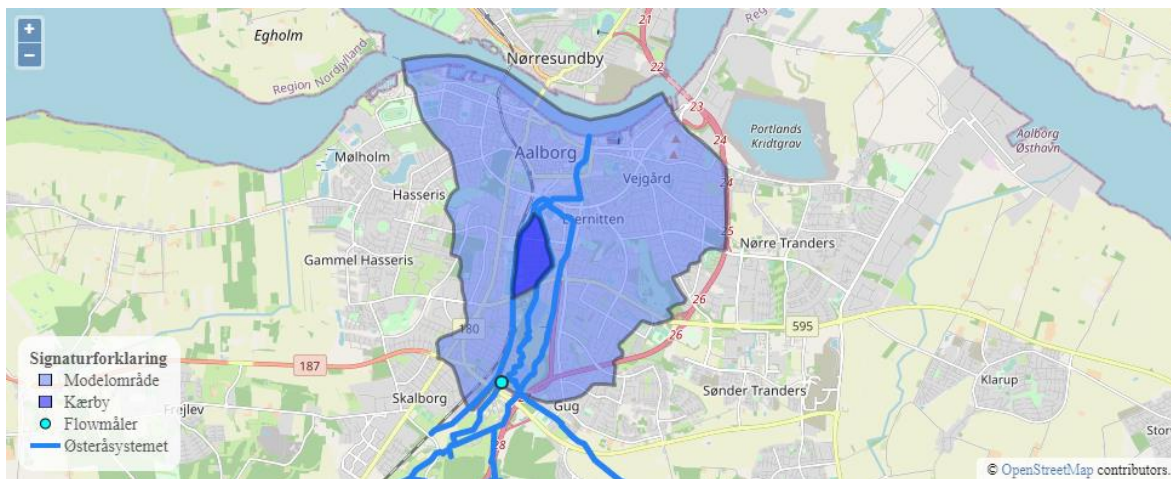


Bilag A: Modelopstilling

Modelområde

Modelområdet er illustreret på Figur A1. Området er afgrænset af Limfjorden i den nordlige retning. Mod vest afgrænses området af og Hasseris Kalkø og mod øst afgrænses det af Tranders Kalkø. Derudover forbinder den sydlige afgræsning den vestlige og østlige afgræsning over Hobrovej syd for Kærby. Modelområdets nordlige, vestlige og østlige afgræsning følger Østerås hydrologiske opland [1], hvorimod den sydlige afgræsning deler Østerås opland i to ved en målestation, der måler vandføringen i Østerå ind i Østerådalen.



Figur A1: Modelområde afgræsning.

Kærby er et byområde i Østerådalen omkranset af vandløbet Østerå og grøfterne Vestre og Østre Landgrøft, hvor vandløb og grøfter udmunder i Limfjorden, som illustreret på Figur . Området i og omkring Kærby har et terrænnært grundvandsspejl, der sammen med højt vandspejl i Østerå i vintermånederne skaber problemer med indsvivende vand i kældre og afløbssystemer samt våde grunde. Modelområdet er urbant med mindre grønne arealer, hvorimod Kærby har mere grønt areal med bl.a. to fodboldbaner, hvilket også afspejles i arealfordelingen i Tabel A1.

