørkeblå = JB1. Lyseblå = JB2. Grøn = JB3. Gul = JB4. Rød = JB5. Pink = JB6.

Tabel 1 Parametre i den umættede zone. Vandindhold θ ved mætning (Saturation), markkapacitet (Field Capacity) og visnepunkt (Wilting Point) samt mættet hydraulisk ledningsevne, K_s .

JB-nr.	Tekstur	θ_s (-)	θ_{FC} (-)	θ_{WP} (-)	K_s (m/s)
JB1	Grovsand	0,30	0,20	0,039	5e-6
JB2	Finsand	0,33	0,21	0,046	2e-6
JB3	Lerblandet sandjord	0,35	0,22	0,058	1e-6
JB4	Sandblandet lerjord	0,40	0,30	0,067	2e-8
JB5	Lerjord	0,44	0,31	0,087	1e-7
JB6	Svær lerjord	0,44	0,31	0,087	2e-8

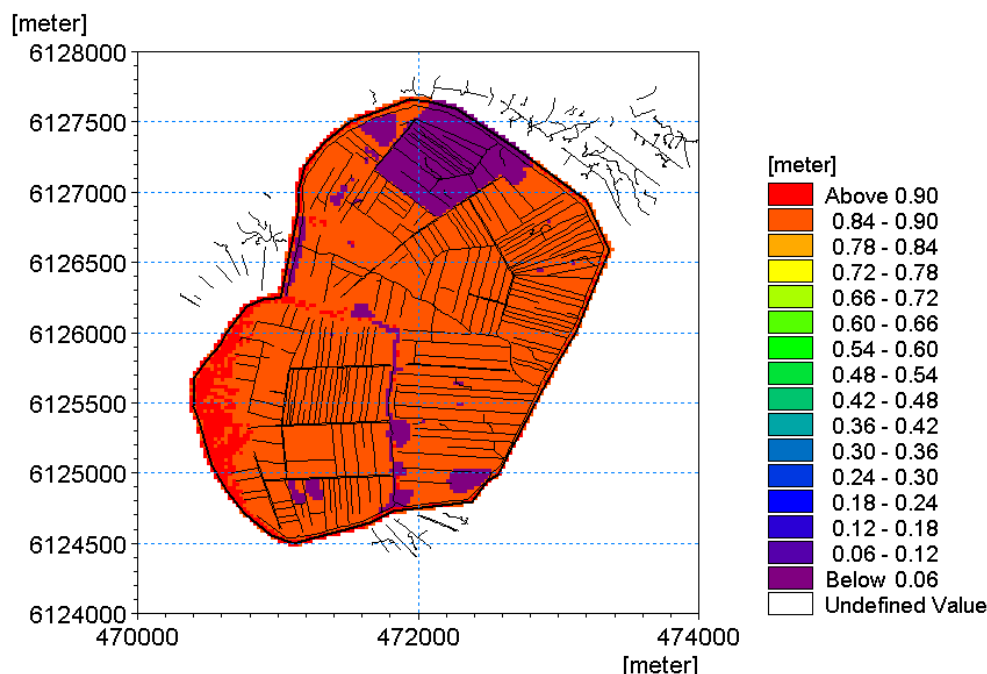
Mættet zone strømning

Strømningen i den mættede zone, dvs. under grundvandspejlet er i DK-modellen beskrevet ved 11 beregningslag med unikke magasinegenskaber for de hydrauliske ledningsevner og magasintal. Mandø-modellen er reduceret til kun at indeholde det øverste terrænnære lag (ca. 3 m), idet der ikke er behov for at undersøge de dybereliggende lag. Det terrænnære lag består primært af ler og sand, som vist for den umættede zone.

MIKE SHE har desuden mulighed for at inkludere indvindingsboringer, men der er ingen aktive indvindingsboringer af betydning på Mandø.

Dræning

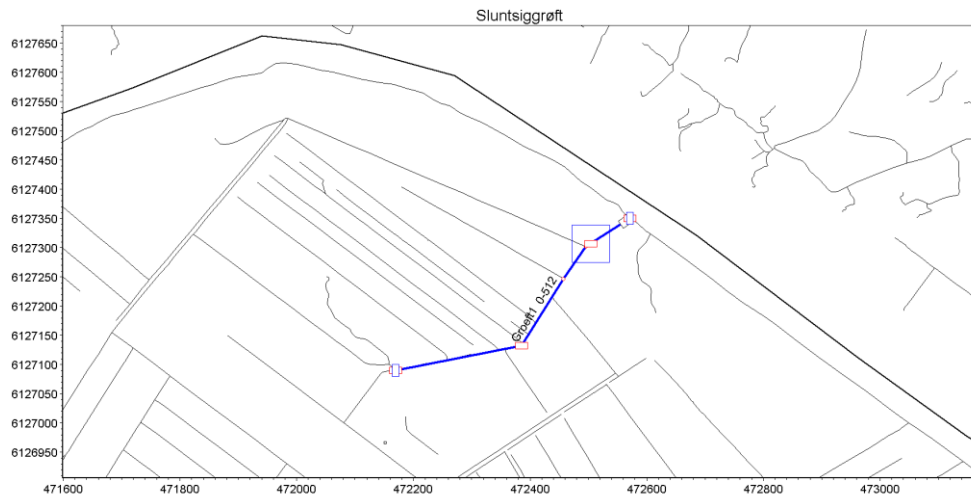
Normalt er dræning i MIKE SHE beskrevet ved et drænniveau (typisk 0,5-1,0 m under terræn) og en dræntidskonstant, der bestemmer hvor hurtigt vandet skal strømme til nærmeste vandløb eller modelranden. I denne beregning er drændybden sat til 0,9 m under terræn i det meste af området baseret på kalibreringen (se næste afsnit), se Figur 8.



