Stokastisk generering af geologiske modeller og simulering af terrænnært grundvand i Kærby

9. Juni 2023

VM10

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

AALBORG UNIVERSITET
STUDENTERRAPPORT

Institut for Byggeri, By & Miljø,
Thomas Manns Vej 23
9220 Aalborg Øst
https://www.byggeri.aau.dk/

Titel:

Stokastisk generering af geologiske modeller og simulering af terrænnært grundvand i Kærby

Projektperiode:

September 2022 - Juni 2023

Deltagere:

Henrik Harlev Thomsen
Nikolaj Nørgaard Larsen
Mikkel Miang Engstrup

Vejleder:

Rasmus Vest Nielsen
Søren Liedtke Thorndahl

Antal sider: 206
Afsluttet: 9. juni 2023

Synopsis:

Projektet undersøger stokastisk modellering af terrænnært grundvand i Kærby. Projektet er opstået i forbindelse med GRAVA-projektet, som blev dannet på grund af forventede problemer ved en separatkloakering af Kærby. Til at undersøge grundvandet i Kærbyområdet, er der i dette projekt genereret en grundvandsmodel, hvortil der er bestemt indre- og ydre randbetingelser.
Geologisk data indsamlet i GRAVA-projektet er benyttet til modellering af den høje geologiske heterogenitet til stede i Kærby, med T-PROGS. Dette projekt arbejder med flere geologiske usikkerheder ved generering af geologiske realiseringer.
Der bliver foretaget en følsomhedsanalyse for antallet af de geologiske realiseringer, og de hydrauliske parametre for jordtyperne. Det bliver fundet, at 30 geologiske realiseringer og 100 Monte Carlo realiseringer af den hydrauliske ledningsevne er tilstrækkeligt. Resultaterne for grundvandsmodellen som beskriver de nutidige forhold, er sammenlignet med grundvandsmålingerne fra GRAVA-projektet og vurderet valid til at beskrive fremtid scenarier for separat- og fælleskloakering af Kærby. Resultaterne for grundvandsmodellen er opdelt i klimascenarier for nutid (1991-2020), nær fremtid (2041-2070) og fjern fremtid (2071-2100). Resultaterne viser en tydeligt forskel mellem fælles- og separatkloakering, og hvilke problemer det ville have givet i fremtiden, hvis separatkloakering var foretaget som planlagt.
Medvidere har dette projekt undersøgt effekten af at reducere antallet af boringer. Der bliver undersøgt effekten af at reducere det geologiske grundlag for T-PROGS til at generere geologiske realiseringer, samt hvordan dette påvirker forskellen i de geologiske parametre. Det fremgår af analysen, at en reduktion af boringer i modellen, har ingen betydeligt effekt på geostatistiske parametre eller på det simulerede trykniveau i Kærby.

.

Forord

Dette er kandidatspeciale udarbejdet af Henrik Harlev Thomsen, Nikolaj Nørgaard Larsen og Mikkel Miang Engstrup, som er studerende på Aalborg Universitet fra instituttet Byggeri, By og Miljø, med specialiseringen Vand og Miljø. Projektet er udarbejdet i perioden fra den 01/09/2022 - 9/6/2023.

Gruppen er igennem rapportskrivningen blevet vejledt af Rasmus Vest Nielsen og Søren Liedtke Thorndahl, som takkes for gavnligt samarbejde, gode råd og konstruktiv kritik.

Til kildehenvisninger angives efternavn og år - [Efternavn, År].

Der vil i rapporten være indsat en *, eksempel: [Efternavn, År]*, efter en kilde, hvis der er lavet redigering af eksempelvis en figur. Kortillustrationer er udarbejdet i QGIS, med baggrundskort fra Dataforsyningen.

Symboler introduceres i en tabel under tilhørende ligninger, første gang de benyttes. Herefter introduceres det samme symbol ikke i samme kapitel igen.

Forsidebillederne er fra [Nielsen og Thorndahl, 2022].

Henrik Harlev Thomsen

Mikkel Miang Engstrup

Nikolaj Nørgaard Larsen

Abstract

This project examines the near-surface groundwater in Kærby through the utilization of stochastic modeling. The project has started due to the GRAVA project, which addresses the challenges of transitioning from a combined sewer system to a separate sewer system in Kærby. In the GRAVA project, citizen involvement has allowed for the installation of groundwater level sensors on the properties of the affected citizens. This is done to study the groundwater level over several years.

To examine the near-surface groundwater in Kærby, a groundwater model has been developed. One of the uncertainties in a groundwater model is the geology. In order to address these uncertainties regarding the geology, the project utilizes T-PROGS software to generate stochastic geological realizations based on the geological data from the model area.

This project adresses several uncertainties for generating geological models. A sensitivity analysis is conducted for determining the number of geological realizations and the hydraulic parameters needed for the model. It is found that 30 geological models and 100 Monte Carlo realizations of hydraulic conductivity are necessary. The results of the groundwater model are compared with the groundwater measurements obtained during the GRAVA project and are found to be valid. Therefore, the groundwater model can be used to describe future scenarios for both separate and combined sewer systems.

The results of the groundwater model are divided into climate scenarios for the present (1991-2020), near future (2041-2070), and far future (2071-2100). The results illustrate the difference between combined and separate sewer systems and the future problems regarding a high groundwater level if a separate sewer system had been implemented as planned.

Additionally, this project examines the effect of reducing the number of boreholes in the model area. The impact of reducing the geological data for T-PROGS to generate geological realizations upon and how this affects the differences in the geological parameters are examined. The analysis revealed that no meaningful effect was found on the geostatistical parameters and the simulated hydraulic head.

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1 Indledning **1**
1.1 Grundvandsrelaterede problemer i Danmark 1

Kapitel 2 Metoder og problematikker ved grundvandsmodellering **3**
2.1 Modelinputs 4
2.1.1 Randbetingelser 4
2.1.2 Grundvandsdannelse 4
2.1.3 Øvrige inputs 5
2.1.4 Beregningsmetode 5
2.1.5 Geologisk model 5
2.2 Geologiske usikkerheder og håndtering af dette 6
2.2.1 Geologisk modelstruktur 6
2.2.2 Parametrisering af geologien 7

Kapitel 3 Problemformulering **9**
3.1 Projektstrategi 9

Kapitel 4 Kærby **12**
4.1 Hydrologi i området 13
4.2 Kloakeringens indflydelse på grundvandet 15
4.3 GRAVA-projektet 17
4.4 Opsamling og diskussion 19

Kapitel 5 Opsætning af grundvandsmodel **21**
5.1 Model område 21
5.1.1 Hydrologisk afgrænsninger og randbetingelser 22
5.2 Hydrologiske fremskrivninger 25
5.2.1 Hydrologiske input 26
5.2.2 Randbetingelser 26
5.3 Model diskretisering 26
5.3.1 Vertikal diskretisering 26
5.3.2 Horisontal diskretisering 27
5.4 Geologisk modelopsætning 28
5.4.1 Inddeling af geologien 30
5.5 Opsamling og diskussion 31
5.5.1 Implementering af dræn 31
5.5.2 Potentialekort 31
5.5.3 Implementering af vandområder 31
5.5.4 Øvrige 32
5.5.5 Klimafremskrivning 32
5.5.6 Model diskreditering 32

Kapitel 6 Vandstandspejlinger og boreprofils data fra GRAVA-projektet 33
6.1 Data filtrering . . . 34
6.2 Automatiske målestationer . . . 34
6.3 Manuelle målestationer . . . 38
6.3.1 Datamængden fra manuelle målestationer . . . 38
6.3.2 Manuelt vandstandsdata . . . 40
6.4 Geologisk data fra boringer . . . 45
6.4.1 Antallet af boringer . . . 45
6.4.2 Geologisk data . . . 46
6.5 Opsamling og diskussion . . . 47

Kapitel 7 Modellering af lokalskala geologisk heterogenitet 49
7.1 Metode til implementering af T-PROGS . . . 49
7.2 Eksempel på implementering . . . 51
7.3 Generering af geologiske realiseringer for modelområdet . . . 52
7.4 Opsamling og diskussion . . . 54

Kapitel 8 Følsomhedsanalyse af geologiske realiseringer og hydrologiske parametre 56
8.1 Følsomhed på hydrologiske parametre . . . 56
8.1.1 Nødvendige hydrologiske parametre . . . 56
8.1.2 Fravalgte hydrologiske parametre . . . 57
8.2 Reduktion af geologiske realiseringer . . . 57
8.2.1 Parametrisering af geologisk variabilitet . . . 58
8.2.2 Reducering baseret på modelresultat . . . 62
8.3 Reduktion af Monte Carlo realiseringer . . . 64
8.4 Opsamling og diskussion . . . 66

Kapitel 9 Validering 68
9.1 Lokal skala validering ved brug af målestationer . . . 68
9.1.1 Manuelle målestationer . . . 69
9.1.2 Automatiske målestationer . . . 72
9.2 Spatial forskel i simulerede og observerede trykniveau . . . 77
9.3 Tværsnitprofiler for grundvandsstand i Kærby . . . 78
9.4 Opsamling og diskussion . . . 83
9.4.1 Validering på lokalskala . . . 83
9.4.2 Spatiale forskelle i trykniveau . . . 84
9.4.3 Tværsnitprofiler . . . 84
9.4.4 Årsager til afvigelser . . . 84

Kapitel 10 Resultater for opstillede klimascenarier i Kærby 86
10.1 Sammenligning af forskellige scenarier for et nutidigt klima . . . 86
10.1.1 Gennemsnitlig dybde . . . 86
10.1.2 25% fraktilen . . . 90
10.1.3 Samtlige værdier . . . 94
10.2 Resultater for et klima en nær fremtid . . . 98
10.2.1 Gennemsnitlig dybde . . . 98
10.2.2 25 % fraktilen . . . 102
10.2.3 Samtlige simulerede værdier for scenarierne . . . 106
10.3 Resultater for et klima i en fjern fremtid . . . 110
10.4 Opsamling og diskussion . . . 112
10.4.1 Den benyttede metode til analyse af resultater . . . 112

10.4.2 Resultater for områderne i Kærby . . . 113
10.4.3 Resultaterne for opstillede klimascenarier . . . 114

Kapitel 11 Følsomhed af boringers densitet **116**
11.1 Boringsmængdens effekt på den rumlige geologiske fordeling . . . 116
11.1.1 Bestemmelse af antal nødvendige iterationer . . . 117
11.1.2 Bestemmelse af antal nødvendige boringsreduktioner . . . 120
11.1.3 Effekten af boringsreduktion på den fulde model . . . 124
11.2 Antallet af boringers effekt på det simulerede trykniveau . . . 126
11.3 Opsamling og diskussion . . . 130
11.3.1 Reduktions analysen . . . 130
11.3.2 Effekt af boringsreduktion på geostatistiske parametre . . . 131
11.3.3 Effekten på trykniveau ved simulering af reduktions intervaller . . . 132

Kapitel 12 Diskussion **133**

Kapitel 13 Konklusion **135**

Kapitel 14 Perspektivering **137**
14.1 Hydrologiske påvirkning . . . 137
14.2 Mulig analyse af klimafremskrivningens betydning . . . 138
14.3 Alternative tilgange til den stokastiske modellering . . . 139

Litteratur **140**

Bilag A Numerisk model **145**

Bilag B Modelopsætning **148**
B.1 Modelopsætningsinput . . . 148
B.2 Topografi . . . 149
B.3 Jordtyper i fyld . . . 150

Bilag C Vandstandsmålere **152**
C.1 Aflæsnings vanskeligheder . . . 152
C.2 Private Målestatoiner . . . 153

Bilag D T-PROGS **157**

Bilag E Følsomhedsanalyse **159**
E.1 Inddeling af projet området . . . 159

Bilag F Validering **164**
F.1 Manuelle målestationer . . . 164
F.1.1 Validering ud fra vintermåneder . . . 165
F.1.2 Validering ud fra sommermåneder . . . 167
F.2 Automatiske målestationer . . . 170

Bilag G Resultater **172**
G.1 Resultater for et klimascenarie i fjern fremtid . . . 172
G.1.1 Gennemsnitlig dybde for fjern fremtid . . . 172
G.1.2 25% fraktilen for fjern fremtid . . . 175
G.1.3 Samtlige værdier for fjern fremtid . . . 177

Bilag H Geologisk Analyse **181**
H.1 Antal mulige scenarier ved fjernelse af borehuller 181
H.2 Fjernelse af boringer 181
H.2.1 Indledende reduktion af iterationer 182
H.3 Borehuls reduktion 185
H.3.1 Effekten af boringsreduktion på den fulde model 192
H.4 Resultater 194

1 Indledning

Grundvand er en vigtig ressource på verdensplan, hvor det estimeres at udgøre 99% af al ferskvand. Grundvandet bruges til drikkevand, markvanding og visse industrielle formål. Det estimeres, at 36% af verdens drikkevand kommer fra grundvand, og større byer oplever især et stigende behov for at benytte sig af grundvandsressourcerne. [Global Environment Facility, 2023]

Grundvandsressourcerne på verdensplan er historisk blevet negligeret, hvilket har ført til utilstrækkelig styring og regulering mange steder. Dette har resulteret i forurening af grundvandet, hvilket har mindsket tilgængeligheden af drikkevand. Samtidig har befolkningstilvækst medført et øget behov for rent drikkevand. [Global Environment Facility, 2023; UN Water, 2023] Desuden vil fremtidige klimaforandringer medfører øgede områder med grundvandsmangel. Dette skyldes stigende temperaturer og ændringer i nedbørsmønstrene [UN Water, 2023]. Ændringer i nedbørsmønstrene kan medføre længere tørkeperioder samt mere intensiv, men kortvarig regn. Tørkeperioderne kan medvirke til en sænkning af grundvandsstanden, mens der også kan forekomme ændringer såsom mindre vandindving og færre dræn, der kan medføre en øget grundvandsstand.

Holland har i tørkeperioder også problemer med at opfylde behovet for rent drikkevand, grundet befolkningsvækst, og forurening af drikkevandet forbindelse med landbrug [Séveno, 2022]. Holland er kystnært og stærkt industrialiseret, mens landbrugets jord- og arealanvendelse er en af de mest intense i verden. På grund af intens brug af gødning er der store problemer med grundvandsforurening i cirka 42% af hele landet. I mere end 90% er landets grundvandsstand mindre end 4 meter under terræn. Da Holland er et lavtliggende land, er dybden til grundvandsspejlet naturligt lavt, små ændringer i grundvandsstanden kan i høj grad påvirke situationen for grundejer, industri og landbrug. [Koreimann et al., 1996]

1.1 Grundvandsrelaterede problemer i Danmark

I Danmark er mange urbane områder placeret tæt på vandløb, fjorde eller det åbne hav, hvor disse under normale omstændigheder, er hydrologisk forbundet med grundvandet. Denne hydrologiske forbindelse kan øge grundvandsstanden, hvilket kan være problematisk, hvis grundvandet er terrænnært. Terrænnært grundvand er per definition det øverste højtstående frie vandspejl, og kan derfor have direkte påvirkning af lokalområdet [WSP et al., 2021]. Det fremgår, at det terrænnære grundvandsspejl reagerer på, at der forekommer ændringer i nedbørsmønstre. Over de seneste 30 år, er det terrænnære grundvand gennemsnitligt steget med cirka 1 meter på landsplan. [Danva og KL, 2019]

Påvirkningen af terrænnært grundvand i byområder kan delvist tilskrives menneskelig aktivitet [Henriksen et al., 2020a]. Dette kan skyldes faktorer såsom øget befæstelsesgrad, ældre beskadigede kloakledninger, anvendelse af LAR-løsninger (lokal afledning af regnvand), reduceret vandindvinding og genåbning af rørlagte vandløb [Henriksen et al., 2020a]. I løbet af de seneste 50-100 år er det terrænnære grundvand blevet sænket i forbindelse med byudvikling, hvor moser, enge og ådale er blevet byggemodnet. Udfordringer i forbindelse med terrænnært grundvand kan forekomme ved tilbagevending til den naturlige tilstand. Det kan være ved tætning af skadede kloakledninger eller ved reduktion i drikkevandsindvinding, som kan resultere i en grundvandsstigning. [WSP et al., 2021]

Danmark har flere byområder der er påvirket af terrænnært grundvand. I Herlev er det terrænnære grundvands påvirket af lukningen af kildepladser. Indvindingen af grundvand er blevet reduceret med cirka 70% siden 1990'erne grundet forurening og reduceret vandindvinding. Resultatet er en stigning i grundvandsstanden på op mod 5-7 meter. [WSP et al., 2021] Holte er topografisk udfordret med hensyn til terrænnært grundvand, da det er beliggende i et lavtliggende område mellem to bakker og tidligere var et moseområde. Holte har ældre kloakledninger, der ikke opfylder nutidens krav fra forsyningsselskabet og skal derfor renoveres. Grundejerne i området oplever i øjeblikket fugtige kældre, og de er bekymrede for en eventuel stigning i det terrænnært grundvand i forbindelse med en separatkloakering. I øjeblikket pumpes der allerede grundvand og regnvand væk fra området [WSP et al., 2021].

Kærby er et mindre byområde i Aalborg, der ligesom Holte er udfordret med hensyn til terrænnært grundvand på grund af sin topografiske beliggenhed. Aalborg Forsynings igangværende renovering af ældre kloakledninger, og overgangen til separat kloakering, er hidtil kun blevet gennemført i et mindre område i Kærby grundet de allerede observerede udfordringer med terrænnært grundvand. Derfor har Aalborg Universitet, Aalborg Forsyning, Aalborg Kommune og NIRAS startet et forskningsprojekt i Kærby kaldet GRAVA-projektet [Ziegler et al., 2023]. GRAVA-Projektet har resulteret i en betydelig mængde geologiske data og en høj rumlig fordeling af vandstandsmålinger for terrænnært grundvand [Ziegler et al., 2023].

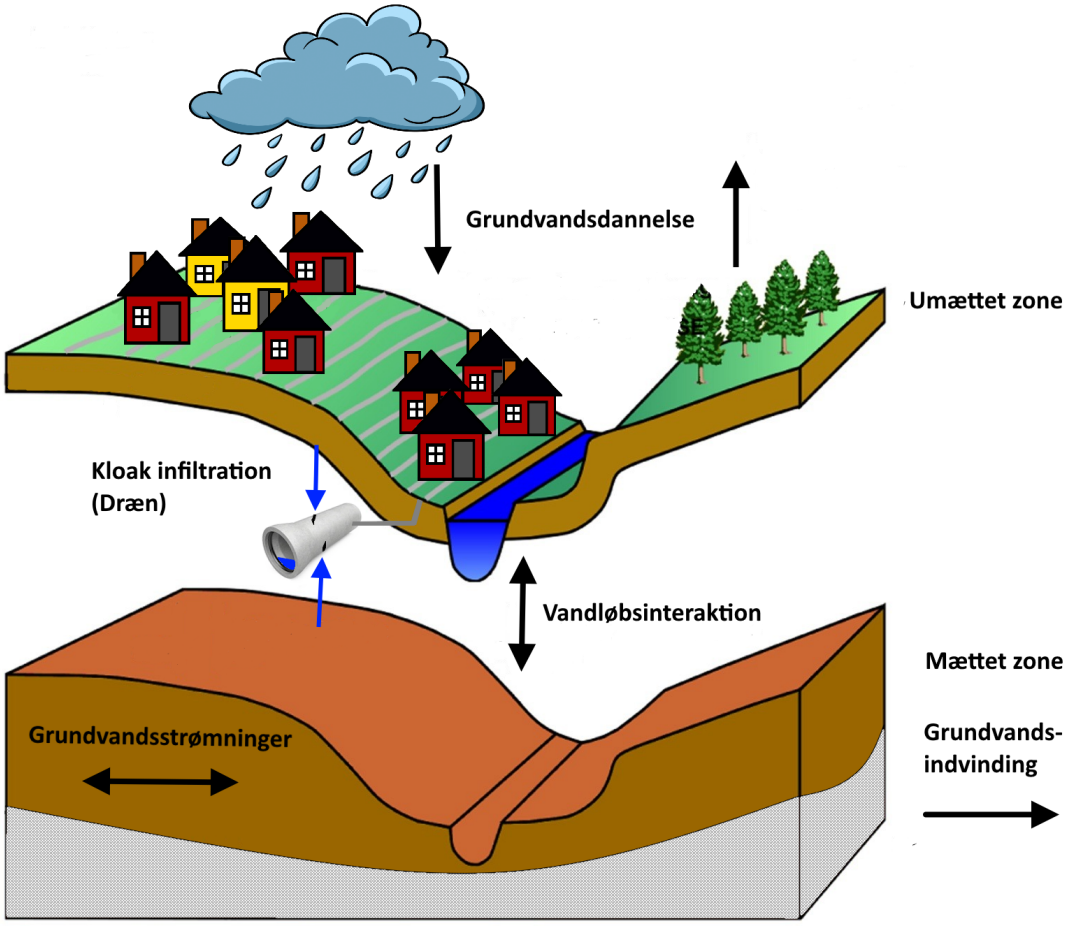
Terrænnært grundvand udgør et aktuelt problem for et stigende antal kommuner i Danmark, og disse udfordringer forventes at øges i takt med klimaforandringerne [Henriksen et al., 2020a; WSP et al., 2021]. Ændringer i grundvandsstanden udgør primært en udfordring i lavtliggende områder, hvilket kan medføre skader [WSP et al., 2021]. Ifølge Intertek [2020] kan terrænnært grundvand føre til problemer såsom indtrængende vand, fugtige kældre, vækst af skimmelsvamp, sprækkede og ujævne gulve, skader på murværk, ustabilt terræn og bevægelser i fundamentet ved konstruktioner. Disse skader har både økonomiske- og sundhedsmæssige konsekvenser for grundejerne. De økonomiske konsekvenser kan omfatte ødelæggelse af bygninger og interiør, mens de samfundsmæssige konsekvenser kan være forstyrrelser af den offentlige infrastruktur og øgede udgifter til vedligeholdelse [WSP et al., 2021; Danva og KL, 2019]. En undersøgelse blandt kommuner har vist, at 32% af de adspurgte instanser hyppigt har oplevet problemer som følge af stigende terrænnære grundvand i løbet af de seneste 10 år. Baseret på data fra HIP-databasen anslås det, at der på landsplan er cirka 450.000 bygninger, der har mindre end én meter til grundvandsspejlet i mere end 80% af året [WSP et al., 2021].

Fremtidige scenarier for grundvandsstanden kan simuleres via grundvandsmodeller, hvor resultaterne kan anvendes til at vurdere afværgeløsninger for forhøjet grundvandsstand i byområder. Ud fra dette kan der foretages en risikovurdering af, hvorvidt disse ændringer vil medføre økonomiske- og samfundsmæssige konsekvenser. I Danmark benyttes grundvandsmodellering typisk i forbindelse med drikkevand, enten som screening efter mulige drikkevandsområder, indvindingspåvirkning eller til vandkvalitetsestimering. [Jensen, 2003] Derudover kan grundvandsmodellering anvendes ved undersøgelse af terrænnært grundvand, hvor grundvandsspejlet kan have afgørende betydning i byområder. Denne type modelanalyse er i stigende efterspørgsel, hvor grundvandsmodeller benyttes til kortlægning af de nuværende- og fremtidige udfordringer med det terrænnære grundvand [WSP et al., 2021; Henriksen et al., 2020a]. Grundvandsmodeller benyttes af kommuner og potentielt forsikringsselskaber til en risikovurdering af grundvand på terræn. Alt efter grundvandsmodellens formål, er valget af modelleringsmetode væsentligt.

Grundvandsmodeller, og dets anvendelse, er ofte begrænset til formålet, og hvordan de er konstrueret, hvorfor grundvandsmodeller har sine begrænsninger, da det er en forsimpling af virkeligheden [Sonnenborg og Henriksen, 2005]. Det er nødvendigt, at forsimplingen er i overensstemmelse med skalaen og formålet med modellen [Sonnenborg og Henriksen, 2005]. Konceptet ved en grundvandsmodel er at benytte tilgængelige inputs til modellering af virkeligheden så præcist som muligt, og derved kunne beregne et modelresultat, i form af et trykniveau og grundvandsstrømninger.

2 Metoder og problematikker ved grundvandsmodellering

Grundvandsmodellering for byområder har typisk andre udfordringer end for områder i frit land. I byområder er den menneskelige påvirkning af grundvandssystemet væsentligt større, hvilket kan skyldes udgravninger til rør og kældre, LAR-løsning og dræn. En konceptuel illustration over, hvad der blandt andet påvirker grundvandet i et byområde, fremgår af figur 2.1.

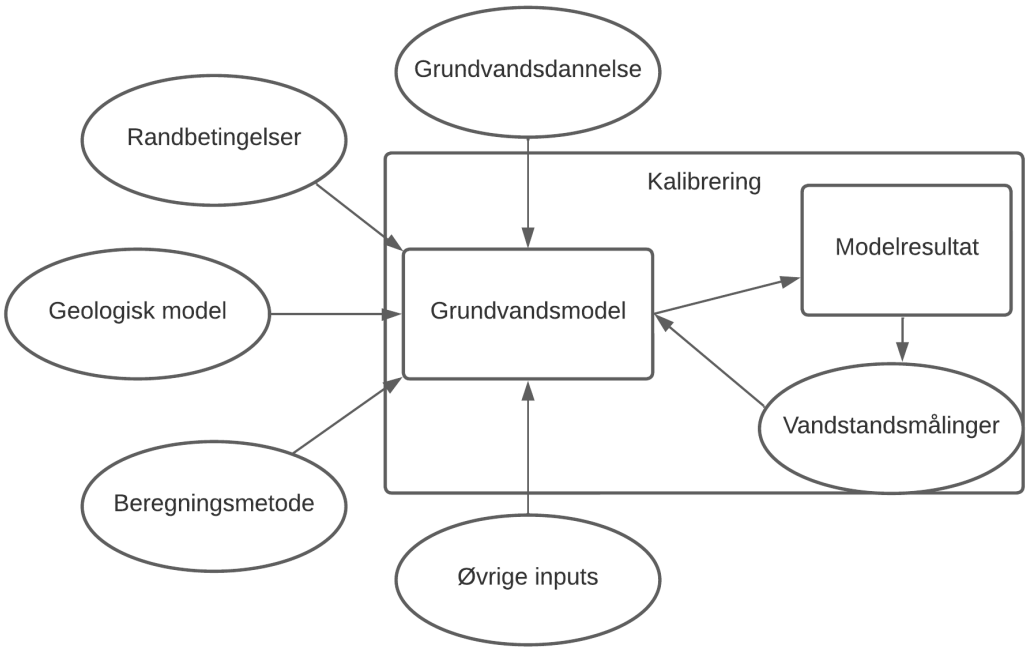


Figur 2.1. Konceptuel illustration over hvad der påvirker grundvandet i et byområde. Figuren er inspireret af figur fra Ma et al. [2016].

Ved opsætning af en grundvandsmodel forenkles det virkelige grundvandssystem og de hydrologiske processer. Derfor kan præcisionen af output ikke overstige kvaliteten af dets input og hvis datamængden er begrænset, kan dette vanskeliggøre udviklingen af en pålidelig forudsigelse. [Sonnenborg og Henriksen, 2005; Jensen, 2003]

Grundvandsmodeller udgør grundlaget for mange vigtige og ofte omkostningstunge beslutninger. For at

træffe disse beslutninger på et solidt grundlag er det nødvendigt at kvantificere usikkerheden forbundet med modelresultaterne. Det datagrundlag, der anvendes til at opbygge grundvandsmodeller, er generelt meget ufuldstændigt, hvilket resulterer i usikkerheder. En konceptuel illustration af opbygningen af en grundvandsmodel og kalibreringen af denne er vist i figur 2.2.



Figur 2.2.Konceptuel illustration over opsætningen af en grundvandsmodel.

Ved præsentation af resultaterne fra grundvandsmodellerne er det essentielt at relatere resultaterne til de tilhørende usikkerheder og begrænsninger. Med viden om usikkerhederne får beslutningstagere indsigt i de mulige risici og udfald, hvorfor de har mulighed for at beslutte, om der skal bruges flere ressourcer på at forbedre kvaliteten af data eller risikoforanstaltninger bør implementeres [Refsgaard et al., 2012].

2.1 Modelinputs

En lang række forskellige terminologier til at beskrive typer og kilder til usikkerhed kan findes i litteraturen. Refsgaard et al. [2007] beskriver, at de vigtigste kilder til usikkerheder er inputdata, modelparameterværdier og konceptuel model. Hvert enkelt modelinput har indflydelse på den samlede grundvandsmodel, hvilket vil påvirke modelresultatet. Af denne årsag bliver de enkelte modelinputs gennemgået, samt de tilhørende usikkerheder og metoder ved implementering af disse.

2.1.1 Randbetingelser

Randbetingelserne angiver den geografiske afgrænsning af grundvandsmodellen. Hertil vælges afgrænsningen alt efter grundvandsmodellen formål, så randbetingelserne har tilpas afstand, og dermed ikke påvirker modelresultat betydeligt [Sonnenborg og Henriksen, 2005; Spitz og Moreno, 1996]. Ved grundvandsmodellering findes der forskellige typer af randbetingelser, som fastholdt trykniveau og no-flow, der hver påvirker resultatet på forskellig vis. Udvælgelsen af randbetingelser kan variere alt efter individuelle fortolkninger [Sonnenborg og Henriksen, 2005; Spitz og Moreno, 1996].

2.1.2 Grundvandsdannelse

Grundvandsdannelsen estimeres typisk på baggrund af simuleringer baseret på meteorologiske data og befæstelser. Simuleringerne kan enten udføres selv eller resultater kan hentes fra større nationale og

offentligt tilgængelige modeller. I begge tilfælde er disse simuleringer forbundet med flere usikkerheder. Især vejrdata er sjældent tilgængelige i tilstrækkeligt omfang, enten fordi det ikke er tilgængeligt i modelområdet eller fordi modelområdet er af en størrelse, der gør det usikkert at projektere vejrdata. Samtidig kan der forekomme underjordiske strømninger, som kan være uforudsigelige [Karlsen og Sørensen, 2014]. For byområder kan de underjordiske strømninger være særligt uforudsigelige på grund af kældre, spunsvægge og dræn. Ligeledes varierer befæstelserne mere, og påvirkningerne på fordampning og nedsivning er usikre.

2.1.3 Øvrige inputs

Øvrige inputs inkluderer flere parametre, som ikke altid anvendes i en grundvandsmodel. De typiske inkluderer dræn, grundvandspumpning, vandløb og søer. Derudover er topografi altid inkluderet som en del af grundvandsmodeller.

Det er ofte en udfordring at bestemme omfanget af dræning. Dette skyldes, at ikke alle dræn er indberettet, og detaljerede oplysninger om dræning sjældent er tilgængelige. Det samme gælder for grundvandspumpning, hvor ikke alle indvindinger er indberettet. For dem, der er indberettet, er det normalt kun den årlige indvinding, der er angivet. Hvis indvindingsdybden ikke er angivet, kan det være uklart, hvilket grundvandsmagasin der bliver udvundet fra [Spitz og Moreno, 1996].

Vandløb og søer kan have usikkerheder med hensyn til deres kote og dybde samt hvordan de implementeres i modellen. Den begrænsede mængde data om vandstand og dybde medfører usikkerheder ved modelformuleringen. Samtidig kan implementeringen af forbindelsen mellem vandområder og grundvandet variere, hvilket også giver usikkerheder. Desuden har vandområder typisk varierende vandspejl, som ofte negligeres i grundvandsmodellering.

Topografikort er tilgængelige på forskellige platforme og i forskellig opløsning. Valget af topografisk kort kan have indflydelse, da kvaliteten og opløsningen varierer. Kvaliteten kan variere i form af, hvor effektivt bygninger og vegetation fjernes, hvilket især er vigtigt for byområder.

2.1.4 Beregningsmetode

Beregningsmetoden anvender både den matematiske formulering til beregning af modelresultat, samt opsætning af de styrende ligninger i tid og sted som diskretiseres over et modelgitter. Grundvandsmodeller kan dermed beregne løsninger dynamisk og stationært. Det meste kommercielle software, til grundvandsmodellering, har udviklet en eller flere matematiske/numeriske formuleringer til beregning af trykniveauet i modelområdet. Dette er enten i form af en generel eller en mere specifik beregningsmetode, alt efter, hvad der undersøges. Ved opsætningen af et gitter, vælges typen og en diskretisering. Diskretiseringen angiver inddelingen af gitteret og cellestørrelserne. Cellestørrelsen angiver dermed, hvor stort et område der midles over. Der er ligeledes usikkerheder forbundet med, hvordan de forskellige inputs implementeres i den numeriske model.

2.1.5 Geologisk model

Den geologiske forsimpling og usikkerheden af denne er anerkendt som værende den primære kilde til modelusikkerhed [Bredehoeft, 2005; Refsgaard et al., 2012]. Derfor er en essentiel del af den konceptuelle model forsimplingen af den ukendte geologi. Denne simplificering er typisk bestående af en geologisk inddeling, ud fra tolkning af stratigrafisk tendenser, baseret på data fra GEUS eller lignende platforme. Disse kan eventuelt suppleres med feltundersølger [Refsgaard et al., 2012]. Derudover udarbejdes en strategi for, hvordan den geologiske heterogenitet håndteres.

Da geologien udgør den største usikkerhed og har en væsentlig betydning for alle typer af grundvandsmodeller, undersøges implementeringen af denne.

2.2 Geologiske usikkerheder og håndtering af dette

Den geologisk usikkerhed i grundvandsmodellering er primært relateret til geologien og dertilhørende hydrauliske parameterværdier. Indenfor en defineret geologi vil parameterværdierne altid udvise lokal skala heterogenitet, som ofte negligeres i vurderinger af geologisk usikkerhed. Traditionelt er de følgende tre strategier anvendt til estimering af geologisk relateret usikkerhed; (1) geologiske struktur (2) effektive modelparametre og (3) modelparametre herunder lokal skala heterogenitet. De mest almindelige metoder til usikkerhedsvurderinger inden for hver af disse kategorier er; stokastiske geologiske realiseringer, Monte Carlo analyse og regressionsanalyse. [Refsgaard et al., 2012]

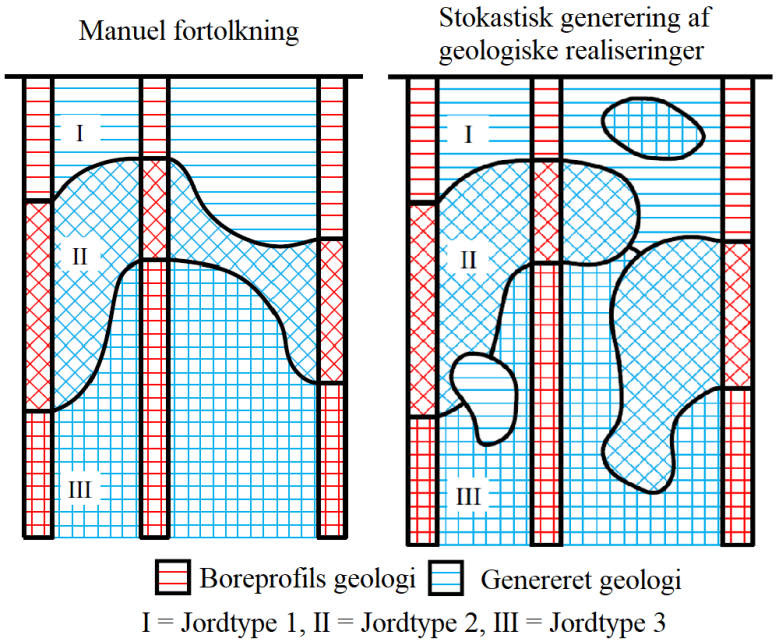
En metode til at vurdere usikkerheder af grundvandsmodeller, relateret til geologisk usikkerhed er ved anvendelse af flere geologiske modeller [Neuman og Wierenga, 2003]. En evaluering af den samlede modelusikkerhed omfatter både usikkerheden på hver af de geologiske realiseringer og den forsimplede geologi [Neuman, 2003].

Denne geologiske forsimpling af heterogenitet og hydrauliske egenskaber forsager derfor modelusikkerhed på lokal skala [Tonkin og Doherty, 2009]. Der findes traditionelt flere fremgangsmåder og metoder til grundvandsmodelling, hvor forskelligheden har indflydelse på præcision og usikkerheder for resultatet.

2.2.1 Geologisk modelstruktur

En geologisk model kan baseres på en stratisgrafisk analyse, ud fra eksisterende data, hvoraf forskellighed kan forekomme i manuelle fortolkninger. Denne mest anvendte metode til geologisk fortolkning, fremgår af venstre del af figur 2.3, hvor geologien og derfor parametriseringen af denne midles over en given dybe. Grundet ufuldstændig information kan der fortolkes flere manuelle geologiske modeller. For at tage højde for denne usikkerhed, kan der anvendes flere modelleringsmetoder, med flere alternative manuelle geologiske modeller af samme modelområde [Poeter og Anderson, 2005; Rojas et al., 2008].

Alternativt til den manuelle fortolkning kan lokalskala heterogenitet medtages, som er illustreret på højre del af figur 2.3. Dette kan gøres ved stokastisk generering af geologiske realiseringer baseret på geostatistisk analyse af geologisk data [Carle, 1999].



Figur 2.3.Konceptuel tegning af den traditionelle metode, hvor geologien udjævnes over en prædefineret dybde og en konceptuel tegning af geologien, hvor der er medtaget lokal skala heterogenitet. [Xiao et al., 2017]

Den stokastiske tilgang, fra højre del af figur 2.3, tillader kombination af geologisk fortolkning og geostatistiske analyser for at generere et antal lige sandsynlige geologiske modeller [Refsgaard et al., 2006]. Software til dette er TPROGS (Transition Probability Geostatistical Software) og SGeMS (Stanford Geostatistical Modeling Software), som kan benyttes til at generere geologiske realiseringer af en manuelt interpoleret geologisk model. Den stokastiske tilgang kan derfor benyttes til at undersøge virkningerne af lokal skala heterogenitet [Troldborg, 2004b]. En indirekte effekt af den geologiske fortolkning, er parametriseringen af den observerede geologi. Hvor usikkerheden relateret til denne parametrisering er påvirket af modellens skala.

2.2.2 Parametrisering af geologien

For at kunne belyse omfanget af usikkerhed i geologien er det nødvendigt at medtage usikkerheden i de geologisk relaterede effektive parameterværdier. Traditionelt er der blevet anvendt to forskellige metoder til dette formål. Den første metode antager effektive parameterværdier, der karakteriserer en gennemsnitlig variation af de hydrauliske egenskaber med konstante værdier inden for et geologisk lag. Den anden metode tager hensyn til den lokale skala af geologisk heterogenitet, hvor de hydrauliske egenskaber udviser den samme ukendte rumlige heterogenitet. Lokal skala heterogenitet bliver ofte negligeret i grundvandsmodeller, hvor det traditionelt antages, at parameterværdierne er konstante over en defineret dybde, der typisk omfatter flere geologiske lag. [Refsgaard et al., 2012]

De to mest anvendte metoder til kvantificering af modelusikkerheder i forhold til parameterusikkerhed er Monte Carlo-analyse og regressionsanalyse [Neuman og Wierenga, 2003].

En Monte Carlo analyse benyttes til bestemmelse af modelusikkerheden ved estimering af de effektive modelparametre ved inversion, og generering af parameterrealiseringer baseret på kovariansen mellem estimerede parametre og observerede værdier. Dette gøres på basis af en kaliberet model. Tilgangen midler hydrauliske egenskaber over en prædefineret dybde [Refsgaard et al., 2012], dette anvendes til tilgangen illustreret på venstre del af figur 2.3. Dermed undervurderes modelusikkerheden ofte, da lokalskala heterogenitet negligeers [Refsgaard et al., 2012]. Dette er den mest almindelige metode til vurdering af den geologiske usikkerhed, hvilket kan tilskrives, at metoden er relativ simpel [Refsgaard et al., 2012]. GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) er et alternativ, hvor fremgangsmåden ligner Monte Carlo metoden. GLUE anerkender modsat Monte Carlo, at der i et parametriseret system, er en given tilstand, hvor samme resultat kan opnås med mange potentielle parameterværdier. Et stort sæt tilfældige realiseringer af parametre og variabler produceres og GLUE simuleringer udføres.

Monte Carlo-analysen kan også udføres på lokal skala. Denne metode indebærer generering af lige sandsynlige realiseringer af de effektive modelparametre baseret på et højopløselig cellegitter, og det muliggør brugen af flere geologiske realiseringer. Denne metode anvendes på en kalibreret model, og resultaterne analyseres og vurderes statistisk, da fordelingen af resultaterne kan have forskellige former, såsom ensartet, unimodal eller multimodal [Refsgaard et al., 2012; Tonkin og Doherty, 2009]. Ved genereringen af de effektive modelparametre skal disse være betinget af in-situ-målte værdier for hver af de observerede geologiske enheder eller af det spænd af hydraulisk ledningsevne, der findes i litteraturen. Disse parameterrealiseringer er baseret på en kalibreret model, hvorfor spændet for de effektive modelparametre er væsentligt mindre end ved den tidligere nævnte Monte Carlo-metode. Simuleringen af modelresultaterne baseret på et tilstrækkeligt antal parameterrealiseringer gør Monte Carlo-analysen tidskrævende [Tonkin og Doherty, 2009].

Regressionsanalysen er designet til at finde et parametersæt, der ved optimering bedst opfylder et bestemt modelleringskriterium. Regressionsanalysen giver et estimat af de hydrologiske parametre og simulerer et modelresultat. Ved hjælp af de observerede parameterværdier bestemmes en optimal parameterværdi ved at minimere et modelleringskriterium. Resultatet af regressionsanalysen er et konfidensinterval for modelusikkerheden og konfidensintervaller for de estimerede modelparametre [Cooley og Christensen,

2006]. Gauss-Newton-algoritmen er en anerkendt metode, der ofte anvendes som en minimeringsalgoritme i problemer, der vedrører estimering af grundvandsparametre [Jensen, 2003].

Ved anvendelse af en regressionsanalyse på lokal skala, anerkender teorien, at grundvandsmodeller skal tage højde for detaljeret, men ukendt rumlig heterogenitet i form af effektive modelparametre. Denne type regressionsanalyse indebærer at erstatte den ukendte rumlige heterogenitet af hydrogeologiske parametre med lokalt midlede zoner. I modsætning til den tidligere nævnte Monte Carlo-analyse er denne regressionsanalyse baseret på kalibrering ved inversion [Cooley og Christensen, 2006].