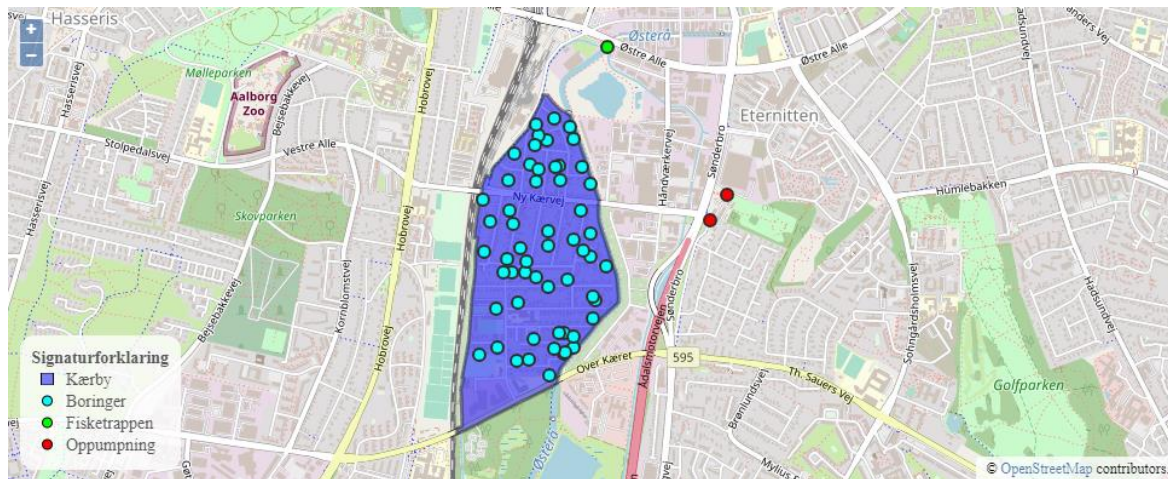
Tabel A1: Arealfordeling i modelområdet.

Arealfordeling	Kærby	Modelområde
Overfladeareal	60 ha	1700 ha
Befæstet areal	40 %	84 %

Hydrogeologisk model

En hydrogeologisk model beskriver de enkelte geologiske lags geofysiske og hydrauliske egenskaber. Den hydrogeologiske model er en fortolkning af de geologiske lags rumlige fordeling afhængigt af deres hydrauliske egenskaber. Den hydrogeologiske model forsimpler derved den geologiske model ved at sammenkoble geologiske enheder med samme hydrauliske egenskaber. Opstillingen af den hydrogeologiske model er baseret på DK-mo-

dellen [2], men den lokale geologi i Kærby er opdateret med en mere detaljeret/lokal fortolkning af den terrænnære geologi. Den lokale geologi er inspiceret gennem en række prøveudtagninger fra 57 boringer foretaget i 2021 i forbindelse med etablering af citizens science målestationerne (Figur A1). Alle boringerne med jordprofiler er indberettet til GEUS's jupiter database. Dybden på boringerne varierer mellem ca. 2-3 meter under terræn.



Figur A1: Boringer med prøveudtagninger.

Hydrologiske afgrænsninger

I grundvandsmodeller defineres der typisk to typer af afgrænsninger: Ydre og indre randbetingelser. De ydre randbetingelser beskriver, hvordan grundvandsmodellen interagerer med det omkringliggende miljø (atmosfæren, tilstødende landområder og havet). Indre randbetingelser beskriver vandudveksling i vandkredsløbet (f.eks. oppumpning af drikkevand).

Indre randbetingelser

De indre randbetingelser består af udveksling mellem grundvandet og andre dele af vandkredsløbet, der ikke er en del af grundvandsmodellen. Det er f.eks. oppumpning af grundvand og ind- og udsivning fra og til vandløb. I Kærby-området er der oppumpning af grundvand på det gamle vandværk på Sønderbro 53. I selve Kærby byområdet eksisterer der også en række mindre private oppumpninger af grundvand fra f.eks. kældre og lign., der ikke er medtaget i grundvandsmodellen. I grundvandsmodellen er oppumpninger af grundvand simuleret via MODFLOW's WEL modul, hvor pumpemængderne er udtrykt fra indberetninger til Jupiter databasen. Østeråsystemet løber mod nord sammen med Vestre og Østre Landgrøft igennem Østerådal og samles ved fisketrappen før, åløbet udmunder i Limfjorden. Vandløbene er i modellen medtaget for at simulere ind- og udsivningen fra vandløbene afhængigt af vandstanden i vandløbene og placeringen af grundvandsspejlet ved brug af MODFLOW's RIVER modul.