Figur 8 Drændybde i modellen. De sorte streger viser grøfter og "vandløb" på Mandø.

Desuden anvendes en dræntidskonstant på $2,836e-7 \text{ sek}^{-1}$, der angiver hvor hurtigt vandet dræner til modelranden.

Den nordlige del af Mandø er i dag henlagt til et vådområde, hvor det tidligere drænede område nu er reguleret af et stemmeværk, og hvor de interne grøfter er afproppet. I modellen er dette beskrevet ved at sætte drændybden til 0 m, se Figur 8. Den større Sluntsiggrøft, hvor stemmeværket befinder sig, er modelleret med en MIKE 11 vandløbsmodel, som er direkte koblet til MIKE SHE modellen, se Figur 9. Herved kan det nedre stemmeværk i Sluntsiggrøften beskrives som et bygværk med en overløbskant i kote 0,98 m DVR90. De præcise dimensioner for grøften kendes ikke, men ud fra ortofotos er bredden vurderet til 16 m og dybden ca. 1 m, dvs. en bundkote omkring kote 0 m DVR90 i den øvre ende af grøften. Udløbet sker til digegrøften, hvor vandstanden antages at være 0 m DVR90. Selve grøften er godt 500 m lang.



Figur 9 MIKE 11 model af Sluntsiggrøft i den nordlige del af Mandø.

Randbetingelser

For at simulere dræningskanalen på indersiden af diget langs modelranden, er grundvandsspejlet i det øverste beregningslag fastholdt i en kote svarende til det ønskede vandspejl. Under de nuværende forhold er koten 0 m DVR90, dvs. svarende til havniveau.

Simuleringsperiode og tidsskridt

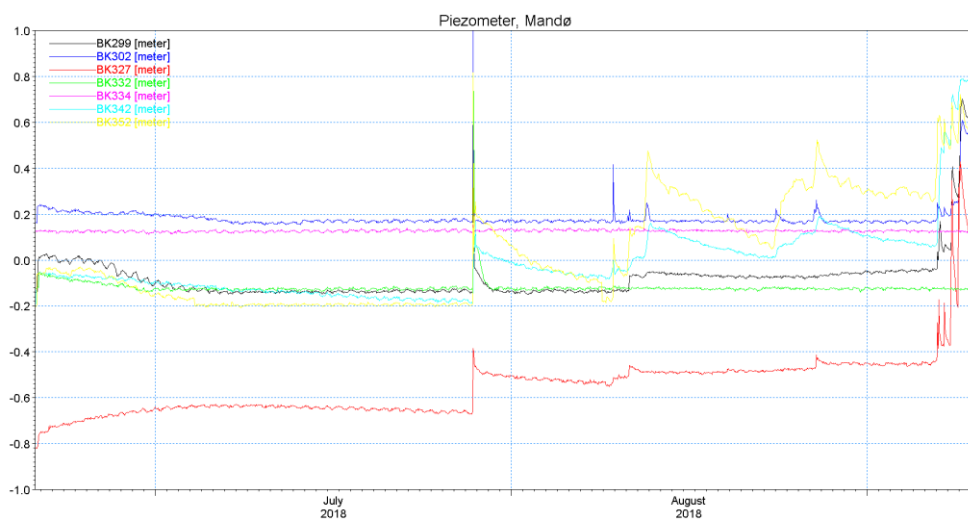
Simuleringsperioden er 02-01-1990 til 31-8-2018, svarende til tidsserierne for klimainputtet. Tidsskridtet er 2 timer for den overfladiske afstrømning (OL) og 4 timer for strømmingen i den umættede zone (UZ) og 12 timer for strømmingen i den mættede zone (SZ).

Resultater, f.eks. grundvandsspejlet i de enkelte beregningsceller, gemmes hvert døgn, mens grundvandsfluxen (grundvandsstrømning i horisontal og vertikal retning) gemmes hver 30. dag. Desuden gemmes daglige værdier af vandstand og vandføring i Sluntsiggrøften, som en del af resultaterne fra MIKE 11 vandløbsmodellen.

Kalibrering af modellen

Modellen er kalibreret ud fra syv dataloggere, der har målt vandstanden siden 20. juni 2018 og frem til 10. september 2018, hvor loggerne blev tappet for data, dvs. der findes data for en periode på knap 3 måneder, se Figur 10. Der var oprindeligt otte dataloggere, men en enkelt (BK331) kunne ikke genfindes ved tapningen af dataloggere i september 2018.

Desuden er vandstanden kalibreret ud fra ortofotos, idet et foto fra foråret 2017 viste hvilke områder af specielt den nordlige del af Mandø, der er vanddækket. Ortofoto for foråret 2017 fremgår af Figur 10.