I Danmark varierer de geologiske forhold markant på tværs af landet. Som følge heraf kan metoderne til håndtering af den geologiske heterogenitet være lokal betingede og have stor betydning for resultaterne af modelleringen [Danva og KL, 2019]. Det er vigtigt at tage hensyn til disse lokale variationer i geologien, da de kan påvirke grundvandets strømning. Ved at tilpasse metoderne og modellerne til de specifikke geologiske forhold kan man opnå præcise og pålidelige resultater til vurdering og håndtering af terrænnært grundvand [Henriksen et al., 2020a].

3 Problemformulering

I Danmark er der et stigende behov for grundvandsmodeller til at undersøge ændringer i det terrænnære grundvand for byområder, især på baggrund af de forventede klimaændringer, der kan påvirke grundvandsstanden. En af de største usikkerheder i grundvandsmodellering er den geologiske heterogenitet [Refsgaard et al., 2007]. For at håndtere denne usikkerhed kan stokastisk modellering af geologiske realiseringer og Monte Carlo-analyse af hydrologiske parametre anvendes. Disse metoder kan bidrage til at belyse beslutningsgrundlaget ved at vurdere risikoen for forskellige scenarier og ændringer i grundvandssystemet. På den måde kan der vælges løsninger, der bedst muligt imødekommer udfordringerne med det terrænnære grundvand.

Baseret på ovenstående er følgende problemformulering udarbejdet:

Hvordan kan et sandsynlighedsbaseret spænd for dybden til grundvandsspejlet, fra stokastisk modellering af terrænnært grundvand, forbedre beslutningsgrundlaget for byområder udfordret af terrænnært grundvand, nu og i fremtidige klimascenarier?

Hvortil denne problemformulering kan suppleres med følgende underspørgsmål:

1: *Kan validering af en grundvandsmodel baseres på et citizen science måleprogram, hvor borgere foretager manuelle pejlinger af grundvandsspejlet?*

2: *Hvilken betydning har anvendelsen af fremskrevne klimascenarier på simulering af dybden til det terrænnære grundvand?*

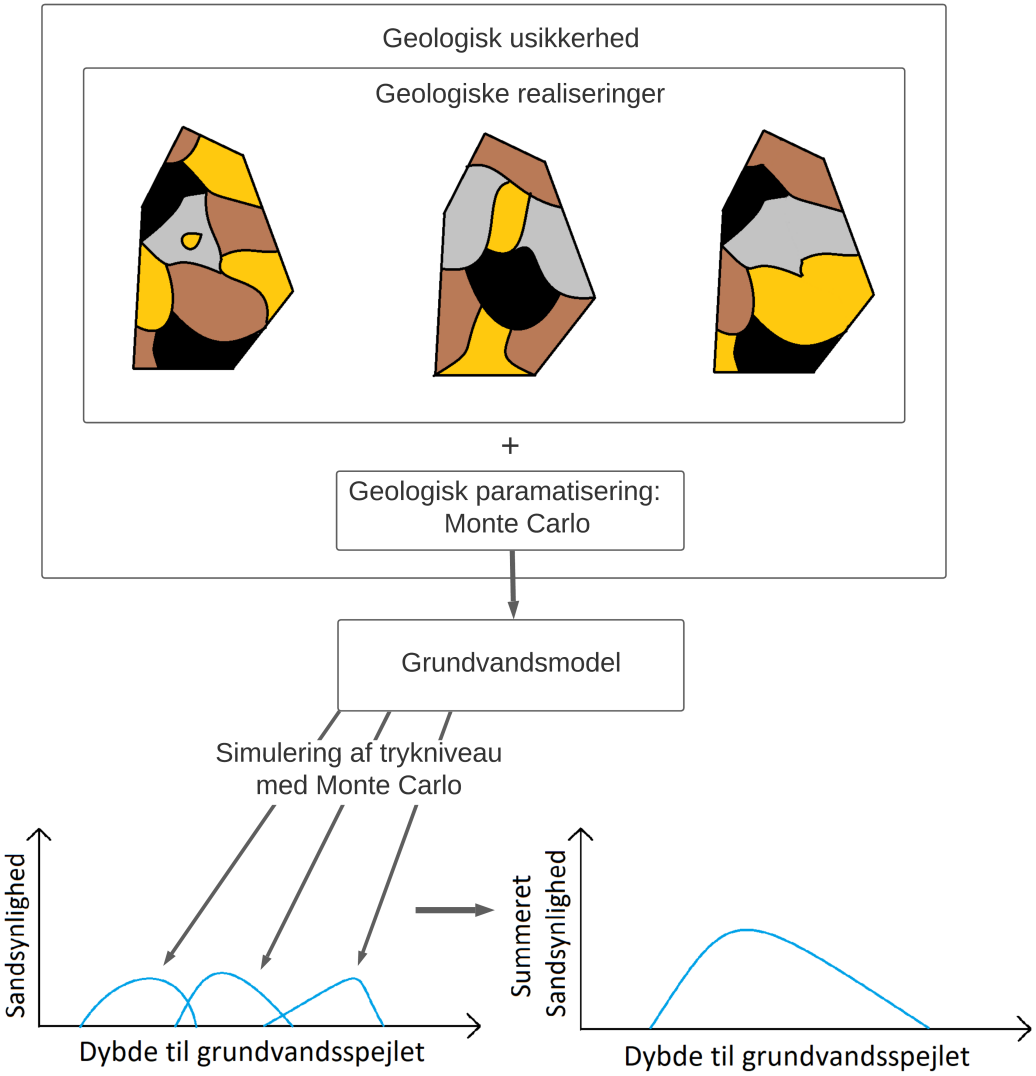
3: *Hvilken indflydelse har antallet af boringer på generering af geologiske realiseringer og simulering af det terrænnært grundvand?*

Projektstrategien vil blive gennemgået for at belyse, hvordan problemformuleringen og underspørgsmålene vil blive besvaret, samt i hvilke kapitler de forskellige nødvendige dele vil blive præsenteret.

3.1 Projektstrategi

Formålet med dette projekt er at belyse den geologiske usikkerhed. Dette kan opnås ved at anvende en stokastisk modelleringstilgang, hvor geologiske strukturer genereres baseret på en statistisk analyse af tilgængelige geologiske data. Denne tilgang tillader en kombination af heterogen geologisk fortolkning og geostatistiske analyser ved hjælp af flere lige sandsynlige geologiske realiseringer. Da den geologiske usikkerhed inkluderer forskelle i de individuelle geologiske elementer og parametriseringen af disse, vil usikkerheden i modellen yderligere blive vurderet ved en Monte Carlo-analyse på lokalt niveau. Ved at anvende flere geologiske realiseringer fravælges individuel kalibrering, da eventuel lokal heterogenitet vil blive udjævnet. Denne modelanalyse muliggør modellering af lokal skala heterogenitet og dens effekt på trykniveauet, som er afgørende for vurderingen af terrænnært grundvand [Danva og KL, 2019]. Kvaliteten af implementeringen af lokalskala heterogenitet baseret på boringsdata afhænger af det tilgængelige datagrundlag, herunder både mængden og dybden af boringerne.

Den foreslåede tilgang i denne rapport er baseret på inddragelse af flere metoder, som nævnt i dette afsnit, og metoden er illustreret i Figur 3.1.



Figur 3.1. Visualisering af tilgangen for dette projekt.

Figur 3.1 illustrerer, at ved brug af stokastiske realiseringer med tilhørende Monte Carlo-analyse af hydrologiske parametre, forventes det at resultere i forskellige sandsynlighedsfordelinger for dybden til grundvandsspejlet. Ved at summere disse sandsynlighedsfordelinger for forskellige lige sandsynlige geologiske realiseringer, opnås et sandsynlighedsbaseret spænd for dybden til grundvandsspejlet. Dette sandsynlighedsbaserede spænd kan yderligere udgøre beslutningsgrundlaget.

Projektet afgrænser sig til at tage udgangspunkt i et enkelt område, hvor der er udfordringer med terrænnært grundvand. Lokationen Kærby er valgt til dette formål og beskrives nærmere i kapitel 4. Kærby har samtidig et omfattende datagrundlag bestående af vandstandsmålinger og geologiske data, hvilket gør den foreslåede metode anvendelig. Kærby har nogle unikke hydrologiske forhold samt mulige ændringer i disse, hvilket gør området velegnet til vurdering og modellering af terrænnært grundvand.

Fremgangsmåden for at undersøge og besvare problemformuleringen samt de enkelte underspørgsmål vil blive præsenteret, og der vil blive angivet, hvilke kapitler der er relevante at læse i forbindelse med hvert enkelt underspørgsmål.

Besvarelse af problemformulering

Den stokastiske modellering af terrænnært grundvand tager udgangspunkt i projektområdet, som er beskrevet i kapitel 4, hvor en grundvandsmodel opstilles og beskrives i kapitel 5. Metoden for den stokastiske modellering, der er benyttet i projektet, beskrives i kapitel 7. I kapitel 8 analyseres det nødvendige antal stokastisk genererede geologiske realiseringer, hydrauliske parametre og Monte Carlo-realisationer af de hydrauliske parametre.

Den geologiske usikkerhed resulterer i et sandsynlighedsbaseret spænd for dybden til grundvandsspejlet, som valideres ved hjælp af vandstandsmålinger fra GRAVA-projektet, der er beskrevet i kapitel 6. Valideringen af grundvandsmodellen præsenteres i kapitel 9. Baseret på dette kan det sandsynlighedsbaserede spænd simuleres for både nutidige og fremtidige scenarier, som beskrives i kapitel 10. I dette kapitel sammenlignes resultaterne også med resultaterne fra GRAVA-projektet.

Underspørgsmål 1

Underspørgsmålet tager udgangspunkt i indberetninger fra borgere i forbindelse med GRAVA-projektet. GRAVA-projektet og dets målestationer er beskrevet i afsnit 4.3, hvor vandstandsmålinger og analyser heraf fremgår af kapitel 6. Vandstandsmålingerne benyttes herefter til validering, som præsenteres i kapitel 9, hvor kvaliteten og kvantiteten af målingerne diskuteres.

Underspørgsmål 2

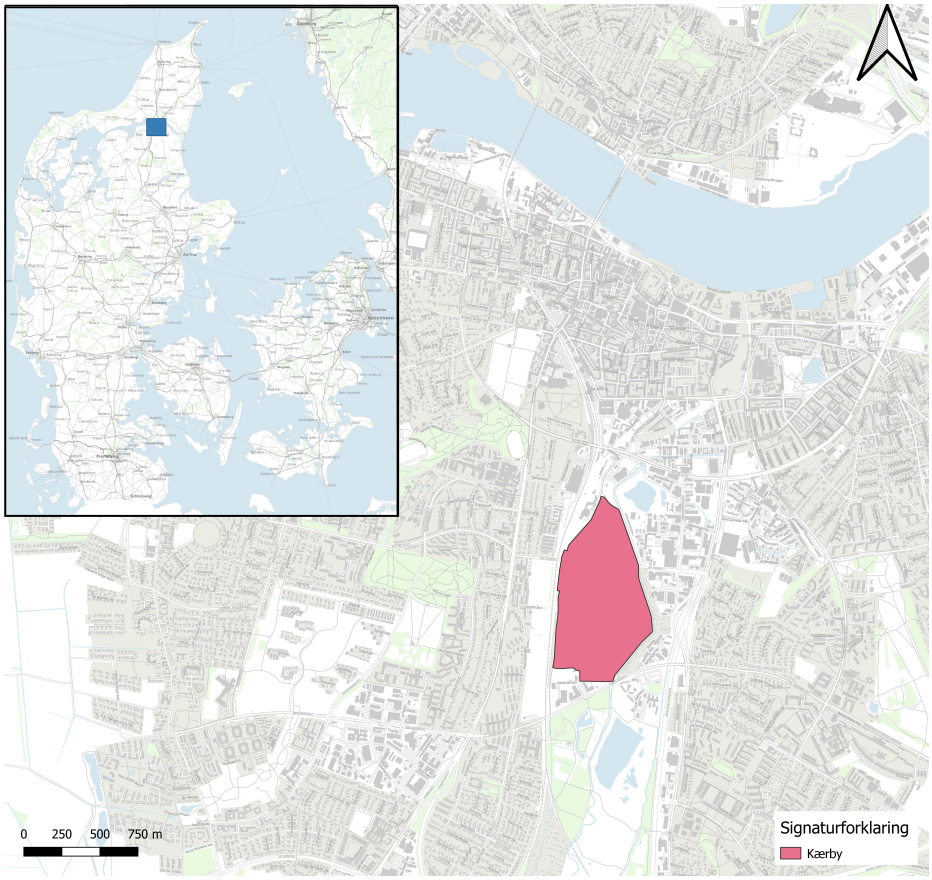
Betydningen af anvendelse af klimafremskrivning på simulering af terrænnært grundvand undersøges ved at benytte grundvandsmodellen, der er beskrevet i kapitel 5. Implementeringen og beskrivelsen af klimascenarierne findes i afsnit 5.2. Resultaterne fra de forskellige klimascenarier og deres betydning præsenteres i afsnit 10.2 og afsnit 10.3.

Underspørgsmål 3

Baseret på den stokastiske modellering, der er beskrevet i kapitel 7, undersøges effekten af at fjerne boringer på de geostatistiske parametre, der anvendes i den stokastiske generering af geologiske realiseringer. Dette suppleres med en vurdering af, hvordan fjernelsen af boringer påvirker det simulerede trykniveau ved brug af grundvandsmodellen fra kapitel 5. Denne analyse præsenteres i kapitel 11.

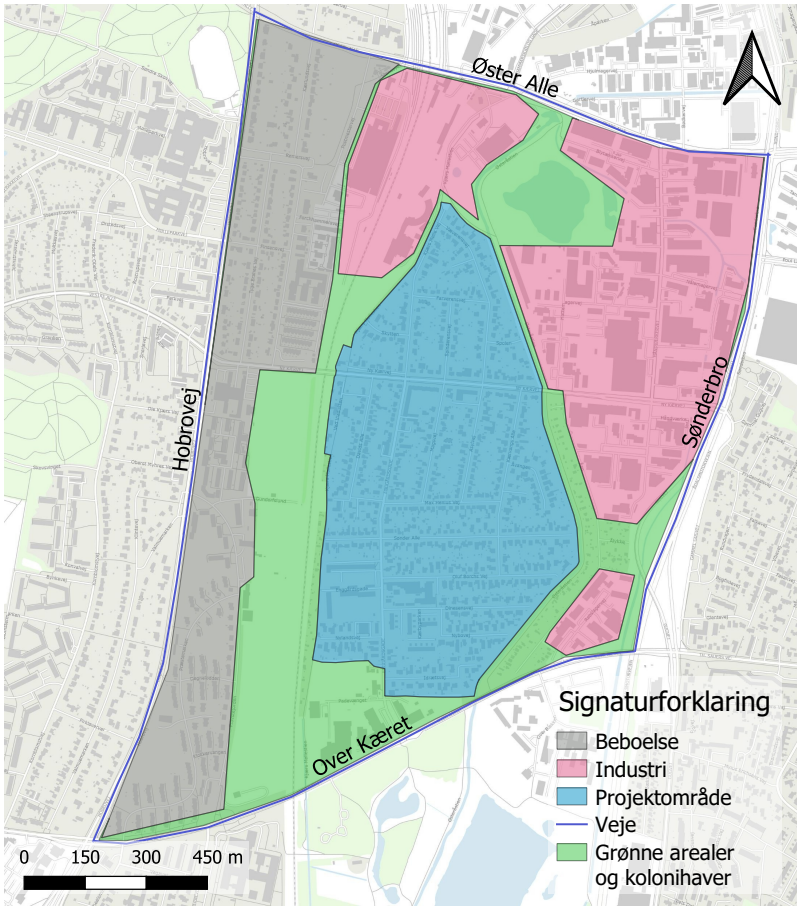
4 Kærby

Kærby er et mindre byområde i Aalborg, hvis placering er illustreret på Figur 4.1. Området er et villakvarter, som primært består af lavtliggende beboelse, hvor en stor del af husene har kælder. Derudover er der erhverv og en skole i området. [Kommune, 2006]



Figur 4.1.Projektlokations placering i Aalborg.

Kærby er ikke et fast defineret byområde. Der foreligger konsensus omkring, at området er afgrænset fire veje: Hobrovej, Over Kæret, Øster Alle og Sønderbro. Det område der i dette projekt bliver betegnet som Kærby, er markeret på figur 4.2, hvor den øvrige bebyggelse også er markeret med dets type. Derudover er de resterende områder, bestående af grønne arealer og kolonihaver ligeledes markeret.

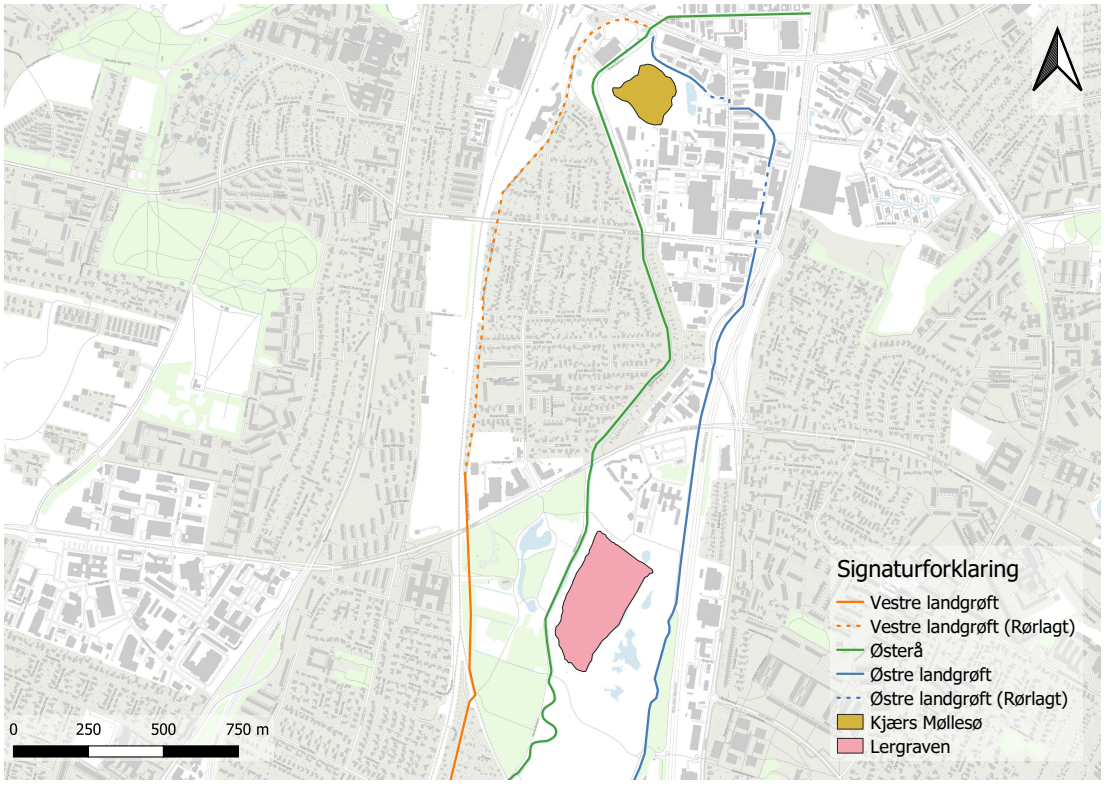


Figur 4.2. Typer af bebyggelse omkring projektområdet.

Området er afgrænset af vandløbene Østerå og Vestre Landgrøft, som er placeret henholdsvist øst og vest for projektområdet. Dette er valgt grundet, at disse vandløb har indflydelse på hydrologien i området.

4.1 Hydrologi i området

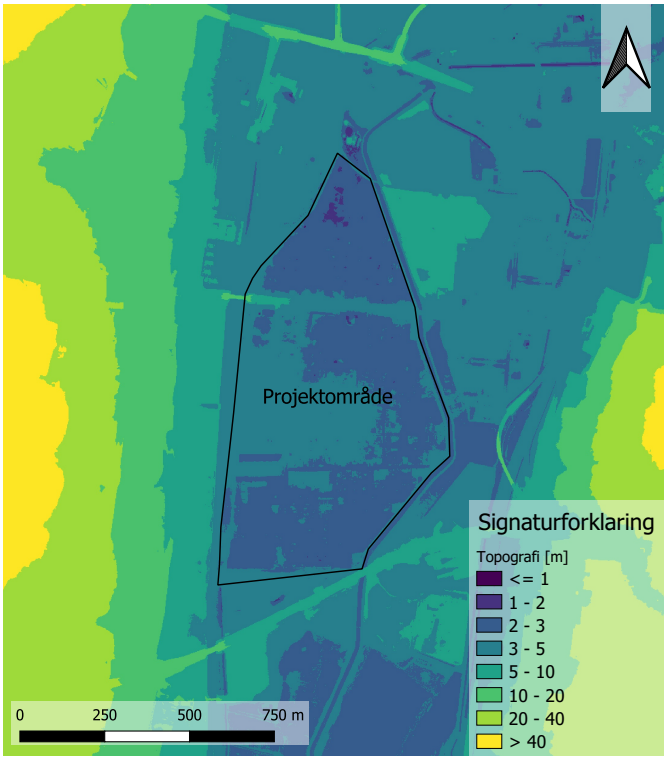
Projektområdet er relevant grundet dets udfordringer med terrænnært grundvand. En del af årsagen til dette skyldes, at flere vandløb og søer placeret nær eller i projektområdet, hvilket fremgår af figur 4.3.



Figur 4.3. Vådområder og vandløb omkring projektlokationen.

Søerne er placeret henholdsvist nord og syd for Kærby, begge nær Østerå. Østerå agerer som den østlige afgrænsning for projektområdet. Den vestlige afgrænsning af projektområdet er Vestre Landgrøft, som er rørlagt en del af strækningen. Ligeledes er Østerå en væsentlig større vandløb end Vestre Landgrøft, baseret på dybde, bredde og tørvejrs-flow. Der er derudover i forbindelse med et borgermøde omtalt, at der er etableret spunsvægge af egetræ i diget langs Østerå, ved den del af diget mod projektområdet. Hvor præcist disse spunsvægge er etableret, vides ikke.

Derudover har terrænforskellen til de omkringliggende områder, som fremgår på figur 4.4 [SCALGO, 2022], medvirket til, at Kærby har problemer med det terrænnære grundvand. Af figuren fremgår det, at den nordlige og sydlige del af projektområdet ligger lavest og den midt vestlige del af projektområdet ligger højest. Det fremgår ligeledes at terrænet falder fra kote 40 til 10 meter, på begge sider af Kærby.

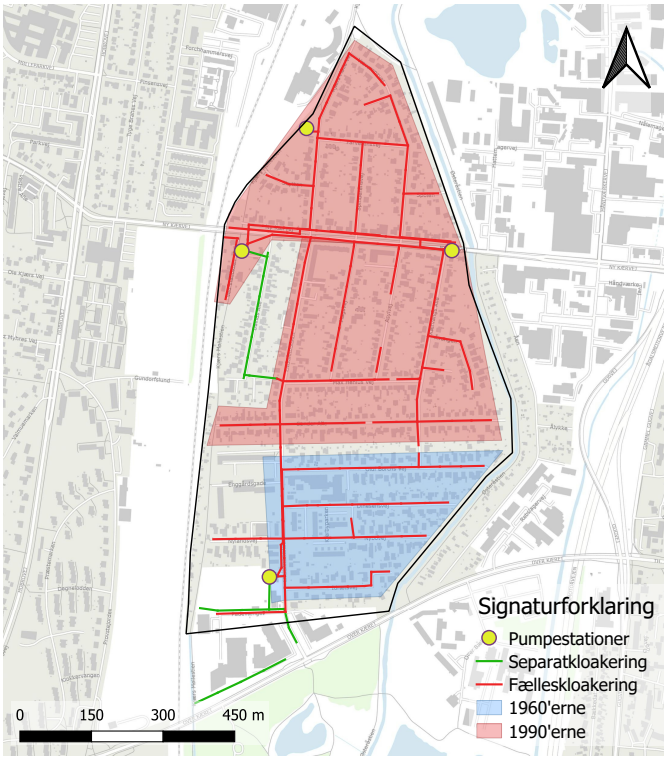


Figur 4.4. Terrænkoter i og omkring projekt området i Kærby.[SCALGO, 2022]

Udover de naturligt forekommende faktorer har kloaksystemet ligeledes en påvirkning på grundvandsstanden i projektområdet.

4.2 Kloakeringens indflydelse på grundvandet

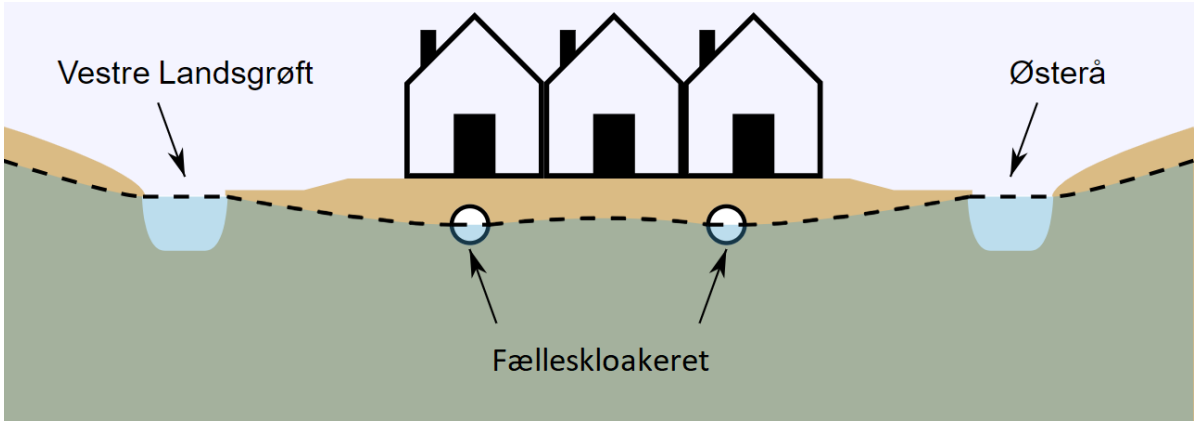
Det gamle fælleskloakkerede system i Kærby er beskadiget og utæt, hvorfor det dræner grundvandet i området. Den utætte kloak er dermed medvirkende til at holde grundvandsstanden nede. Placeringen af fælles- og separatkloakering, samt pumpestationer i Kærby er illustreret på Figur 4.5. Figuren viser ligeledes en overordnet generalisering af anlægstidspunkt for kloakledningerne. Dette skyldes at anlægstidspunkt er meget varierende, hvoraf de ældste strækninger er anlagt i 1930'erne og 1960'erne [Vandkoncern, 2023]. Af figuren ses det, at der er ganske få strækninger, i den sydlige og midt vestlige del af Kærby, som er separatkloakeret. Langt størstedelen af både de fælles- og separatkloakerede ledninger er anlagt i en kote 0,5 til 2 meter [og Aalborg Forsyning, 2023].



Figur 4.5.Det nuværende kloaksystem i projektområdet, samt en generaliseret oversigt over anlægsperioden.

I Kærby er der flere pumpestationer, hvor både spildevand og regnvand pumpes væk. Ved store regnhændelser forekommer der overløb, til den rørlagte del af Vestre landgrøft. Den østlige af pumpestationer håndterer kun regnvand, som udledes til Østerå. Vandet fra den sydlige pumpestation pumpes op til den midt vestlige pumpestation [og Aalborg Forsyning, 2023]. Det lavtliggende terræn medfører udfordringer med kloakering, hvilket gør det nødvendigt at pumpe vandet væk fra området.

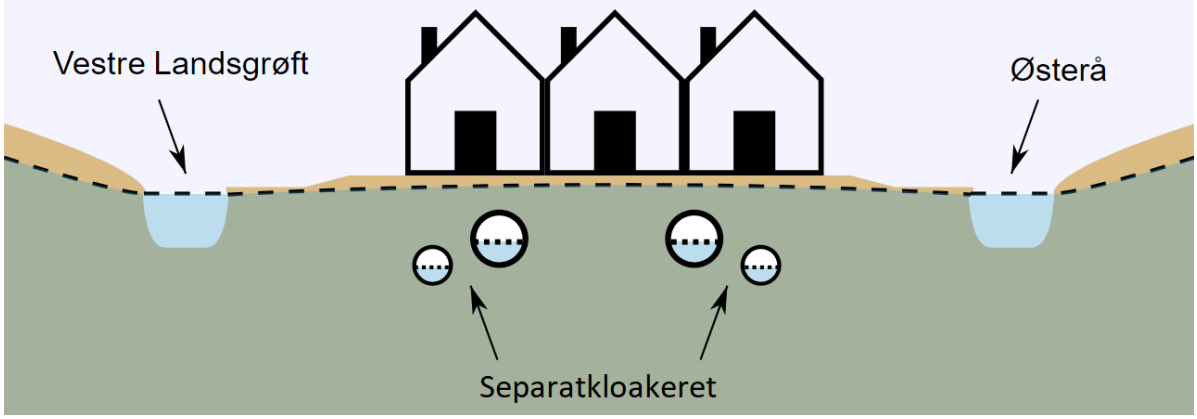
Ud fra de førnævnte faktorer, kan det nuværende grundvandsystem, samt kloakledningernes effekt, illustreres ved en konceptuel illustration, som fremgår af figur 4.6. Kloakledningernes drænende effekt er betinget af, at grundvandsstanden er over de utætte ledninger, hvilket kan være årstidsbestemt.



Figur 4.6.Konceptuel illustration af det nuværende grundvandssystemet i Kærby.[Ziegler et al., 2023]

Den nærtliggende ændring på grundvandssystemet i Kærby, kommer i form af Aalborg Kommunes målsætning om at have separatkloakere hele kommunen inden 2065 [Aalborg Kommune, 2023]. Dette vil medføre at kloaksystemets drænende effekt i området bliver afviklet, da nye og tætte kloakledninger ikke vil have samme effekt. En separatkloakering af Kærby kan medføre øget grundvandsspejl, som illustreret

på den konceptuelle illustration på figur 4.7 [Ziegler et al., 2023].

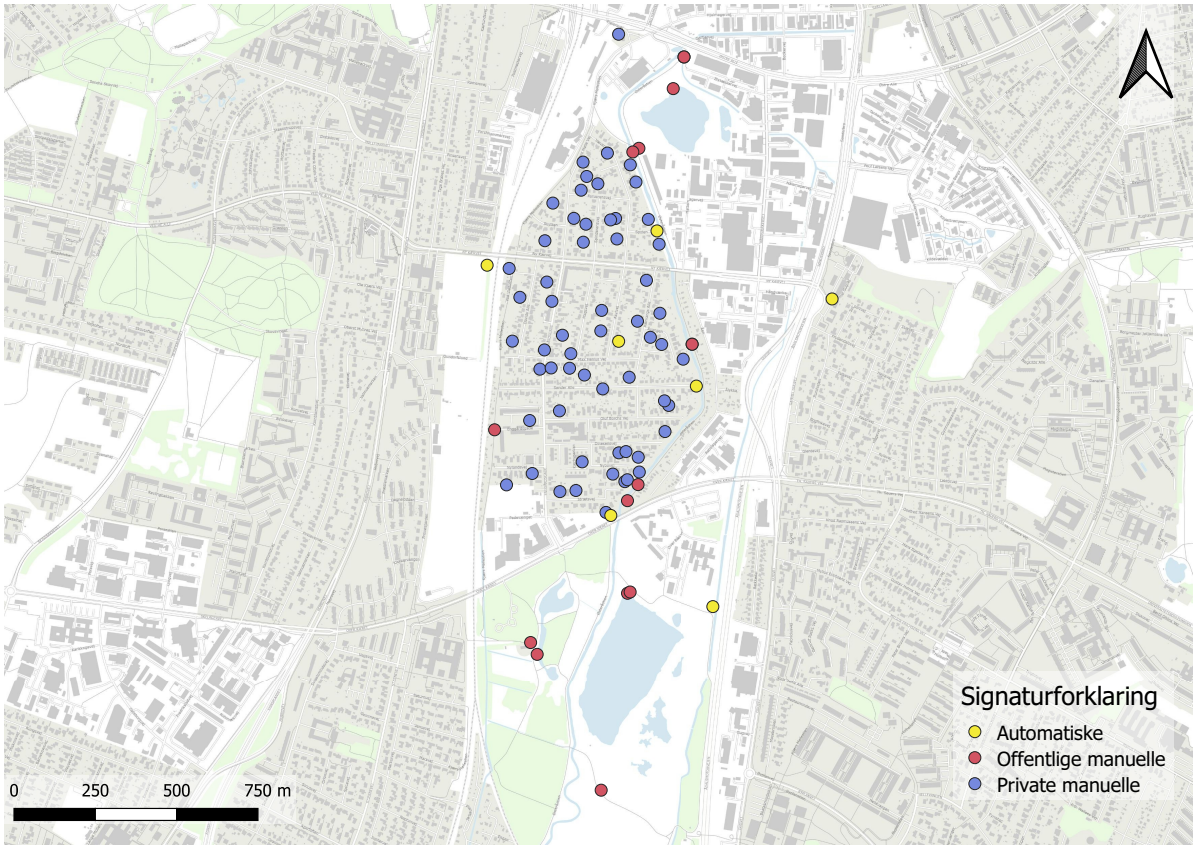


Figur 4.7.Konceptuel illustration af det fremtidige grundvandssystemet i Kærby.[Ziegler et al., 2023]

Siden Kærby i forvejen har problemer med det terrænnære grundvand, er der frygt for, at en separatkloakering vil forværre dette, tilsvarende effekten som separatkloakeringen har medført i Herning, Odense og Sunds [WSP et al., 2021]. Tidligere fremlagde Aalborg Kommune et forslag om at separatkloakere Kærby inden 31. december 2026 [Aalborg Kommune, 2021]. Dette blev ikke vedtaget grundet de formodede konsekvenser og juridiske begrænsninger i afhjælpning af problemstillingen. Sidstnævnte fremgår af WSP et al. [2021], hvor det viser sig problematisk at finde de nødvendige fælles løsninger mellem kommune, forsyning og grundejere, og placering af finansielle ansvar. Dette har medført at Aalborg Kommune, Aalborg forsyning, Aalborg Universitet og NIRAS er gået sammen om GRAVA-projektet.

4.3 GRAVA-projektet

GRAVA-projektet tager udgangspunkt i Kærby og de dertilhørende problemstillinger, hvor erfaringer herfra skal benyttes til fremtidige projekter. Erfaringerne består i modelstudier, løsningstiltag og målemetoder for grundvandsstanden. Målemetoderne indebærer både automatiske og manuelle målestationer, hvor de manuelle både er på offentlig og privat grund, de automatiske er udelukkende på placeret på offentlig grund [Ziegler et al., 2023]. De automatiske- og manuelle målestationer er opsat i forbindelse med GRAVA-projektets placering er illustreret på figur 4.8.



Figur 4.8.Oversigt over forskellige offentlige og private målestationer.

Benyttelsen af manuelle målestationer må tilskrives ønsket om at inddrage borger i projektet. Dermed kan borgerne medvirke til at forøge datagrundlaget, ved at indberette målinger fra egen eller offentlig grund. Dette gøres ved at indsende indlæsninger til en fælles portal. En sådan inddragelse af borger til projektet kaldes citizen science. De første målestationer blev opsat i første halvdel af 2019, hvor de fleste på private grund er opsat i løbet af 2020. Projektet sluttede officielt i efteråret af 2022, men der kan stadig indberettes målinger.

Der bliver i forbindelse med GRAVA-projektet anvendt tre målestationsopsætninger. Der er placeret automatiske målestationer og 2 typer af manuelle målestationer. De manuelle målestationer er både placeret på privat grund, hvor grundejer selv står for indberetninger, og som offentlige målestationer, hvor alle kan lave indberetninger. De offentlige målestationer og skalapæle er vist på figur 4.9.

Figur 4.9.Billede af en offentlig manuel målestation, set fra siden og oppe fra (til venstre). Samt billede af en skalapæl (til højre).

Den automatiske loggeres placering fremgår af figur 4.8, og et billede af en af målerne fremgår af figur 4.10.

Figur 4.10.Automatisk målestation.

Alle målinger for de forskellige målestationer vil videre behandles og blive anvendt til validering af den opsatte grundvandsmodel. Dermed kan der udarbejdes en grundvandsmodel, med det formål at beregne grundvandsstanden i projektområdet, i både et separat- og fælleskloakeret scenarie.

4.4 Opsamling og diskussion

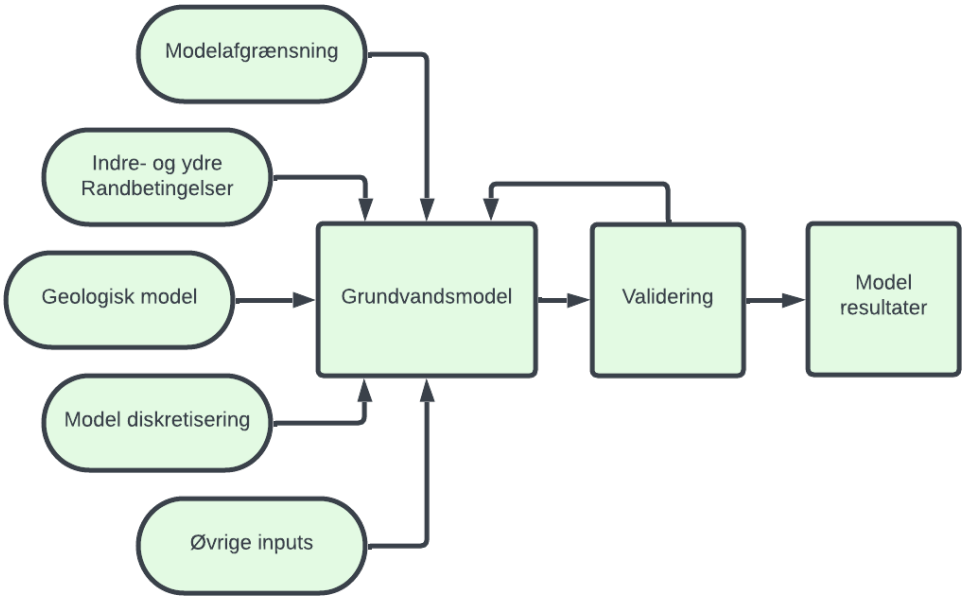
Kærby er relevant, da området er påvirket, er terrænnært grundvand, og GRAVA-projektets arbejde med dette er brugbar for det videre arbejde. Der forekommer alligevel nogle usikkerheder i den data som generelt er tilgængelig for Kærby.

Kærby har haft udfordringer med terrænnært grundvand i mange år, hvilket betyder, at de private og offentlige løsninger, som er anvendt til at modvirke dette, ikke altid er registreret korrekt. Dette er eksempelvis tilfældet med spunsvæggene som er placeret i den vestlige del af diget ved Østerå. Spunsvæggens størrelse, præcise placering og stand er ukendt, hvilket medfører usikkerheder, for det videre arbejde med dette område. Derudover er den nordlige strækning af den rørlagte del af vestre landsgrøft blevet renoveret, hvortil omfanget og dets indvirken på grundvandet er ukendt. Kærby har et gammelt kloaksystem, som i nogle områder daterer tilbage til 1930'erne og 1960'erne. Disse gamle ledninger er med tiden revnet og dræner derfor området for grundvand. Omfanget af dræningsevnen er ukendt, for de enkelte ledningsstykker, hvilket i arbejdet med grundvandsmodellen ligger grund for usikkerheder ved opsætningen af denne. Der er også i et uvist omfang, lagt omfangsdræn omkring nogle af husene i Kærby, men det vides ikke, hvilke huse disse omfatter. Flere af disse ligger ikke offentligt tilgængeligt, hvorfor viden om disse er tilegnet grundet tilfældigheder. Derfor er det muligvis flere grundvandspåvirkninger, som stadig er ukendte.

Da der forbindelsen med opstarten af GRAVA-projektet været afholdt borgermøder, for at gennemgå de udfordringer de står over for i Kærby. Til mødet valgte 57 at få opstillet manuelle grundsmålestationer, på egne matrikler. [Ziegler et al., 2023] Placeringen af disse fremgår af figur 6.2. Der forekommer nogle generelle usikkerheder ved, at der kun er placeret 57 manuelle målestationer på borger matrikler, når der i Kærby sammenlagt er mere end 617 matrikler [Dataforsyningen, 2023]. Grundvandsstanden og geologien er derfor ikke repræsenteret på alle matrikler, hvilket kan give et ikke fuldstændig datasæt til at beskrive Kærbys grundvand og geologi.

5 Opsætning af grundvandsmodel

I dette kapitel beskrives fremgangsmåden for opsætningen af grundvandsmodellen med fokus på simulering af hydrostatisk trykniveau under stationære forhold og håndtering af geologisk usikkerhed gennem stokastisk generering af geologiske realiseringer. Modellen opsættes ved hjælp af softwaren GMS (Groundwater Modeling System), hvor Modflow anvendes til grundvandsmodellering. For at håndtere lokal skala heterogenitet benyttes T-PROGS til konvertering af boredata til rumlige geologiske realiseringer. Den generelle fremgangsmåde for opsætningen af modellen illustreres i figur 5.1.



Figur 5.1.Generel fremgangsmåde for opsætning af grundvandsmodel.

GMS: Modflow har flere varianter af deres 'Solver', hvoraf der i dette projekt benytter er Modflow: NWT (Newton solver). Dette er valgt, på grund af Modflow: NWT er udviklet til at grundvandsmodeller for frie magasiner, herunder udtørring og vandmætning af celler [Niswonger et al., 2011]. En redegørelse for den benyttede beregningsmetoder for Modflow: NWT fremgår af bilag A.

5.1 Model område

Kærby har nogle særlige karakteristika, der gør en grundvandsanalyse interessant. Som et resultat af GRAVA-projektet er der mange geologiske boringer til rådighed, hvilket muliggør oprettelsen af en geologisk model, der kan anvendes til at undersøge den geologiske usikkerhed. Udover de geologiske data er der også indberettet dybder til grundvandsspejlet, hvilket giver mulighed for validering af det simulerede trykniveau for modelområdet [Ziegler et al., 2023].