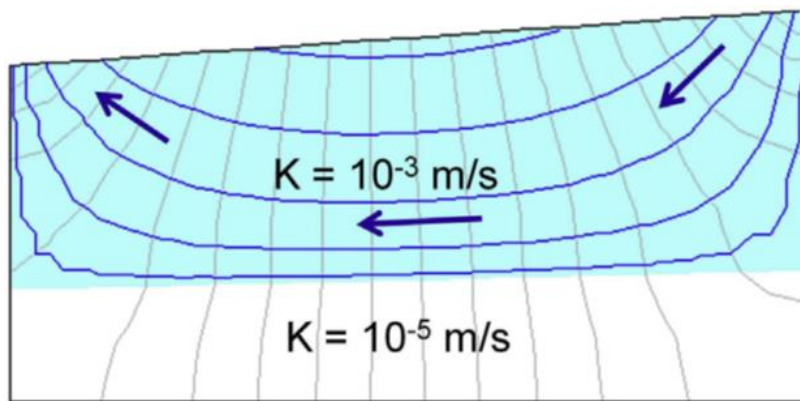
Der er en relativ høj indsivning af grundvand til de aldrende afløbssystemer i Aalborg. I Kærby-området er der målt en grundvandsindsivning under tørvejrperioder på omkring 4-6 gange spildevandsproduktionen i oplandet. Dermed har afløbssystemet en drænende effekt på grundvandsspejlet i de lavtliggende områder i Aalborg by. Afløbssystemet i Aalborg er inkluderet i modellen som dræn. I Kærby eksisterer der data til at bestemme vandvolumen på grundvandsindsivningen til afløbssystemet, hvorfor modellen er kalibreret ind til at

have en fejl på ca. 15 % over en semi-stationær periode. For den resterende del af afløbssystemet i Aalborg er dræningen fra afløbssystemet kalibreret efter målinger af vandspejlskoten, se kalibreringsafsnit.

Ydre randbetingelser

Grundvandsdannelsen til det øvre lag er udtrækket fra den Hydrologiske Informations- og Prognosesystem's (HIP) resultatdatabase og er simuleret af DK-modellens to-lagsmodel, der beregner grundvandsdannelsen ud fra nedbør, aktuell fordampning og vandindholdet i rodzonen. Dermed er den umættede zone ikke med i grundvandsmodellen, hvilket er antaget som acceptabelt grundet en lille umættet zone i Kærby med en tykkelse på 1-1,5 meter.

Grundvandsmodellens vertikale udstrækning er fastsat til 50 meter under toppen af kalken, hvor den dybere kalk antages impermeabel. Den nedre randbetingelse mellem den øvre og nedre kalk er derfor afspejlet med ingen vandudveksling (se Figur A3).



Figur A3: De øvre 50 meter af kalken er antaget at have en betydelig højere hydraulisk ledningsevne med en faktor to, hvilket er nok til at danne en separation af flow mellem det øvre og nedre kalklag [3, 4].

For den nordlige afgrænsning er trykniveauet i det øverste lag sat til at være i det semi-stationære havniveau i kote 0. For de dybere lag er det antaget, at der ingen vandudveksling forekommer på tværs af Limfjorden. For den vestlige, østlige, og sydlige afgrænsning er der fastholdt et trykniveau i alle lag, hvor trykniveauet er udtrækket fra HIP's periodevise stationære modelresultater.

Hydrauliske egenskaber

De hydrauliske egenskaber beskriver evnen for et geologisk lag til at transportere og opmagasinere vand og er bestemt af partikelstørrelse og forbindelsen mellem porehulrummene. Den hydrauliske ledningsevne beskriver hvor hurtigt vand gennemstrømmer et geologisk jordlag. Typisk har sand- og grusaflejringer en høj hydraulisk ledningsevne og modsat har leraflejringer en lavere hydraulisk ledningsevne. Den hydrauliske ledningsevne varierer typisk indenfor de enkelte jordlag. Typisk er der også retningsbestemt variation (anisotropi), der afhænger af den orientering, som jordlagene blev aflejret i.

Grundet manglende viden om rumlig udstrækning og hydrauliske egenskaber af de enkelte jordlag, så er det nødvendigt at sammenkoble jordlag med mindre udstrækning og beskrive dem med effektive hydrauliske parametre. Typisk er tynde sandlag, sprækker, og lignende i lerlag således ikke tilstede i den hydrogeologiske model, men er i stedet beskrevet via en højere hydraulisk ledningsevne i lerlaget. De hydrauliske ledningsevner for de forskellige lag er givet i Tabel A2.

Tabel A2: Hydrauliske ledningsevner brugt i DK-modellen.