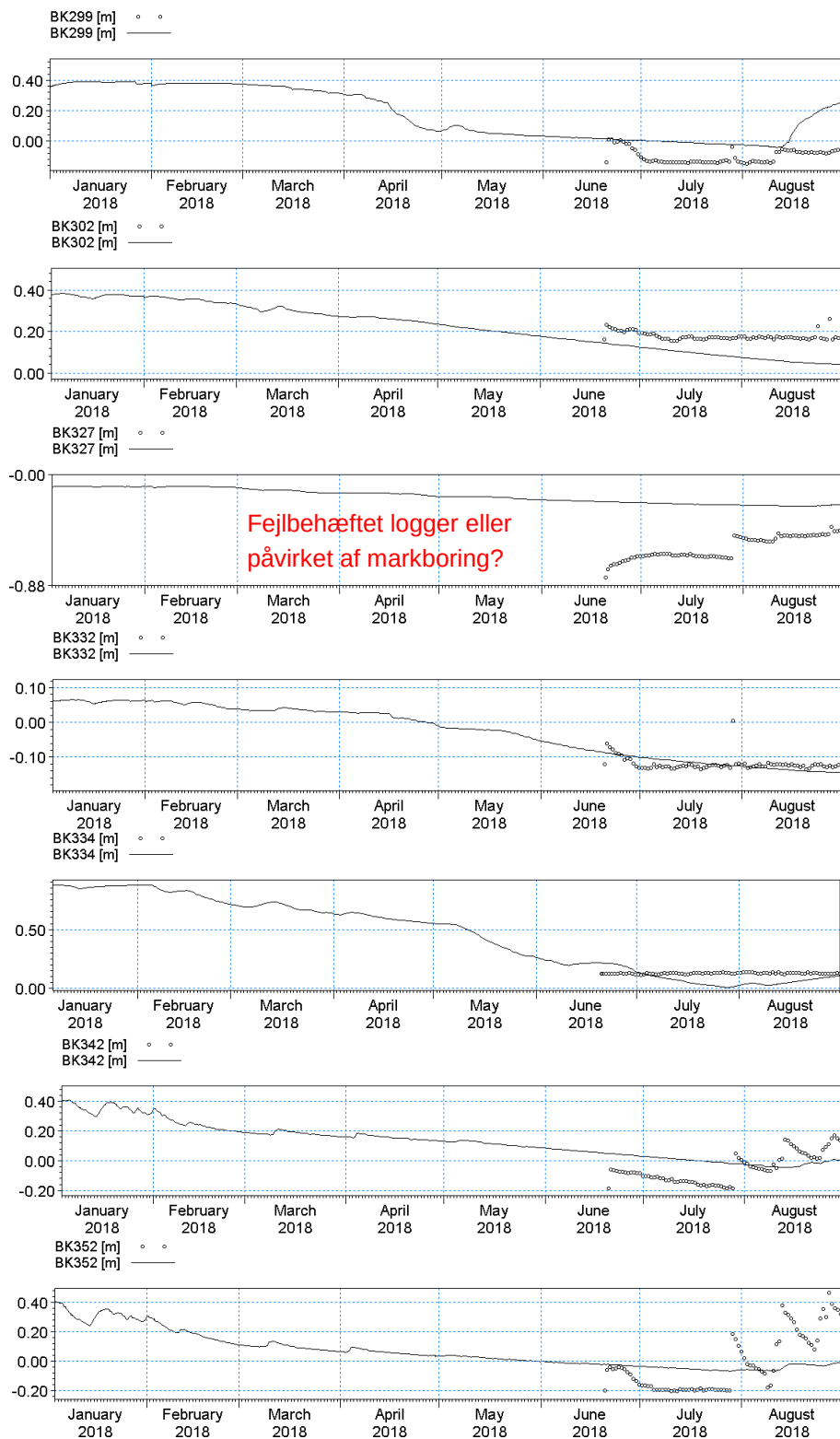
Figur 10 Syv dataloggere har målt vandstanden på Mandø siden 20. juni 2018.

Som det fremgår af Figur 10 ligger grundvandsstanden generelt tæt på kote 0 (+/- 0,2 m), bortset fra BK327, hvor vandstanden i størstedelen af perioden ligger et mindst 0,5 m under kote 0. Denne tidsserie anses imidlertid ikke for at være korrekt, idet en manuel pejling foretaget d. 10. september 2018 viste en grundvandsstand på -0,05 m DVR90, dvs. kun 5 cm under havniveau. Alle tidsserier viser et udsving (stigning) i grundvandsspejlet omkring d. 27.-28. juli 2018 i forbindelse med en nedbørshændelse, der blev registreret til 45 mm ifølge DMI.

Som en del af kalibreringen blev der justeret på drændybden, dræntidskonstanten, den hydrauliske ledningsevne for grundvandszonen samt den mættede hydrauliske ledningsevne i den umættede zone. Som ventet var det drændybden og den mættede hydrauliske ledningsevne i den umættede zone, der havde størst betydning for den simulerede vandstand. Drændybden blev kalibreret til 0,9 m under terræn for hele Mandø, dog blev drændybden sat til 0 m under terræn (svarende til ingen dræning) på Naturstyrelsens areal på den nordlige del af Mandø, hvor grøfter i dag er afproppet. Kalibreringen af parametrene for den umættede zone fremgår, som tidligere beskrevet, af Tabel 1. Kalibreringsresultatet fremgår af Tabel 2 og Figur 11.