I det følgende vil modelopsætningen og de valg, der er foretaget i forbindelse med opsætningen, blive beskrevet for at kunne oprette en repræsentativ model, der simulerer trykniveauet for grundvandsspejlet

i Kærby. For at bestemme modelområdet vil de hydrologiske afgrænsninger for Kærby blive undersøgt.

5.1.1 Hydrologisk afgrænsninger og randbetingelser

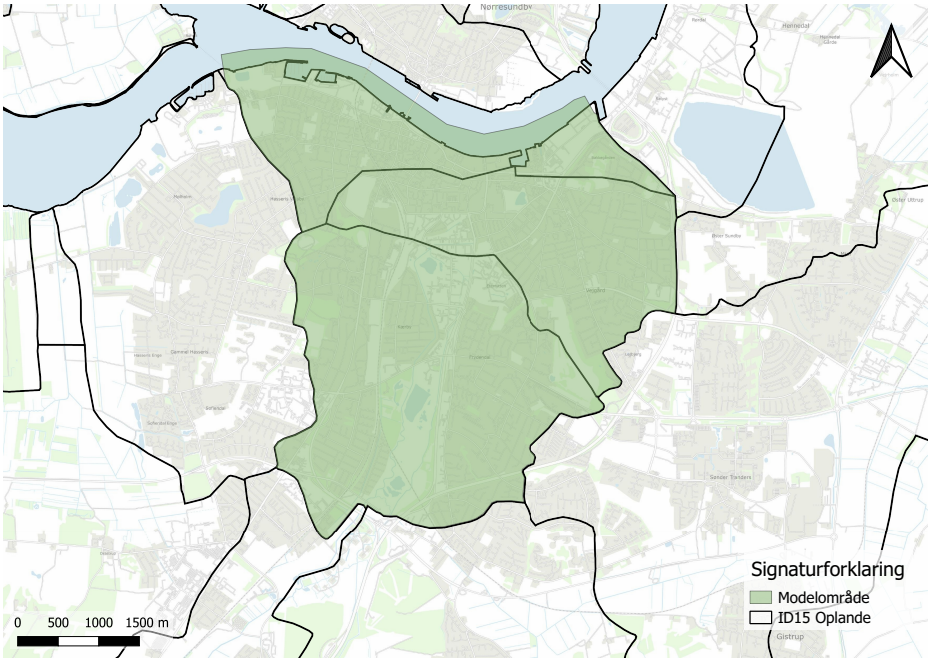
Den hydrologiske afgrænsning af området fastlægges ud fra, hvor der er naturlige hydrauliske afgrænsninger. Dette sikrer, at afgrænsningen ikke påvirkes af grundvandsforhold uden for det definerede modelområde. De hydrologiske påvirkninger vil blive opdelt i indre- og ydre randbetingelser. De indre randbetingelser beskriver, hvordan vandet i modelområdet interagerer med vandkredsløbet, mens de ydre randbetingelser beskriver grænserne for modellen og vandets interaktion med omgivelserne uden for modelområdet [Spitz og Moreno, 1996].

Ydre randbetingelser

De hydrologiske afgrænsninger kan identificeres som fysiske naturlige afgrænsninger som eksempelvis søer, floder og havet [Spitz og Moreno, 1996]. Er dette ikke muligt, kan der findes andre måde at afgrænse modelområdet. Der findes tre typer randbetingelser for at afgrænse sit modelområde. Spitz og Moreno [1996] beskriver randbetingelserne som følgende:

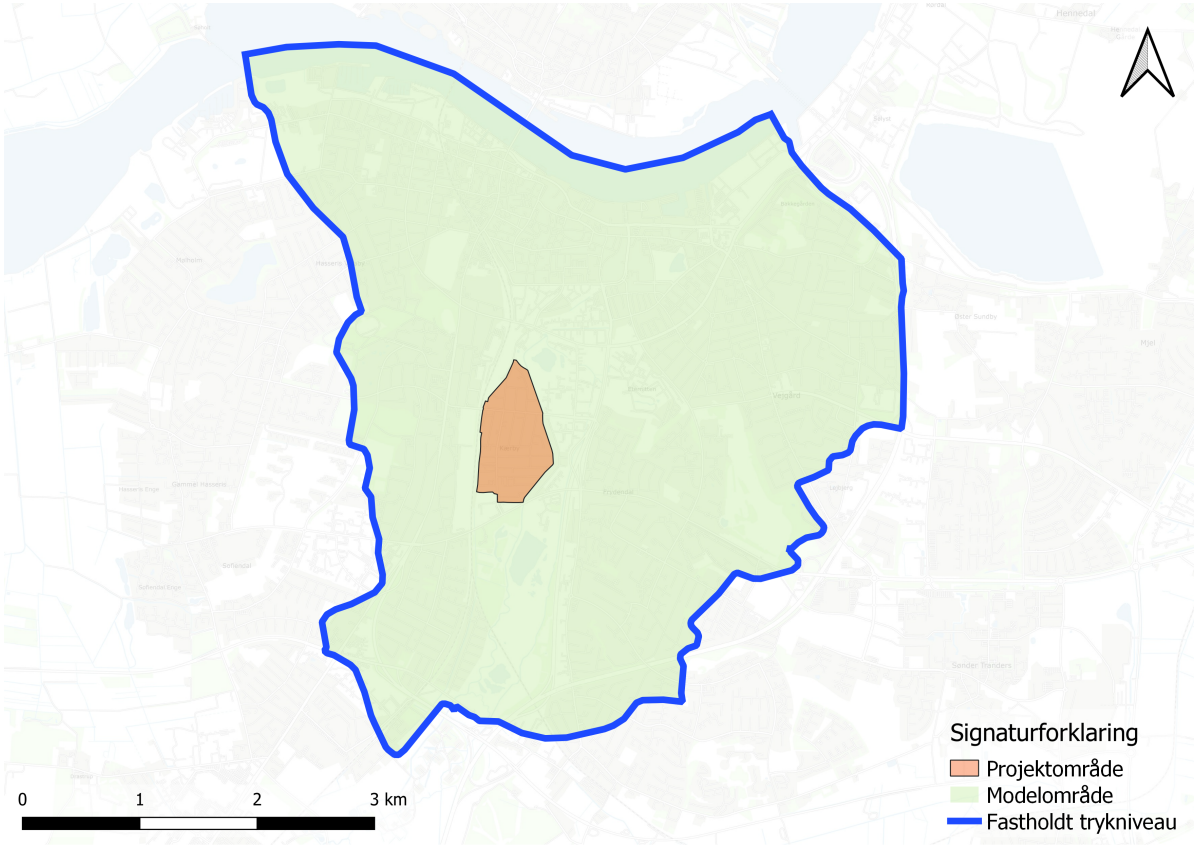
- **Specificeret trykniveau** også kendt som Dirichlet-grænse.
- **Specificeret flow** også kendt som Neumann-grænsen.
- **Trykafhængigt flow** også kendt som Cauchy-grænse.

Nord for modelområdet er Limfjorden, hvorfor denne kan antages som værende en naturlig hydraulisk afgrænsning. Limfjorden antages som semistationær ved kote 0, og betegnes som værende specificeret trykniveau. Mod syd, øst og vest udvælgelses de hydrauliske afgræsninger for grundvandet, baseret på Østerå hydrologiske opland som er udtrykket fra Miljøstyrelsen [2023], hvilket fremgår af Figur 5.2.



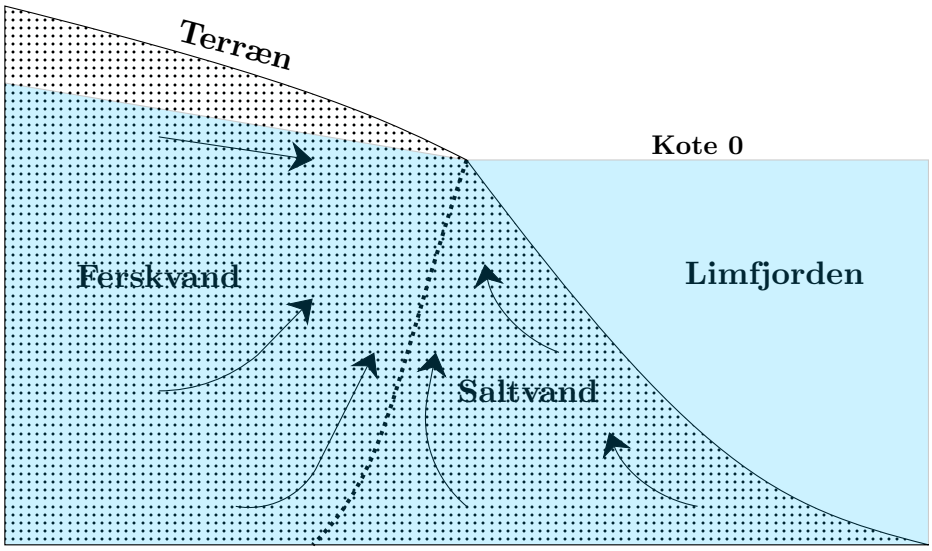
Figur 5.2. Afgrænsningen af modelområdet baseret på vandløbsoplande (ID15 oplande) fra Miljøstyrelsen [2023].

Modelafgræsningen er fastsat med specificeret trykniveau, hvor de anvendte værdier er udtrukket fra Dataforsyningen [2022]. Ligeledes anvendes grundvandspotentialet til at fastsætte startbetingelser for hele grundvandsmodellen. Den endelige hydrauliske afgrænsning er illustreret på figur 5.3.



Figur 5.3.Hydrologisk afgrænsning for modelområdet, samt projektområdets placering i forhold til dette.

Den hydrologiske afgrænsning omkring Kærby er som illustreret på ovenstående figur. For de nedre lag anvendes der specificeret flow, hvilket betyder, at der ikke forekommer vandudveksling. Der bliver ikke anvendt trykafhængigt flow noget sted i modellen. En illustration af randbetingelserne for den nordlige afgrænsning fremgår af figur 5.4.

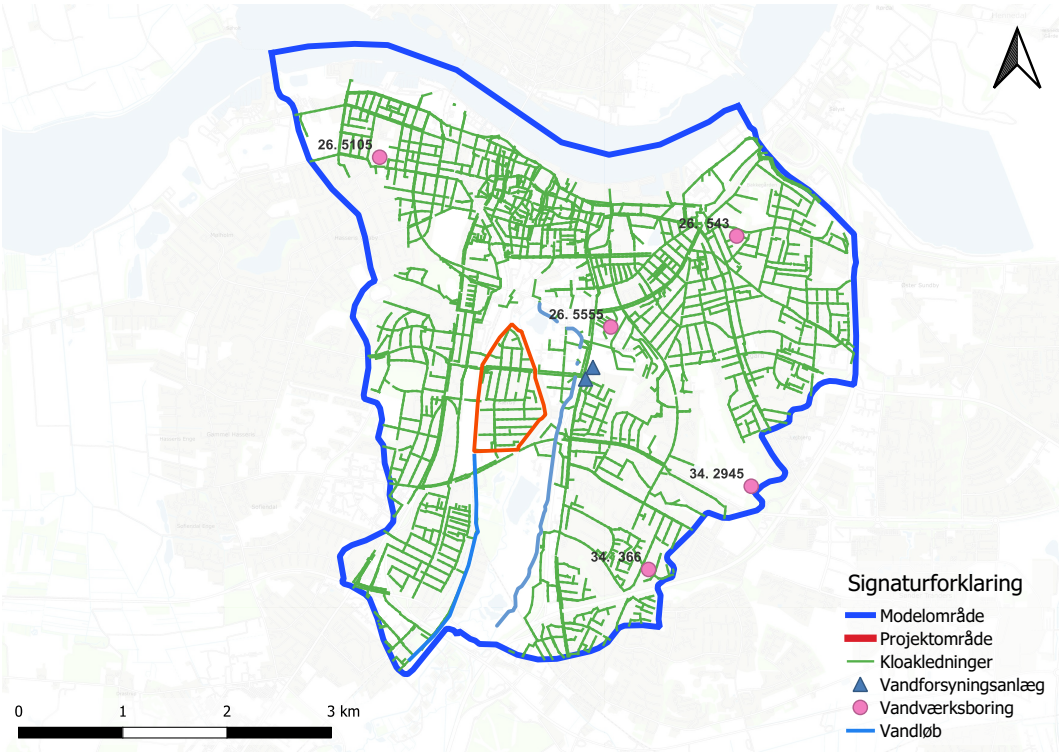


Figur 5.4.Hydrologisk afgrænsning med Limfjorden, hvortil pilene beskriver strømningsretninger.

Efter fastlæggelsen af de ydre randbetingelser kan vi nu undersøge, hvilke indre randbetingelser som er gældende inden for dette område. Analyse af disse indre randbetingelser vil fastlægge det hydrologiske system indenfor modelområdet.

Indre randbetingelser

De indre randbetingelser beskriver udveksling med vandkredsløbet såsom grundvandsdannelse, vandindvinding, dræn og over- og underjordiske strømninger. [Spitz og Moreno, 1996] De indre randbetingelser som anvendes i grundvandsmodellen fremgår af figur 5.5 og vil videre blive beskrives i dette afsnit.



Figur 5.5. De indre randbetingelser til opsætning af grundvandsmodellen.

Indvindingsboringerne i modelområdet findes flere steder. Indvindingsmængderne er udtrukket fra Jupiter databasen [GEUS, 2023]. Vandforsyningsboringerne har en gennemsnitlig årlig indvinding på 0,001 m^3/s pr. boring. De øvrige vandværksboringer er angivet med DGU-numre på figur 5.5, og deres indvindingsmængder er angivet i tabel 5.1.

Tabel 5.1. Indvindingsmængder for boringer i modelområde [GEUS, 2023].

DGU nr.	**Indvinding** $\frac{m^3}{år}$	**Indvinding** $\frac{l}{s}$
26.5555	62207	1,97
26.543	184936	5,86
34.366	77062	2,44
34.2945	311952	9,89
26.5105	343919	10,89

De indre randbetingelser er valgt til også at omfatte det eksisterende kloaksystem i Kærby samt resten af Aalborg. I Kærby er kloaksystemet primært et fælleskloakeret område, som vist på figur 4.5. De eksisterende kloakledninger i Kærby er meget gamle og utætte, hvilket medfører dræning af grundvandet i modelområdet. [Nielsen og Thorndahl, 2022] En generaliseret oversigt over alderen på kloakledningerne kan ses på figur 4.5. Når vandet er blevet drænet, forlader det modellen. Andre interaktioner mellem kloakledninger og grundvand, såsom vand fra ledninger, der trænger ud i grundvandet, er negligeret i modellen.

Som nævnt i afsnit 4 er de fleste kloakledninger i projektområdet mellem kote 0,5 og 2. Baseret på topografien i området antages det, at alle kloakledninger er placeret i en dybde på 1,2 meter. Dræneffekten er sat til 0,31 $m^2/d/m$, baseret på gennemsnitlige værdier fra kalibreringen i GRAVA-projektet [Nielsen og Thorndahl, 2022].

Der bliver i modellen også medtaget de hydrauliske forhold vedrørende ind- og udsivningen af vandløb. Ind- og udsivningsmængderne er afhængigt grundvandsspejlet, kontra det simulerede trykniveau i beregningscellerne. For modelområdet er vandløbene implementeret med et fast dybde, hvilket er sat til 0,9 m under terræn. [Nielsen og Thorndahl, 2022]

Topografien for området er også blevet hentet fra HIP-databasen [Dataforsyningen, 2022] og anvendes til at bestemme dybden til grundvandet ved at beregne forskellen mellem topografien og det simulerede trykniveau. Den anvendte topografi kan ses på figur B.3.

Infiltrationen til grundvandet refererer til den mængde af nedbøren, som ikke fordamper eller drænes fra vandløb, indvindinger eller kloakken [Karlsen og Sørensen, 2014]. Infiltrationen til grundvandet i det øvre lag er udtrukket fra HIP-databasen, der er genereret ved DK-modellens To-lags model [Dataforsyningen, 2022]. I grundvandsmodellen er fokus rettet mod den mættede zone, og den umættede zone er derfor ikke inkluderet. Den umættede zone er vurderet at kunne negligeres, da denne er minimal i Kærby med en tykkelse på omkring 1 til 1,5 meter. [Nielsen og Thorndahl, 2022]

Infiltrationen til grundvandet er beregnet på 100 x 100 meter celler. Til beregning af grundvandsdannelsen har Dataforsyningen [2022] benyttet MIKE SHE by DHI's software til evapotranspiration, hvilket er beregnet på dagsbasis [Henriksen et al., 2020b]. Ved implementering af grundvandsdannelse midles inputdataen for hver årstid. Årstidsmidlerne skaleres med henholdsvis 0,5 og 1,5 for sommer og vinter, hvilket er baseret forsimpling af undersøgelser fra Thorling et al. [2021]. Dette gøres med henblik for at undersøge mere ekstreme scenarier. En illustration af de beregnede celleværdier for infiltrationen til grundvandet før skaleringen, for sommer og vinter, fremgår af bilag B.1.

5.2 Hydrologiske fremskrivninger

Grundet det omfang af at ændre kloaksystemet, er det væsentligt at undersøge grundvandsspejlet ved at separatkloakere. Af denne årsag simuleres grundvandsspejlets trykniveau i tre klimascenarier: Nutidigt, nær-fremtid og fjern-fremtid. Der benyttes fremskrivning til to scenarier, nær fremtid og fjern fremtid. Dette gøres ved at benytte potentialekort og grundvandsdannelse fra HIP databasen [Dataforsyningen, 2022], hvor tidligere beskrevne data fra denne database, også er tilgængeligt i klima fremskreven form. [Henriksen et al., 2020b]

Klimafremskrivningen er foretaget ved at simulere grundvandsstanden i to perioder (nærfremtid og fjernfremtid) af 30 år, udover den historiske reference periode. Hver fremskrivning er simuleret med klimamodeller. Referenceperiode er simuleret for perioden 01-01-1991 til 31-12-2020. Nær- og fjernfremtid er simuleret for henholdsvis 01-01-2041 til 31-12-2070 og 01-01-2071 til 31-12-2100. Alle modeller er kørt med et opvarmnings-år, hvilket der ikke er udtaget værdier for [Henriksen et al., 2020b]. En oversigt over beregningsperioderne for klimascenarierne fremgår af Tabel 5.2.

Tabel 5.2.Periode og opvarmnings-år for klimafremskrevne scenarier fra HIP databasen [Dataforsyningen, 2022]

Simulering periode	**Nutid**	**Nær fremtid**	**Fjern fremtid**
Opvarmnings-år	1990	2040	2070
Årrække	[1991-2020]	[2041-2070]	[2071-2100]

For de klimafremskrevne perioder er der simuleret 22 klimamodeller, som er midlet til et enkelt resultat. Af modellerne er 17 med et udledningsscenarie på RCP 8.5 og fem med RCP 4.5 [Henriksen et al., 2020b]. Forkortelsen RCP står for *Representative Concentration Pathways*, som angiver forskellige scenarier for udledningen af drivhusgasser og dermed ændringer i vejrforhold. Disse scenarier har forskelligt niveau alt efter, hvor kritisk det er, jo højere værdi, desto mere kritisk. [Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015] I implementeringen af udledningsscenarierne benyttes klimamodeller fra Jacob et al. [2014] som inputparametre. [Henriksen et al., 2020b]

5.2.1 Hydrologiske input

Grundvandspotentialerne er hentet fra HIP database [Dataforsyningen, 2022] og implementeret på samme vis som de ikke fremskrevne. Potentialeberegningerne er fortaget med de førnævnte 22 klimamodeller, hvor klimamodellen med en cellestørrelse på $500 \cdot 500$ meter er benyttet [Henriksen et al., 2020b].

Fremskrivning af grundvandsdannelsen er implementeret på samme vis som grundvandspotentialerne, hertil benyttes skalering på 0,5 og 1,5, for henholdsvis sommer og vinter.

5.2.2 Randbetingelser

Randbetingelsernes placering ændres ikke for de forskellige klimafremskrevne scenarier. Teoretisk burde metoden være at estimere randbetingelserne på ny, for det klimafremskrevne potentialekort. Af flere årsager er dette ikke gjort. Dette skyldes grundvandspotentialet i høj grad er påvirket af andre parametre end grundvandsdannelsen. Dermed forventes det ikke, at grundvandspotentialet og dermed randbetingelserne ændre sig væsentligt. Yderligere foreligger der en vis usikkerhed ved klimafremskrivningen, hvorfor der ved korrektion herfor vil være en detaljegrad ude af proportioner med usikkerheden. Af samme årsag benyttes der ligeledes samme randbetingelser ved sommer og vinter simuleringer.

5.3 Model diskretisering

For at kunne foretage numeriske beregninger skal modellen inddeles i celler. Cellerne angiver beregningspunkter, hvor hver celle er forbundet til de omkringliggende celler. Ved opsætning af grundvandsmodeller skal der vælges en diskretisering, for cellernes størrelse. [Spitz og Moreno, 1996] Diskretiseringen har traditionelt været et rektangulært gitter, hvor noget software har mulighed for andre geometriske strukturer [Jensen, 2003].

Med det fastlagte modelområde vil diskretiseringen have indflydelse på antallet af celler i modellen. Antallet af celler har væsentlig indflydelse på beregningstiden, grundet det øgede antal af beregningspunkter. Diskretiseringen har ligeledes indflydelse på nøjagtigheden af beregningerne, da større celler midler over større områder og trykniveauet beregnet i cellens centrum. [Spitz og Moreno, 1996]

Da dette projekt ønsker at analysere resultaterne for flere geologiske realiseringer, medføre dette, at der er behov for flere simuleringer. Dermed er beregningstiden ikke uvæsentlig, da dette kan begrænse antallet af scenarier, som kan undersøges. Samtidig er projektområdet et mindre område, hvorfor grovere diskretiseringer kan medføre unuancerede resultater. Med baggrund i ovenstående er begrundelsen for diskretiseringen beskrevet vertikalt og horisontalt.

5.3.1 Vertikal diskretisering

Den vertikale diskretisering er finere desto tættere på terræn. Dette skyldes, at mange af boringerne i projektområdet har en fin geologisk inddeling og en dybde på 2 til 3 meter. For at kunne implementere denne geologiske inddeling, er der valgt en fastsat lagtykkelse på 0.5 meter i de øverste 3 meter.

Derudover anbefaler Spitz og Moreno [1996], at celleforøgelsen fra celle til celle ikke må overstige en faktor 1,5. Dermed medføre dette et vis antal vertikale lag for at imødegå dette.

Med udgangspunkt i dette er den vertikale lagdeling fastlagt som vist i tabel 5.3. I tabellen fremgår ligeledes lag skaleringen i forhold til det forrige lag.

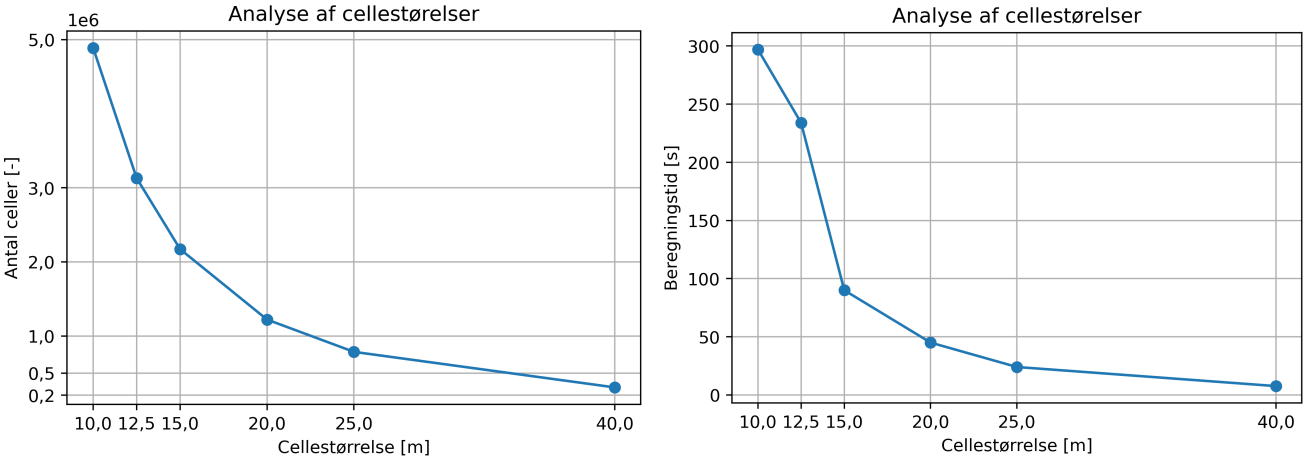
Tabel 5.3.Oversigt over lagenes dybde, tykkelse og skalering.

	Lag top [m.u.t.]	**Lag bund** [m.u.t.]	**Lag tykkelse** [m]	**Skalering af lagene** [-]
Lag 1	0	0,5	0,5	-
Lag 2	0,5	1,0	0,5	1,0
Lag 3	1,0	1,5	0,5	1,0
Lag 4	1,5	2,0	0,5	1,0
Lag 5	2,0	2,5	0,5	1,0
Lag 6	2,5	3,0	0,5	1,0
Lag 7	3,0	4,0	1,0	2,0
Lag 8	4,0	6,0	2,0	2,0
Lag 9	6,0	9,0	3,0	1,50
Lag 10	9,0	14,0	5,0	1,66
Lag 11	14,0	21,0	7,0	1,40
Lag 12	21,0	31,0	10,0	1,43
Lag 13	31,0	50,0	19,0	1,90
Lag 14	50,0	80,0	30,0	1,58

Som det fremgår af ovenstående tabel, er der flere lag skaleringer over 1,5, dette skyldes, at lag tykkelserne forsøges at holdes til heltal efter de første tre meter. Mange geologiske lag beregningstiden væsentligt, hvorfor skaleringen i nogle tilfælde overstiger 1,5. Skaleringen af lagene er begrænset til ikke at overstige 2,0.

5.3.2 Horisontal diskretisering

Med antallet af vertikale lag fastlagt, kan der foretages en analyse af effekten ved forskellige horisontale diskretiseringer. Analysen består i at opnå den bedste balance mellem præcision og beregningstid. Denne er baseret på antallet af celler og beregningstiden ved forskellige cellestørrelser, hvilket er illustreret på Figur 5.6.



Figur 5.6.Beregningstid og antal celler ved forskellig cellestørrelse.

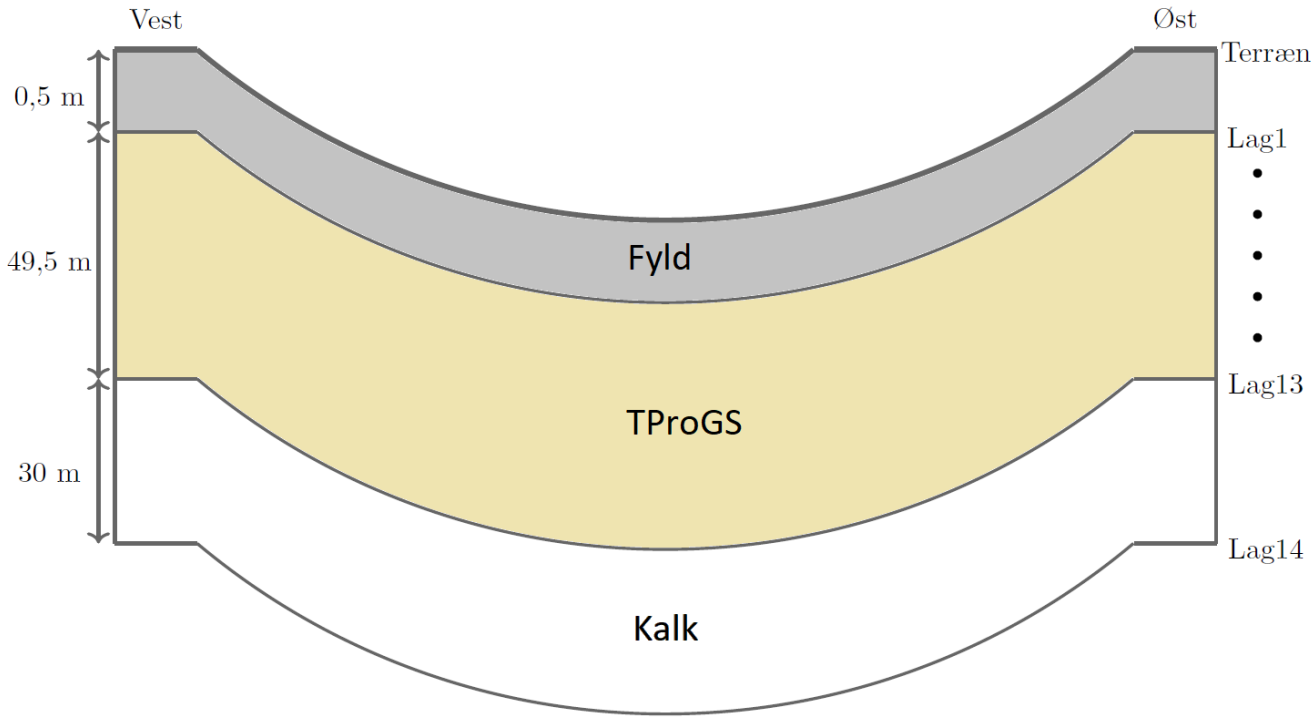
Ud fra ovenstående analyse, er der valgt en cellestørrelse på $15 \cdot 15$ m. Dette er valgt på baggrund af

beregningstiden, hvor der forekommer en markant stigning i beregningstiden på cellestørrelser mindre end $15 \cdot 15m$. Beregningstiden stiger fra cirka 1,5 min til cirka 4 min ved at sænke cellestørrelsen med 2,5 m. Ligeledes falder beregningstiden ved stigende cellestørrelser, hvor ændringen ikke er i samme størrelsesorden, fra cirka 1,5 min til 40 s ved at øge cellestørrelsen med 5 m.

5.4 Geologisk modelopsætning

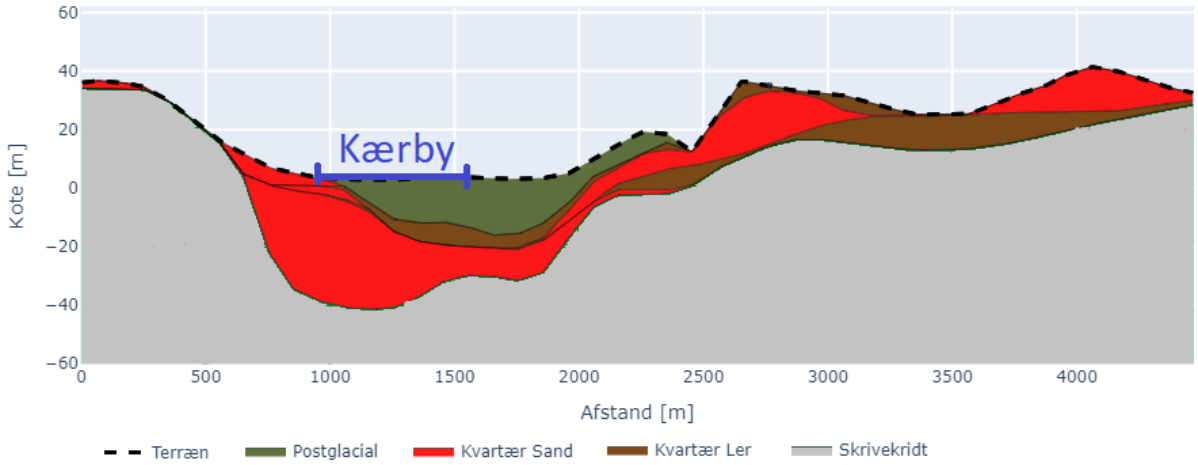
Som tidligere beskrevet, ønskes den geologiske usikkerhed belyst, ved anvendelse af stokastisk genererede geologiske modeller. Disse geologiske realiseringer genereres med T-PROGS (Transition Probability Geostatistical Software). T-PROGS benytter boringer og de tilhørende boreprofiler til at generere geologiske realiseringer. Yderligere information om T-PROGS, samt antagelser hertil, vil blive beskrevet i afsnit D.

Ud fra en generel geologisk forståelse for Aalborg området, er der visse lag som der ikke foretages T-PROGS realiseringer for. Dette er gældende for lag 1 (det øverste lag), som er fastsat til at være jordtypen fyld og Lag 14 (det nederste lag som er fastsat til jordtypen kalk. Dette er tilsvarende til metoden benyttet af He et al. [2015], som ligeledes foretager T-PROGS realiseringer for udvalgte lag. De øvrige lag vil dermed variere på tværs af de geologiske realiseringer. Dette er illustreret på figur 5.7, af visuelle årsager er illustrationen ikke mål fast i forholdene mellem lagene, dette skyldes store forskelle i lagtykkelse mellem det øverste og nederste lag.



Figur 5.7. Lag med forudbestemt jord kategori og lag, hvor deres foretages T-PROGS realiseringer.

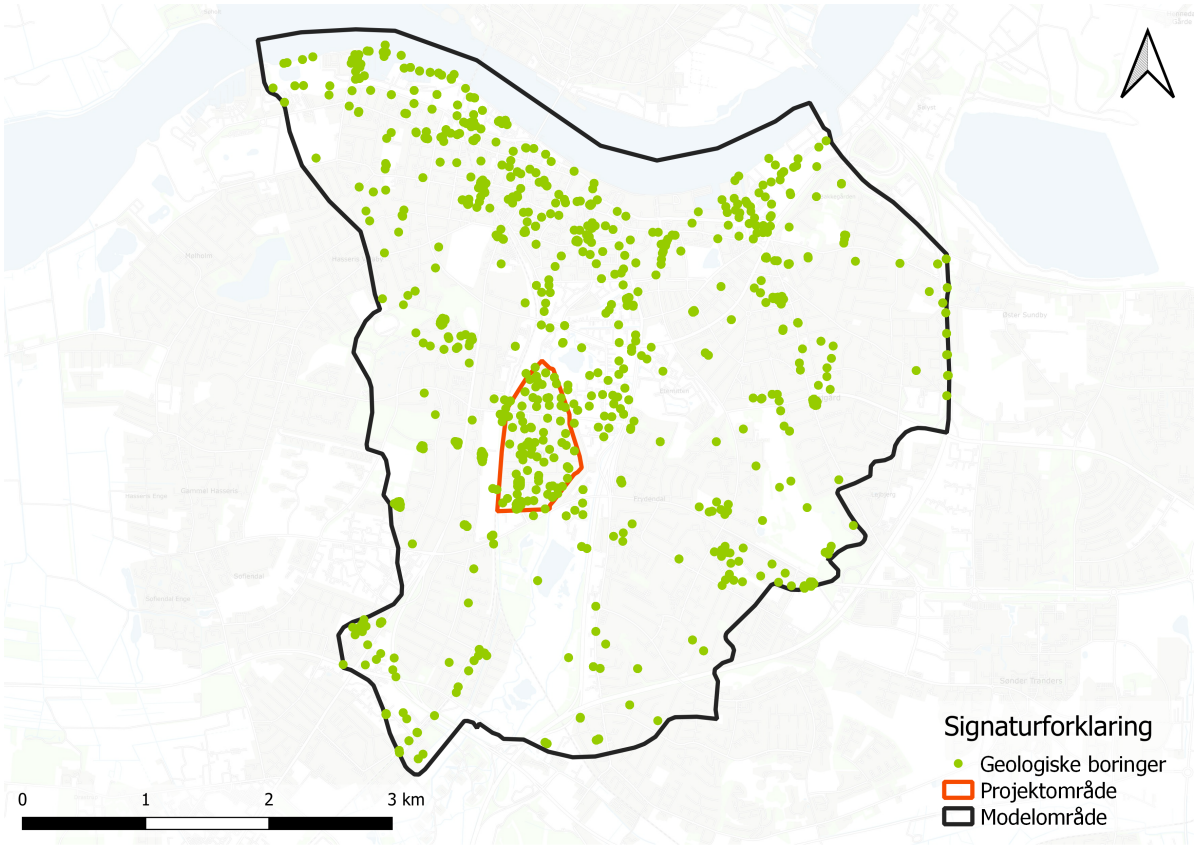
Ved implementering af kalk som vist ovenfor, er kalk fastsat til dybden 50 til 80 meter. Dybden til kalken varierer væsentligt på tværs af området. Denne variation fremgår af figur 5.8, som viser et geologisk tværsnit hen over modelområdet. Geologien er fastlagt af WatsonC [2023].



Figur 5.8. Geologisk tværsnit af modelområdet. [WatsonC, 2023]

Af figuren fremgår det, at flere steder er dybden til kalken under 10 meter. Det vurderes, at dette ikke er problematisk, da den geologiske data fra boringerne skulle kompensere for dette.

For bedst mulige repræsentation af den geologiske heterogenitet, er alle boringer indenfor modelområdet forsøgt implementeret. Boringerne blev medtaget ved brug GEUS-database [GEUS, 2023]. Samtlige boringer blev ikke medtaget, da enten indberetningsstrukturen ikke muliggjorde dette eller geologien ikke var rapporteret. Figuren 5.9 illustrerer boringer i modelområdet og i projektområdet.



Figur 5.9. Boringer anvendt til modelopsætningen og markering af, hvilke der er indenfor projektområdet.

Med udgangspunkt i de anvendte borehuller, er der jordtyper, som skal inddeles yderligere for at kunne implementeres i T-PROGS.

5.4.1 Inddeling af geologien

T-PROGS tillader op til fem jordtyper, hvorfor det er nødvendigt at samle flere geologiske aflejringer i en samme jordtype. Baseret på boringerne fra GEUS, illustreret på figur 5.9, findes der er lang række geologiske inddelinger. I disse er der ofte angivet typen af aflejring og i hvilken geologisk tidsalder aflejringen er forekommet. Dette er blevet ignoreret, med undtagelse af aflejringstypen moræne, hvilket skyldes den væsentlige forskel på moræneler og ler.

De geologiske aflejringer er i alt inddelt i fem jordtyper, hvilket er: Fyld, Sand, Kalk, Organiske jorde (også betegnet org. jord) og Ler. Hvilke geologiske aflejringer som indgår i hver jordtype, fremgår af tabel 5.4.

Tabel 5.4.Geologiske aflejringer og jordtyperne disse er placeret i.

Jordtype				
Fyld	**Sand**	**Kalk**	**Org. jord**	**Ler**
Geologiske aflejring				
Fyld	Sand	Kalk	Muld	Ler
Diverse*	Moræne grus	Kridt	Tørv	
	Moræne sand	Kalk/kridt	Gytje	
	Grus	Kridt/kalk		
		Silt		
		Skrivekridt		
		Moræneler		

* Angiver at der er en lang af liste "Unikke"geologiske aflejringer som er placeret i denne kategori. Dette indebærer naturligt og unaturligt forekommende jorde, samt alternative indberetninger.

Inddelingen er foretaget på baggrund af den hydrauliske ledningsevne, generelle struktur og geologisk lagplacering. Moræneler er placeret i kategori med kalk og kridt. Dette skyldes, at moræneleret kan variere meget i ledningsevne, alt efter ler-indholdet, hvilket er sammenlignelig med kalks variation alt efter, hvor sprækket kalken er. En udførlig liste af jorde som indgår i *Diverse* kan ses i bilag af afsnit B.3.

På baggrund af værdier fra Miljøstyrelsen [2004] er der foretaget følgende antagelser for den hydrauliske ledningsevne for hver jordtype, som fremgår af tabel 5.5. Disse er foretaget ud fra, hvilke geologiske aflejringer som forekommer i jordtypen, som vist tabel 5.4.

Tabel 5.5.Oversigt over spændet for den hydrauliske ledningsevne for hver jordtype. Værdierne er angivet i m/s.

Jordtype	**Interval for den hydrauliske ledningsevne**
Sand	10e-5 - 10e-3
Kalk	10e-6 - 10e-3
Fyld	10e-4 - 10e-2
Ler	10e-12 - 10e-9
Organiske jorde	10e-8 - 10e-5

Med udgangspunkt i modelopsætningen, samt placeringen af jordtyper i geologiske kategorier, kan data fra GRAVA-projektet analyseres for dets geologi og vandstandsmålinger.

5.5 Opsamling og diskussion

Ved en opsætning af grundvandsmodellen er det vigtigt at erkende og forstå de usikkerheder som der medtages i en grundvandsmodel. Usikkerhederne påvirker modellens pålidelighed og præcision, og de skal derfor håndteres på en passende måde. For at kunne fremstille troværdige resultater er det vigtigt, at have en grundig forståelse af usikkerhederne og hvordan de påvirker resultaterne. Der vil derfor i dette afsnit vurderes de opsætningsvalg til grundvandsmodellen, som kan have betydning for resultatet.

5.5.1 Implementering af dræn

Som det fremgår af figur 5.5, er alle kloakker i modelområdet implementeret som dræn. Dette er ubetinget af kloakkernes alder. Det kan diskuteres hvor vidt dette er korrekt, da det er ukendt om og hvor meget disse dræner. Der er ikke undersøgt effekten af at fjerne disse som dræn, hvilket skyldes at det er Kærby som er fokusområdet.

Kloaksystemet i Kærby er som beskrevet i afsnit 4 af varierende alder. Nogle af områderne i den sydlige del er fra 1930'erne, hvor andre dele er fra 1960'erne og 1990'erne. Ved opsætningen af modellen kunne en opdeling af kloakledningerne i forhold til alder. De ældste kloakledninger burde intuitivt have en større dræningsevne, da der med alderen burde forekomme flere huller og revner i kloakledningerne. Men omvendt kunne det diskuteres, hvorvidt nyere kloakledninger er tilsluttet private omfangsdræn. En aldersopdeling i kloakledningerne kunne derfor anvendes til at optimere grundvandsmodellen. Et andet optimeringspunkt vedrørende kloaksystemet i Kærby er, at alle ledninger i grundvandsmodellen er placeret 1,2 meter under terræn, hvilket ikke er den korrekte dybde for alle ledningerne, hvorfor dette kunne være implementeret mere nøjagtigt.

Der er generelt manglende information vedrørende omgangsdræn i Kærbyområdet. Da Kærby i en lang periode har haft problemer med højtliggende grundvand, er det nærliggende, at flere husstande kan have fået indlagt omfangsdræn. Da placeringen af omfangsdrænene er ukendt, er den drænene effekt for omfangsdrænene medtaget i kloakledningerne. Dette kan medføre en kunstig forøgelse af dræningsevnen for kloakledninger. Da der ikke findes noget tilgængeligt data for omfangsdræn i Kærby, vides det heller ikke i hvor stor udstrækning, at dette er en fejlkilde.