Jordlag	Horisontal hydraulisk ledningsevne (m/d)	Anisotropifaktor
Sand	3.32E-04	10
Sand og ler	6.37E-05	10
Ler	6.02E-07	10
Sand	2.71E-04	10
Ler	5.65E-08	10
Sand	2.71E-04	10
Ler	2.13E-07	10
Sand og ler	5.62E-05	10
Prekværtært ler	5.66E-08	10
Prekværtært sand og ler	9.18E-05	10
Kalk	1.00E-05	10

De hydrauliske ledningsevner vist i Tabel A2 er brugt som udgangspunktet for modelkalibreringen (se kalibreringsafsnit), og er derfor ikke de endelige hydrauliske ledningsevner.

Modelopstilling

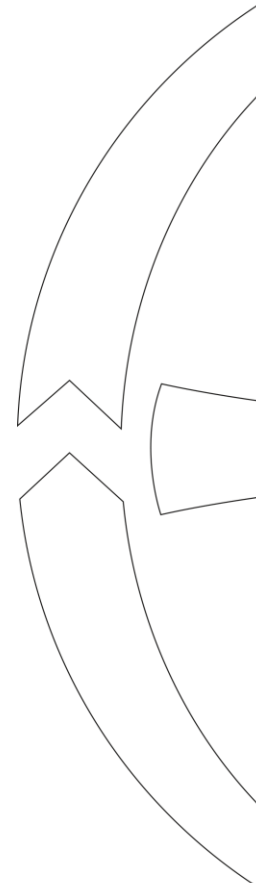
Grundvandsmodellen er en deterministisk og fuldt distribueret model, som beskriver de væsentligste strømningsprocesser i det hydrologiske kredsløb. Modellen beskriver tre-dimensionel grundvandsstrømning i den mættede zone samt én-dimensionel drænvandsindstrømning.

Modellen er stationær (uforandret over tid), hvilket gør, at modelresultaterne viser periodevise konstante tilstande, men kan ikke bruges til at simulere enkelthændelser. Modellen er opstillet i MODFLOW 2005 modelkoden og er opbygget via flopy version 3.3.2.

I modelopsætningen er følgende moduler fra MODFLOW anvendt:

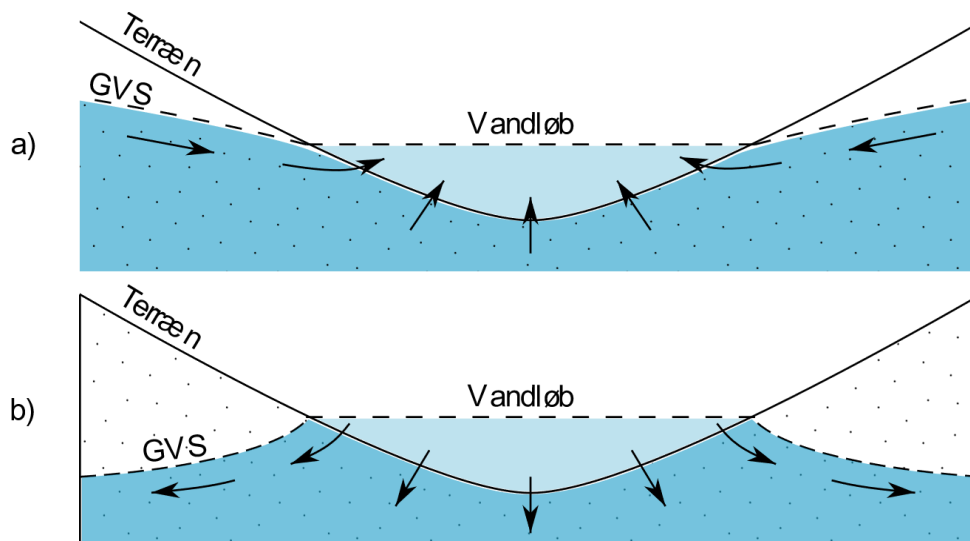
- River Package (RIV)
- Drain Package (DRN)
- Well Package (WEL)
- Discretization File (DIS)
- Upstream Weighting Package (UPW)
- Basic Package (BAS)
- Recharge Package (RCH)
- Time-Variant Specified-Head Package (CHD)
- Output Control (OC)

I nedenstående gennemgås kun de moduler, hvori der indgår variabler, der senere kalibreres. For de resterende moduler henvises der til MODFLOW's manual.