Tabel 2 Kalibreringsresultat.

Boring	Middelfejl, ME (m)	Middel absolut fejl, MAE (m)	Kvadratafgivelses-sum, RMSE (m)	Standardafvigelse, STDres (m)
BK299	-0,128	0,129	0,149	0,077
BK302	0,092	0,092	0,098	0,034
BK327	-0,342	0,342	0,355	0,096
BK332	0,002	0,016	0,038	0,038
BK334	0,049	0,070	0,077	0,059
BK342	-0,047	0,109	0,121	0,111
BK352	0,028	0,155	0,190	0,188
Middel	-0,049	0,130	0,147	0,086



Figur 11 Kalibrering af grundvandsmodellen for Mandø.

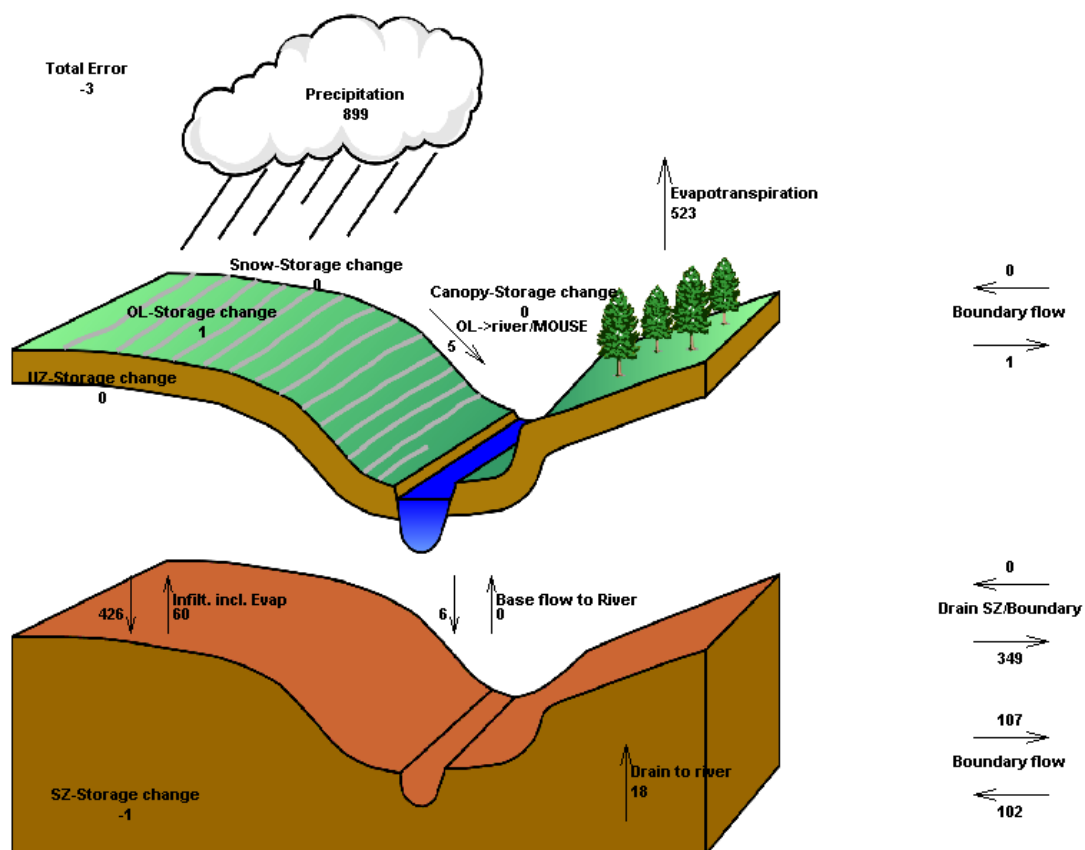
Som det fremgår af Tabel 2 og Figur 11 er niveauet for grundvandsspejlet rimeligt godt kalibreret med en middelfejl på blot 4,9 cm. Dette tal dækker imidlertid over et spænd på middelfejlen på op til 34 cm for de enkelte pejleboringer. Dette er dog den tidligere boring BK327, som ikke vurderes at vise troværdige observerede pejlinger. Det kan evt. også skyldes påvirkning fra en lokal markboring, der ikke er inkluderet i modellen.

Dynamikken er ligeledes svær at matche, hvilket skyldes, at vandstanden er meget styret af vandstanden i de enkelte grøfter, der afhænger af de lokale forhold såsom opstemninger og rørlagte strækninger. Dette detaljeringsniveau er ikke inkluderet i modellen på nuværende tidspunkt.

Resultater

Vandbalance

På baggrund af beregningen for perioden 2011-2018 kan der laves en vandbalance, hvilket er vist på Figur 12. Vandbalancen er udtrukket for perioden 2012-2017, idet det første år (2011) benyttes til "opvarmning" af modellen. Perioden fra 1. januar til 31. august 2018 er heller ikke inkluderet i vandbalancen, idet det giver bedst mening af lave vandbalancen for et helt antal år, dvs. fra 1. januar til 1. januar. Vandbalancen viser, at nedbøren i gennemsnit er 899 mm/år, mens fordampningen er 523 mm/år. Dette giver en nettonedbør på 376 mm/år. I grundvandszonen sker en nettoudstrømning 6 mm/år fra modelområdet, mens drænastrømningen er på 349 mm/år. Overordnet set kan vandbalancen beskrives ved at nettonedbøren på 376 mm/år fordeles på ca. 350 mm/år til drænastrømning og ca. 30 mm/år til vandløb (Sluntsiggrøften). I praksis bør der ikke skelnes mellem vandløb og dræn, men i modellen er det kun Sluntsiggrøften, der er beskrevet som et vandløb i modellen, mens resten er beskrevet som dræn. Vandbalancen i tabelform fremgår af Tabel 3. Som det fremgår af tabellen er der en mindre vandbalancefejl, som opstår i udvekslingen mellem vand på terræn og i grundvandszonen. Det er primært beregningscellerne i digegrøften, der oplever en vandbalancefejl, som dog ikke påvirker de beregnede vandstande.