5.5.2 Potentialekort

Potentialekortene bliver anvendt i grundvandsmodellen til at bestemme trykniveauet for den fastholdte afgrænsning for modelområdet. Potentialekortet fra HIP databasen, har tilhørende usikkerheder, hvilket overføres til dette projekts model.

5.5.3 Implementering af vandområder

For en grundvandsmodel er det afgørende at implementere vådområderne i modelområdet korrekt. Vådområderne er afgørende for at beskrive det terrænnære grundvand for et givet område. Vådområdernes indvirken på modelområdet er afhængigt den dybde som er angivet for vådområderne. Dybden af vandløb kan være vanskeligt at fastlægge, da dybdeinformationerne kan være begrænsede. Den manglende præcision i dybdeforholdene medvirker som en usikkerhed, da det er svært at fastlægge vådområdernes indvirken på grundvandet.

En anden usikkerhed end dybden er også, at dybden af vandløb kan variere med årstiden. Vådområderne oplever derudover også naturlige variationer på baggrund af lokal regn hændelser. Dybdeinformationer vedrørende årstidsvariationer er begrænset og svært præcist at fastlægge for områder, hvor dette ikke er undersøgt over en længere periode. Hvis forholdet mellem vådområderne og trykniveauet skulle afspejles korrekt, skulle den korrekte dybde og dybdevariationerne medtages, men da dette ikke mulig anvendes en fast dybde for alle vådområder.

Der er i grundvandsmodellen ikke medtaget de to søer som er placeret nord og syd for projektområdet, som vist på 4.3. Disse er ikke medtaget grundet, det vurderes, at de ikke har tilstrækkelig indflydelse på grundvandet omkring Kærby. Dette skyldes, at Østerå er placeret i imellem Kærby og søerne. Den egentlige effekt søerne har på grundvandet er ikke undersøgt, hvilket kunne have været undersøgt.

5.5.4 Øvrige

Der forekommer nogle generelle usikkerheder vedrørende modelopsætningen i Kærby. Dette skyldes udtalelser fra borgere i Kærby vedrørende opsætning af egetræsspunsvægge langs det vestlige dige af Østerå for mange år siden. Der er som sagt ingen tilgængelige oplysninger om opsætning af disse spunsvægge eller hvilken stand de er i. Spunsvæggene er placeret for at påvirke grundvandsstrømningen ved at danne en barriere, men da placeringen er ukendt, er det svært at bestemme effekten af disse barrierer. Hvis påvirkningen af spunsvæggene og usikkerhederne herfra skulle inddrages korrekt i modellen, kunne feltundersøgelser og felttest af området anvendes til at bestemme tilstanden og effekten af egetræsspunsvæggene.

5.5.5 Klimafremskrivning

Til klimafremskrivning benyttes grundvandsdannelse og potentialekort fra Dataforsyningen [2022], som benyttes 22 forskellige klimamodeller til hver fremskrivning. Dette data er tilgængeligt i et $500m \cdot 500m$ rasterlag. Det kan derfor diskuteres, om denne opløsning er problematisk at projektere ned på et $15m \cdot 15m$ gitter, som der benyttes i modellen. Derudover forekommer usikkerheder ved fremskrivning af klimaet, da dette er baseret på prognoser som fremskrives alt efter RCP værdien. Refsgaard et al. [2016] beskriver blandt andet, hvordan klimafremskrivning kan udgøre den primære usikkerhed ved grundvandsmodellering.

Som beskrevet i kapitlet burde randbetingelsernes placering ændres for de forskellige klimafremskrevne scenarier. Teoretisk burde metoden være at estimere randbetingelserne på ny, for det klimafremskrevne potentialekort. Af flere årsager er dette ikke gjort. Dette er ikke gjort på grund af grundvandspotentialet i høj grad er påvirket af andre parametre end grundvandsdannelsen. Dermed forventes det ikke, at grundvandspotentialet og dermed randbetingelserne ændre sig væsentligt. Derfor ville en korrektion være en detaljegrad ude af proportioner med usikkerheden.

5.5.6 Model diskreditering

Ved valg af model diskreditering blev der foretaget en analyse af beregningstid, som gjorde udfaldet for, hvilken der blev valgt. Her var det målsætning at opnå så fin en diskretisering som muligt og samtidig undgå en beregningstid, som ville begrænse, hvilke undersøgelser, som kunne foretages. Ligeledes har T-PROGS en begrænsning i antallet af celler, hvorfor flere celler end cirka 3×10^6 ikke ville være muligt. Diskrediteringsanalysen blev udelukkende foretaget horisontalt og udelukkende på kvadratiske celler.

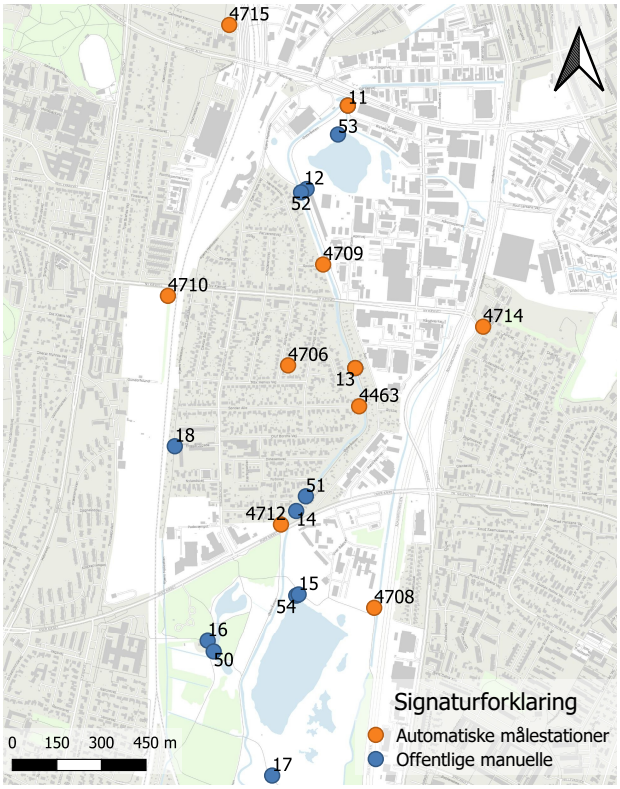
For den vertikale diskretisering, som fremgår af tabel 5.3, blev der valgt 14 lag, hvor de øverste var af 50 cm tykkelse, som gradvist blev større. Skaleringen lagene imellem, overholdt i størstedelen af tilfældene Spitz og Moreno [1996] anbefaling om ikke at overstige 1,5. Der blev ikke undersøgt effekten af dette, hvorfor der muligvis kunne have været færre lag, hvis dette ikke havde effekt, eller det er nødvendigt med, flere hvis dette har en effekt. Modellens totale dybde er 80 m, hvor effekten af denne længde ikke blev undersøgt, dette er ikke gjort, da grundvandsspejlet er terrænnært.

For den horisontale diskretiseringen blev der kun undersøgt for kvadratiske celler, hvor rektangulære celler og ikke firkantede celler, kunne potentielt have forbedret gitteret. Ligeledes kunne der have været anvendt et forfinet område, hvor et mindre område i modellen, har finere diskretisering end det resterende område. Dette kunne have været fordelagtigt, da det udelukkende er for Kærby, som undersøges.

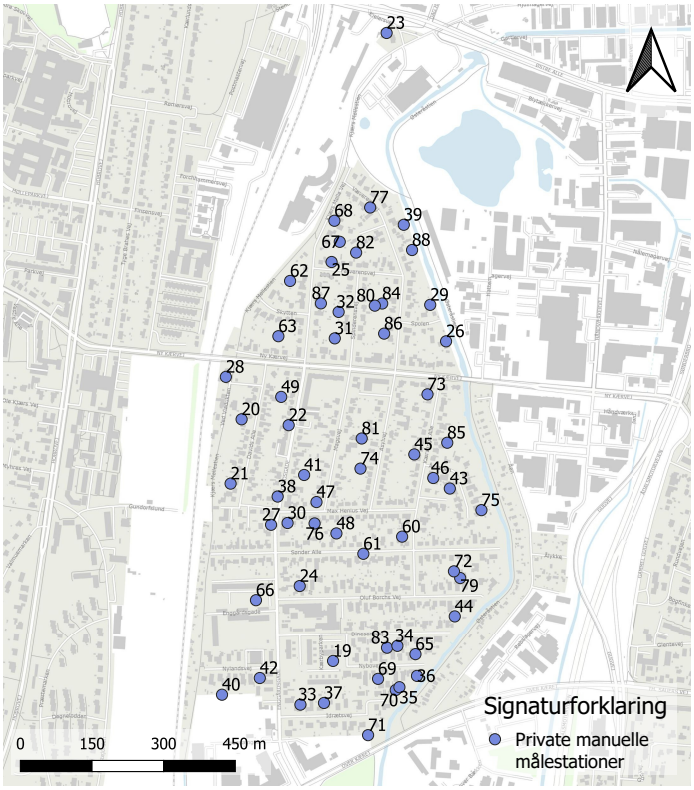
6 Vandstandspejlinger og boreprofils data fra GRAVA-projektet

I forbindelse med GRAVA-projektet [Nielsen og Thorndahl, 2022] er der opsamlet en stor datamængde i og omkring projektområdet. Den indsamlede datamængde består både af vandstandsmålinger og boreprofiler fra opsætningen af vandstandsmålere.

Vanstandspejlinger er af dybde til grundvandet og er fra automatiske- og manuelle målestationer. De manuelle målere er både på offentlige og private grunde som illustreret på figur 4.8, hvor de automatiske også fremgår. Af figur 6.1, fremgår både alle offentlige målestationer med ID-nummer, hvor figur 6.2 viser de private manuelle målestationer med ID-nummer. Projektet startede i 2020 og er officielt stoppet i efteråret 2022. Siden målestationerne endnu ikke er fjernet, foreligger der målinger efter projektets officielle afslutning.



Figur 6.1. Placering og navn på de offentlige målestationer fra GRAVA-projektet.



Figur 6.2. Placering og navn på de private målestationer fra GRAVA-projektet.

Målestationerne navngivet i [11 - 19] er for manuelle målere af dybde til grundvandsspejlet, hvor målestationer navngivet i [51 - 59] er skalapæle. De automatiske målestationer er navngivet i [4463 - 4750]. Enkelte stedet er der ikke overensstemmelse mellem navngivning og farve på figur 6.1. Dette skyldes, at der flere steder er automatiske og manuelle målestationer meget tæt placeret, hvor dette er tilfældet, er

der indberettet samme koordinaterne.

Inddragelsen af borgere i lokalområdet, i form for data indberetning, er også kendt som "citizen science". Borgerinddragelse giver den individuelle borger muligheden for at deltage aktivt i projektet. I GRAVA-projektets opstartsfase, er der indkaldt til borgermøde, hvor de påvirkede grundejere er blevet tilbudt installation af målingsenhed og givet instruktioner i aflæsning og indberetning her af. I følgende afsnit vil data fra manuelle og automatiske målestationer blive gennemgået.

6.1 Data filtrering

Grundet grundejer inddragelse i GRAVA-projektet, og udfordringer med de automatiske målestationer, er der observeret unaturlige variationer i indberettede målinger i form af outliers. På dette grundlag er der fortaget en filtrering af den automatiske og manuelle målinger. Indberetning af grundejerne i området og kan indeholde enhedsfejl og fejlaflæsninger. Dette indebærer blandt andet indberetninger i den forkerte enhed, typisk i form af indberetningen i centimeter frem for meter. Disse fejl er typisk nemme at lokalisere, grundet boringerne ikke er mere end 3 meter dybe. Derfor er disse åbenlyse indberetnings fejl korrigeret eller frasorteret.

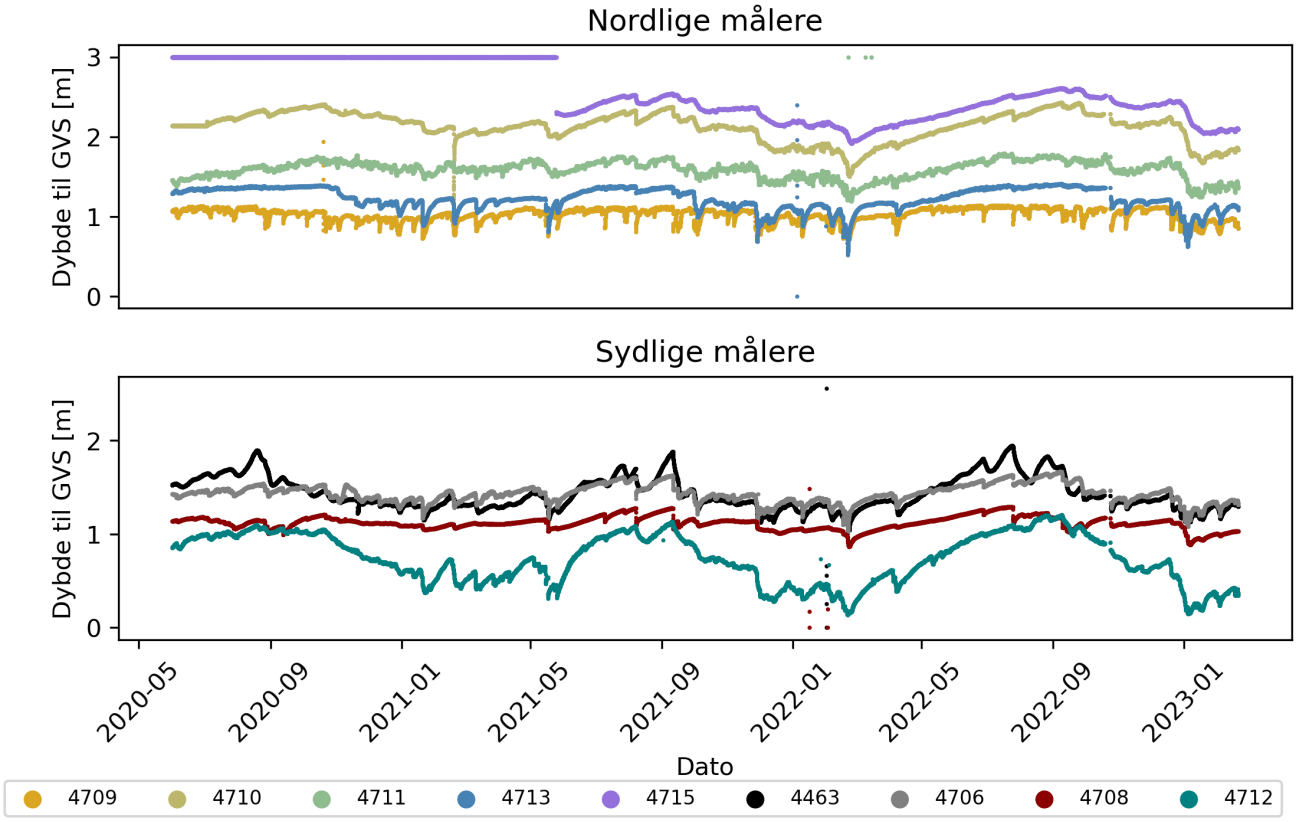
Det er observeret, at indberetningshyppigheden er dalende i løbet af projektets forløb, dette er gældende for størstedelen af målestationerne. Disse manuelle målestationer med ganske få indberetninger er ikke frasorteret, men er antaget som ikke fyldestgørende at sammenligne de simulerede resultater med.

I forbindelse med GRAVA-projektet er der installeret skalapæle i de omkringliggende søer og Østerå, med indberetnings mulighed. Disse er observeret som afvigende i kvalitet og kvantitet fra det resterende data. Dette kan skyldes, at de i vækstsæsonen, stort set har været tildækket af vegetation og derfor både er svære at lokalisere, og er besværlige at aflæse korrekt. I bilag C.1, er disse forhold illustreret.

De automatiske målestationer, 4715 og 4714, er opsat med et andet formål. Som det fremgår af Figur 5.5 bliver det ligeledes pumpet grundvand ved denne station 4714, derfor er disse målinger ikke retvisende og dermed ikke medtaget i analysen af vandstanden. Ligeledes er station 4715 placeret i et andet magasin hvorfor denne heller ikke er benyttet. Placeringen af de automatiske målestationer fremgår af figur 6.1.

6.2 Automatiske målestationer

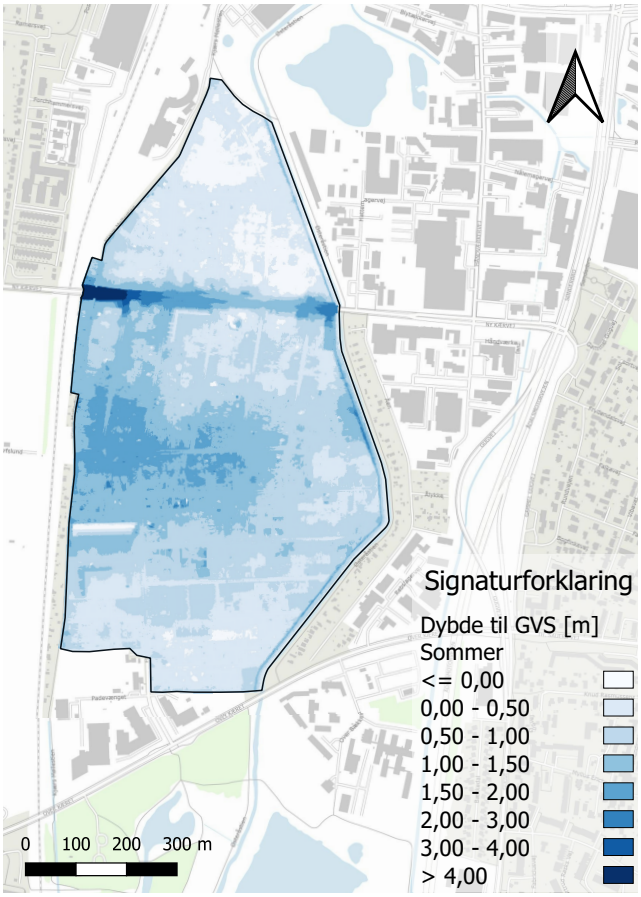
Det store datagrundlag for automatiske målestationer, skyldes kontinuerlig målinger hvert 10 minut. De automatiske målestationer blev opsat ved GRAVA projektets start i februar og foråret 2020. En oversigt over målingerne for automatiske målestationer fremgår af figur 6.3, hvor der vises målinger fra juni 2020 og frem. Målestationer er opdelt i det nordlige- og sydlige område og de enkelte målestationers placering fremgår af figur 6.1.



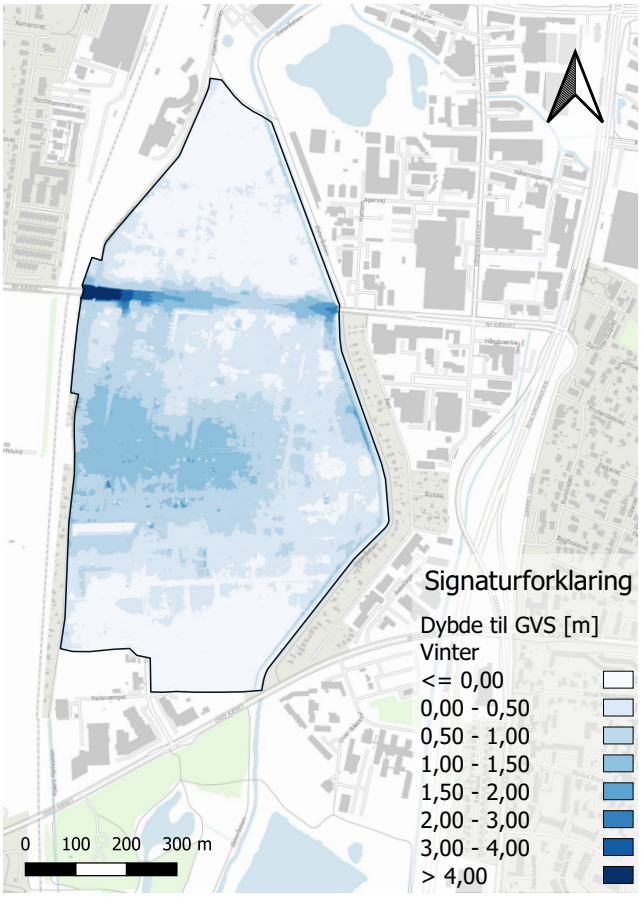
Figur 6.3.Dybden til grundvandsspejlet delt op i nordlige og sydlige område.

Af ovenstående figur 6.3, fremgår det, at for hovedparten af målerne er dybden til grundvandsspejlet relativt konstant omkring 1 til 2 meter. På målere [4708-4709], kan dybden til grundvandsspejlet observeres at være særdeles stabil, omkring 1 meter, hvilket kan tilskrives den hydraulisk kontakt til Østerå. Målestation 4712 er placeret lavt i forhold til omkringliggende terræn og udviser store fluktuationer i dybde til grundvandsspejlet. Det kan yderligere observeres at dybden til grundvandet ved denne måler, i perioder er få cm fra terræn. Den laveste observeret dybde til grundvandsspejlet er 20 cm i den sydlige del 28 januar 2021. Generelt kan det observeres, at dybden til grundvandsspejlet, er højest i den nord- og vestlige del af Kærby.

For grafisk at illustrere den spatiale fordeling af dybden til grundvandsspejlet, for henholdsvis maksimale dybde om sommeren og minimale dybde om vinteren, er der genereret interpolerede dybdekort. Disse fremgår af figur 6.4 og figur 6.5.



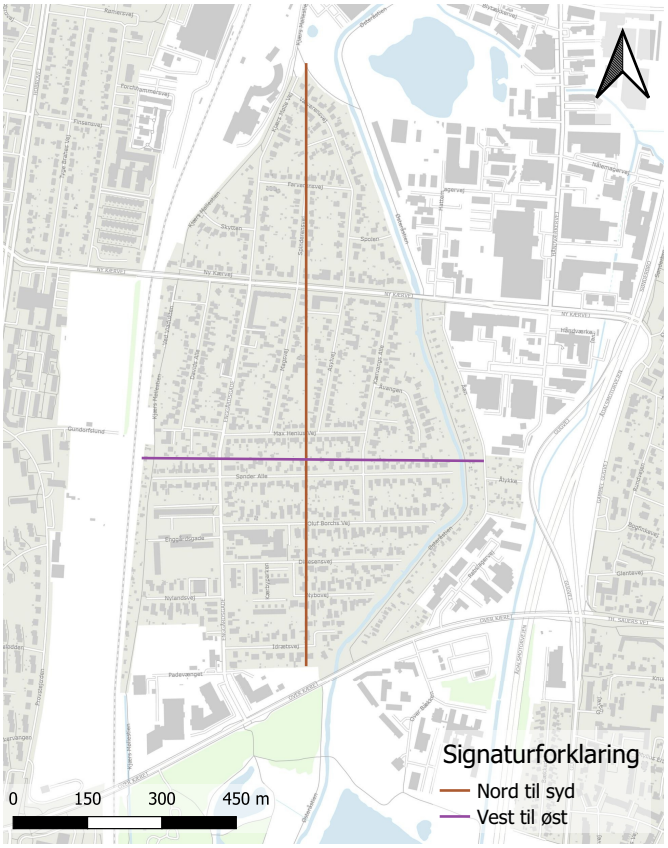
Figur 6.4. Den midlet dybde til grundvandsspejlet for sommer. Alle enheder i [m]



Figur 6.5. Den midlet dybde til grundvandsspejlet for vinter. Alle enheder i [m]

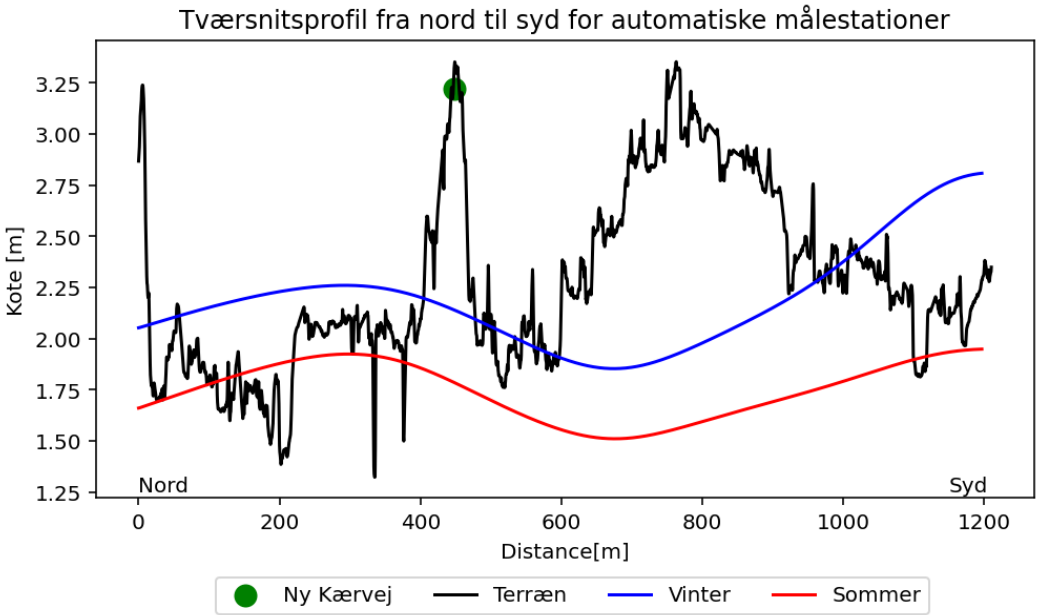
De individuelle vandstandsmålere er midlet over august 2021 og 2022 for illustration af maksimale dybde til grundvandsspejlet om sommeren og for januar 2021 og 2022 er minimums dybde om vinteren. Dette er valgt, grundet den begrænsede data for vintermånederne, fremfor sammenligning af midlet sæsonvariationer, som yderligere negligerer de ekstreme værdier. Trykniveauet i den tidsbegrænsede periode er efterfølgende interpoleret ved "Inverse distance weighting", også angivet "IDW"og er begrænset af projektområdet. Denne interpoleringsmetode er valgt, grundet de usikkerheder der foreligger ved indberetningerne. Det kan observeres af figuren, at særlige den syd- og østlige del af Kærby, er særligt påvirket af det terrænnære grundvand.

Med udgangspunkt i de interpolerede kort, er der udarbejdet tværsnitsprofiler, for at tydeliggøre afstanden til grundvandsspejlet ved forskelligt data. Til tværsnitprofilerne benyttes der to strækninger, en fra nord til syd og en fra vest til øst, disse strækninger fremgår af Figur 6.6.



Figur 6.6. Illustrationerne af linjerne som er benyttet til tværsnitsprofilerne.

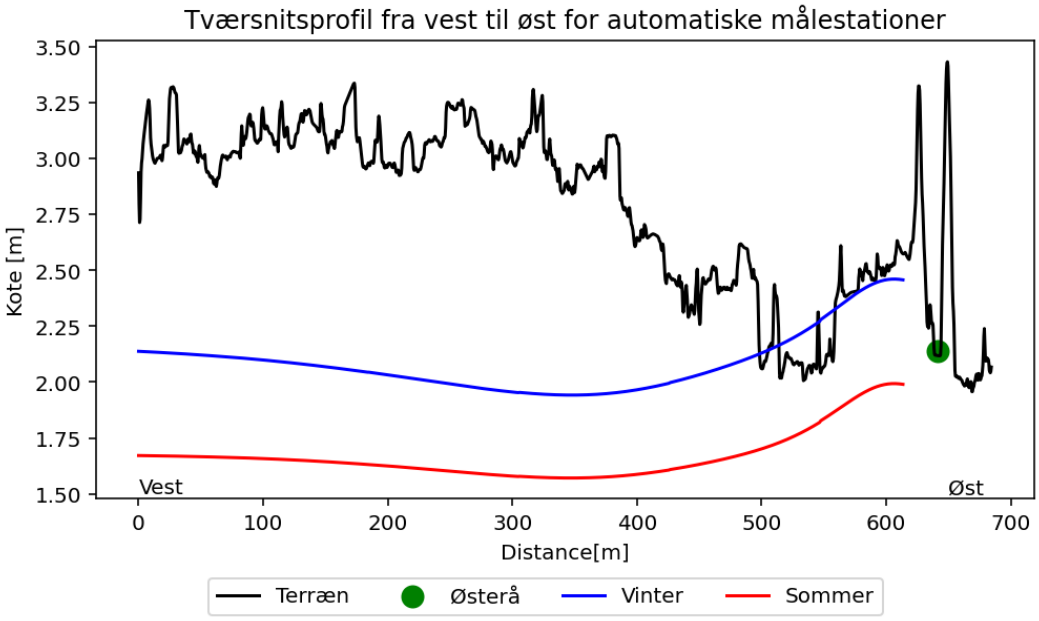
Placeringen af linjerne er baseret på de længste strækninger på tværs af Kærby, hvortil det er forsøgt at undgå at placerer strækningerne ved vejene i området. Ved at sammenligne Figur 6.4 og Figur 6.5, kan følgende tværsnitprofiler udarbejdes: fra nord til syd af Figur 6.7 og fra vest til øst af Figur 6.8.



Figur 6.7. Tværsnitsprofil over det automatiske data fra nord til syd.

For tværsnitsprofilet fra nord til syd ud fra interpolerede kort, observeres vand på terræn for begge årstider. For sommer er der vand på terræn ved strækningen fra cirka 100 til 210 m og enkelte steder på resten af tværsnitsprofilet. For vintermåneden er det tilfældet i cirka halvdelen af strækning, hvor det

primært er ved en terrænkote over 2,25 m, at der ikke er vand på terræn. Forskellen mellem månederne varierer fra cirka 30 til 75 cm.



Figur 6.8. Tværsnitsprofil over det automatiske data fra vest til øst.

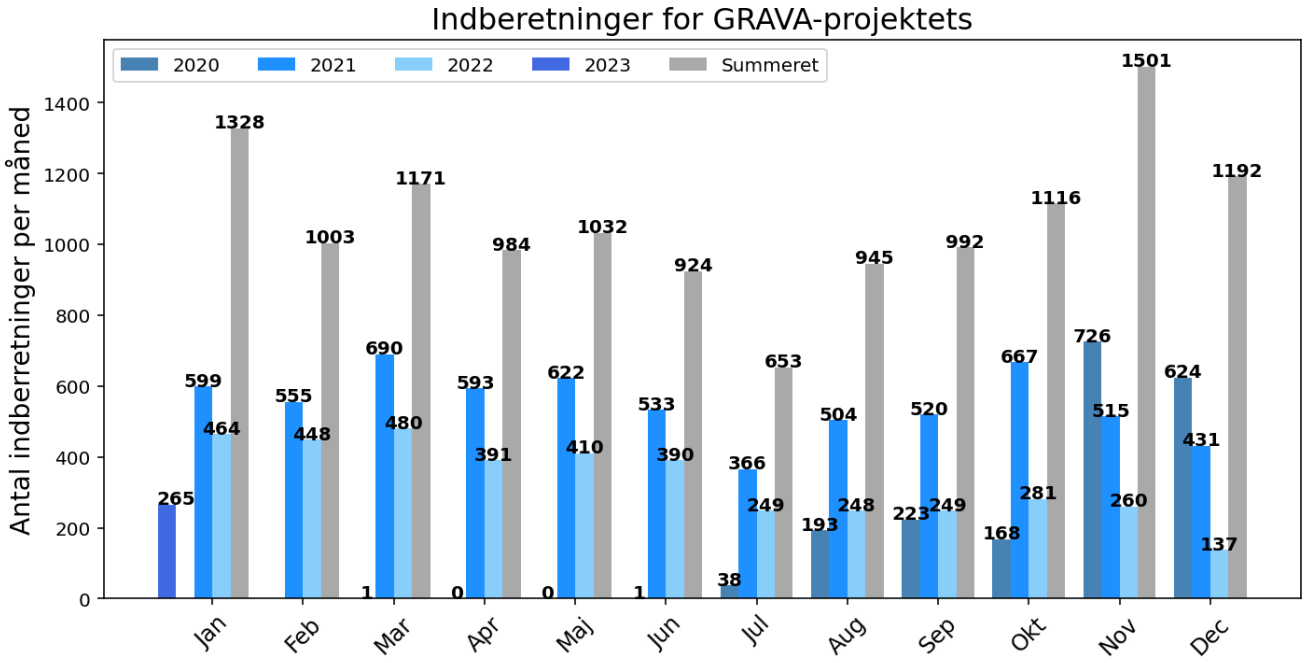
Ved interpolering af de automatiske målestationer fremgår det, at der forekommer vand på terræn for tværsnitsprofilet fra vest til øst. Det forekommer vand på terræn for vintermålingerne fra en distance på cirka 480 til 580 m. Vintermånederne er generelt cirka en halv meter tættere på terræn end sommer målingerne, hvor denne forskel også er tilstede nær Østerå. Fra 0 til 350 m er der cirka 1 og 1,5 m til terræn for henholdsvis sommer og vinter.

6.3 Manuelle målestationer

De manuelle målestationer er i form af pejlinger af dybden til grundvandsspejlet og målepæle med vandstanden ved vandområder. Til analyse af vandstandsmåleringerne er målepælenes indberetninger negligeret, da vandstanden i vandområder ikke kan overføres direkte til grundvandsspejlet. Her er mængden af data fra de manuelle målestationer afhængig af borgernes indberetnings hyppighed. Af denne årsag er mængden af den manuelle data analyseret.

6.3.1 Datamængden fra manuelle målestationer

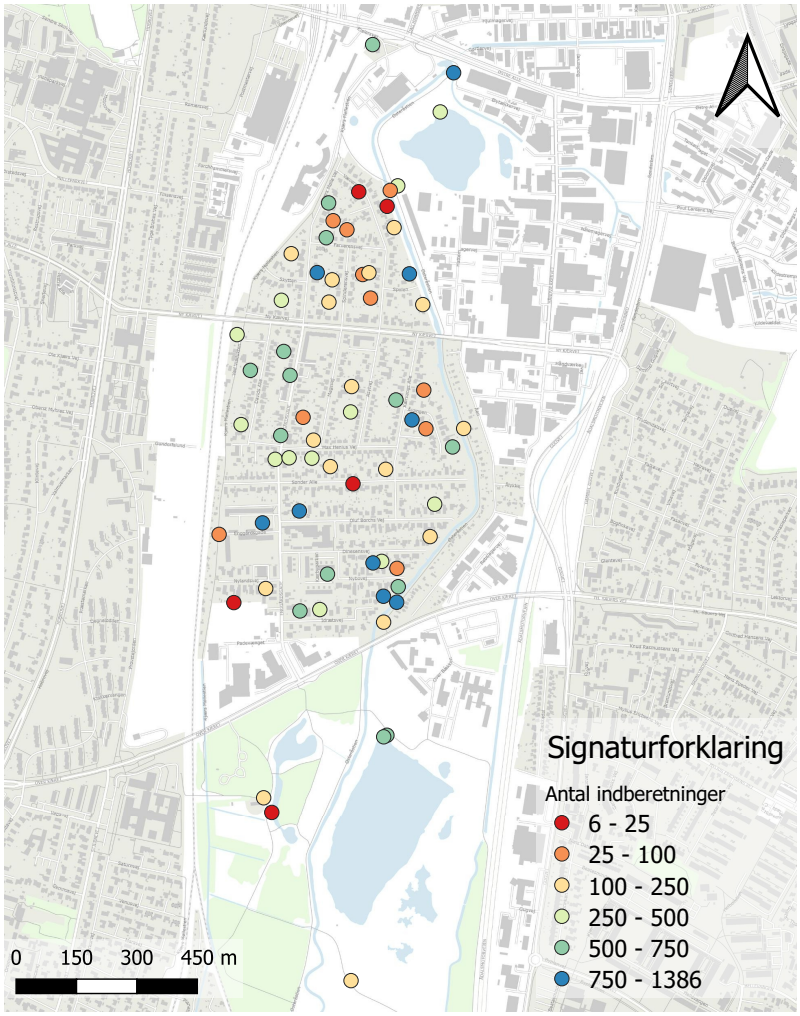
Mængden af data fremgår i from af antal indberetninger for hver måned og hver måned summeret på figur 6.9.



Figur 6.9. Antallet af indberetninger per måned fra manuelle målestationer i forskellige år.

Figuren er opdelt i de forskellige år, da der i starten af projektet, ikke var opsat mange målestationer, hvorfor antallet af indberetninger var lavere end den efterfølgende periode. Af figuren 6.9 fremgår det, at da projektet fik opsat alle målestationerne i slutningen af år 2020, var indberetningshyppigheden højere, da alle måneder i første halvdel af 2021 har over 500 indberetninger. Herefter faldt antallet af indberetninger kontinuerligt. Som tidligere beskrevet ønskes det at undersøge dybden til grundvandsspejlet i både et vinter og sommer scenarie. Af denne årsag er indberetningerne summeret på månedsbasis over de forskellige år, for at finde antallet af indberetninger for de forskellige måneder, hvilket fremgår af figur 6.9.

Udover fordelingen af data på månedsbasis, er der også en spatial variation i data. Dette skyldes, at alle grundejer ikke indberetter lige meget, hvorfor der ikke er lige meget data fra alle steder i området. Fordelingen af boringerne og visualisering af antallet af indberetninger fremgår af Figur 6.10.

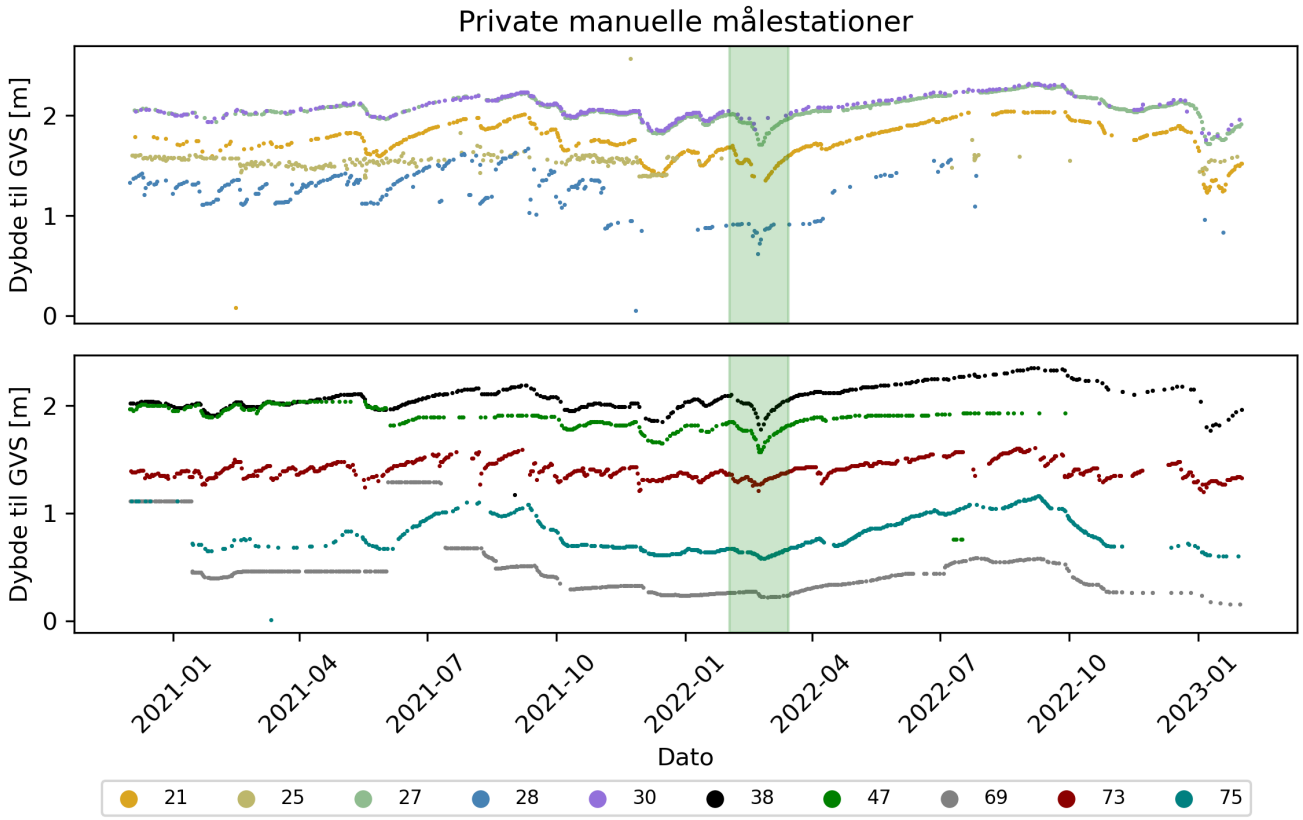


Figur 6.10. Antallet af indberetninger per boring i området.

Her ses der en sammenhæng mellem, at flere af de offentlige målestationer har mange indberetninger, hvorimod det variere mere, hvor mange indberetninger de private målestationer har. Enkelte offentlige målestationer har ganske få indberetninger. Med udgangspunkt i disse indberetninger kan vandstandsmålingerne analyseres.