River Package (RIV) - Modelling af vandløb

Vandløb er modelleret som en trykniveau-afhængig flux, der simulerer vandtransporten mellem vandløb og grundvand. Størrelsen på fluxen er afhængig af trykniveauet i vandløbet og i grundvandet, hvor vandtransporten mellem vandløb og grundvand afhænger af trykgradienten. Dette betyder, at hvis vandstanden i vandløbet er under koten på trykniveauet i grundvandet, så vil grundvandet sive ind i vandløbet. Omvendt så vil vand fra vandløbet sive ud til grundvandet, hvis trykniveauet i grundvandet er under vandspejlskoten for vandløbet, se Figur A4.



Figur A4: Illustration af vandtransport mellem grundvand og vandløb. a) situation hvor grundvandsstanden er højere end vandstanden i vandløbet, hvorfor grundvandet strømmer til vandløbet. b) situation hvor grundvandsstanden er lavere end i vandløbet, hvorfor vand fra vandløbet siver ud til grundvandet.

Fluxen (Q) mellem vandløb og grundvandet er modelleret ved formlen nedenunder, hvor $h_{\text{vandløb}}$ og $h_{\text{grundvand}}$ er vandstanden og trykniveau i hhv. vandløbet og grundvandet. Konduktansen (C_{riv}) er en konstant, der kalibreres (se kalibreringsafsnit):

$$Q = C_{\text{riv}} * (h_{\text{vandløb}} - h_{\text{grundvand}})$$

I modelområdet er Østeråsystemet, Vestre og Østre Landgrøft implementeret som vandløb i de åbne sektioner, hvorimod de lukkede kanaler ikke er inkluderet i modellen, se Figur .

Drain Package (DRN) - Modelling af dræn og utætte afløbssystemer

Dræn er ligesom vandløbene modelleret som en trykniveauafhængig flux, der har en konduktans som proportionalitetsfaktor. Dræn er typisk kendt fra landbruget, hvor landmanden dræner markerne for vand, der derefter ledes til en grøft, vandløb eller lign. I urbane områder kan de ældre dele af afløbssystemet være meget utætte, hvorfor der ofte forekommer en stor indsvivning af grundvand til afløbssystemet. Interaktionen mellem grundvand og afløbssystemer og dræn er modelleret ved differensen mellem vandstand i drænet og grundvandsspejlets niveau. Forskellen mellem DRN-modulet og RIV-modulet er, at hvis grundvandsstanden er under drænets niveau, så påvirker drænet ikke længere grundvandet. Derfor er formlen nedenunder meget ens med formlen for flux til vandløbene.

Når $h_{\text{grundvand}} > h_{\text{dræn}}$:

$$Q = C_{\text{drn}} * (h_{\text{dræn}} - h_{\text{grundvand}})$$

Når $h_{\text{grundvand}} < h_{\text{dræn}}$:

$$Q = 0$$

Konduktansen, C_{drn} , for drænmodulet er også medtaget i kalibreringen.

Modelgrid og modeltopografi

Modellen er opstillet i UTM zone 32 EUREF89 og har en rumlig opløsning på 5 gange 5 meter. Modellen er 3-dimensionel med en horisontal opløsning på 5 gange 5 meter og 11 geologiske lag med varierende tykkelser. Modeltopografien er baseret på DHM/Terræn raster på 2,5 meter aggregeret til 5 meter [6]. Til at opstille det 3-dimensionelle grid er programmet GRIDGEN anvendt.