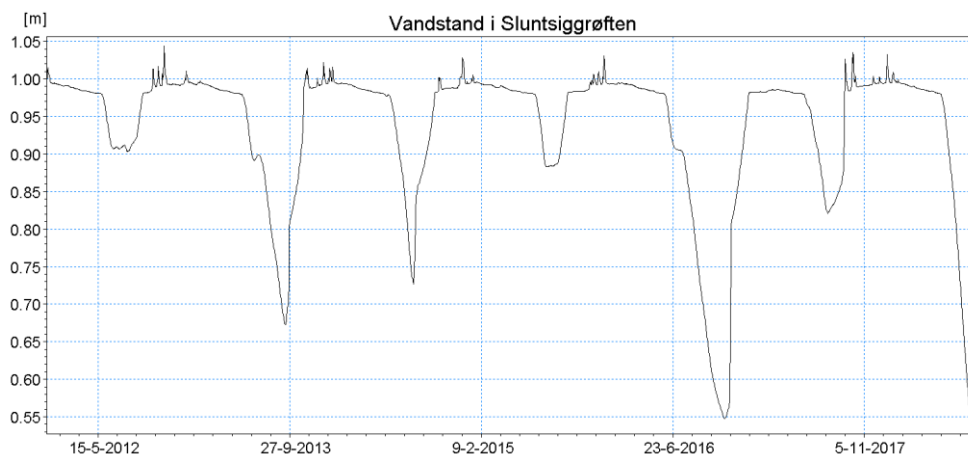
Figur 12 Vandbalance for Mandø lokalmode. Enheden er mm/år og tallene repræsenterer et gennemsnit for perioden 2012-2017.

Tabel 3 Vandbalance (mm/år) for perioden 2012-2017. Pga. afrunding kan tallene afvige en anelse fra figurene.

Parameter	mm/år
Nedbør	899
Fordampning	523
Nettonedbør	376
Randstrømning (pos. ud)	1
GV-strømning (pos. ud)	6
Dræn til rand	349
Dræn til vandløb	18
Baseflow til vandløb	6
Overfladisk afstrømning til vandløb	5
Magasinerings	0
Vandbalancefejl	-3

Vandstand i Sluntsiggrøften

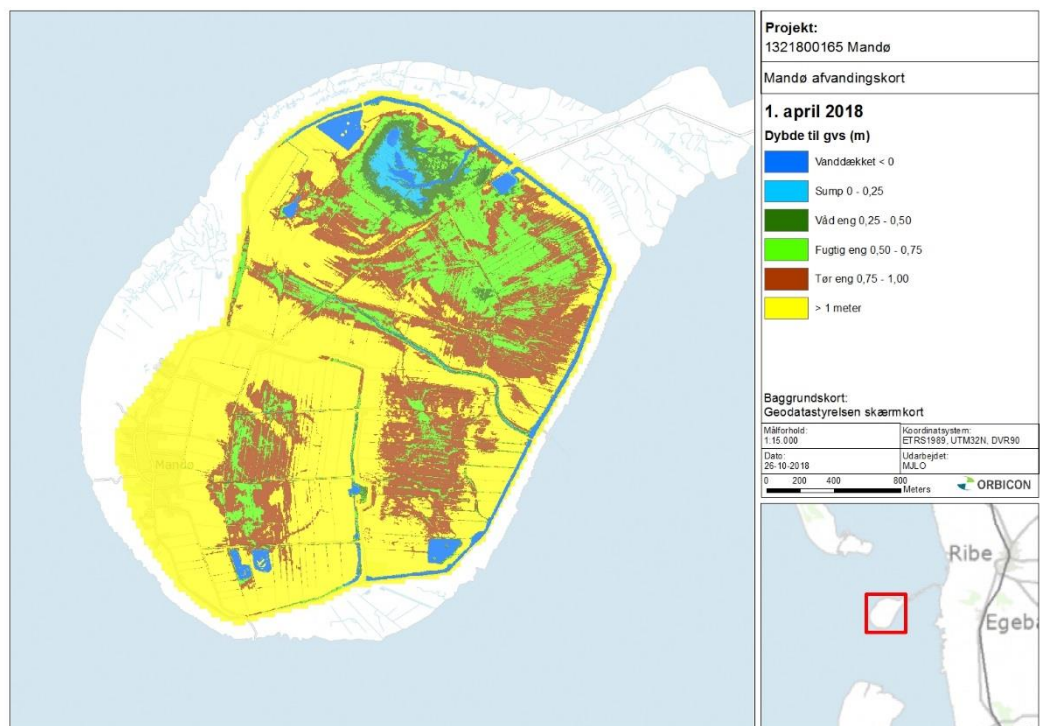
Vandstanden i Sluntsiggrøften er beregnet med modellen, og den simulerede vandstand er vist på Figur 13. Der findes, så vidt vides, ikke målte vandstande for grøften, men det fremgår af figuren, at området er vandmættet om vinteren, hvor vandstanden er defineret af overløbskanten i kote 0,98 m DVR90. Om sommeren falder vandstanden med op til ca. 45 cm.