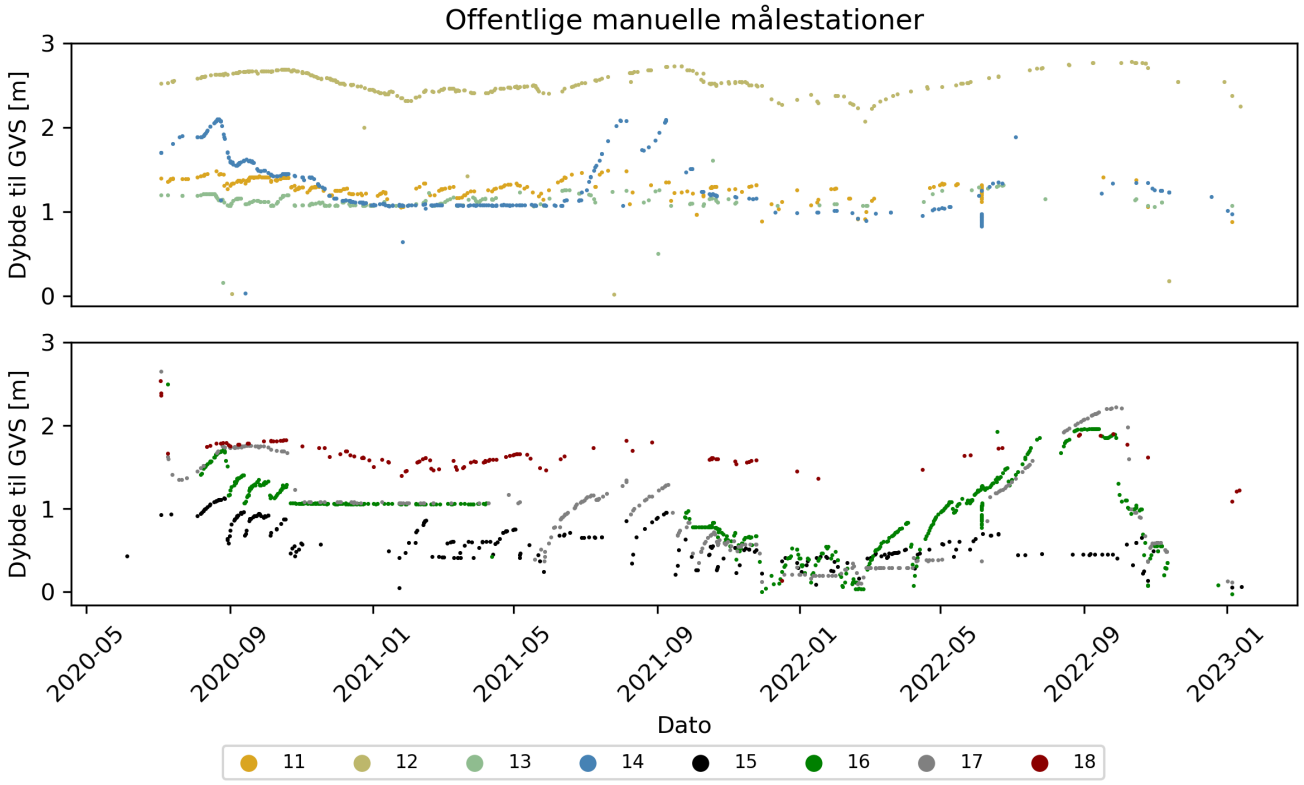
6.3.2 Manuelt vandstandsdata

Som før nævnt, blev borgerne givet en introduktion i, hvordan indberetningen skulle foregå. På trods af dette, er der observeret adskillige fejlrapporteringer eller fejlaflæsninger. Dette kan blandt andet, skyldes kondens i enhederne, som vist i bilag C.1, hvilket besværliggør en korrekt aflæsning. De private manuelle målestationer med størst indberetnings hyppighed, er vist på nedenstående figur 6.11. Placeringen af de udvalgte manuelle målestationer fremgår af figur 6.2.



Figur 6.11. Vandstandsmålinger for udvalgte private målestationer gennem GRAVA-projektets forløb.

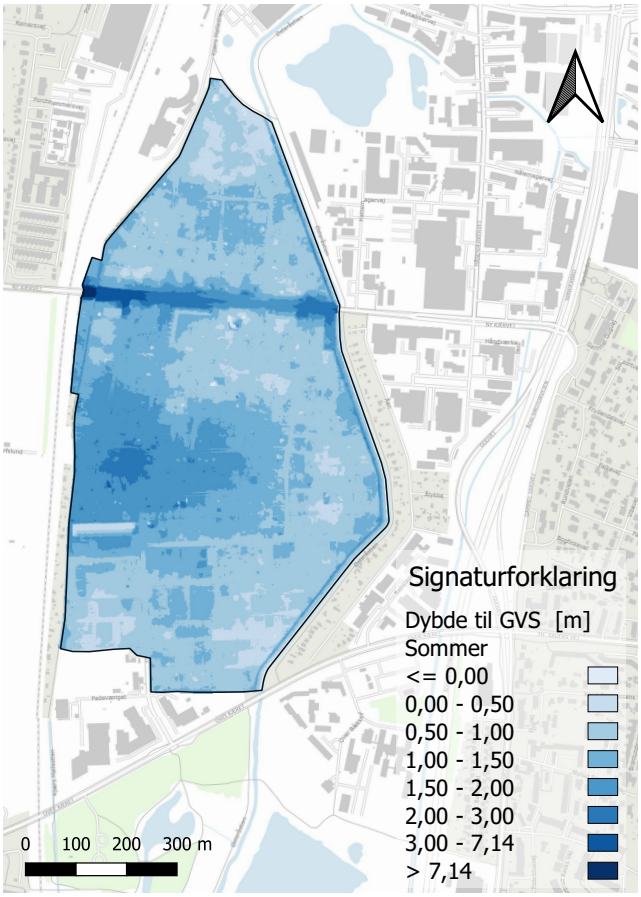
ovenstående figur 6.11, illustrerer dybden til grundvandsspejlet gennem GRAVA-projektets forløb for udvalgte målestationer. De individuelle målestationers placering er vist på figur 6.2. Indberetningerne for dybden til grundvandsspejlet for de manuelle målestationerne, kan observeres at være aftagende mod udløbet af projektperioden. Dette kan særligt observeres på målestation 25 og 28. Målestation 69, angivet på figuren med grå, udviser periodevis unaturlige udsving på omkring en meter i dybden til grundvandet, hvilket ikke har været muligt af verificerer på de omkringliggende målestationer. Data fra denne målestation, er derfor ikke benyttet videre i dette projekt. I den fremhævede periode, illustreret med grønt på figur 6.11, kan varierende hydrologisk respons observeres mellem de anviste målestationer. Ved sammenligning af placeringen, vist på figur 6.2, og dybden til grundvandsspejlet vist på figur 6.11, responsen, angivet i perioden med grøn, tilskrives de varierende hydrologiske forhold i Kærby. Grundet mængden af målestationer, og de store indberetningsvariationer, er alle tidsserierne fra det fulde antal målestationer ikke vist på figuren. Placeringen af de offentlige manuelle målestationer fremgår af Figur 6.12.



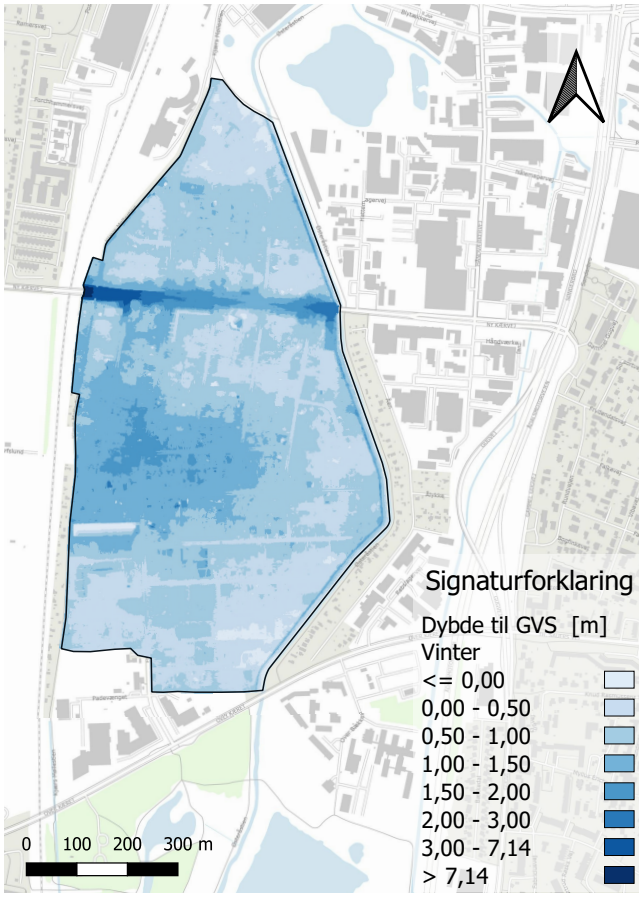
Figur 6.12. Antallet af indberetninger per boring i området.

På figur 6.12, fremgår der større variation i dybden til grundvandsspejlet fra indberetningerne, for nogle af de offentlige målestationer. Dette er særligt tilfældet ved målestation 16 og 14, og må tilskrives placeringen i vandområdet syd for Kærby, som det fremgår af figur 6.1, og at det er flere forskellige borgere, som foretager indberetninger.

Ud fra målingerne af dybde til grundvandsspejlet, undersøges den spatiale fordeling. Den spatiale fordeling af dybden til grundvandsspejlet, for henholdsvis maksimal dybde om sommeren og minimum dybde om vinteren. Et interpoleret kort for dybden til grundvandsspejlet fremgår af figur 6.13 og figur 6.14, for henholdsvis sommer og vinter.



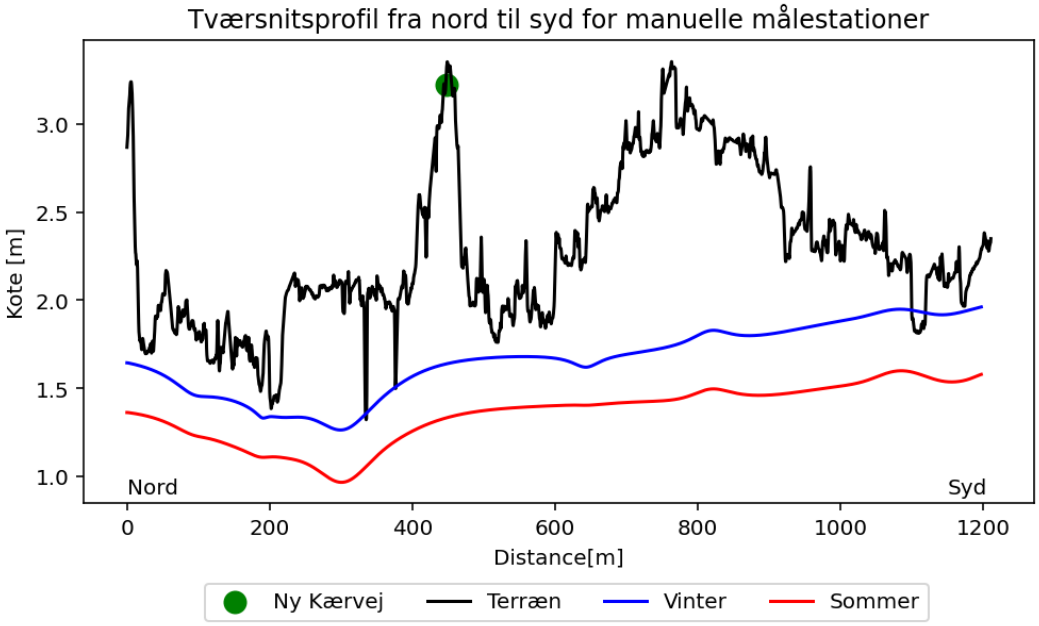
Figur 6.13. Den midlet dybde til grundvandsspejlet for sommer.



Figur 6.14. Den midlet dybde til grundvandsspejlet for vinter.

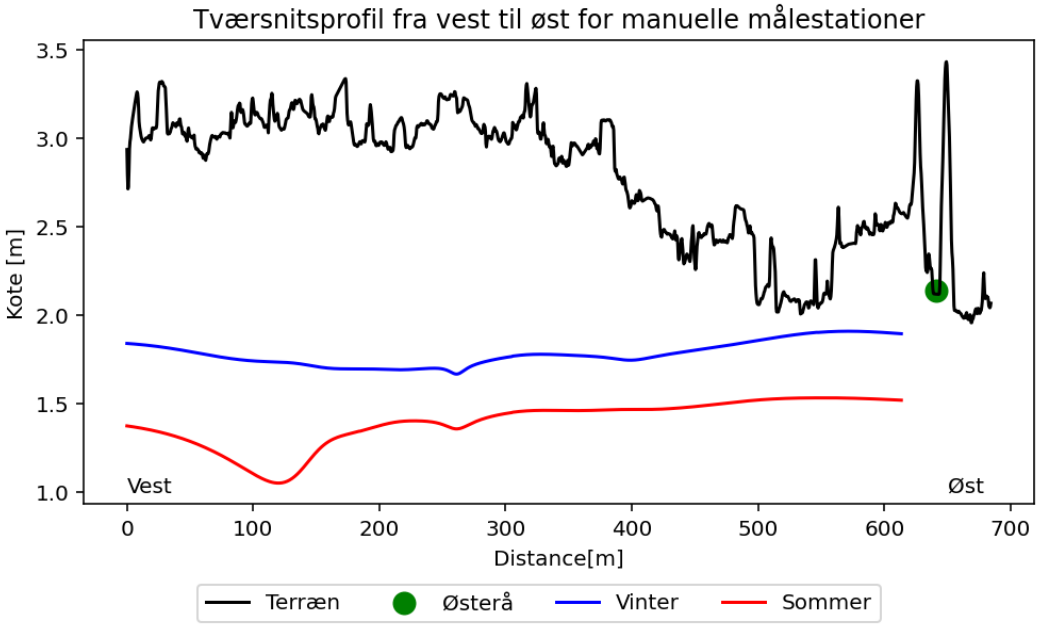
Den spatiale fordeling af dybden til grundvandsspejlet, for henholdsvis maksimum dybde om sommeren og minimum dybde om vinteren er vist på figurerne 6.13 og 6.14 ovenfor. De individuelle målestationer er midlet over august 2021 og 2022 for illustration af maksimum dybde til grundvandsspejlet om sommeren og januar 2021 og 2022 for minimales dybde om vinteren. Grundet begrænset data i vintermånederne, og faldende mængde af indberetninger frem mod GRAVA-projektet afslutning, er denne metode valgt. Yderligere illustrerer dette de ekstreme værdier, fremfor sammenligning af midlet sæsonvariationer, hvor ekstremerne negligeres. Det kan observeres af figurerne, at særlige den syd- og østlige del af Kærby, er særligt påvirket af terrænnært grundvand. Den kortest observerede dybde til grundvandsspejlet er 58 cm i den sydlige del, den 20. januar 2021. Generelt kan det observeres, at dybden til grundvandsspejlet, er højest i den nord- og vestlige del af Kærby, afhængigt af sæsonen.

Som tilfældet var ved de automatiske, er der udarbejdet tværsnitsprofiler, hvor data fra figur 6.13 og figur 6.14 er benyttet. Disse fremgår fra nord til syd af figur 6.15 og fra vest til øst af figur 6.16.



Figur 6.15. Tværsnitsprofil over det manuelle data fra nord til syd.

Af tværsnitprofilen fremgår det, at forskellen mellem dybde til grundvandsspejlet om sommeren og vinteren er relativt konstant langs strækningen. Om vinteren er grundvandsspejlet tættere på terrænet, og på nogle steder er det enten på eller få centimeter fra terrænet. Enkelte steder er afstanden til grundvandsspejlet over en meter.



Figur 6.16. Tværsnitsprofil over det manuelle data fra vest til øst.

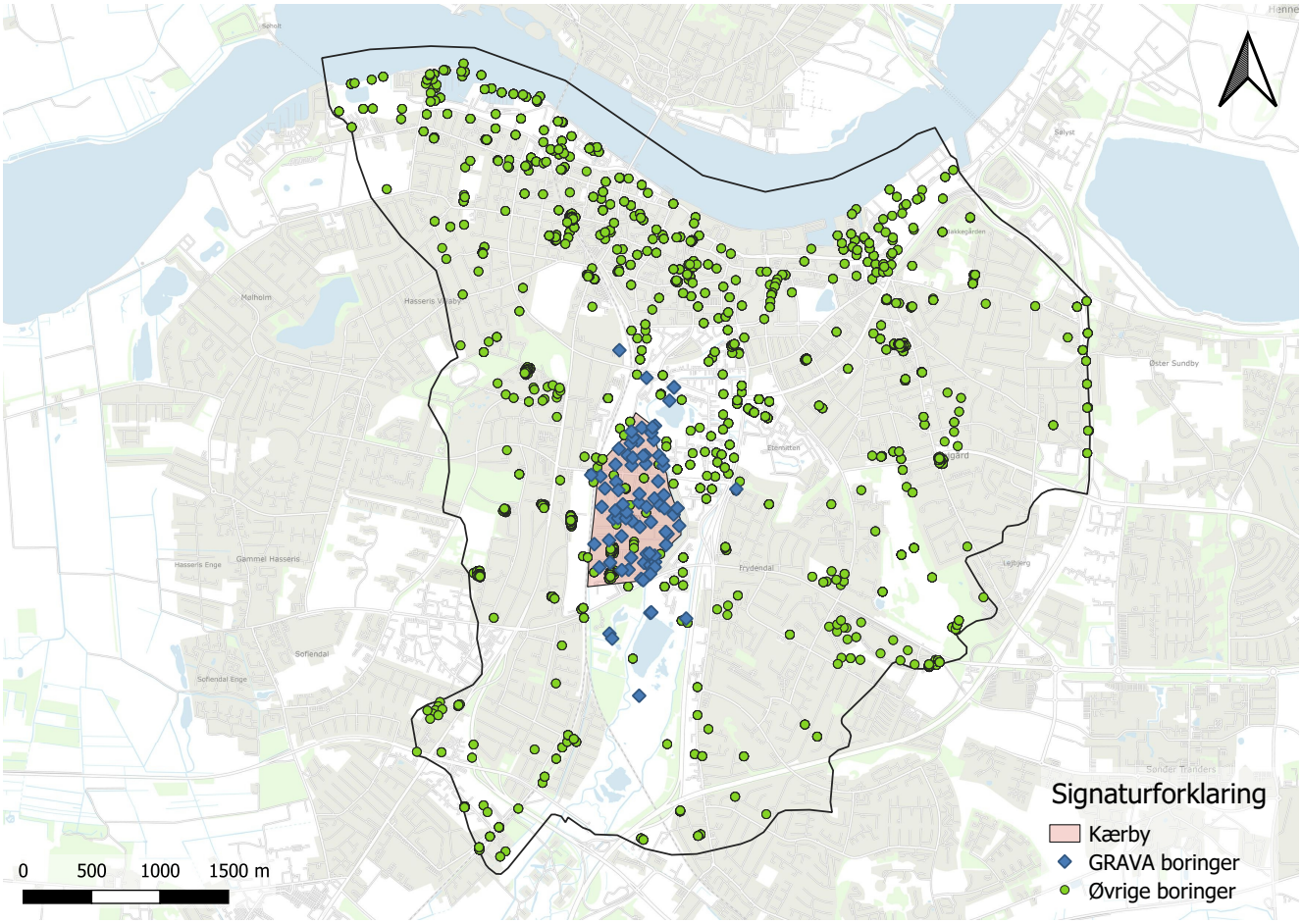
Af figuren fremgår det, at grundvandsspejlet for vintermånederne er tættest på terræn. Afstanden mellem grundvandsspejlet om sommeren og om vinteren varierer fra cirka 30 cm til en meter. Fra cirka 500 til 580 m er grundvandsspejlet cirka 20 cm fra terræn om vinteren, hvor det ligeledes er væsentlig tættere på Østerå. De første 350 m er der cirka en meter til terræn for vintermåneden.

6.4 Geologisk data fra boringer

Som beskrevet i kapitel 5, er den geologiske modelopsætning betinget af den geologiske data fra boreprofilerne. Dette er både i form af den geologi som boreprofilerne indeholder og antallet af boreprofiler. Dermed har GRAVA-projektet indflydelse på det geologiske data, da antallet af boringer øges. Dette medvirker til at belyse den ukendte geologiske heterogenitet, grundet den høje koncentration af boringer.

6.4.1 Antallet af boringer

Af figur 6.17 fremgår de boringer som indgår i modellen. Derudover er det markeret, hvilke boringer som er en del af GRAVA-projektet.



Figur 6.17.Boringer som indgår i modelopsætningen, hvor det er markeret, hvilke som er en del af GRAVA-projektet.

Af figur 6.1 fremgår navnet på de offentlige manuelle målestationer. Målepælene er ikke medtaget, da der ikke er et boreprofil for disse. Derfor er disse ikke medtaget i oversigten over boringer i GRAVA-projektet, som fremgår af tabel 6.1, hvorfor det ligeledes fremgår, hvor mange boringerne er indenfor projektområdet.

Tabel 6.1.Antallet af boringer fra GRAVA-projektet og antallet placeret i Kærby.

Type	Antal	Antal i Kærby
Private manuelle	58	57
Offentlige manuelle	8	1
Offentlige automatiske	8	3

Dermed bidrager GRAVA projektet med 74 boringer i hele modelområdet og 61 boringer i projektområdet.

Med disse boringer har GRAVA-projektet indflydelse på densiteten af boringerne, som fremgår af tabel 6.2.

Tabel 6.2.Areal, antal boringer og boringsdensiteten for model og projektområdet, med og uden boringerne fra GRAVA projektet.

Område	**Areal** [km^2]	**Antal boringer** [stk]	**Borings densitet** [stk /km^2]
Model område	21,1	840	39,8
Projekt område	0,6	110	183,3
Uden GRAVA			
Model område	21,1	764	36,2
Projekt område	0,6	49	81,7

Med 22 boringer i projektområdet, opnås der cirka samme borings densitet som i modelområdet, uden boringerne fra GRAVA-projektet. Antallet af boringer vil ligeledes påvirke det geologiske data.

6.4.2 Geologisk data

Med den ekstra geologiske data som GRAVA-projektet medfører, forbedres viden om den generelle geologi i modelområdet. Som tidligere nævnt i kapitel 5 er jordtyperne som fremkommer inddelt i fem geologiske kategorier. Geologisk data for boringerne i form af: antal af detektioner, gennemsnitlig og maksimal tykkelse og samlede længde for hver geologisk kategori, fremgår af tabel 6.3.

Tabel 6.3.Antal af detektioner, gennemsnitlig og maksimal tykkelse og samlede længde, for hver geologisk kategori for alle boringer i benyttet i modelopsætningen.

Jordtype	**Antal af detektioner**	**Gennemsnitlig tykkelse [m]**	**Maksimal tykkelse [m]**	**Samlede længde [m]**
Fyld	496	1,4	5,6	694
Sand	847	2,2	31	1863
Kalk	394	7,6	361	2994
Org. jord	390	1,9	21	741
Ler	591	2,8	31	1655

En tilsvarende tabel med data udelukkende bestående af data fra boringer fra GRAVA-projektet fremgår af tabel 6.4. Flere af boringerne fra GRAVA-projektet er ikke medtaget, da de enten ikke indeholder noget data eller ikke har et DGU. nummer. Data som indgår i tabellen, er for 56 boringer.

Tabel 6.4.Antal af detektioner, gennemsnitlig og maksimal tykkelse og samlede længde, for hver geologisk kategori for alle boringer i benyttet i modelopsætningen med boringerne fra GRAVA-projektet.

Jordtype	**Antal af detektioner**	**Gennemsnitlig tykkelse [m]**	**Maksimal tykkelse [m]**	**Samlede længde [m]**
Fyld	57	0,35	0,9	19,95
Sand	26	0,74	2,0	19,24
Kalk	3	0,23	0,4	0,69
Org. jord	11	0,49	1,0	5,39
Ler	52	1,29	2,5	67,08

Både den gennemsnitlige og maksimale tykkelse, samt samlede længde er forholdsvist lav sammenlignet med værdier i Tabel 6.3, dette skyldes, at boringerne fra GRAVA-projektet ikke er dybere end 3 m. Tabel 6.5 er ligeledes tilsvarende, blot med data fra hele modelområdet uden boringerne fra GRAVA-projektet.

Tabel 6.5.Antal af detektioner, gennemsnitlig og maksimal tykkelse og samlede længde, for hver geologisk kategori for alle boringer i benyttet i modelopsætningen uden boringerne fra GRAVA-projektet.

Jordtype	Antal af detektioner	Gennemsnitlig tykkelse [m]	Maksimal tykkelse [m]	Samlede længde [m]
Fyld	439	1,52	5,6	674
Sand	821	2,25	31	1844
Kalk	391	7,65	361	2993
Org. jord	379	1,94	21	736
Ler	539	2,94	31	1588

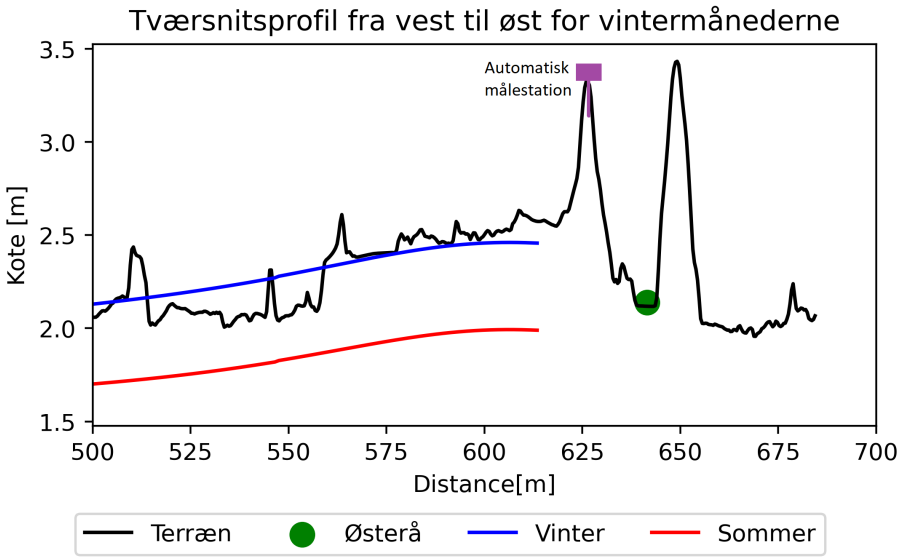
Boringerne fra GRAVA-projektet er korte, hvorfor deres indflydelse på den samlede længde ikke er så væsentlig. Sammenligningen er ligeledes mellem meget lange og korte boringer, hvilket forklarer den manglende indflydelse på den geologiske kategori Kalk, som typisk forekommer længere dybere end 3 meter nede. Sidstnævnte er ligeledes illustreret på Figur 5.8.

6.5 Opsamling og diskussion

GRAVA-projektet i Kærby, har bidraget med stor tilgængelighed af data for vandstandsmålinger [Nielsen og Thorndahl, 2022]. Både de manuelle målestationer, der er placeret på både offentlige og private grunde, og de automatiske målestationer er vist i figur 4.8.

De automatiske målestationer opsat i forbindelse med GRAVA-projektet, bidrager med et stort kontinuerlig datagrundlag med målinger cirka hvert 10 minut, fordelt over 9 målestationer. Manuelle målestationer er også opsat på privat grund. Grundejernes inddragelse og engagement har derfor haft indflydelse på indberetningshyppigheden af dybde til grundvandsspejlet, hvilket varierer henover GRAVA-projektets periode. Antallet af indberetninger igennem GRAVA-projektets forløb er illustreret på figur 6.9. De forskellige dataindsamlingsmetoder har givet mulighed for at evaluere, og diskutere kvalitets- og kvantitetsforskellen mellem de 2 grundlæggende forskellige typer af målestationer.

De 9 automatiske målestationer har stort datagrundlag, hvor det kan diskuteres om placeringen af disse har været hensigtsmæssige. Da problemstillingen er grundet lokale forhold, er dette forsøgt illustreret på den nedenstående figurer 6.18.



Figur 6.18.Placering af størstedelen af de automatiske målestationer.

Da Kærby er et tæt bebygget boligområde, har placeringen af de automatiske målestationer været begrænset til offentlige områder, hvor flere af disse er placeret langs Østerå. Dette er illustreret på 6.18. Resultat af denne placering har givet et misvisende billede af grundvandsspejlet. Dette skyldes, at målingerne repræsenter en hydrologisk forbindelse mellem det relative stabile grundvandsspejl og vandstanden i Østerå om vinteren. Dette fremgår af figur 6.18, hvor det observeres, at grundvandsspejlet er over terræn. Hvilket ikke er observeret i Kærby i denne periode. Da datagrundlagnet fra automatiske målestationer [4715 og 4714] ikke er anvendeligt, har dette betydet et væsentlig forringet datagrundlag. Det fremgår yderligere, at de interpolerede kort, af figur 6.4 og figur 6.5, at der særligt i vintermånederne observeres vand på terræn.

De manuelle private og offentlig tilgængelige målestationer, har et væsentlig mindre indberetningsinterval relativt til de automatiske måleenheder, hvorimod den spatiale fordeling er væsentligt større. Fra analysen af målestationerne er der fundet, at de manuelle målestationer har bidraget med en væsentlig bedre repræsentation af den rumlige fordeling af dybden til grundvandsspejlet. Dette er på trods af faldende hyppighed i indberetninger, indberetningsfejl og potentielle aflæsningsfejl. Ved udfærdigelse af de interpolerede kort over dybden til grundvandsspejlet, som er baseret på manuelt data, illustreret af figur 6.13 og figur 6.14, kan en realistisk dybde til grundvandsspejlet observeres. Præcisionen ved aflæsning af de manuelle målestationer er vurderet til at være fra få millimeter til få centimeter [Jensen, 2003]. Derfor vurderes de manuelle målestationer som troværdige. Yderligere kan det nævnes, at et mindre antal manuelle offentlige målestationer, medvirker til et misvisende billede af grundvandsspejlet som illustreret ved de automatiske målestationer på figurer 6.18 og 6.18. Dette kan observeres af figur 6.11, ved perioden angivet med grøn, hvor varierende hydrologisk respons observeres mellem de anviste målestationer.

Der er udarbejdet tværsnitsprofiler af grundvandsspejlet baseret på det manuelle datagrundlag, disse fremgår fra nord til syd af figur 6.15 og fra vest til øst af figur 6.16. Disse er baseret på højopløselig topografikort, og er baseret på IDW interpoleret data, hvilket er vurderet som den optimale interpoleringsmetode for det manuelle data. Det kan diskuteres hvorvidt "Kriging"havde været en bedre interpolerings metode, da denne vægter de ekstreme værdier højere end IDW, som potentielt kunne resultere i et mere nuanceret billede af dybden til grundvandsspejlet. Et pålideligt datagrundlag er vigtigt ved anvendelse af "Kriging"metoden, hvilket det manuelle data ikke vurderes som værende.

Det kan derfor diskuteres hvorvidt de automatiske målestationer med højt indberetningsinterval, altid er den bedste løsning. Hvor det er fundet i dette projekt, at datagrundlaget fra de manuelle målestationer, har dannet grundlag for et nuanceret billede af dybden til grundvandsspejlet gennem GRAVA-projektets periode. Ved sammenligning af målestationstyper, er dette baseret på 57 manuelle og 9 automatiske, hvilket har haft indflydelse på dette. Dertil, er automatiske målestationer væsentligt dyrere end manuelle, som er del i denne årsag.

Det skal yderligere nævnes, at der i forbindelse med GRAVA-projektet, er installeret skalapæle i de omkring liggende søer og Østerå. Disse fremgår af figur 6.1, hvor målestationerne navngivet med [51 - 59] er skalapæle.

Disse er observeret som afvigende da de målestationer vandstande i vandområder og derfor ikke benyttet. Det må dertil tilskrives, at de i vækstsæsonen, stort set er dækket af vegetation og derfor er svære at lokalisere, hvilket yderligere besværliggør korrekt aflæsning. Dette er illustreret i bilag C.1. Set i forhold til modellering af det hydrologiske samspil mellem grundvandsspejlet og de lokale søer og åer, kan det diskuteres, hvorvidt det havde været optimalt at prioritere disse skalapæle. Det havde potentielt givet et mere nuanceret billede af vandstanden i søer og vandløb.

7 Modellering af lokalskala geologisk heterogenitet

T-PROGS genererer stokastiske geologiske realiseringer baseret på boringsdata, hvilket giver en rationel tilgang til at belyse usikkerheder forbundet med geologisk karakterisering af modelområdet. De stokastiske simuleringer T-PROGS benytter er særligt velegnede til mindre lokale skalamodeller, da den resulterende komplekse heterogenitet er mere repræsentativ for faktisk stratigrafisk aflejring. Denne udtrykte geologiske heterogenitet gør det realistisk og potentielt mere nøjagtig modellering muligt. [Carle, 1999] Den geologiske heterogenitet observeret i Kærby, beskrevet i 6.4.

Det kapitel omhandler, hvorledes T-PROGS implementere geostatisk på boringdata og variationer i parametrene for modelområdet. Derfor vil teorier og metoder for T-PROGS først blive gennemgået. Grundet datamængden for boringer i modelområdet, vil T-PROGS metoden blive vist, for et eksempel med et boreprofil, hvorefter implementeringen for modelområdet gennemgås.

7.1 Metode til implementering af T-PROGS

T-PROGS kan generere endimensionelle Markov-chains til generering af geologiske realiseringer ved 4 forskellige metoder: 1. Overgangshastigheder. 2. Diskret lag baseret på overgangssandsynligheds data for en bestemt lag afstand. 3. (TP) observerede overgangssandsynligheder baseret på boringsdata. 4. Overgangsfrekvenser, baseret på jordtypernes observeret frekvens. Dette projekt benytter sig af TP metoden ved generering af Markov-chains, da metoden har et stærkt statistisk grundlag og er anerkendt i litteraturen [He et al., 2015; Qi et al., 2015; Elfeki, 2006; Refsgaard et al., 2012; Troldborg, 2004b]. Tilgangen for T-PROGS er en udfærdigelse af Markov-chains til generering af geologiskemodeller, hvilket er baseret på sandsynligheden for en jordtype overgang (Transitions probability, herefter angivet TP), som er en metode til modellering af heterogenitet i geologiske realiseringer.

TP er baseret på en rationel sandsynlighedsbaseret geostatistik metode, der som er enkel at fortolke [Carle, 1999]. Slutproduktet ved T-PROGS genereringer er en 3D geologisk model, med angivet jordtype i hver celle. Der kan genereres 99 geologiske realiseringer, med maksimalt 3 millioner celler per geologisk model, hvortil det er muligt at have op til 5 jordtyper. En simpel definition af de anvendte betingede overgangssandsynligheder t fremgår i udtrykket nedenfor i ligning (7.1). Givet at en jordtype j er til stede på en lokation x, hvad er sandsynligheden for, at en anden jordtype k forekommer på lokation $x + h$. h repræsenterer en positiv afstand(vektor) i retningen ø [Carle, 1999]:

$$t_{j,k}(h_{\text{ø}}) = Pr\ \{kategori\ j\ obs\ x \mid kategori\ k\ obs\ \ x + h_{\text{ø}}\} \tag{7.1}$$

Hvor:

Pr	Sandsynlighed

Overgangssandsynligheden følger princippet for Markov-Chain, som beskriver overgangen fra et stadie til et andet på matrice form. Ved at benytte princip kan samtlige overgangssandsynligheder for retningen udtrykkes i en enkelt matrice som vist i ligning (7.2).

$$T(h_\phi) = \begin{bmatrix} t_{jj},(h_\phi) & \cdots & t_{jk},(h_\phi) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{kj},(h_\phi) & \cdots & t_{kk},(h_\phi) \end{bmatrix} \tag{7.2}$$

For at kunne implementere denne matrice, er der matematiske betingelser dette skal overholde. Den geostatistiske Markov-chains tilgang antager, at den rumlige fordeling afhænger af den lokale forekommende geologiske kategori og er udelukkende er afhængig af den nærmeste geologiske enhed af en anden eller samme kategori. Da overgangssandsynligheden fra en jordtype til sig selv, ikke kan udtrykkes matematisk, er denne udtrykt som den gennemsnitlige jordtype udbredelse $L_{j,\phi}$ i ϕ-retningen. Udbredelsen baseres på den gennemsnitlige observerede dybde af jordtypen.

Ifølge reglerne for sandsynlighedsestimering skal andelene af hver jordtype opfylde nedenstående betingelser i ligning (7.3), hvor P_k repræsentere en andel af jordtyperne i modellen. Dermed skal de genererede geologiske realiseringer overholde de observerede jordtype andele. [Carle, 1999]

$$\sum_{k=1}^{k} P_k \ = 1 \tag{7.3}$$

Jordtypen med største andel benyttes som baggrundsmateriale, hvilket beskrives som den jordtype, der indsættes i det resterende område, hvor beregningsbetingelserne ikke er opfyldt. Dette er i tilfælde, hvor der ikke findes boringer i nærheden og linseudbredelsen for øvrige jordtyper ikke overholder udbredelsesbetingelser. Dette sikrer samtidig, at jordtype andelene overholdes.

Ligeledes skal hver række i overgangssandsynlighedsmatricen $T(h_\phi)$ overholde udtrykket fra ligning (7.4).

$$\sum_{k=1}^{k} t_{jk,h} \ = \ 1 \qquad \forall j \tag{7.4}$$

$T(h_\phi)$ baseres på vertikale observationer, hvortil dette projekteres til horisontalt. Dette gøres ved at kombinere Walthers lov og TP, som er en logisk tilgang til udvikling af horisontal rumlig variabilitet, fra observeret vertikale observationer [Carle, 1999]. Det antages, at vertikale aflejringer kan repræsenterer den horisontale geologiske udbredelse [Elfeki og Dekking, 2005]. Dermed kan 1D Markov-chains fra boringsdata, projekteres ud til den 3D rummelige variabilitet [Elfeki og Dekking, 2005].

Geologisk materiale aflejres i vertikal retning og horisontale retninger med samme sekvens i forskellige skala [Elfeki og Dekking, 2005]. Den observerede geologiske variabilitet i boringerne kan være til stede i horisontale retning i en større skala. Dermed er antallet af overgange mellem forskellige jordtyper de samme i forskellige retninger, hvorfor det kan antages at $T_z = T_{x,y}$. Forholdet mellem vertikal og horisontal linse udbredelse, afhænger af de lokale forhold og stratigrafiens hældning. Da de forskellige jordtyper i et profil er aflejret i det samme geologiske miljø, antages de gennemsnitlige hældninger for forskellige jordtyper at være de samme [Carle et al., 1998; Qi et al., 2015].

Dermed kan de horisontale retninger implementeres ved skalering af T_z [Carle, 1999]. Den retnings bestemte skalering af jordtype udbredelsen er standard i T-PROGS og fremgår nedenfor [Carle, 1999]:

$$L_{x,y} = 10 \cdot L_z \tag{7.5}$$

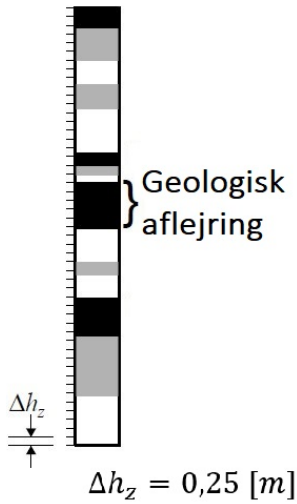
Hvor:		
	$L_{x,y}$	Midlet horisontale jordtype udbredelse
	L_z	Midlet vertikale jordtype udbredelse

Geologiske realiseringer med T-PROGS er genereret på basis af geologiske forsimplinger, hvor disse antagelser er listet nedenfor.

- Geologisk materiale aflejres i vertikal og horisontale retninger med samme sekvens, men forskellige skalaer[Elfeki og Dekking, 2005]. $T_z = T_{x,y}$
- Geologiske aflejringer for modelområdet antages at have samme gennemsnitlige hældninger for forskellige jordtyper [Carle et al., 1998; Qi et al., 2015]. $Hældning = 0°$
- Den horisontale jordtype udbredelse kan beskrives ved skalering af den vertikale jordtype udbredelse multipliceret med en faktor [Elfeki og Dekking, 2005; Carle, 1999]. $L_{x,y} = 10 \cdot L_z$
- Der negligeres lokalskala heterogenitet inden for de definerede celler og individuelle variationer for jordtyper.

7.2 Eksempel på implementering

Ud fra den beskrevet metode, til analysering af geologisk data, vil et eksemplet blive gennemgået nedenfor, hvor figur 7.1 viser, en boreprofil, med 3 jordtyper: Sand=Hvid, Kalk = Grå, Ler = Sort.



Figur 7.1.Eksempel på diskretiseret boreprofil med 3 geologiske elementer [Carle, 1999].

Rækkefølgende er således:

- 1. Indfør diskretiseringen af boreprofil dybde, baseret på indberetningsintervallet.
- 2. Tæl de observerede jordtype overgange, som observeres på figur 7.1, som kan observeres på nedenstående matrice.

		Fra		
		Sand	*Kalk*	*Ler*
Til	*Sand*	–	5	1
	Kalk	2	-	3
	Ler	3	0	-

Tabel 7.1.Observerede jordtype overgange fra figur 7.1.

- 3. Divider hver celle med rækkesummen.

		Fra		
		Sand	*Kalk*	*Ler*
Til	*Sand*	–	0.833	0.167
	Kalk	0.4	-	0.60
	Ler	1	0	-

Tabel 7.2.Beregnede TP ud fra antal observationer fra tabel 7.1.

- 4. Ud fra diskretiseringen af boreprofilet, bestemmes gennemsnitlige vertikale udbredelse for de 3 jordtyper.

		Fra		
		Sand	*Kalk*	*Ler*
Til	*Sand*	2.3	0.833	0.167
	Kalk	0.4	4	0.60
	Ler	1	0	3

Tabel 7.3.TP med beregnet gennemsnitlige vertikale udbredelse.

På baggrund af denne metode i eksemplet, udføres disse beregninger af T-PROGS på boringerne beskrevet i afsnit 5.4.

7.3 Generering af geologiske realiseringer for modelområdet

Ved at benytte den beskrevne metoder på boringerne i modelområdet, resultere dette i TP matricer, volumetriske jordtype andele og midlet jordtype udbredelse. Den volumetriske andel og den gennemsnitlige udbredelse L_z genereret i modellen kan ses i tabel 7.4.

Tabel 7.4.Volumenforhold og gennemsnitlige vertikal jordtype udbredelse baseret på boringsdata.

Jordtype	**Volumetriske $p_{\mathbf{j}}$ jordtype andel**	**Gennemsnitlig $L_{k,\mathbf{z}}$ jordtype udbredelse [m]**
Fyld	0,047	1,56
Sand	0,299	3,30
Kalk	0,355	14,15
Org. jord	0,078	2,18
Ler	0,221	3,12

Af tabel 7.4 fremgår det, at for modelområdet har kalk den største volumetriske andel, efterfulgt af sand, hvorfor kalk er baggrundsmateriale. Kalk har den største udbredelse, hvor denne er cirka en faktor 4 større end den næststørste. Fyld har både en lille andel, som er under 5% og en kort udbredelse, sammenlignet med de øvrige jordtyper, på 1,5 m. Dette må tilskrives, at som tidligere er en menneskeskabt overfladejord, som ikke naturligt forekommer. Derfor forventes den ikke at være til stede i så høj grad. Sammenlignet med boringer GRAVA-projektet, vist i tabel 6.4, er dette interessant, da fyld udgør den næststørste ud fra andel, har flest detektioner og næst kortest gennemsnitlig udbredelse. Organiske jorde udgør en andel på cirka 8% og en gennemsnitlig udbredelse på 2,18 m, dermed er den næstmindst på begge parametre. For hele modelområdet er ler en dominerende jordtype, da denne har medianen for både andel og gennemsnitlig udbredelse, hvilket er i modsætning til boringerne fra GRAVA-projektet, hvor ler var størst på begge disse parametre, som vist i tabel 6.4.