Kalibrering og validering

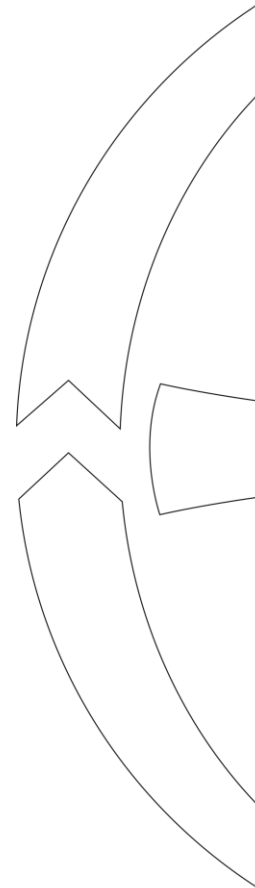
Grundvandsmodellen er kalibreret og valideret ved anvendelse af optimeringsprogrammet PEST, der er en algoritme, der "automatiserer" kalibreringen og hjælper med parameterestimering. Modellen er kalibreret og valideret efter trykniveau udtrukket fra Jupiter databasen og grundvandsstandsmålinger foretaget under GRAVA-projektet.

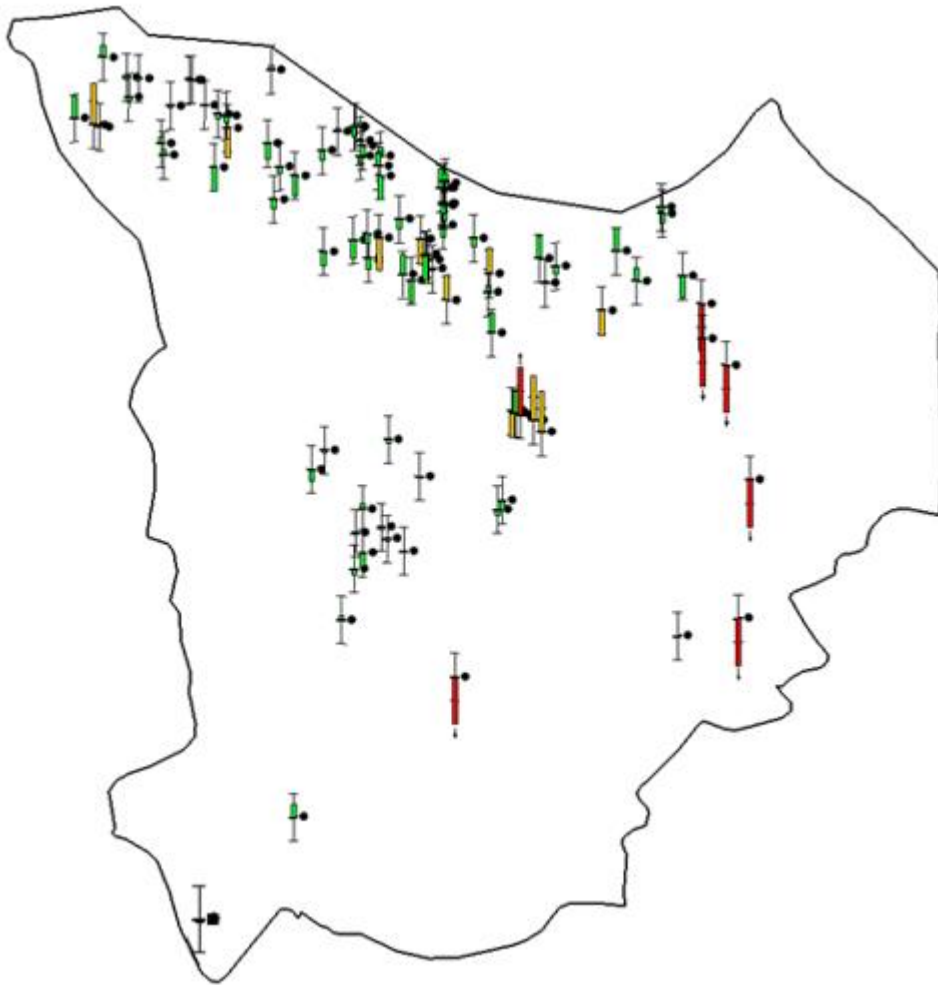
Observationer fra Jupiter databasen er screenet for manglende rumlige koordinater (x, y, og indtagsdybde) og derefter placeret i modellens beregningslag. Efter nærmere inspektion er der ikke altid overensstemmelse med den observerede geologi fra Jupiter og typen af den geologiske formation i beregningslaget. Det er dog valgt at fokusere på at få en korrekt dybde på Jupiter databasens observationer fremfor at få observationen placeret i den observerede geologiske type. Observationerne er delt i to komplimenterende datasæt, hvor der er fokuseret på at få en god rumlig fordeling af observationer i begge datasæt.