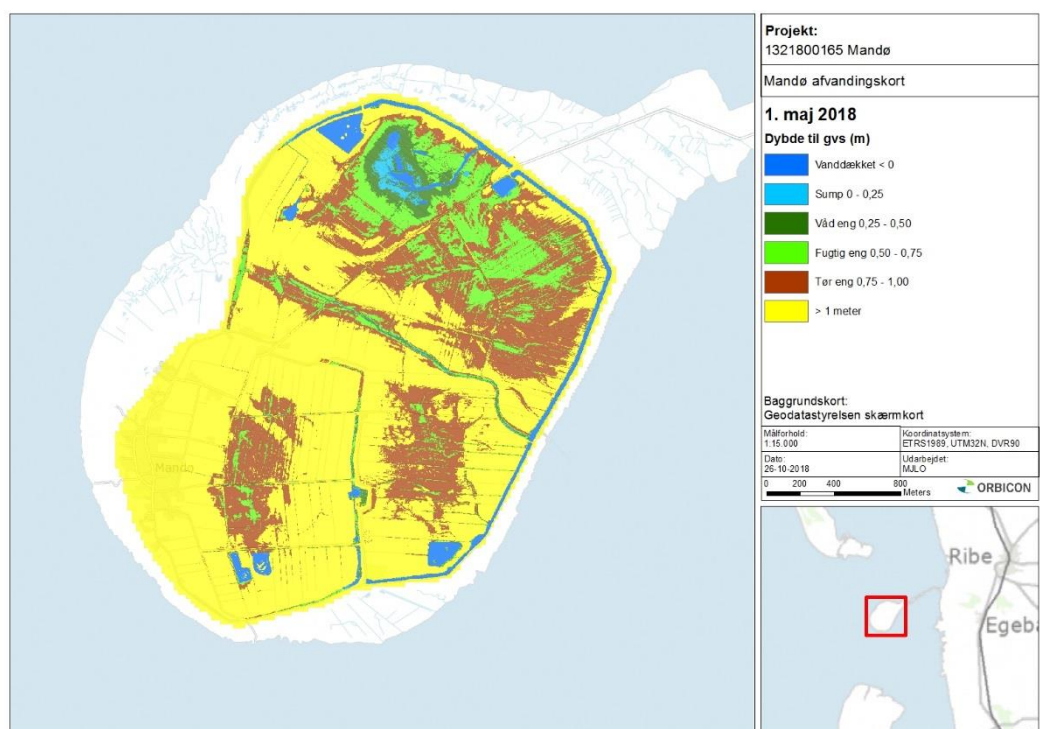
Figur 13 Simuleret vandstand i Sluntsiggrøften.

Konsekvenskort for afvandingsdybden

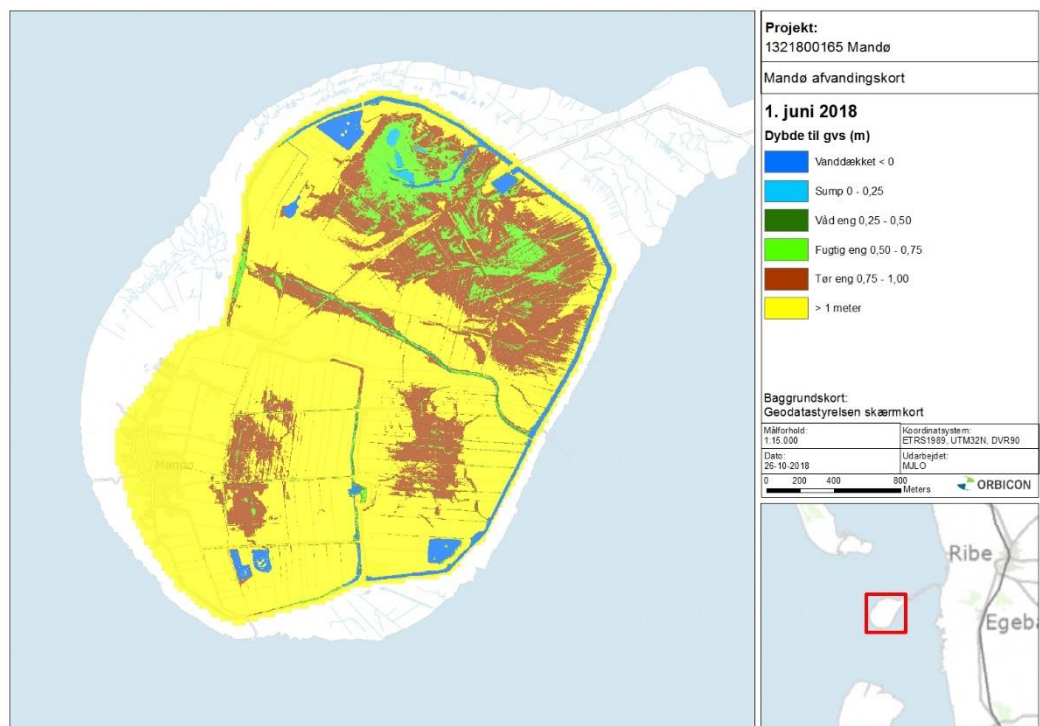
Ud over vandbalancen for Mandø og vandstanden i Sluntsiggrøften er der beregnet konsekvenskort for vandstanden i området. Der er beregnet konsekvenskort for følgende snapshots 1. april, 1. maj, 1. juni, 1. juli, 1. august og 31. august 2018. Konsekvenskortet er defineret som dybden til grundvandsspejlet og er fundet ved at trække grundvandsspejlet fra terrænkoten. På Figur 14 til Figur 19 ses de seks snapshots.