TP matricen (T_z), er beregnet baseret på tilgængelig boreprofildata for modelområdet, og er vist i tabel 7.5. En sammenligning mellem de observerede og de estimerede overgangssandsynligheder fra tabel 7.5, fremgår i bilag af figur D.1.

Tabel 7.5. Vertikal overgangssandsynlighed TP_z.

Jordtype	**Fyld**	**Sand**	**Kalk**	**Org. jord**	**Ler**
Fyld	1.56	0.67	0.0	0.33	0.0
Sand	0.25	3.30	0.12	0.36	0.27
Kalk	-1.12	1.65	14.15	-1.02	1.50
Org. jord	0.22	0.45	0.04	2.17	0.29
Ler	0.26	0.51	0.11	0.12	3.12

Baggrundsmaterialet for Kærby-modellen er kalk, hvorfor de negative værdier i den vertikale overgangssandsynligheds matrice TP_z, fra tabel 7.5, er en matematisk nødvendighed, for at overholde ikke diagonale begrænsninger defineret i ligning (7.4). Tabel 7.5 viser ligeledes at søjlen med fyld har høje sandsynligheder for ændring i jordtype, da summen af disse er cirka 1,5. Tilsvarende er den gennemsnitlige udbredelse meget lav. Fyld har flest overgange til jordtypen kalk, som ikke har nogle overgange til fyld. Kalks overgangssandsynligheder er lave, cirka 0,25 i alt, hvilket skyldes den lange gennemsnitlige udbredelse og kalk typisk ville være den jordtype som er aflejret først. Dermed udgør kalks overgange til andre jordtypen en lille andel af rækkesummen, hvorfor værdierne er lave.

Den gennemsnitlige vertikale- og horisontale jordtype udbredelse, fremgår af tabel 7.6.

Tabel 7.6. Gennemsnitlig vertikale- og horisontale jordtype udbredelse.

Jordtype	**Gennemsnitlig $L_{k,\mathbf{z}}$ jordtype udbredelse**	**Gennemsnitlig $L_{k,(\mathbf{x},\mathbf{y})}$ jordtype udbredelse**
Fyld	1.56	15.6
Sand	3.30	33.0
Kalk	14.15	141.5
Org. jord	2.18	21.8
Ler	3.12	31.2

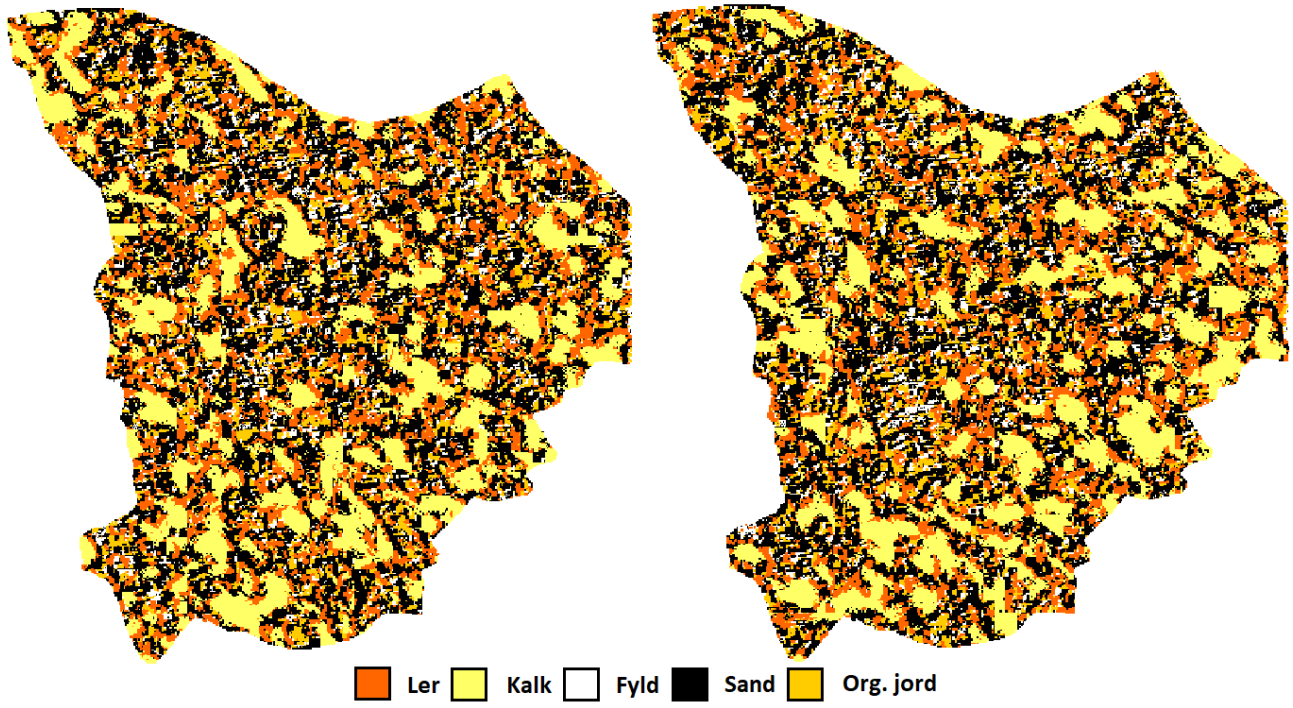
Det er antaget, som beskrevet i [Carle, 1999], at Walthers lov kan benyttes til estimering af den horisontale jordtype udbredelses med ligning (7.5). Implementeringen fremgår for hver jordtype af tabel 7.7

Tabel 7.7. Overgangssandsynligheden $TP_{x,y}$ i horisontal retning.

Jordtype	**Fyld**	**Sand**	**Kalk**	**Org. jord**	**Ler**
Fyld	15.6	0.67	0.0	0.33	0.0
Sand	0.25	33.0	0.12	0.36	0.27
Kalk	-1.12	1.65	141.5	-1.02	1.50
Org. jord	0.22	0.45	0.04	21.7	0.29
Ler	0.26	0.51	0.11	0.12	31.2

De observerede overgangssandsynligheder i den vertikale retning er projekteret til den horisontale plan. Det skyldes at geologisk materiale aflejres i vertikal retning og horisontale retninger med samme sekvens i forskellige skala [Elfeki og Dekking, 2005]. Den observerede geologiske variabilitet i boringerne kan være til stede i horisontale retning i en større skala, hvorfor det kan antages at $T_z = T_{x,y}$. Hvor diagonalen som repræsentere den skalerede horisontal jordtype udbredelses, vist i tabel 7.6 Illustrationen af $TP_{x,y}$ i den horisontale retning er vist i bilag D.

Resultatet af den geologiske analyse af modelområdes heterogenitet er 99 lige sandsynlige geologiske realiseringer. To udvalgte modeller er vist på figuren 7.2.



Figur 7.2.Lag 2 for to forskellige geologiske realiseringer.

Ud fra de geologiske elementers placering på figuren 7.2, og placeringen af boreprofilerne på figur 5.9, kan det observeres, at geologien er mere konstant ved højere boringsdensitet. Lignende tendenser fremgår af de 97 øvrige geologiske realiseringer. Derfor vurderes en potentiel sammenhæng mellem boringsdensitet og geologisk variation for de genererede realiseringer. Sammenhængen er særlig interessant, da udførelsen af boringsarbejde og omkostninger med disse er betragtelig i projekter som GRAVA-projektet. Boringsdensitetens påvirkning på den geologiske heterogenitet i Kærby belyses derfor i kapitel 11.

7.4 Opsamling og diskussion

De fleste geostatistiske værktøjer bruger statistiske tendenser som datagrundlag, såsom middelværdi, varians og korrelationslængde til at generere modelrealiseringer, men tillader normalt ikke input baseret på geologiske forståelser. Her adskiller T-PROGS sig, da de volumetriske andele, og jordtypernes rumlige placering i forhold til hinanden også er inkluderet i realiseringerne. En nyttig funktion ved T-PROGS er, at det betingede data kan inkluderes, som muliggør brugen af eksterne data [He et al., 2015; Carle, 1999; He et al., 2014]. Dette har ikke været muligt at fremskaffe TEM data (Transient electromagnetics) for området, som fundet særlig anvendeligt i litteraturen ved primære tilstedeværelse af sand og ler [He et al., 2015]. Det kan diskuteres om dette havde ændret signifikant på resultaterne, da boringsdensiteten i Kærby må antages at være høj sammenlignet med boringsdensiteten i litteraturen [He et al., 2015; Troldborg, 2004a; He et al., 2014]. He et al. [2015] fandt, genereringen af geologiske realiseringer væsentlig mere sammenlignelige med benyttelse af TEM data, hvorfor en ændring i resultaterne derfor ikke kan udelukkes.

Ved anvendelse af T-PROGS til generering af geologiske realiseringer er 841 boreprofiler anvendt, til at beskrive den geologiske heterogenitet for hele modelområdet. [He et al., 2015; Troldborg, 2004a] argumentere for, at særligt boringsdensiteten er vigtig ved projekteringen af vertikale observerede tendenser til den horisontale plan. Boringsdensiteten benyttet i dette projekt, er 5 gange højere, end

observeret i førnævnt litteratur. Det kan derfor diskuteres, om denne datamængde er tilstrækkelig for modelleringen af den høje heterogene geologiske fordelinger observeret i Kærby. Hvor He et al. [2015], argumentere for anvendelse af TEM data, som ikke er muligt i så tæt beboede områder som Kærby. Ved genereringen af de geologiske realiseringer er der i dette projekt, observeret en relativ konstant rumlig fordeling af jordtyper i Kærby. Dette må tilskrives den høje boringsdensitet observeret i Kærbyområdet.

Boreprofilerne er den primære kilde til geologisk fortolkning, hvorfor kvaliteten, inddelingen og den vertikale udbredelse er særlig vigtig at kvalitet sikre. T-PROGS kan maksimalt modellere geologisk heterogenitet med 5 jordtyper, hvorfor den observerede geologi i boreprofilerne er simplificeret. Denne forsimpling er beskrevet i afsnit 5.4. Forsimplingen er baseret på at kvantificere 5 generelle ledningsevner, der tilsammen bedst repræsenterer det naturlige system. Dette er i overensstemmelse med fremgangsmetoderne i litteraturen [He et al., 2014]. Da modellen opsat i dette projekt, dækker over et byområde, har det været nødvendigt at definere en overflade jord og grundet den høje tilstedeværelse af terrænnært ler i Kærbyområdet. Det kan diskuteres, om det havde været en mere korrekt tilgang, at slette ikke geologiske elementer fra boreprofiler og i stedet udelukkende defineret infiltrationsjorden i de øverste 0,5 meter af de geologiske realiseringer, som beskrevet i [He et al., 2015]. Dette ville samtidig give mulighed for en jordtype mere, hvis fyld var undladt

Ved de geologiske realiseringer, bliver de nederste lag ikke modelleret som udelukkende kalk, hvilket der var ønsket, hvorfor der er valgt at prædefinere dette. Samme argument er benyttet i [He et al., 2015; Troldborg, 2004a], som er relateret til den vertikale udbredelse af boreprofilerne. Dette er en forsimpling af de observerede tendenser, da kun enkelte boringer er dybere end modellen, hvorfor dette er antaget som værende den bedste løsning. Yderligere information udover boreprofiler, hvor subjektiv viden i form af geologisk indsigt og fortolkning af andre datakilder er benyttet, må anses som værende bedste alternative løsning [Troldborg, 2004a].

Midlet jordtype udbredelse og retningstendenser af de primært observerede jordtyper blev fortolket ud fra boreprofiler. Det kan diskuteres, om den mere homogene geologi for den ydre del af modelområdet, påvirker den høje geologiske heterogenitet, som tydeligt er til stede i Kærby. Argumenterne til diskussion for generering af TP matricerne, er baseret på den valgte lag diskretisering af boreprofilerne og dertil indberetnings intervallet i den vertikale retning. Indberetningsintervallet for boreprofilerne placeret i det omkringliggende område, er typisk i intervaller af [0,5 - 1 meter], som relativt til indberetningerne i Kærby på 0,3 meter må anses som grove. Derfor vil den ellers observerede heterogenitet blive reduceret ved indberetning af mest observerede jordtype over cirka 1 meter. Vigtigheden af højkvalitets boringer til anvendelse i T-PROGS bliver påpeget i litteraturen [He et al., 2014]. Det varierende indberetningsinterval, vil påvirke generering af TP matricerne inklusiv midlet jordtype udbredelse, da T-PROGS er baseret på total midlet tendenser for det modellerede område [Carle, 1999]. Det blev bevist, at sammenlignelige TP matricer kunne genereres ved forskelligt indberetnings interval for flere geologiske placering i forskellige lande [Qi et al., 2015]. Det kan derfor diskuteres, om en alternativ tilgang til geologiske realisering, ved anvendelser af finere diskretisering i et mindre område, havde været mere optimal. Fremgangsmåden kunne være, en kaliberet model for hele modelområdet, undtagen selve Kærby, hvor T-PROGS kunne anvendes på et højtopløseligt gitter, hvor den geologiske heterogenitet derfor kunne repræsenteres med væsentlig højere præcision.

Tilsvarende til at benytte en mindre model, kunne dette ligeledes have indflydelse på baggrundsmaterialet, som er bestemt efter den jordtype, som udgør den største andel. Dette kunne med fordel være gjort, da det udelukkende er Kærby som undersøges.

8 Følsomhedsanalyse af geologiske realiseringer og hydrologiske parametre

I forbindelse med simuleringerne og generering af geologiske realiseringer, er der foretaget en følsomhedsanalyse af, hvilke hydrauliske parametre, som har en væsentlige indflydelse modelresultat. Det nødvendige antal geologiske realiseringer og Monte Carlo realiseringer for de hydrauliske parametre undersøges derfor.

De præsenterede modelresultater for de forskellige geologiske realiseringer vil fremgå som et simuleret trykniveau for hver beregningscelle. I Kærby er trykniveauet omregnet til dybde til grundvandsspejlet.

Følsomhedsanalysen er foretaget ved undersøgelse af de geologiske usikkerheders indflydelse på resultaterne. Dette gøres ved at trække det simulerede trykniveau for grundvandsspejlet fra topografikoten. Den anvendte topografi er fra HIP databasen [Dataforsyningen, 2022], og har en opløsning på $[100m \cdot 100m]$, hvilket også anvendes i modelberegningerne. Simuleringsopsætningen for følsomhedsanalysen er foretaget med et fælleskloakeret system for et nutidigt vinterscenarie. Det antages dermed, at der ikke er variation i det nødvendige antal realiseringer, klimascenarier, afløbssystemer og årstiderne imellem.

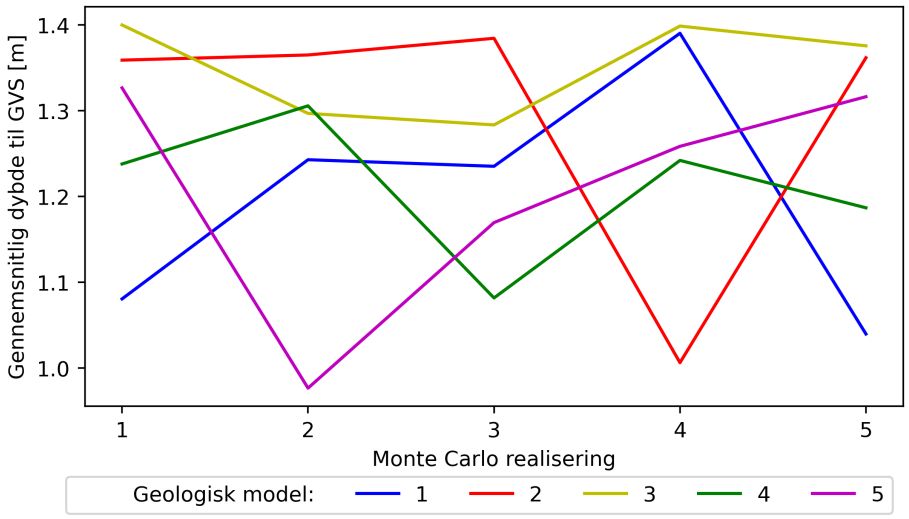
8.1 Følsomhed på hydrologiske parametre

For at undersøge hvilke parametre som har indflydelse på resultatet, er der foretaget en følsomhedsanalyse heraf. De hydrauliske parametre hvortil effekten undersøges, er den hydrauliske ledningsevne, det specifikke magasintal og specific yield.

8.1.1 Nødvendige hydrologiske parametre

Til analysen af den hydrauliske ledningsevnes effekt på resultatet, blev der benyttet en tilfældig værdi, for hver jordkategoris spænd fra tabel 5.5. Dette er gjort for fem forskellige geologiske realiseringer, og fem Monte Carlo realiseringer per model. Årsagen til dette, er spændet for den hydrauliske ledningsevne som varierer med en faktor 1000, for alle fem jordtyper.

Af figur 8.1 fremgår den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet for forskellige geologiske realiseringer ved forskellige Monte Carlo realiseringer for den hydrauliske ledningsevne. Monte Carlo realiseringer er foretaget for hver jordkategori, hvor en tilfældig værdi er valgt ud fra et før angivet spænd i Tabel 5.5. Dermed belyses den hydrauliske usikkerhed. I dette tilfælde har hver geologisk model fem Monte Carlo realiseringer af den hydrauliske ledningsevne.



Figur 8.1.Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet (GVS) for forskellige geologiske realiseringer per Monte Carlo realisering.

Af figur 8.1 fremgår det, at Monte Carlo realiseringerne har betydelig indflydelse på den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet. Dette fremgår, at samme geologiske realisering kan variere med over 30 cm.

Geologiens påvirkning fremgår ligeledes tydeligt af figur 8.1, hvor den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet varierer med over 30 cm for hver Monte Carlo realisering.

8.1.2 Fravalgte hydrologiske parametre

De ovenstående resultater er beregnet med et forhold mellem den vertikale hydrauliske ledningsevne og horisontale hydrauliske ledningsevne på 1,5. Effekten på den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet ved et øget forhold er fundet ubetydelig, hvorfor dette er negligeret. Dette fremgår af figur E.1. Ved forøgelse af forholdet medfører dette en øget beregningstid, hvorfor et forhold på 1,5 er benyttet for alle fremtidige beregninger.

Effekten af det specifikke magasintal og specific yield er ligeledes undersøgt. Tidligere i analysen har referenceværdier på henholdsvis 0,2 for det specifikke magasintal og 0,0001 for specific yield, været benyttet. Disse er sammenlignet med resultater, hvor referenceværdierne er 1,5 gang større og mindre. Denne undersøgelse har vist, at dette ikke påvirker trykniveauet betydeligt. Af denne årsag benyttes værdierne 0,2 for det specifikke magasintal og 0,0001 specific yield, til fremtidige beregninger.

8.2 Reduktion af geologiske realiseringer

Af figur 8.10 fremgår det, at de geologiske realiseringer har en væsentlig indvirkning på resultatet. Derfor er det vigtigt at undersøge, hvor mange geologiske realiseringer der er statistisk nødvendige. Analysen baserer sig på to metoder. Den første metode involverer en analyse af den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne og ændringer heri for de forskellige geologiske realiseringer. Den anden metode involverer en analyse af resultaterne i form af trykniveau for hver enkelt geologisk model. Formålet er at undersøge, hvor meget geologien varierer, og hvor meget resultatet ændrer sig som følge heraf. Som tidligere nævnt, at T-PROGS er begrænset til at generere 99 geologiske realiseringer, og derfor er analysen baseret på disse 99 realiseringer, der er genereret ved hjælp af den opsætning, der er beskrevet i afsnit 7.

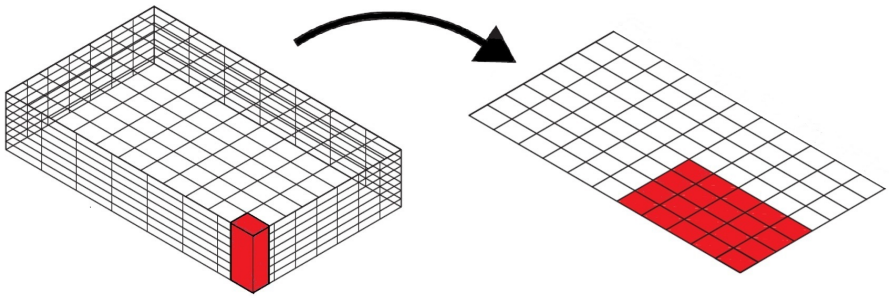
8.2.1 Parametrisering af geologisk variabilitet

I denne sektion er der udført en statistisk analyse af de genererede geologiske realiseringer ved hjælp af T-PROGS. Formålet med analysen er at vurdere forskellene mellem de forskellige geologiske realiseringer, baseret på parametriseringen af de 5 jordtyper. Tabellen 8.1 viser den logaritmiske gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne for hver af de 5 jordtyper. Dette giver en indikation af variationen i hydraulisk ledningsevne på tværs af de forskellige geologiske realiseringer.

Tabel 8.1.Hydraulisk ledningsevne for analysen fortaget i T-PROGS. Alle værdier er angivet i m/s

Jordtype	**Hydrauliske ledningsevne benyttet til analysen**
Sand	10e-4
Kalk	10e-5
Fyld	10e-3
Ler	10e-10
Organiske jorde	10e-7

I den statistiske analyse blev de genererede geologiske realiseringer ved hver iteration konverteret til 2D. Analysen er baseret på 2 til 6 inddelinger, hvoraf 4 inddelinger er vist i dette afsnit. Den samlede analyse for alle inddelinger kan findes i bilag E.1. Dette blev gjort for at analysere variationen inden for hver sektor og vurdere forskellene mellem dem. Figur 8.2 illustrerer processen med at konvertere de geologiske realiseringer til 2D-format. Ved at opdele dem i sektorer kunne man foretage mere detaljerede analyser af den rumlige variation i de geologiske egenskaber.

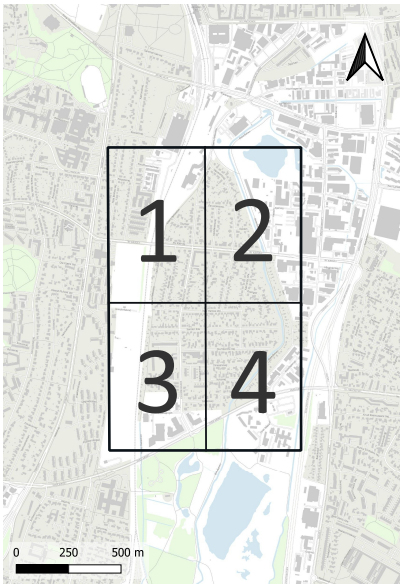


Figur 8.2.Konvergering af geologisk realisering til 2D område ud fra hydraulisk ledningsevne.

Opdelingen af de geologiske realiseringer i sektorer har til formål at kvantificere forskellene mellem hver iteration og vurdere, om det løbende gennemsnit for den lokale sektion tilnærmer sig det globale gennemsnit for den hydrauliske ledningsevne. Når det lokale gennemsnit nærmer sig det globale gennemsnit, kan det antages, at tilstrækkeligt antal geologiske realiseringer er blevet genereret.

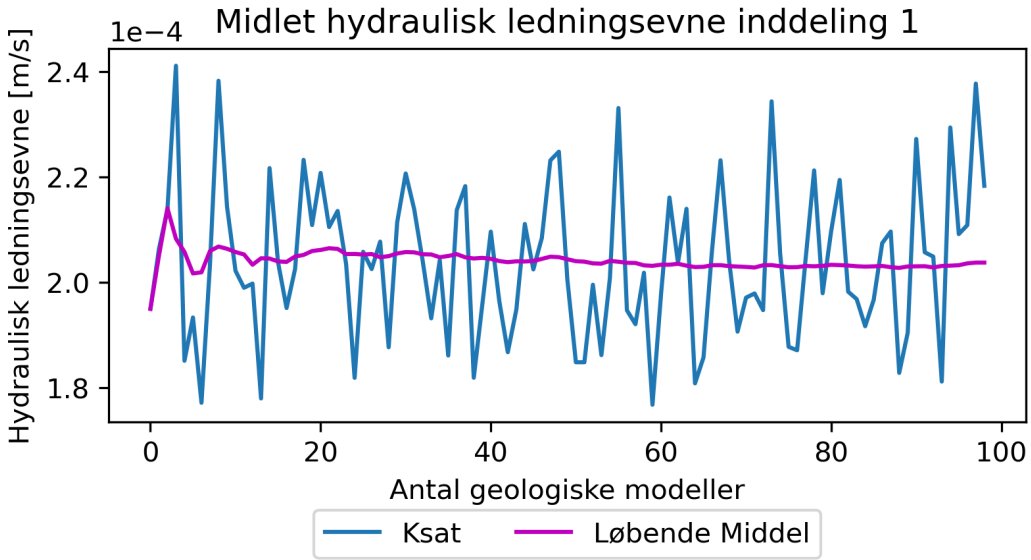
Ved at opdele de geologiske realiseringer i sektorer og analysere variationen inden for hver sektor kan man identificere eventuelle afvigelser fra det globale gennemsnit. Når forskellene mellem de lokale gennemsnit og det globale gennemsnit bliver minimale, kan det betragtes som en indikation af, at der er genereret tilstrækkelig antal geologiske realiseringer. Denne tilgang tager højde for, at variationen i de geologiske egenskaber kan være signifikant inden for forskellige sektorer og sikrer, at der genereres tilstrækkeligt mange realiseringer til at repræsentere den rumlige heterogenitet i modellen.

Modelområdet er opdelt i fire sektorer, som er illustreret på Figur 8.3. Denne opdeling gør det muligt at observere minimale ændringer i den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne mellem iterationerne, når den statistiske analyse er baseret på den totale geologiske realisering.



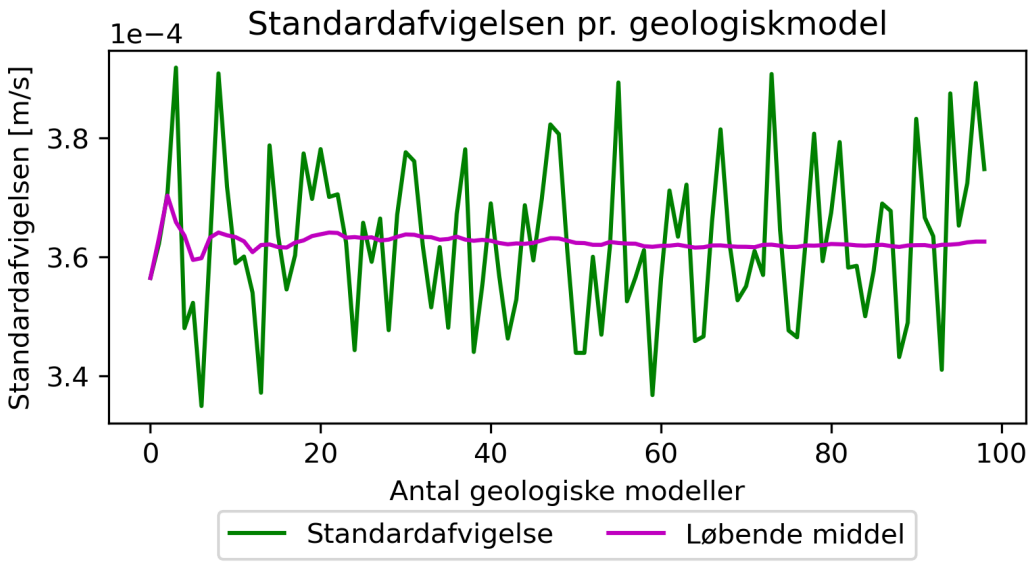
Figur 8.3. Inddelinger af Kærby i 4 sektioner.

For at undgå for mange unødvendige iterationer af modellen undersøges det, hvornår den geologiske fordeling konvergerer. Figur 8.4 giver en oversigt over, hvordan fordelingen konvergerer som funktion af antallet af gennemførte iterationer. Den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne for inddeling 1 er vist på figur 8.4.



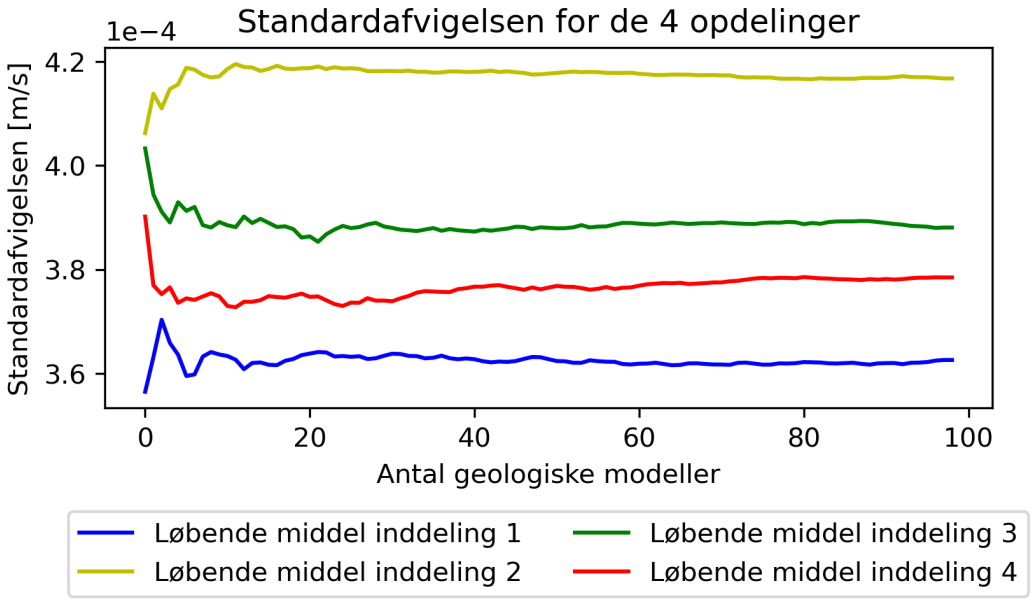
Figur 8.4. Den gennemsnitlige hydraulisk ledningsevne vist med det løbende gennemsnitlige for inddeling 1.

Det fremgår af figur 8.4, at den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne for hver iteration, varierer cirka i intervallet $[1{,}7 \cdot 10^{-04} - 2{,}4 \cdot 10^{-03}]$. Det løbende middel, for den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne, stabiliseres efter cirka 10 realiseringer og varierer cirka i intervallet $[1.95 \cdot 10^{-04} - 2{,}18 \cdot 10^{-04}]$. Standardafvigelsen for den hydrauliske ledningsevne er ligeledes beregnet for hver iteration, med et løbende middel for dette i inddeling nr. 1. Denne fremgår af figur 8.5.



Figur 8.5.Standardafvigelsen for den hydraulisk ledningsevne og løbende middel for denne i inddeling nr. 1.

Det fremgår af figur 8.5, at standardafvigelsen for den hydrauliske ledningsevne i hver iteration, varierer cirka i intervallet $[3.4 \cdot 10^{-4} - 3.9 \cdot 10^{-04}]$. Det løbende middel for standardafvigelsen stabiliseres efter cirka 10 realiseringer og varierer cirka i intervallet $[3{,}58 \cdot 10^{-4} - 3{,}69 \cdot 10^{-04}]$. Det løbende middel for standardafvigelse af den hydrauliske ledningsevner, for hver af de fire inddelinger er vist på figur 8.6.



Figur 8.6.Løbende middel for standardafvigelsen for de fire inddelinger.

Figur 8.6 illustrerer standardafvigelsen for den hydrauliske ledningsevne som løbende middel af de fire inddelinger. Det kan observeres, at standardafvigelsen for hver inddeling, udviser individuelle tendenser, hvor inddeling nr. 3 konvergere mod stabilitet efter cirka 30 realiseringer. De 3 resterende inddelinger konvergerer efter cirka [10 - 20] geologiske realiseringer. På grund af de individuelle tendenser i standardafvigelsen for hver inddeling anvendes alle 4 sektioner til at estimere, hvornår der ikke er signifikant forskel mellem de geologiske realiseringer.

Da jordtype andelene kan antages at være konstant over den geologiske realisering, forventes det også

at gælde for de parametriserede jordtyper. På baggrund heraf er der forsøgt at estimere, hvornår de stokastisk genererede geologiske realiseringer ikke længere afviger signifikant fra hinanden. Det forventes derfor, at standardafvigelsen vil konvergere som funktion af iterationerne. Det nødvendige antal iterationer bestemmes ved hjælp af en Chi-square test, som tester, hvornår to værdier ikke længere kan antages at være signifikant forskellige fra hinanden. Chi-square testen er defineret som vist i ligning (8.1).

$$\chi^2 = \frac{(n-1) \cdot S^2}{S_0^2} \tag{8.1}$$

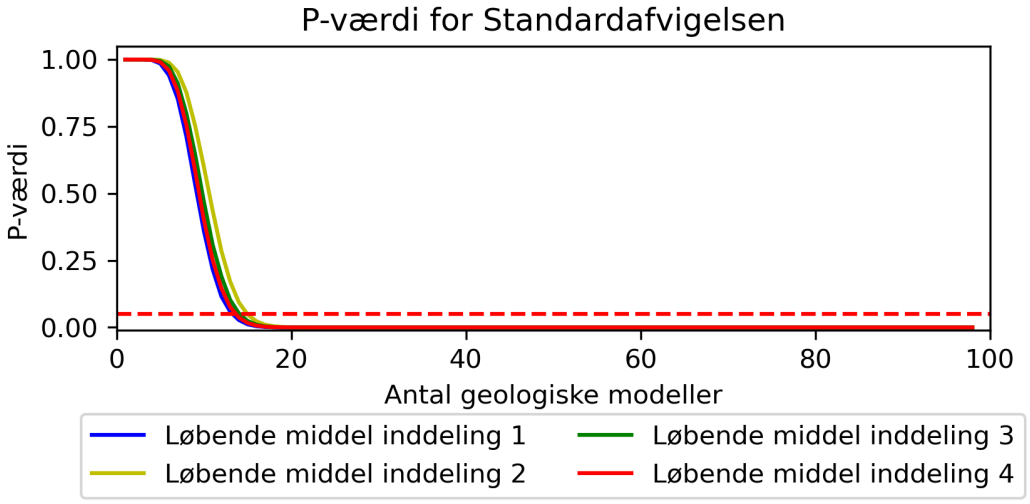
Hvor:

χ^2	chi-square
n	Antal geologiske realiseringer
S^2	Lokale Standardafvigelse
S_0^2	Globale standardafvigelse

Til at undersøge sammenhængen mellem den lokale og globale standardafvigelse opstilles følgende nulhypotese:

H0: Der er signifikant forskel mellem den lokale og den globale standardafvigelse.

Den globale standardafvigelsen er defineret som den midlet standardafvigelse af hele arealet for de 99 geologiske realiseringer. Den lokale standardafvigelse er defineret som løbende middel over de foregående iterationer, for én inddeling. Det anvendte signifikansniveau er 0.05, hvorfor alle værdier under denne vil være accepteret og derfor antages der ikke er nogen signifikant forskel mellem de lokale og globale standardafvigelser. Den beregnede P-værdi som funktion af geologiske realiseringer for samtlige inddelinger og er vist på figur 8.7.



Figur 8.7.Chi-square test for standardafvigelsen for de fire inddelinger.

Der observeres ingen sammenhæng mellem den lokale og globale standardafvigelse, som funktion af de første 12 geologiske realiseringer, hvor P-værdien er stærkt faldende. P-værdien kommer under signifikansniveauet 95% ved iterationer 15, hvorefter denne ligger stabilt, og de geologiske realiseringer kan ikke længere antages som værende signifikant forskellige, og dermed forkaste nulhypotesen. Dette er i overensstemmelse med det nødvendige antal geologiske realiseringer fundet i litteraturen, hvor det blev estimeret til 25 geologiske realiseringer [He et al., 2015]. Tabel 8.2 nedenfor, angiver hvornår P-værdien for standardafvigelsen som funktion af geologiske realiseringer ikke længere kan antages at være signifikant forskellige.

Tabel 8.2.Tabellen angiver hvornår P-værdien for standardafvigelsens løbende middel, med et signifikansniveau på 95% kan antages ikke at variere fra det globale løbende middel.

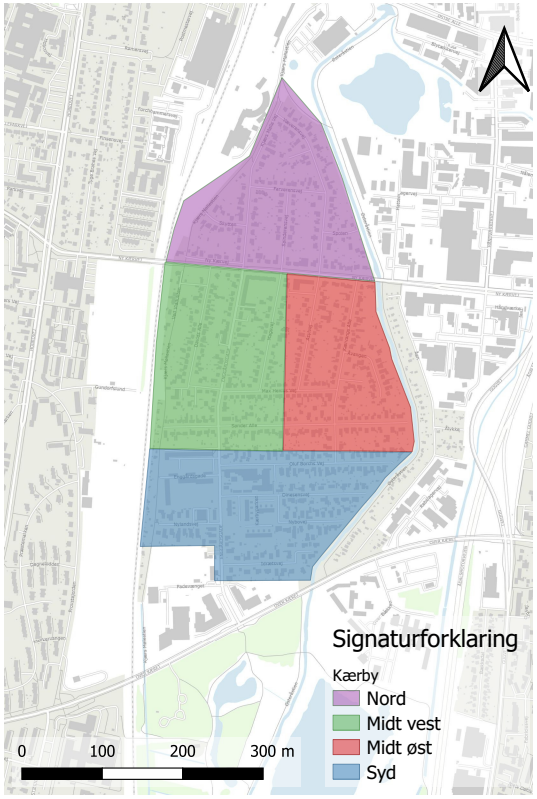
Inddeling nr.	**1**	**2**	**3**	**4**
Antal geologiske realiseringer	14	15	14	14

Denne analyse baserer sig på en parametisering af geologien, hvor andre parametre ligeledes har indflydelse på simulering af trykniveauet, hvorfor dette undersøges.

8.2.2 Reducering baseret på modelresultat

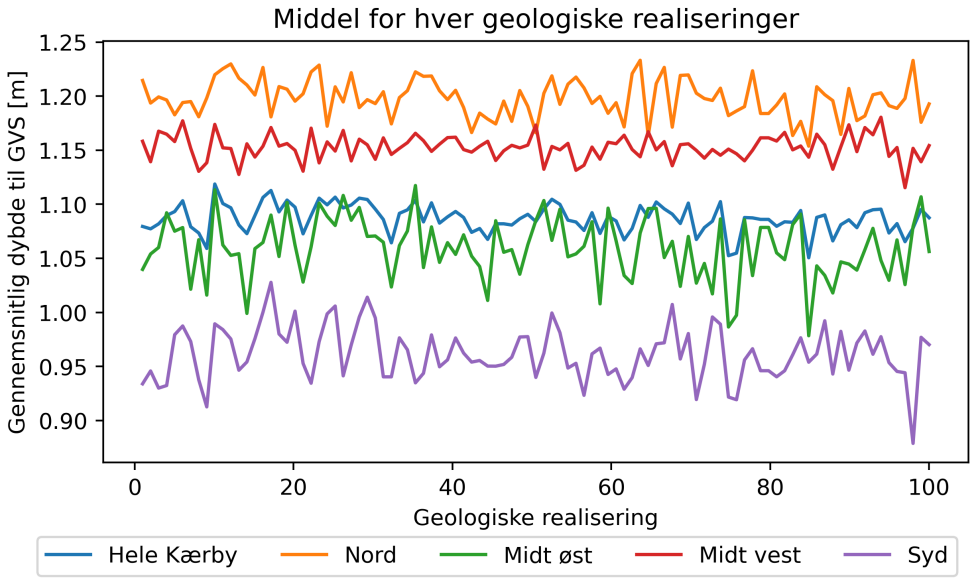
For at illustrere effekten af antallet af geologiske realiseringer på trykniveauet, er henholdsvist middelværdien og standardafvigelsen beregnet per antal geologiske realiseringer. Denne analyse er som ovenstående, foretaget med faste værdier for de hydrauliske parametre. Den hydrauliske ledningsevne for jordtyper i denne analyse er vist i tabel 8.1.

Dette gøres både med udgangspunkt i hele modelområdet og ved inddeling i projektområdet i mindre områder. Inddelingen er med baggrund i topografien, afløbsoplandet og geografi, hvilket er beskrevet i afsnit 4. De forskellige områder i projektområdet fremgår af figur 8.8.



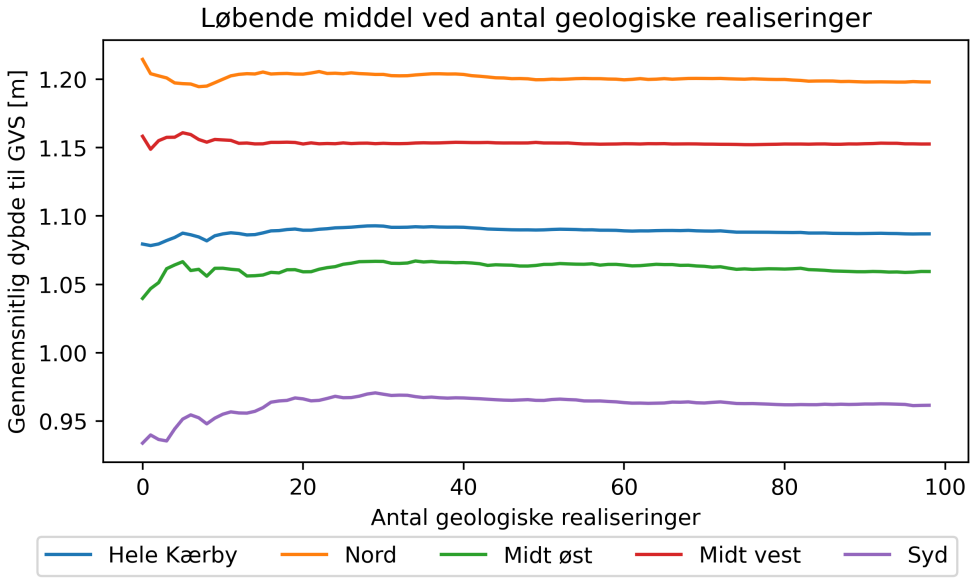
Figur 8.8.Inddeling af Kærby i fire geografiske områder, som benyttes til analyse af modelresultaterne.

Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet for hver geologisk model fremgår af figur 8.9.



Figur 8.9.Gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet for hver geologisk model, for de fire opdelinger og hele området.

Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet observeres som varierende indenfor et spænd på $[10-15cm]$ for de fire delområder, hvor et midlet gennemsnit for hele Kærbyområdet er mindre $[2{,}5-6cm]$. Det løbende gennemsnit for dybden til grundvandsspejlet, for hvert område per geologisk model fremgår af figur 8.9.

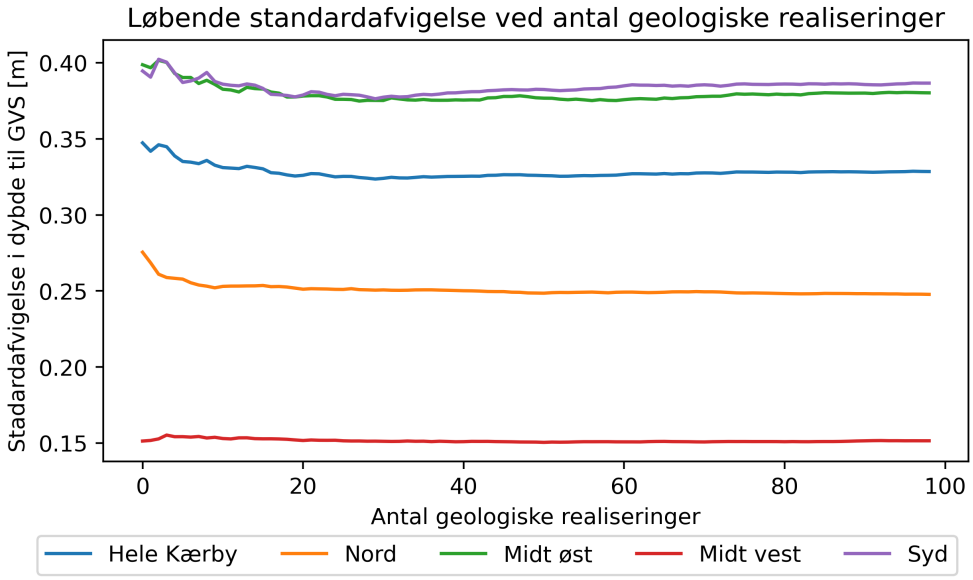


Figur 8.10.Løbende gennemsnit for dybde til grundvandsspejlet, for hvert område per geologisk realisering.

Det løbende gennemsnit for hele Kærby, indikeret med blå, og kan observeres som være relativt konstant efter 10 geologiske realiseringer. For de individuelle delområder (nord, midtøst og midtvest) kan det observeres, at de bliver relativt stabile efter cirka 20 geologiske realiseringer. Det sydlige område konvergerer først efter cirka 30 geologiske realiseringer. Dette indikerer, at der er forskelle i geologien og dermed i grundvandsspejlet mellem disse områder.

Udover den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne, er standardafvigelsen for hydrauliske ledningsevnen ligeledes belyst. På dette grundlag, er det undersøgt hvorvidt de geologiske realiseringer konvergerer

efter cirka 30 realiseringer. Standardafvigelsen for den hydrauliske ledningsevne er vist for Kærby og de forskellige delområder på figur 8.11.

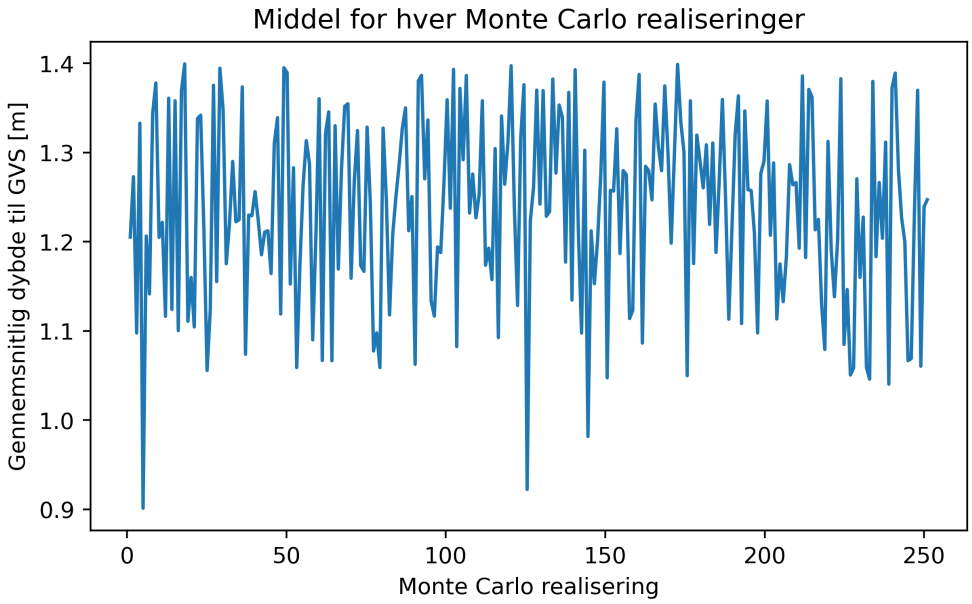


Figur 8.11. Løbende standardafvigelse for de forskellige områder, per geologisk realisering.

Standardafvigelsen for Kærbyområdet, er faldende fra den første iteration og konvergerer efter cirka 20, hvorefter denne kan observeres som stabil i den resterende periode. For delområderne af figur 8.11 kan det vurderes, at standardafvigelsen for Kærby midtvest konvergeret efter de første iterationer og stabil over de resterende iterationer. De resterende delområder udviser samme tendens for standardafvigelsen, hvor variationen er faldende fra første iteration, hvorefter disse konvergere efter [10 - 20] iterationer.

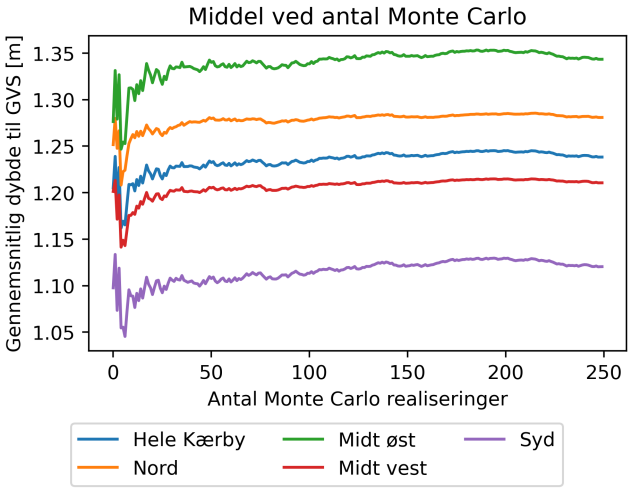
8.3 Reduktion af Monte Carlo realiseringer

Grundet indflydelsen af Monte Carlo realiseringerne af den hydrauliske ledningsevne på dybden til grundvandsspejlet, som fremgår af figur 8.1, er det nødvendige antal realiseringer undersøgt. Dette er undersøgt ved at simulere 250 Monte Carlo realiseringer for samme geologiske realisering. Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet for hver af de 250 Monte Carlo realiseringer fremgår af figur 8.12.

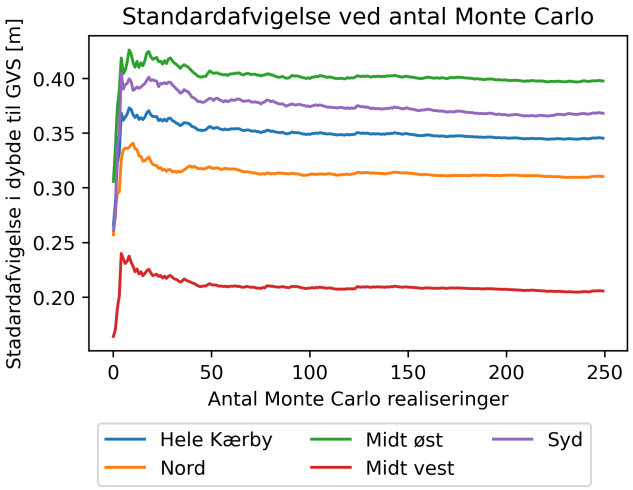


Figur 8.12.Gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet for hver Monte Carlo realiseringer.

Af figuren fremgår en variation i den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet Monte Carlo realiseringerne imellem. Størstedelen af realiseringerne har en gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet på [1,15-1,35 m], hvor enkelte realiseringer har en gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet på under en meter. Grundet denne variation, benyttes samme metode, som blev anvendt til de geologiske realiseringer til at undersøge effekten på det globale middel, hvilket fremgår af figur 8.13. Herefter er standardafvigelsen ligeledes undersøgt, hvoraf denne fremgår af figur 8.14.

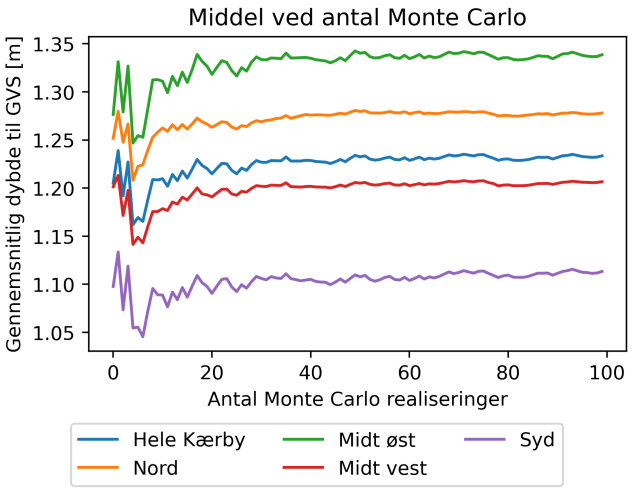


Figur 8.13.Gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet per antal af Monte Carlo realiseringer.

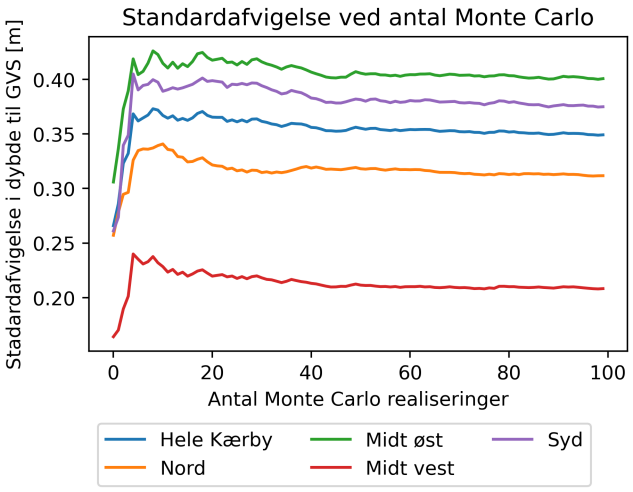


Figur 8.14.Standardafvigelsen i dybde til grundvandsspejlet per antal af Monte Carlo realiseringer.

Figurerne illustrerer store variationer i det løbende gennemsnit ved de første 10 Monte Carlo realiseringer. Denne variation aftager med antallet af Monte Carlo realiseringer. Standardafvigelsen stabiliseres her tidligere, hvoraf 50 realiseringer ville være tilstrækkeligt. Den gennemsnitlige standardafvigelse viser større variation, og vurderes stabiliseret efter cirka 100 realiseringer. Dermed fremgår det, at mindre end 250 realiseringer er tilstrækkeligt, hvorfor ovenstående figurer er gentaget med de første hundrede realiseringer. Dette fremgår af figur 8.15 og figur 8.16.



Figur 8.15. Gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet per antal af Monte Carlo realiseringer.



Figur 8.16. Standardafvigelsen i dybde til grundvandsspejlet per antal af Monte Carlo realiseringer.

Af figur 8.16 fremgår samme tendens, hvor standardafvigelsen er stabiliseret ved [60-80] realiseringer, og den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet stadig har variation på figur 8.15. På baggrund af dette er 100 realiseringer vurderet tilstrækkeligt, da variationerne i gennemsnitlig dybde er under en centimeter.

8.4 Opsamling og diskussion

Som belyst først i dette afsnit og vist på figur 8.12, er den geologiske realisering af stor betydning for præcisionen af den færdige grundvandsmodel. Den estimerede beregningstid for 99 geologiske realiseringer og 250 Monte Carlo simuleringer er 70 dage. Reduceringen af dette medfører, at flere scenarier kan undersøges. Derfor er det i dette afsnit vurderet, hvorvidt det er muligt at reducere antallet af geologiske realiseringer og Monte Carlo simuleringer.

Til den første af metoderne er, projektområdet delt ind i områder. Formålet med denne opdeling er at kvantificere forskellene mellem hver iteration, da de volumetriske andele for de 99 genererede geologiske realiseringer er konstante. Derfor antages det, at når det løbende gennemsnit for den lokale sektion tilnærmer sig det globale gennemsnit for den hydrauliske ledningsevne, så betragtes dette som et tilstrækkeligt antal geologiske realiseringer. Analysen vil være baseret på 2, 4 og 6 inddelinger. Den samlede analyse for alle inddelinger fremgår af bilag E.1, og de 3 inddelings intervaller udviser lignende tendenser.

Som vist på figur 8.7 og i tabel 8.2, observeres der ikke signifikant forskel mellem de geologiske realiseringer, efter cirka 15 iterationer. Argumenterne til diskussion er den statiske analyse af hydrauliske parametre ikke nødvendigvis udviser samme variation i trykniveau. Det fremgår af figur 8.10 for den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet og figur 8.11 for standardafvigelsen for dybde til grundvandsspejlet, at de konvergerer efter cirka 30 iterationer sydlige område og cirka 20 for øvrige områder. Da den statistiske analyse af de geologiske realiseringer indikerer, at der er mulighed for at reducere antallet af geologiske realiseringer, er antallet af de geologiske realiseringer reduceret til 30. På baggrund af dette kan det diskuteres, hvorvidt analysen af P-værdierne havde været nødvendig. Analysen er væsentlig hurtigere end at simulere trykniveauerne, hvorfor dette blev vurderet som et supplement til at vurdere geologien. I litteraturen fandt de 25 geologiske realiseringer tilstrækkeligt [He et al., 2015], hvilket tal for troværdigheden af denne analyse.

Det er estimeret antallet af Monte Carlo realiseringer har stor indflydelse på dybden til grundvandsspejlet, dette fremgår af figur 8.1. Derfor er antallet af Monte Carlo realiseringer, nødvendigt for at opnå stabilitet

for det globale resultat, forsøgt estimeret. Alternativt kan der foretages en chi-square test på de Monte Carlo realiseringer, hvilket formentlig havde resulteret i færre nødvendige realiseringer.

250 Monte Carlo realiseringer for samme geologisk realisering er genereret, hvor den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet for hver af de 250 Monte Carlo realiseringer fremgår af figur 8.13 og standardafvigelsen af figur 8.14. Der observeres store variationer i det løbende gennemsnit ved de første 10 Monte Carlo realiseringer, hvor variationen aftager for hver efterfølgende Monte Carlo realisering. Af figur 8.15 og 8.16 fremgår samme tendens, hvor standardafvigelsen stabiliserer sig ved 100 realiseringer, mens den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet stadig varierer. Det er vurderet, at siden denne variation bliver i få centimeter, vurderes det, at 100 er et tilstrækkeligt antal af realiseringer. Yderligere konkluderer Rojas et al. [2010]; Refsgaard et al. [2012], at geologisk modelusikkerhed sandsynligvis vil dominere over parameterusikkerhed for variabler, der ikke er inkluderet i kalibrering. Hvor argumenterne til diskussion om nødvendig Monte Carlo realiseringer antages at være baseret på et tilstrækkeligt grundlag.

9 Validering

For at underbygge resultaterne fra grundvandsmodellen gennemføres der en validering. Formålet med valideringen er at sikre, at der er tilstrækkelig begrundelse for at konkludere ud fra modelresultaterne. I valideringen undersøges der, om der er en overensstemmelse mellem de simulerede og observerede trykniveauer. Valideringen udføres for to årstider: sommer og vinter. Der fokuseres kun på simuleringer med det eksisterende fælleskloaksystem og nutidens klima.

Resultaterne valideres ved sammenligning med det observerede data, i form af data fra automatiske målestationer og indberetninger fra manuelle målestationer. Dette gøres ved, at de interpolerede kort fra kapitel 6, sammenlignes med det simulerede trykniveau, fra det dertilhørende simuleringsscenarie. Derudover sammenlignes dataen fra de enkelte målestationer med den simulerede. For simuleringerne er der benyttet et $100 \cdot 100m$ diskretisering for topografien. Denne diskretisering belyser ikke de lokale forskelle som forekommer i Kærby, hvorfor der kan være en forskel mellem den benyttede topografi i modellen og den reelle i Kærby. Dette kan have indflydelse, når sammenligningen med det observerede foretages. Forskellen i topografien for et $100 \cdot 100m$ og et $0{,}4 \cdot 0{,}4m$ gitter er fremgår bilag på figur F.1.

9.1 Lokal skala validering ved brug af målestationer

Tidligere er august måned benyttet for sommer, og januar måned benyttet for vinter. Denne periode er forlænget, da det ønskes at have et vis antal indberetninger for det manuelle data. Perioden som benyttes i dette afsnit, er for sommer fra 1. juni til 1. september og for vinter fra 1. december til 1. marts, perioden benyttes for alle år med tilgængeligt data. Perioderne fremgår ligeledes af tabel 9.1.

Tabel 9.1.Første og sidste dag for sommer- og vinterperioden som benyttes i afsnittet, samt hvilke år som indgår i perioderne.

Periode	**Første dag**	**Sidste dag**	**År som indgår**
Sommer	1. juni	31. august	2020, 2021 og 2022
Vinter	1. december	28. februar	2020, 2021, 2022 og 2023

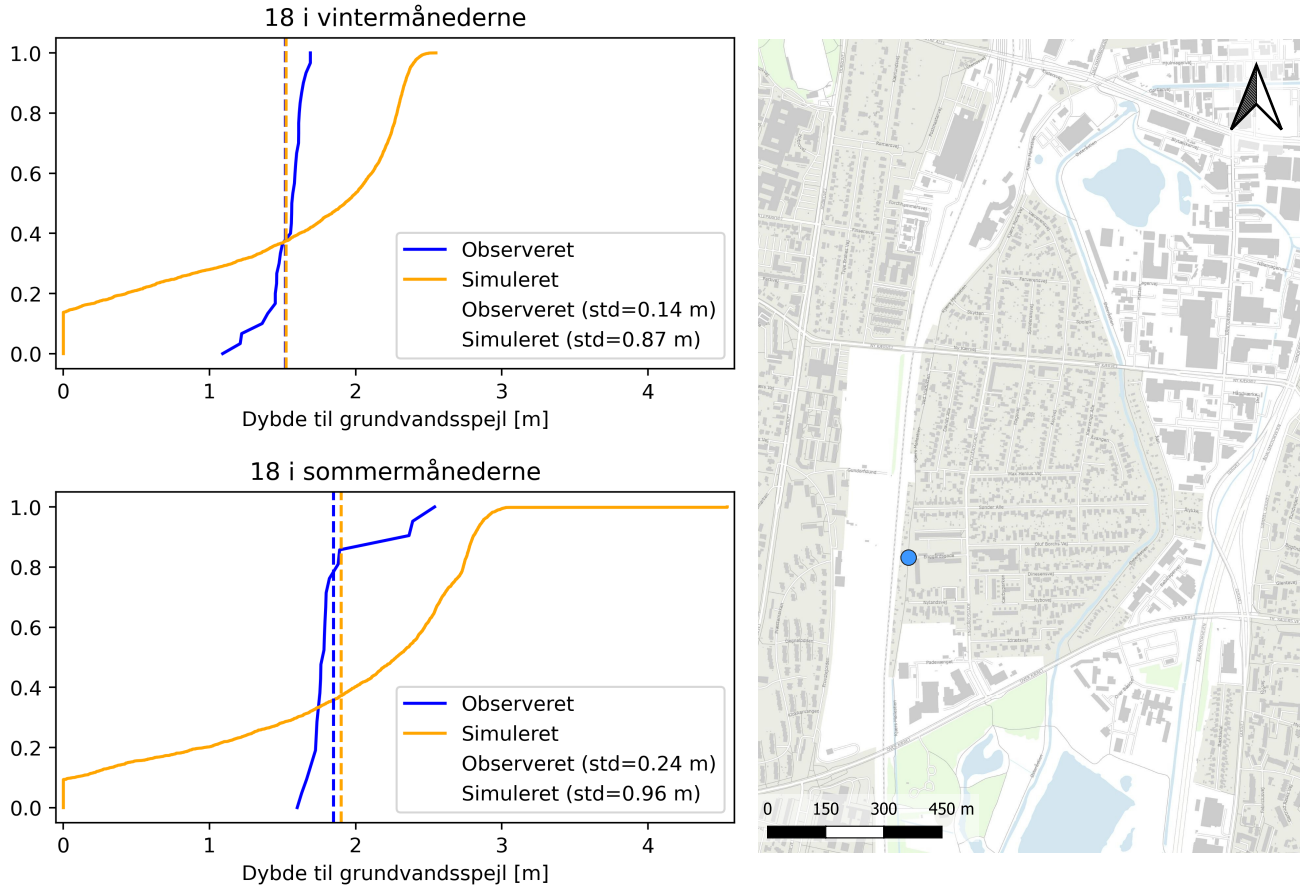
Sammenligningen mellem det observerede og simulerede data udføres ved hjælp af kumulative sandsynlighedsfordelinger over alle værdier i den aktuelle periode for både det observerede og det simulerede hydrostatiske trykniveau i cellen, hvor målestationen er placeret. Dette gør det muligt at sammenligne den tidslige variation i det observerede trykniveau med den geologiske variation i det simulerede trykniveau. Ved at anvende kumulative sandsynlighedsfordelinger kan vi vurdere, hvor godt simuleringen repræsenterer den observerede variation og identificere eventuelle afvigelser mellem de to datasæt.

Den cellebaserede sammenligning opdeles i et afsnit for automatiske målestationer og et for manuelle målestationer. Dette er valgt grundet forskellen i datamængde, som tidligere beskrevet i kapitel 6. Denne forskel i datamængde påvirker derfor sammenligningsgrundlaget, hvorfor disse er adskilt.

9.1.1 Manuelle målestationer

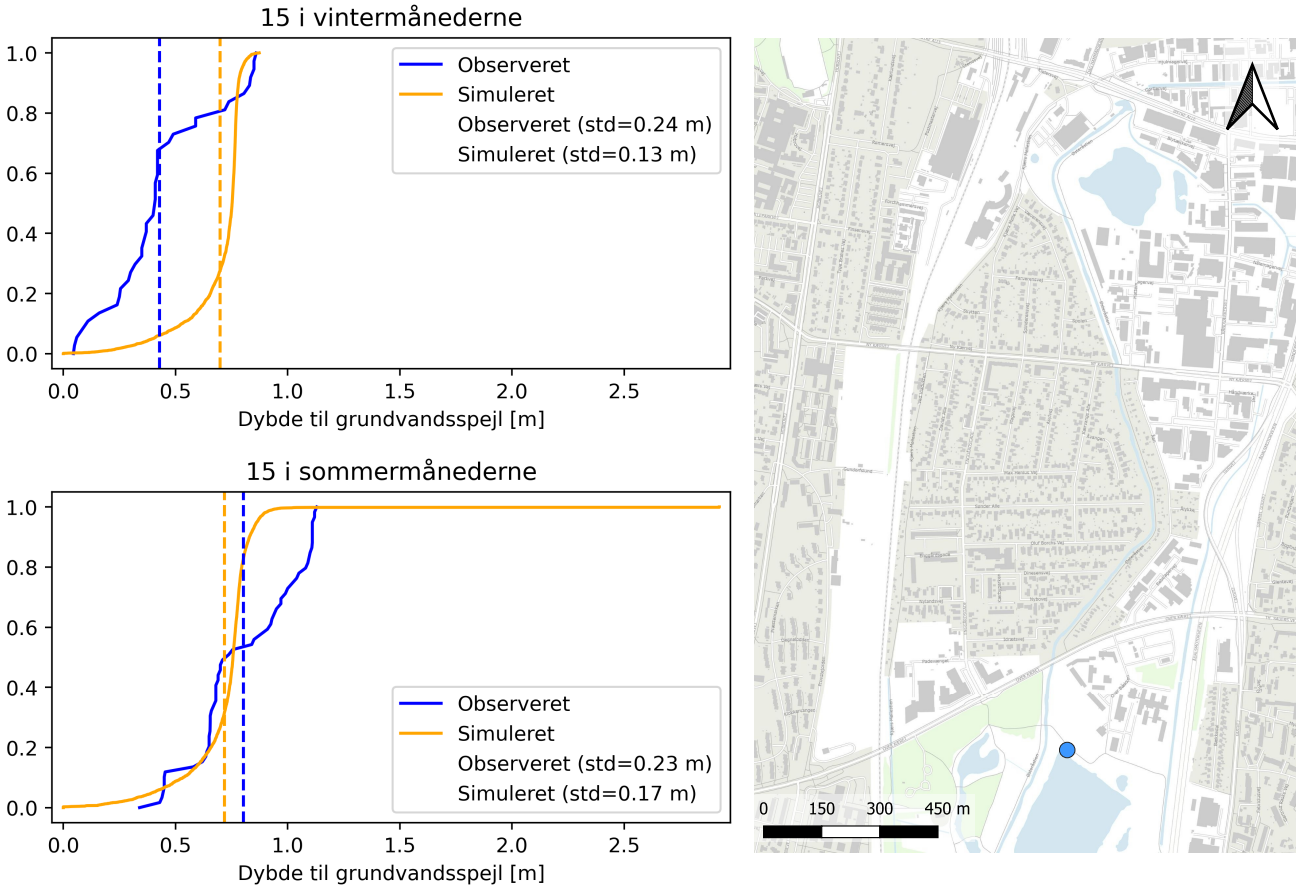
Fra GRAVA-projektet er der i alt 71 manuelle målestationer, heriblandt 5 af disse som er skalapæle, som ikke er medtaget. Da dette udgør en stor mængde af målestationer at validere, er der udvalgte enkelte målestationer til afsnittet, hvor samtlige manuelle målestationer findes i bilag i afsnit F.1. Udvælgelsen er baseret på, hvilke målestationer der har en tilstrækkelig datamængde for begge årstider.

Figurerne 9.1, 9.2, 9.3 og 9.4, viser kumulativ sandsynlighedsfordeling, med middelværdi og standardafvigelse, for begge årstider for henholdsvist målestation 18, 15, 80 og 88. Middelværdierne er angivet som en lodret stiplet linje.



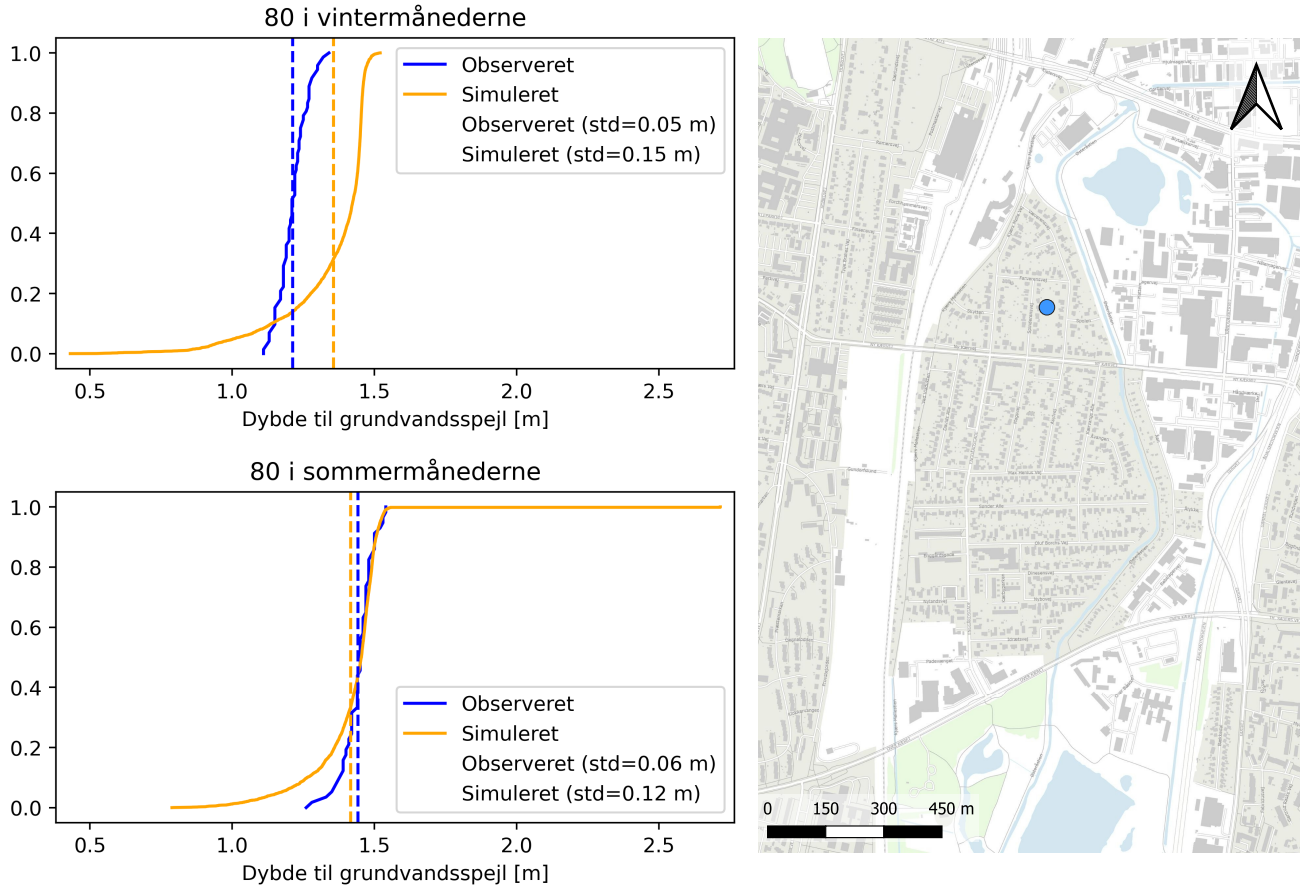
Figur 9.1. Målestation 18's sammenligning mellem observerede og simulerede dybde til grundvandsspejlet, for henholdsvist vinter og sommer. Samt målestationens placering i området. De stiplede linjer viser middelværdien for observeret og simuleret.

Figur 9.1 for målestation 18 viser for begge årstider et stort spænd i den simulerede dybde til grundvandsspejlet. For begge årstider er der simuleret et grundvandsspejl, som overstiger terrænkoten. Dette er cirka henholdsvist 15% for vinter og 10% for sommer, hvor den maksimale dybde simuleret, er henholdsvist cirka 2,5 m for vinter og 3 m for sommer, hvis outlier fjernes. Den observerede dybde til grundvandsspejlet har et mindre spænd. Her er spændet cirka på en meter for sommer og en halv meter for vinter. Vintermånederne har værdier i tættere på terræn, for både observerede og simulerede dybde til grundvandsspejlet. For begge årstider er størstedelen af de observerede værdierne mellem 1,5 m og cirka 1,8 m i dybde til grundvandsspejlet, hvor sommers middelværdi er cirka 1,8 m og for vinter cirka 1,5 m. For begge årstider er den simulerede middel dybde til grundvandsspejlet få centimeter fra den observerede. I begge årstider er standardafvigelsen over 60 cm større for de simulerede værdier end de observerede.



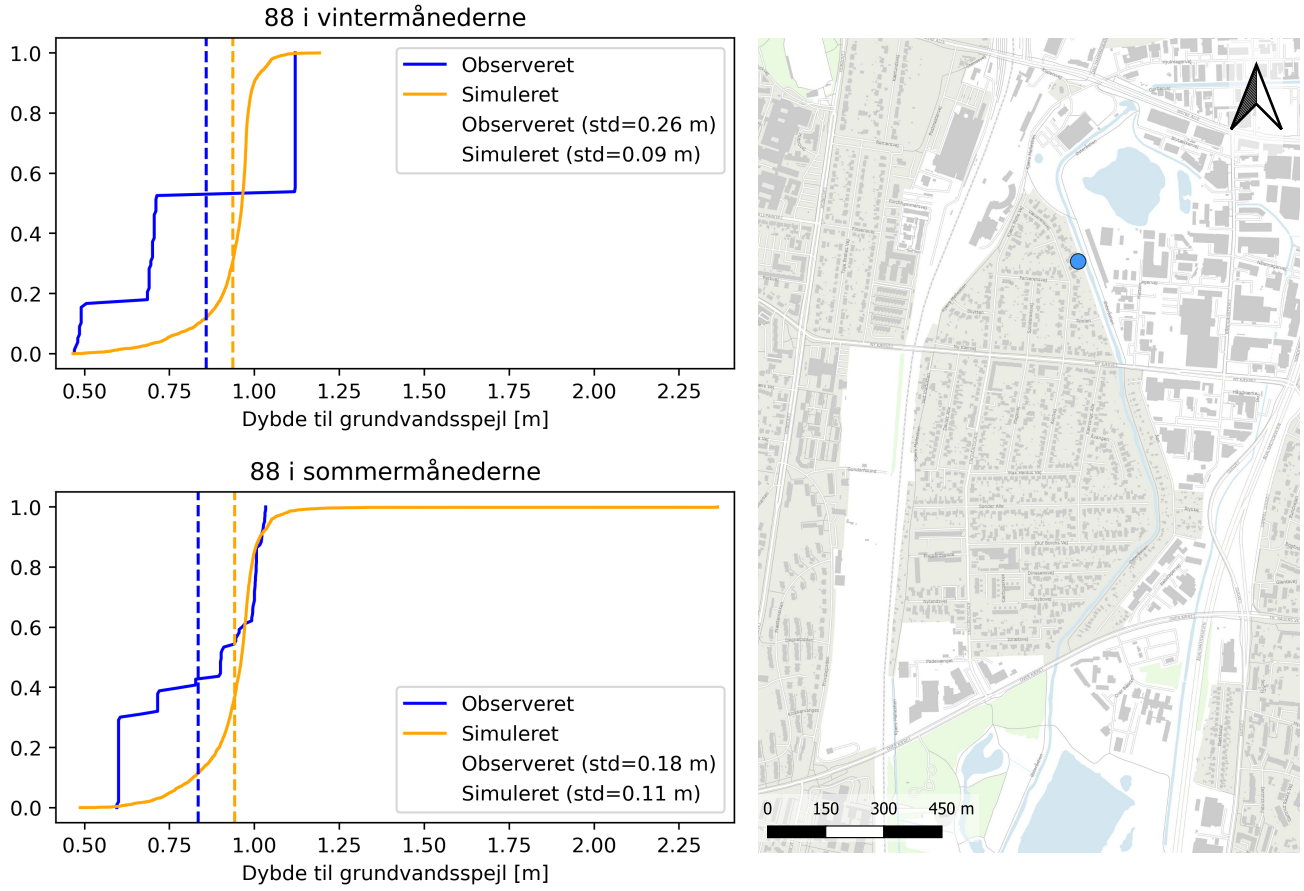
Figur 9.2.Målestation 15's sammenligning mellem observerede og simulerede dybde til grundvandsspejlet, for henholdsvist vinter og sommer. Samt målestationens placering i området. De stiplede linjer viser middelværdien for observeret og simuleret.

For målestation 15 fremgår der bedre overensstemmelse mellem observerede og simulerede dybde til grundvandsspejlet. Dette fremgår ved at spændet er tilsvarende for begge årstider, hvis outlier fjernes fra sommer simuleringerne. For vintermånederne er det observerede data mere lineær end det simulerede, som er mere eksponentielle tendenser. Ved sommermånederne er formen mere lig hinanden, hvor forskellen kun ganske få steder er mere end cirka 20 cm. For begge årstider er standardafvigelsen tilsvarende, da denne varierer med henholdsvist 6 og 11 cm. Middelværdien er mest tilsvarende for sommermånederne, hvor de observerede og simulerede værdier ligger tættere på hinanden.



Figur 9.3. Målestation 80's sammenligning mellem observerede og simulerede dybde til grundvandsspejlet, for henholdsvist vinter og sommer. Samt målestationens placering i området. De stiplede linjer viser middelværdien for observeret og simuleret.

Målestation 80 viser god overensstemmelse mellem de observerede og simulerede værdier for begge årstider. For vintermånederne er der større forskelle i de laveste 5 % af værdierne, mens de resterende 95 % har en variation mellem de observerede og simulerede værdier på få centimeter op til cirka 20 cm. For sommermånederne er der kun få afvigelser mellem de simulerede og observerede værdier, med undtagelse af en outlier og få værdier i bunden af fordelingen. For begge årstider er standardafvigelsen tilsvarende, med variationer på henholdsvis 6 og 10 cm. Middelværdien viser størst overensstemmelse for sommermånederne, hvor forskellen er kun få centimeter, mens der for vintermånederne er en forskel på cirka 20 cm.

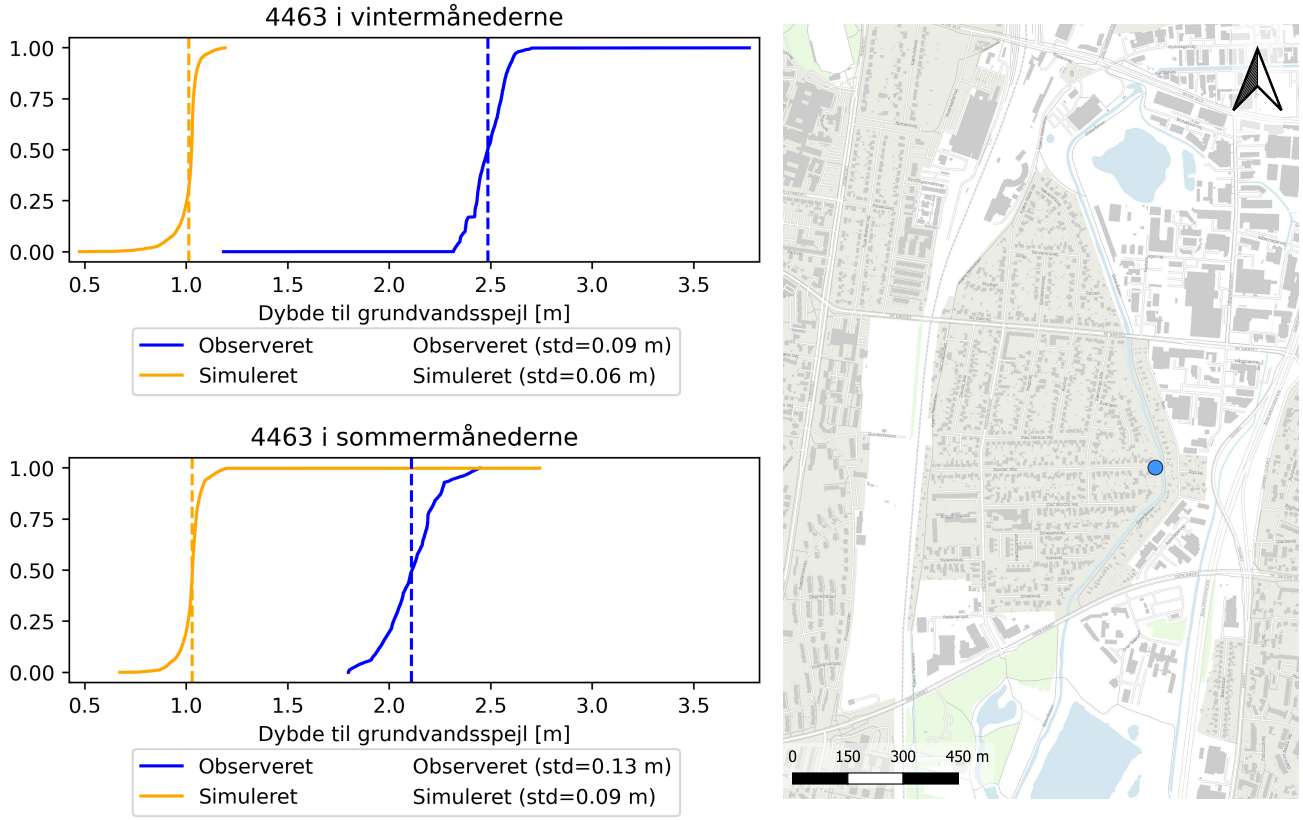


Figur 9.4. Målestation 88's sammenligning mellem observerede og simulerede dybde til grundvandsspejlet, for henholdsvist vinter og sommer. Samt målestationens placering i området. De stiplede linjer viser middelværdien for observeret og simuleret.

Af figuren for målestation 88 fremgår der en overensstemmelse mellem spændet for den observerede og simulerede dybde til grundvandsspejlet, hvis outliers fjernes fra sommermånederne. For vintermånederne viser det observerede data et spænd fra cirka 0,75 m til 1,1 m uden yderligere variationer. Dette kan forklares ved, at flere dele af målestationen kan krydse hinanden og fastsætte dybden til 1,1 m. Forskellen mellem de observerede og simulerede værdier for vintermånederne er cirka 20 cm for størstedelen af værdierne. For sommermånederne er forskellen mellem observerede og simulerede værdier kun få centimeter i området mellem sandsynlighed 0,5 og 1. For resten af værdierne varierer forskellen fra få centimeter til cirka 30 cm. Standardafvigelsen og middelværdien kommenteres ikke for vintermånederne på grund af fejlindberetninger. For sommermånederne er forskellen mellem observerede og simulerede værdier henholdsvis cirka 7 cm og cirka 15 cm for standardafvigelsen og middelværdien.