Efterfølgende er der foretaget en manuel frasortering af observationer baseret på følgende kriterier:

- Mindre end 500 meter fra modelranden
- Forskel på mere end 5 meter mellem nærliggende observationer i samme dybde
- Trykniveau over terræn

I kalibreringsprocessen er der lagt vægt på at minimere fejlen mellem de observerede og simulerede trykniveauer fornuftigt over hele modelområdet. Fejlen mellem det observerede og simulerede trykniveau er også kaldet for modellens residual og er illustreret rumligt på Figur A5 og kvantitativt på Figur A6.

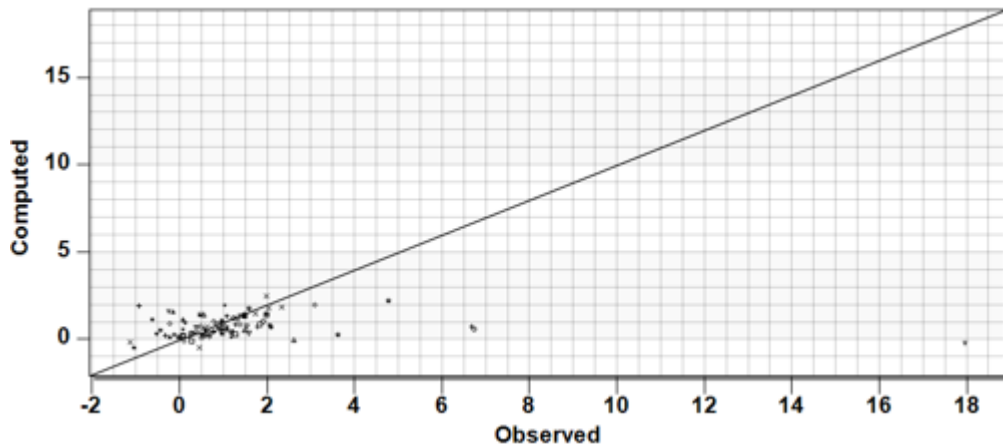




Figur A5: Rumlig fordeling af modelfejl med såkaldte "error-bars". Figuren viser afvigelsen mellem observationer og simulerede trykniveauer. En grøn farve betyder, at afvigelsen er under 20 %, hvor en gul farve indikerer en afvigelse på 50 % og rød er over 100 %.

Af Figur A5 fremgår det, at der generelt er et problem med at simulere trykniveauet i den østlige del af modelområdet, hvor der derimod findes en god overensstemmelse mellem tilgængelige observationer i og omkring Kærby og i det nordlige og vestlige modelområde. Kun få observationer er tilgængelige i den sydlige del af modelområdet, hvorfor det er svært at konkludere parameterestimeringen i dette område.

Det har ikke været muligt at få modelresidualet i den østlige del af modelområdet ned på et acceptabelt niveau, hvilket også kan observeres på Figur A5, hvor der for nogle punkter ikke er sammenhæng mellem observationer og simulerede trykniveauer. Fælles for observationerne i det østlige område er, at de alle ligger i højt terræn med en lav dybde til indtaget (mellem 1 til 8 meter), hvorfor det kan skyldes et terrænnært grundvandsreservoir. Det vil i så fald kræve en mere detaljeret geologiske undersøgelser af området for at kunne kalibrere modellen i dette område.



Figur A6: Observeret og simuleret trykniveau. Bemærk "afstikkerne" er sammenfaldende med observationerne i det østlige modelområde.

I Tabel A3 er den gennemsnitlige simuleringsfejl fundet til at være under 1 meter, hvor de seks observationer med terrænnære observationer i den østlige del af modelområdet er ekskluderet. Hvis kun observationer indenfor Kærby medtages falder den gennemsnitlige fejl til under 40 centimeter.

Tabel A3: *Mean Absolute Error (MAE) og **Root Mean Square Error (RMSE) for modelresidualerne. Bemærk at de østlige observationer er ekskluderet.