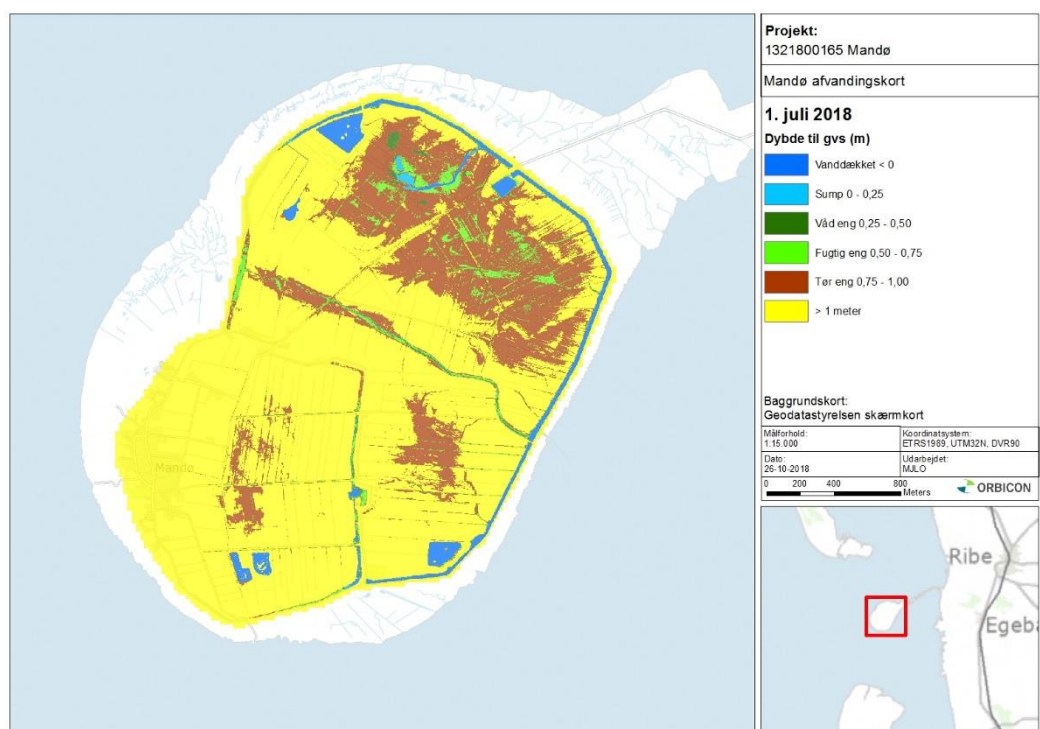
Figur 14 Konsekvenskort af afvandingsdybde for 1. april 2018.



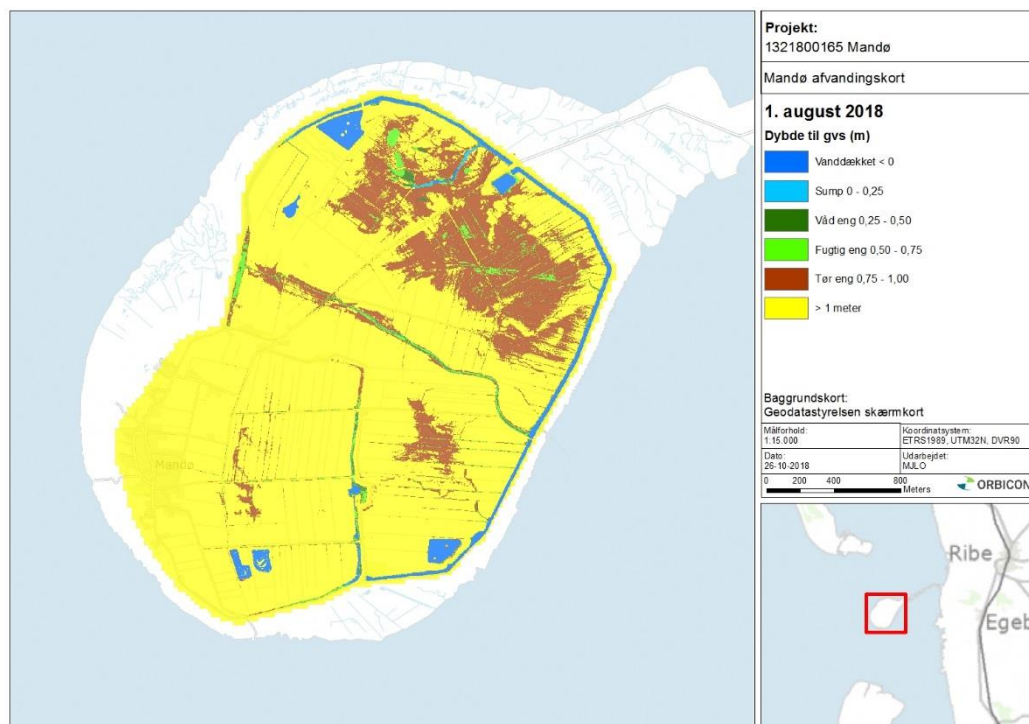
Figur 15 Konsekvenskort af afvandingsdybde for 1. maj 2018.