Scenarie	MAE* [m]	RMSE** [m]
Kalibrering	0.58	0.81
Validering	0.76	0.99

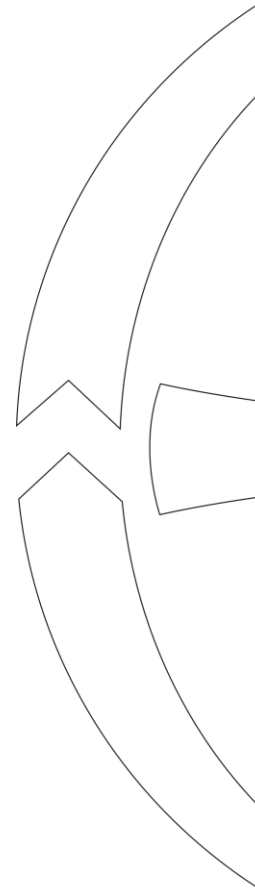
De endelige kalibrerede parameterværdier er vist i Tabel A4 nedenunder. Antagelsen om at flere større sammenhængende homogene lag kan beskrives med en enkelt hydraulisk ledningsevne viste sig dog ikke at være muligt i lag 1, 2, 8 og 10. Derfor de førnævnte lag er inddelt i en række zoner, hvor hver zone har fået tildelt en unik hydraulisk ledningsevne. Dette skyldes bl.a., at kalken i lag 10 generelt er mere opsprækket på kalkøerne (Hasseris og Tranders kalkbakker), hvorfor de har fået tildelt en højere ledningsevne end kalken i det lavtliggende terræn.

Tabel A4: De endelige kalibrerede parameterværdier.

Parameter	Konduktans (m ² /d/m)	Hydraulisk ledningsevne (m/d)
Kloak del 1	3.33E-05	-
Kloak del 2	4.82E-01	-
Kloak del 3	6.74E-01	-
Kloak del 4	8.54E-02	-
Vandløb del 1	1.16E+00	-
Vandløb del 2	3.91E-03	-

Lag 1 zone 1	-	8.64E+01
Lag 1 zone 2	-	1.01E+00
Lag 1 zone 3	-	3.26E+00
Lag 2 zone 1	-	3.04E-01
Lag 2 zone 2	-	5.68E+01
Lag 2 zone 3	-	1.02E-03
Lag 3	-	1.87E-01
Lag 4	-	8.60E+02
Lag 5	-	4.98E-03
Lag 6	-	8.00E-02
Lag 7	-	6.14E-02
Lag 8 zone 1	-	3.27E-02
Lag 8 zone 2	-	5.48E-02
Lag 8 zone 3	-	3.17E-03
Lag 9	-	8.60E-01
Lag 10 zone 1	-	2.02E+00
Lag 10 zone 2	-	3.21E+02
Lag 10 zone 3	-	8.74E+01
Lag 11	-	3.09E+01

Kloakledningerne er inddelt efter lokale forhold, hvor det primært har vist sig, at konduktansen i højereliggende områder og oplande med nyere kloaksystemer er betydeligt lavere end i f.eks. Kærby. Vandløbene er opdelt i to kategorier, hvor "Vandløb 1" beskriver den åbne del af Østerå og "Vandløb 2" beskriver konduktansen i mindre vandløb og grøfter.



Referenceliste

- [1] Hydrologisk Informations- og Prognosesystem, <https://dataforsyningen.dk/data/3623>
- [2] Simon Stisen, Maria Ondracek, Lars Troldborg, Raphael J. M. Schneider & Michael John van Til: National Vandressource Model. Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019. GEUS rapport 2019/31.
- [3] Freeze, R.A., Witherspoon, P.A., 1967. Theoretical analysis of regional ground-water flow: 2. Effect of water table configuration and subsurface permeability variations. Water Resources Research 3 (2), 623e634. <http://dx.doi.org/10.1029/WR003i002p00623>.
- [4] Anderson MP, Woessner WW, Hunt RJ (2015). Applied groundwater modelling simulation of flow and advective transport. Academic, San Diego, CA
- [6] Danmarks Højdemodel, <https://dataforsyningen.dk/data/926>.