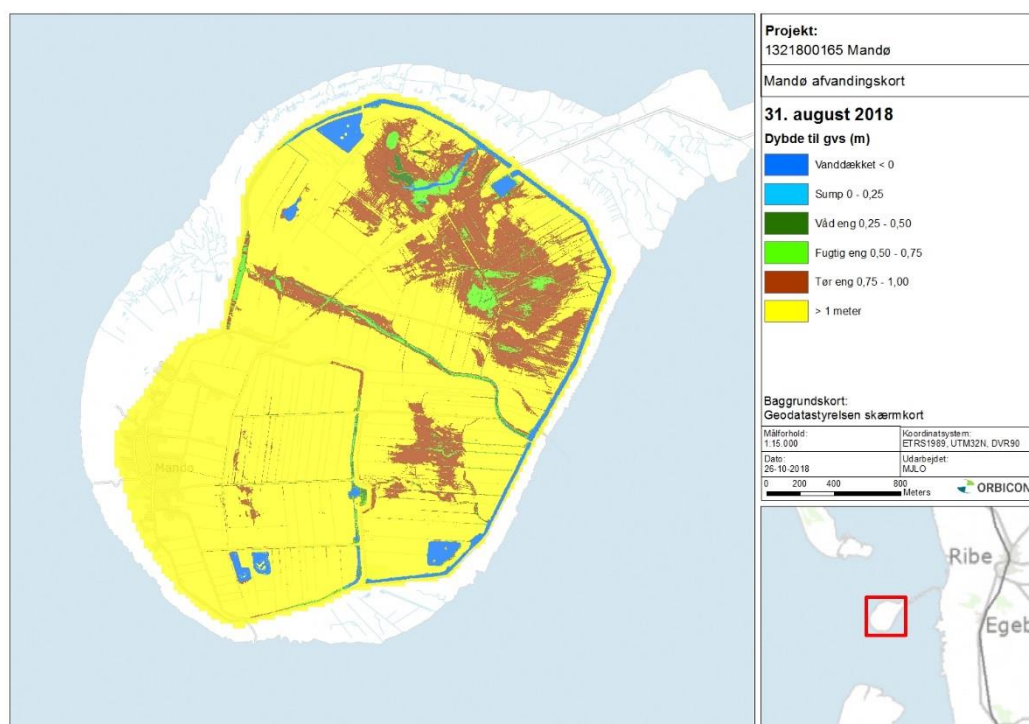
Figur 16 Konsekvenskort af afvandingsdybde for 1. juni 2018.



Figur 17 Konsekvenskort af afvandingsdybde for 1. juli 2018.



Figur 18 Konsekvenskort af afvandingsdybde for 1. august 2018.



Figur 19 Konsekvenskort af afvandingsdybde for 31. august 2018.

Konklusion og videre arbejde

På baggrund af DK-modellen er der opstillet en lokal MIKE SHE model for Mandø i 25 m grid, hvor DK-modellen anvender et 500 m grid. Modellen er opdateret i forhold til DK-modellen på en lang række punkter, bl.a. terrænmodellen, arealanvendelse, den umættede zone og geologien i de øverste ca. 3 m. Desuden er modellen udvidet mht. klimadata for perioden 2011-2018 (31. august).

Modellen er kalibreret mod målte vandstande fra syv dataloggere for en periode på ca. 3 måneder samt ortofotos af det frie vandspejl på den nordlige del af øen. Herefter er der udtrukket snapshots af grundvandsspejlet, som er omregnet til en afvandingsdybde ved at trække grundvandsspejlet fra terrænmodellen. Terrænmodellen er ændret i forhold til Danmarks digitale højdemodel for 2015, idet søer og større grøfter er stemplet ved i terrænet, så det er bunden af søer, klæggrave osv. der er beskrevet i terrænmodellen i stedet for et vandspejl, som i den oprindelige højdemodel.

Modellen er overordnet set i stand til at beskrive vandstanden på Mandø. Dog er dynamikken i de enkelte pejleboringer ikke særlig godt beskrevet, mens niveauet til gengæld er fint beskrevet. Dynamikken i grundvandsspejlet formodes at være styret af lokale forhold som mindre grøfter og dræn, opstemninger samt rørlagte strækninger. Dette er ikke detaljeret beskrevet i modellen, og modellen vil derfor med fordel kunne opdateres ved at inkludere større grøfter og de stemmeværker, der måtte eksistere på øen ud over det nedre stemmeværk i Sluntsiggrøften. Herefter vil modellen også i højere grad kunne bruges til at simulere forskellige tiltag med afpropning af grøfter og projektforslag med naturlig hydrologi.