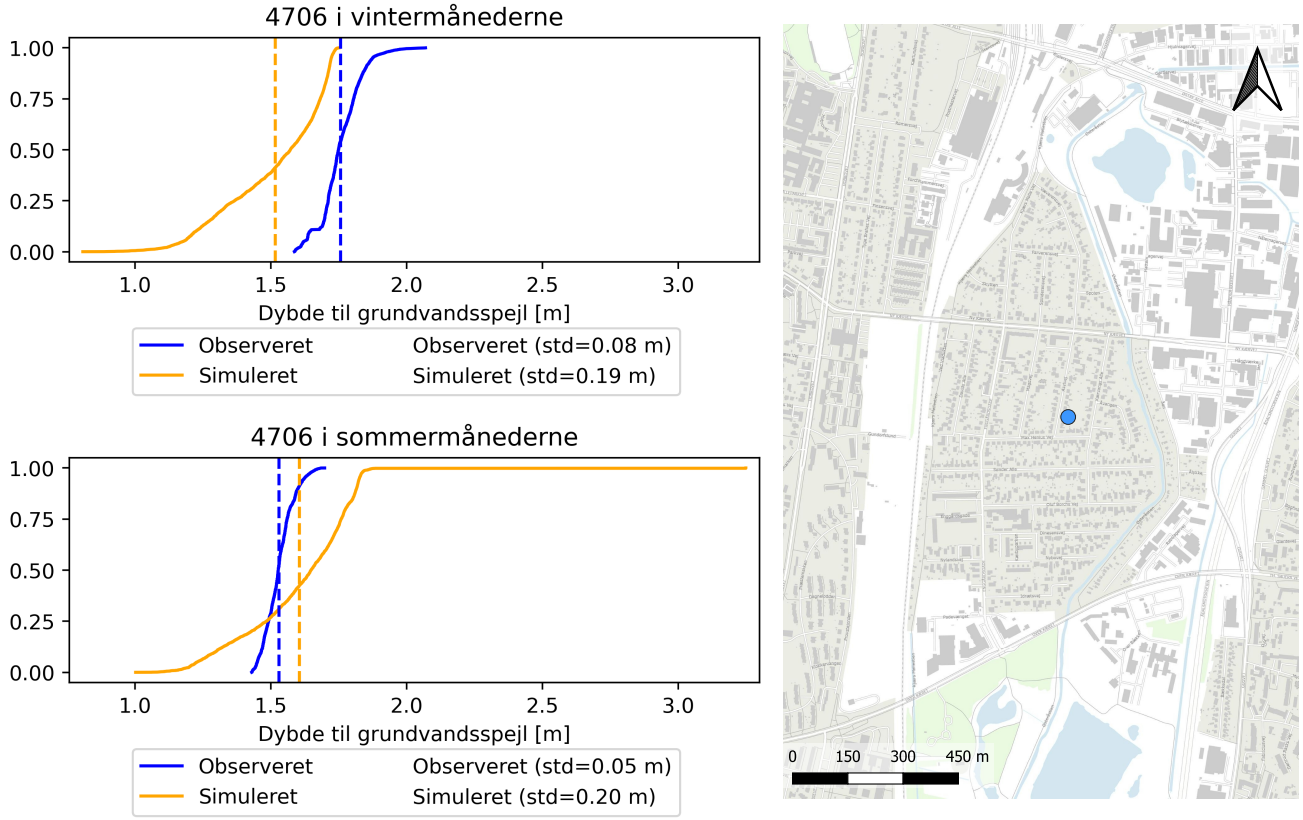
9.1.2 Automatiske målestationer

For de automatiske målestationer er samme perioder anvendt som for de manuelle målestationer. Målestationerne 4714, 4715 og 4708 er ikke inkluderet i denne analyse, enten på grund af deres placering eller på grund af datakvaliteten. Dette er yderligere beskrevet i kapitel 6. Figur 9.5 viser en sammenligning mellem de observerede og simulerede trykniveauer for den automatiske målestation 4463.



Figur 9.5.Målestation 4463's sammenligning mellem observerede og simulerede dybde til grundvandsspejlet, for henholdsvist vinter og sommer. Samt målestationens placering i området. De stiplede linjer viser middelværdien for observeret og simuleret.

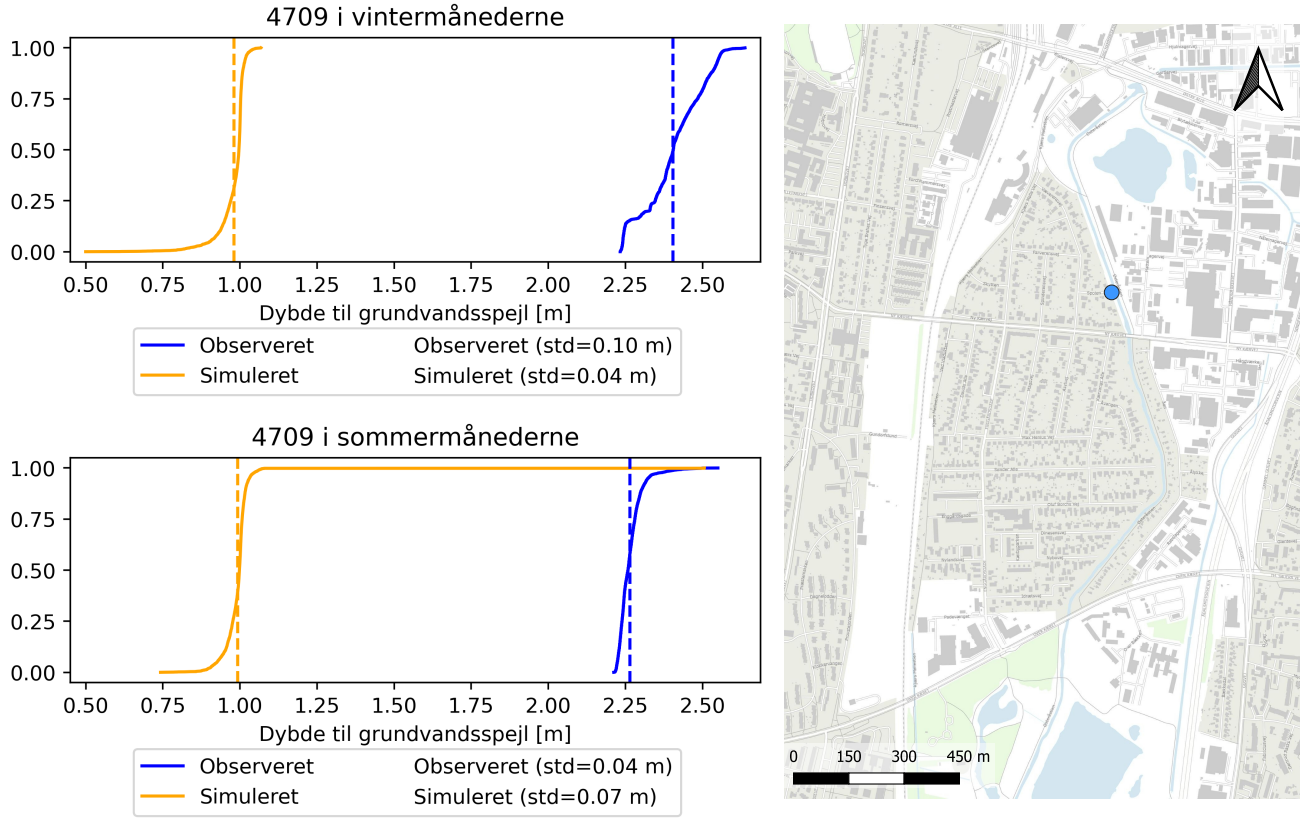
Figuren viser ingen overensstemmelse mellem observeret og simuleret værdier, da værdier er forskudt med 1 til 1,5 m. Standardafvigelsen er sammenlignelig for begge årstider da denne er 3 og 4 cm. Forskellen kan skyldes forskellig i terræn for simuleret og virkeligheden, samt den før omtalte spunsvæg. Af figur 9.6 fremgår en sammenligning mellem observerede og simulerede trykniveau, for den automatiske målestation 4706.



Figur 9.6. Målestation 4706's sammenligning mellem observerede og simulerede dybde til grundvandsspejlet, for henholdsvist vinter og sommer. Samt målestationens placering i området. De stiplede linjer viser middelværdien for observeret og simuleret.

Målestation 4706 har for vintermånederne en forskel på 20 til 50 cm i observeret og simuleret, hvor simuleret er tættest på terræn. For sommermånederne er der bedre overensstemmelse, da forskellen i middel er cirka 10 cm, sammenlignet med cirka 25 cm for vinter. Spændet for sommer simuleret er cirka 1 m, hvor det observeret er cirka 0,3 m, hvilket også fremgår af forskellen i standardafvigelse. Middelværdierne for sommer afviger med cirka 10 cm, hvor dette er cirka 30 cm for vinter.

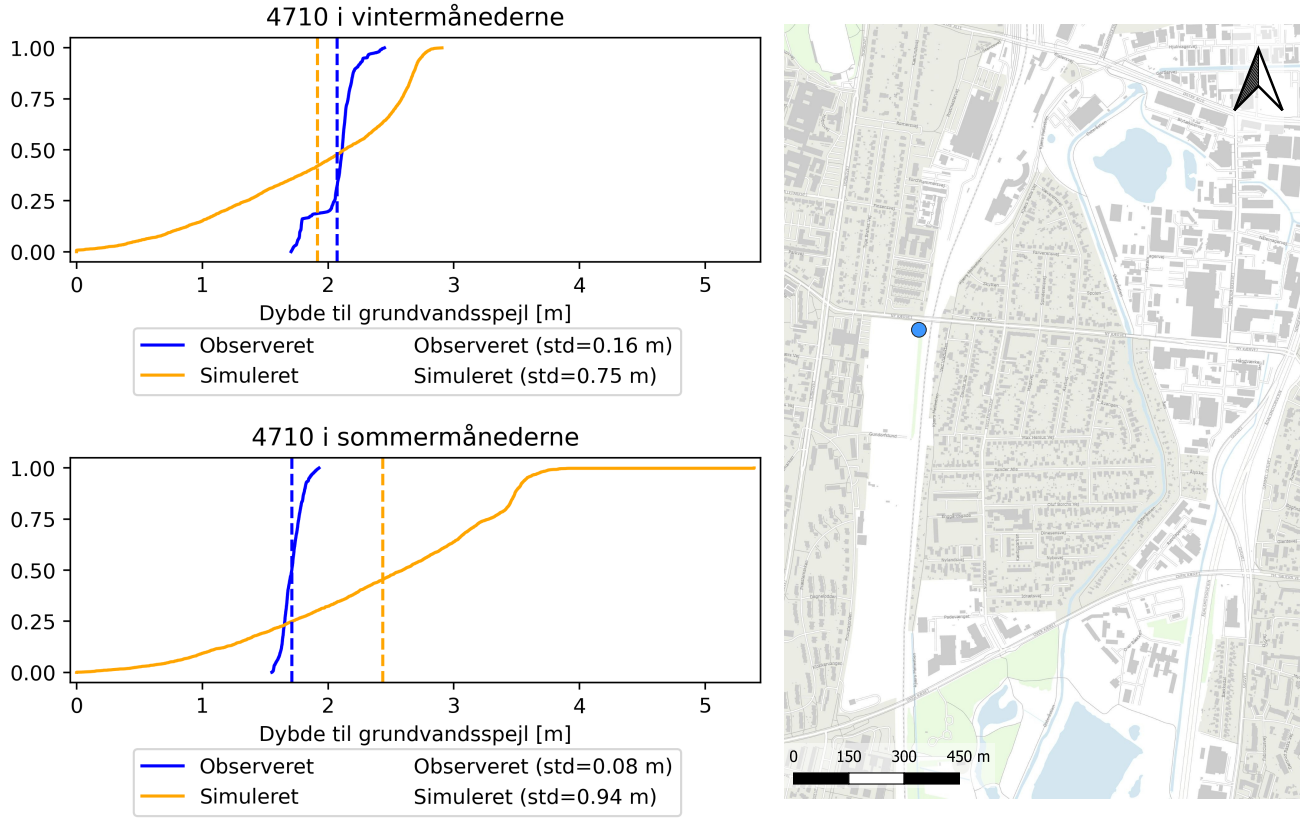
Af figur 9.7 fremgår en sammenligning mellem observerede og simulerede trykniveau, for den automatiske målestation 4709.



Figur 9.7. Målestation 4709's sammenligning mellem observerede og simulerede dybde til grundvandsspejlet, for henholdsvist vinter og sommer. Samt målestationens placering i området. De stiplede linjer viser middelværdien for observeret og simuleret.

Figur 9.7 viser tilsvarende til figur 9.5 ingen overensstemmelse mellem observeret og simuleret værdier, da værdierne er forskudt med over 2 m. Standardafvigelsen er sammenlignelig for begge årstider, da denne er 3 og 6 cm. Forskellen kan skyldes forskellig i terræn for simuleret og virkeligheden, samt den før omtalte spunsvæg.

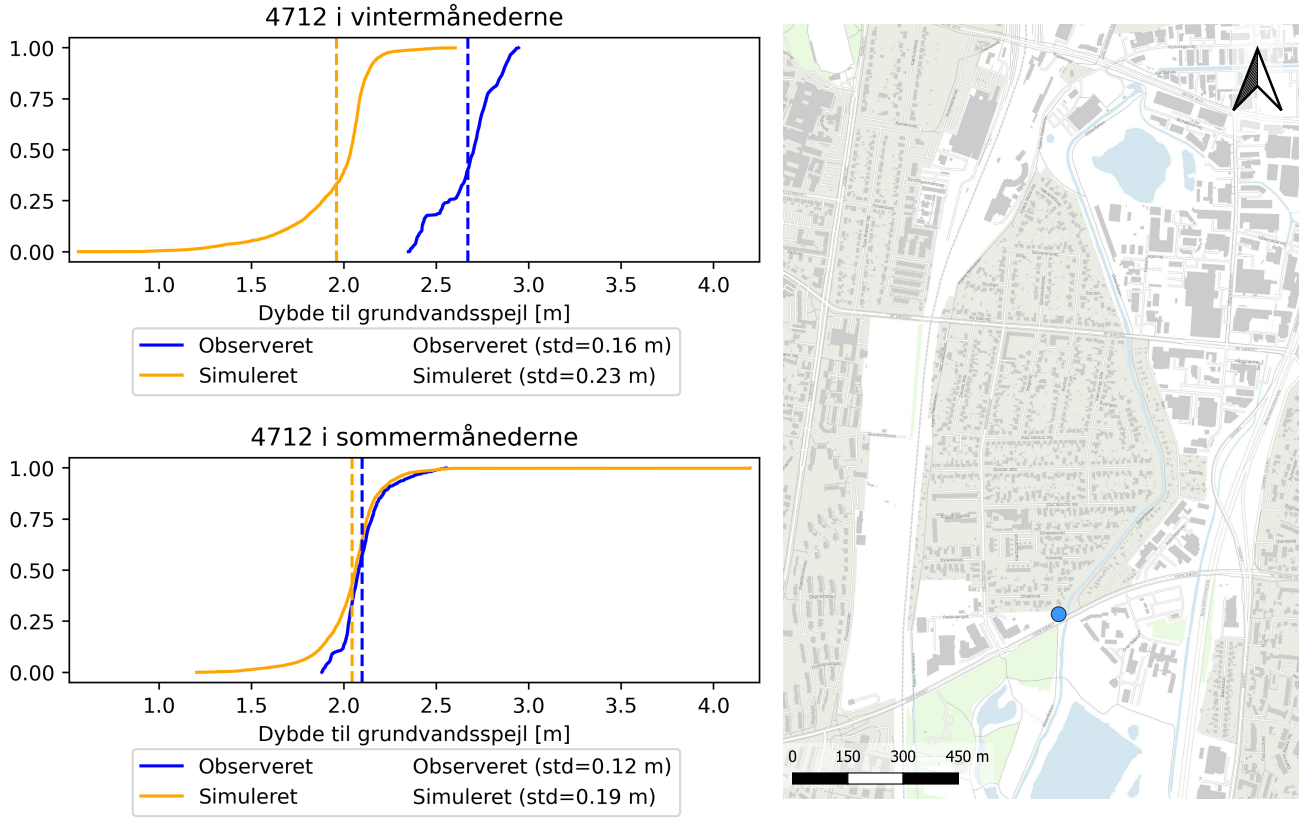
Af figur 9.8 fremgår en sammenligning mellem observerede og simulerede trykniveau, for den automatiske målestation 4710.



Figur 9.8. Målestation 4710's sammenligning mellem observerede og simulerede dybde til grundvandsspejlet, for henholdsvist vinter og sommer. Samt målestationens placering i området. De stiplede linjer viser middelværdien for observeret og simuleret.

Af figuren ovenfor fremgår det, at der er en grad af overensstemmelse mellem observeret og simuleret for målestation 4710, i vintermånderne, hvor forskellen i middelværdi er cirka 10 cm. Det simulerede har et spænd på cirka 3 m, hvor det for det observerede er cirka 1 m. Dette fremgår ligeledes at standardafvigelsen for det simulerede er henholdsvist 0,94 og 0,75 m. Der forekommer ikke overensstemmelse for sommermånederne, da forskellen i middel er cirka 1 m og spændet for simuleret er cirka en faktor 8 større end for observeret, ved fjernelse af outliers.

Af figur 9.9 fremgår en sammenligning mellem observerede og simulerede trykniveau, for den automatiske målestation 4712.



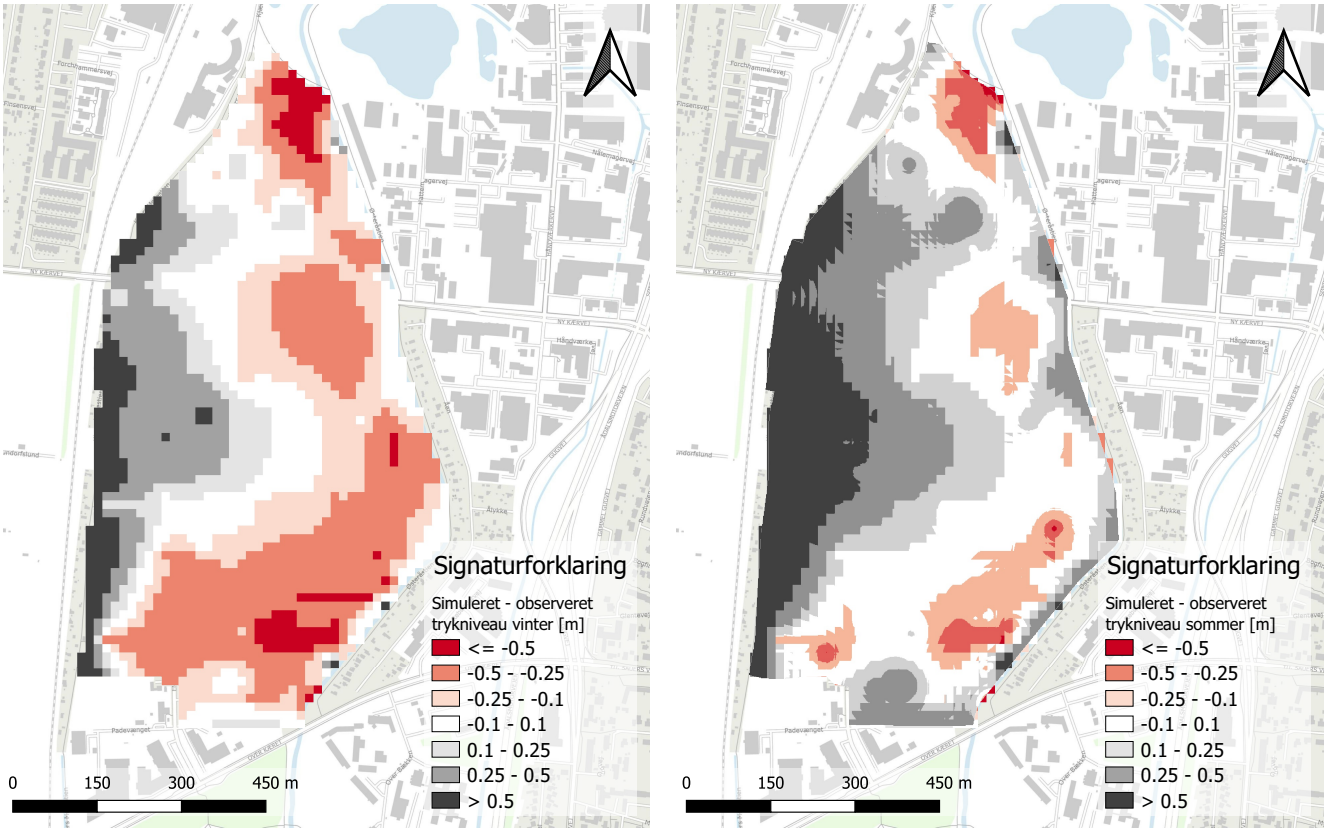
Figur 9.9. Målestation 4712's sammenligning mellem observerede og simulerede dybde til grundvandsspejlet, for henholdsvist vinter og sommer. Samt målestationens placering i området. De stiplede linjer viser middelværdien for observeret og simuleret.

For målestation 4712 fremgår det af figuren, at det simulerede generelt overestimere trykniveauet, sammenlignet med det observerede for vintermånederne. Forskellen i middel er cirka 70 cm for vintermånederne. For sommermånederne er der overensstemmelse, hvor forskellen overvejende er på enkelte centimeter, som ligeledes er forskellen i middel.

De automatiske målestation 4711 og 4713 fremgår af bilag på figur F.8. Disse er i bilag, da deres i simulering er i Østerå, hvorfor næsten alle værdier er 0,9 m under terræn, hvilket er dybden Østerå er angivet til.

9.2 Spatial forskel i simulerede og observerede trykniveau

Til sammenligning af den spatiale forskel i det simulerede og observerede trykniveau, beregnes dette ved at trække det observerede trykniveau fra det simulerede. Her benyttes interpolerede kort for manuelt data fra figur 6.13 og figur 6.14. For det simulerede trykniveau, tages gennemsnittet for i hver celle for henholdsvist sommer- og vinter simuleringer. Den spatiale forskel er visualiseret på figur 9.10.



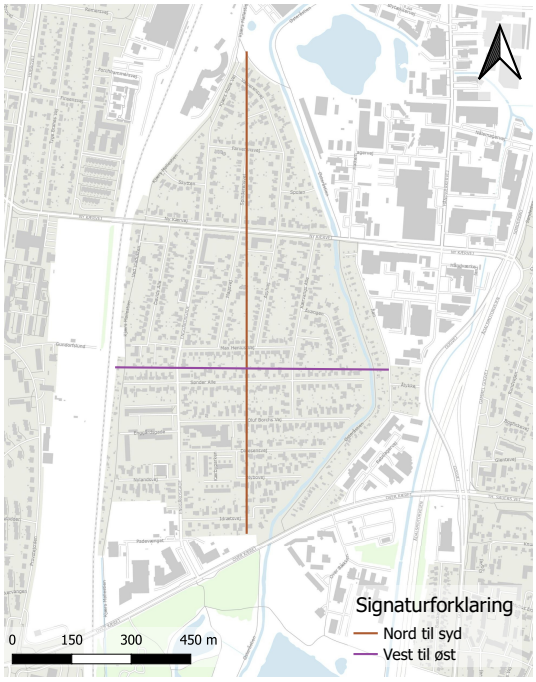
Figur 9.10. Sammenligning mellem simuleret og observeret trykniveau, for henholdsvist vinter (til venstre) og sommer (til højre). Sammenligningen foretages ved at trække observeret fra simuleret.

I begge scenarier på figuren forekommer samme generelle tendens, med en overestimering af trykniveauet mod vest og en underestimering mod øst. For vinter fremgår dette ved at der flere steder mod vest er overestimeret med mere end 0,5 m og større områder med 0,25 - 0,5 m overestimering. For sommer er overestimering mod vest større, da både kategorien for 0,5 og [0,25 - 0,5 m] udgør et større areal. Det modsatte gør sig gældende for underestimeringen mod øst, hvor der for sommer er enkelte områder med mindre underestimeringer. For vinter udgør underestimeringen næsten hele den østlige halvdel af området, og særlig den sydøstlige og nordlige del er kategorien for -0,5 og [-0,5 - -0,25 m] til stede.

9.3 Tværsnitprofiler for grundvandsstand i Kærby

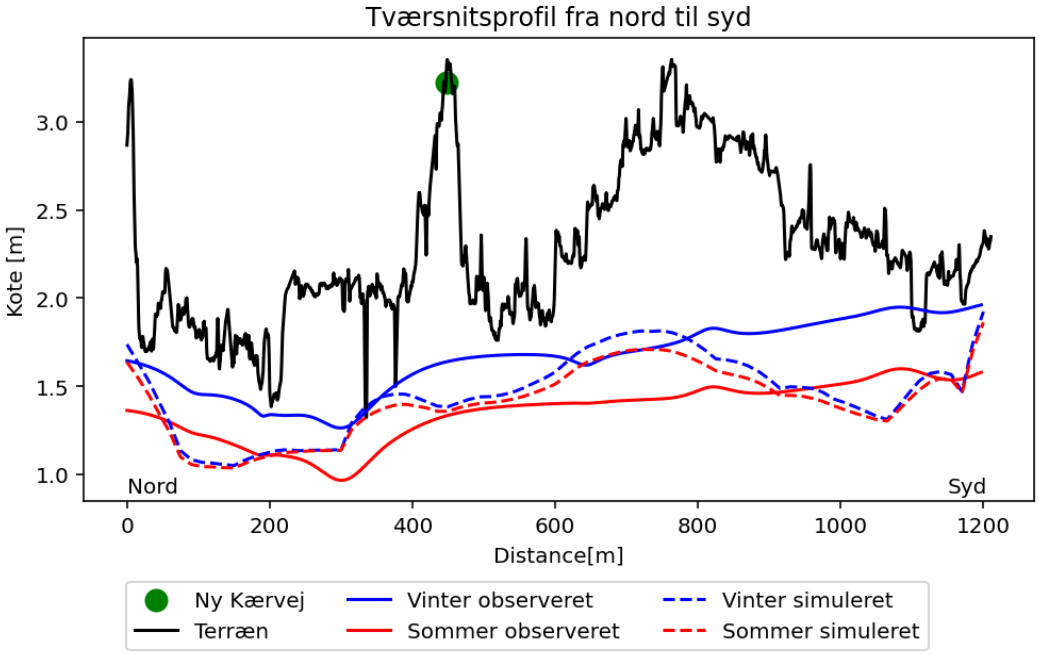
For at visualisere forskellen mellem det simulerede og observerede trykniveau på anden vis, benyttes tværsnitsprofiler over trykniveauet. For det observerede trykniveau benyttet interpolerede kort for manuelt data fra figur 6.13 og figur 6.14. Dermed er tværsnitprofilerne lavet for en gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet simuleret i hver årstid, som er sammenlignet med de mest kritiske værdier for sommer og vinter i det observerede.

Af tværsnitprofilerne vil terræn ligeledes fremgå [SCALGO, 2022]. Linjerne der benyttes, er illustreret tidligere på figur 9.11.



Figur 9.11.Illustrationerne af linjerne, som er benyttet til tværsnitsprofilerne.

Tværsnitprofilerne fremgår for nord mod syd af figur 9.12 og for vest mod øst af figur 9.14.

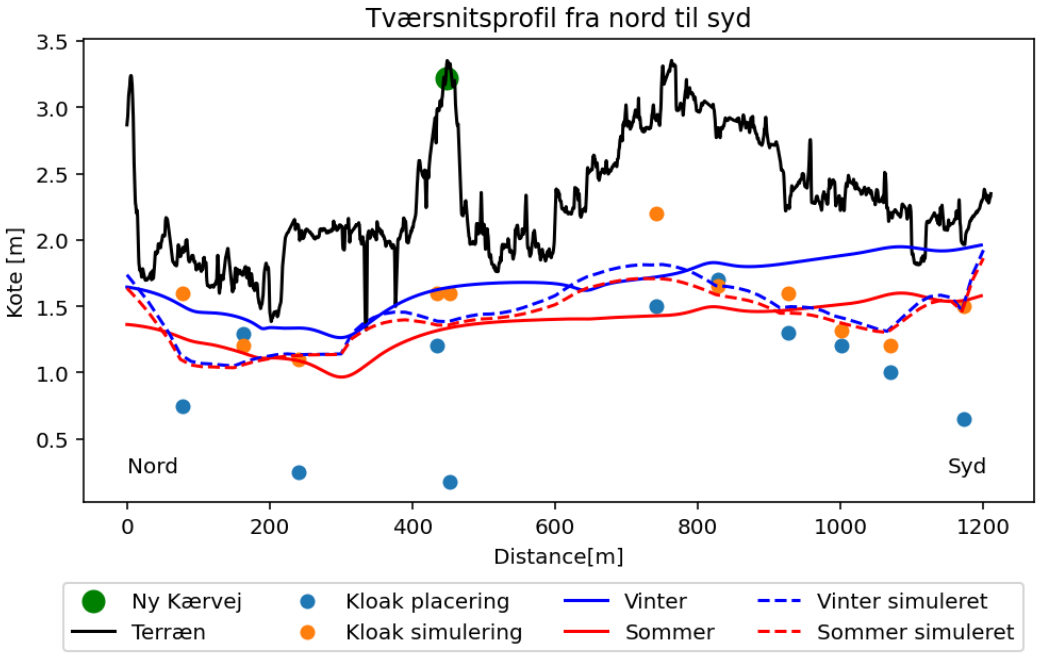


Figur 9.12.Tværsnitprofil fra nord til syd, over det observerede og simulerede trykniveau. Værdier for terræn er fra SCALGO [2022].

Ud fra den ovenstående tværsnitprofil fra nord til syd fremgår det, at der er en afvigelse mellem, det simulerede og det observerede trykniveau. Forskellen er primært mellem 0 og cirka 30 cm. Enkelte steder er variationen større, for eksempel omkring [1050 - 1100 m], hvor det observerede vinter trykniveau ligger cirka 50 cm højere end det simulerede vinter trykniveau. Generelt ligger det simulerede trykniveau for sommer og vinter mellem det observerede trykniveau for sommer og vinter over størstedelen af strækningen. Der kan observeres enkelte steder, hvor både det simulerede sommer- og vinter trykniveau er tættere på terrænet end det observerede vinter trykniveau. Ligeledes er der steder, hvor det simulerede vinter trykniveau er tættere på terrænet end det observerede vinter trykniveau.

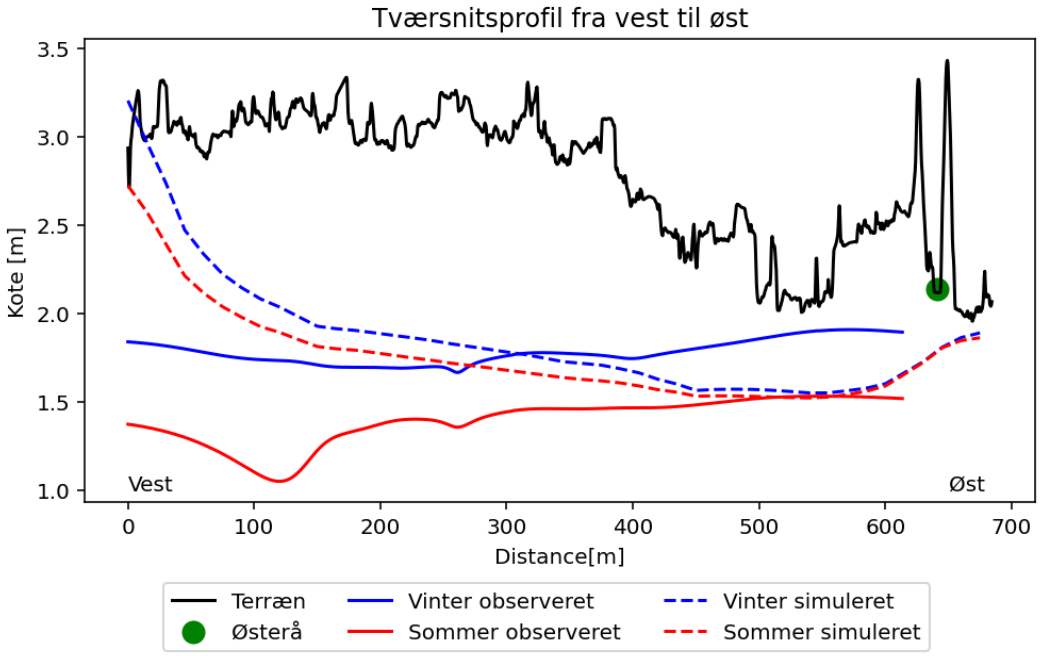
Desuden viser figur 9.12, at der generelt er en større forskel mellem sommer og vinter i det observerede trykniveau sammenlignet med det simulerede trykniveau. På enkelte steder ligger det observerede vinter trykniveau enten få centimeter fra terrænet eller på terrænet. Dette gælder også for det simulerede trykniveau for både sommer ved cirka 350 m og for vinteren ved cirka 30 m.

En af årsagerne til forskellen mellem det observerede og det simulerede trykniveau kan være placeringen af kloakledningerne. I simuleringerne er alle kloakledningerne placeret 1,2 m under terræn, som vist på topografikortet over terrænet i figur B.3. Den faktiske placering af kloakledningerne er imidlertid mere nuanceret og er hentet fra og Aalborg Forsyning [2023]. Tværsnitprofilerne med den estimerede placering af kloakledningerne og placeringen i simuleringen kan ses i figur 9.13 fra nord til syd og figur 9.15 fra vest til øst.



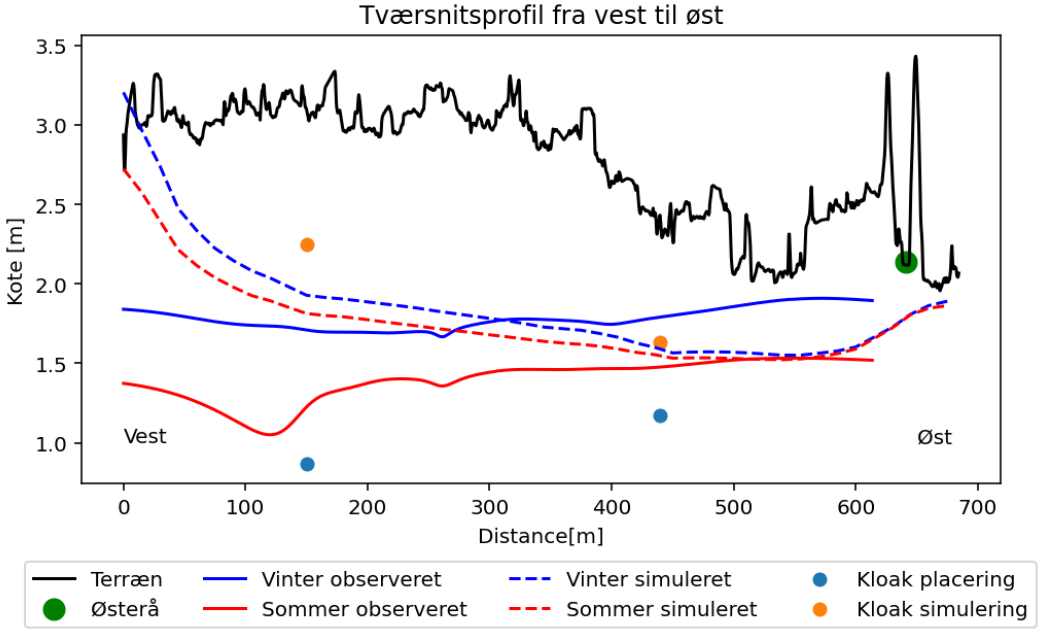
Figur 9.13. Tværsnitprofil fra nord til syd, over det observerede og simulerede trykniveau, hvor kloakledningens placering er angivet, samt hvor kloakledninger er placeret i simuleringerne. Værdier for terræn er fra SCALGO [2022].

Af figuren fremgår det, at der er væsentlige forskelle i dybden, hvor de forskellige ledninger er placeret, med forskelle på over en meter flere steder. Dette skyldes, at den anvendte topografi i modellen er baseret på en cellestørrelse på [100 · ×100·]. Andre steder er forskellen i kloakledningens dybde mindre markant. Figuren viser også, at kloakledningerne generelt er placeret tættere på terræn i simuleringen. Flere steder på tværsnitsprofilet fremgår det, at det simulerede trykniveau er kun få centimeter fra den faktiske placering af kloakledningen i modellen. Dette har en væsentlig indflydelse på det simulerede trykniveau. Til sammenligning ses denne tendens ikke i samme grad for det observerede trykniveau. Dette kan skyldes, at trykniveauet er blevet interpoleret ud fra målinger i området, hvilket ikke giver den samme detaljerede information. Målestationerne er typisk også placeret lidt væk fra vejen, hvor kloakledningerne primært er placeret under. I figuren er Ny Kærvej markeret, hvilket er årsagen til de store ændringer i terrænet og tilstedeværelsen af flere kloakledninger i området.



Figur 9.14. Tværsnitprofil fra vest til øst, over det observerede og simulerede trykniveau. Værdier for terræn er fra SCALGO [2022].

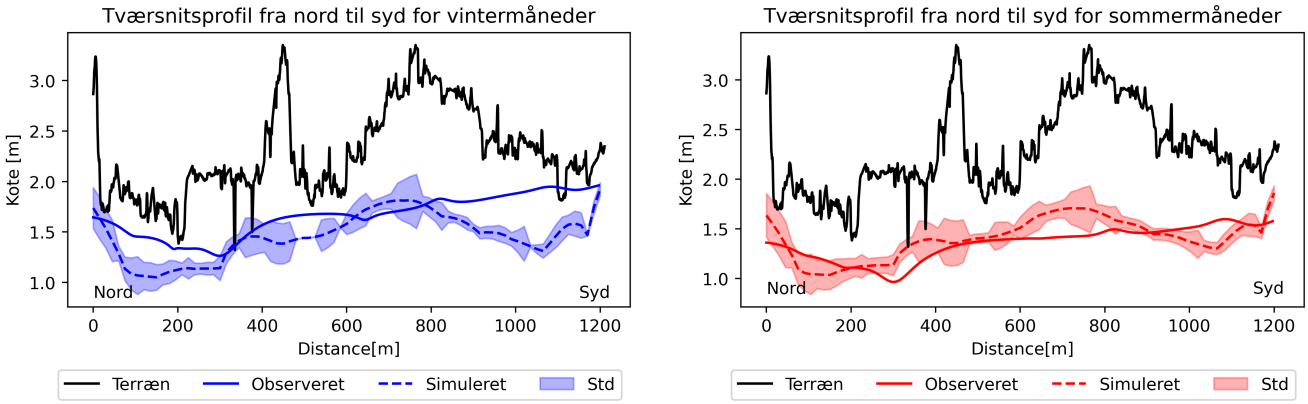
Figur 9.14 viser væsentlige forskelle mellem det simulerede og observerede trykniveau for de første 100 m. Det simulerede trykniveau er cirka 1,5 m højere end det observerede, denne forskel aftager over de næste 300 m. De efterfølgende 300 m er det simulerede trykniveau for sommer og vinter, er mellem det observerede trykniveau for sommer og vinter. Tilsvarende til nord til syd tværsnittet, er forskellen mellem sommer og vinter for det simulerede trykniveau, mindre end forskellen for det observerede. For det observerede trykniveau, fremgår det, at vinter er væsentligt tættere Østerå end sommer, hvor for det simulerede trykniveau er ubetydelig forskel mellem sommer og vinter.



Figur 9.15. Tværsnitprofil fra vest til øst, over det observerede og simulerede trykniveau, hvor kloakledningernes placering er angivet, samt hvor kloakledninger er placeret i simuleringerne. Værdier for terræn er fra SCALGO [2022].

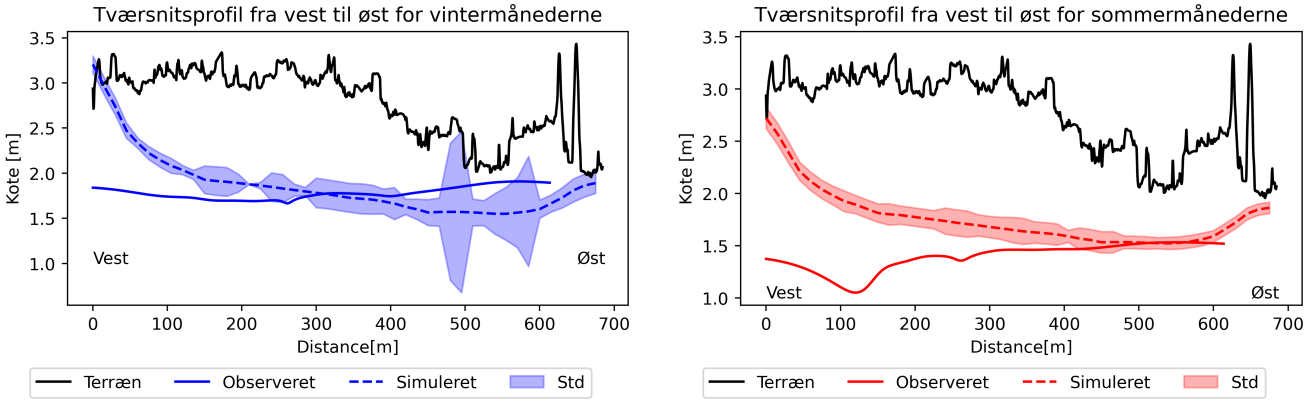
Det fremgår af figuren, at kloakledningsdybderne varierer for henholdsvis de dybder som anvendes i modellen, og hvad der er estimeret fra og Aalborg Forsyning [2023]. Den vestlige kloakledning har cirka 1,5 m forskel i dybden og for den østlige kloakledning er forskellen cirka 0,5 m. Effekten at dette, har formentlig været væsentlig, da begge ledninger er placeret under trykniveauet for det observerede, hvor begge er placeret over trykniveauet for det simulerede.

I de tidligere figurer er det simulerede trykniveau vist som et gennemsnit af de 3000 simuleringer. Der er forskel på, hvor meget trykniveauet varierer i de 3000 simuleringer, hvorfor trykniveauet illustreres med den tilhørende standardafvigelse under og over. Dette fremgår af figur 9.16 for nord til syd tværsnittet og figur 9.16 for vest til øst tværsnittet.



Figur 9.16. Tværsnitsprofil fra nord til syd over simuleret og observeret trykniveau, for henholdsvist vinter (til venstre) og sommer (til højre). Standardafvigelsen fremgår over og under det simulerede som et markeret område.

Ved medtagelse af standardafvigelsen fremgår der en forbedret overensstemmelse mellem det simulerede- og observerede trykniveau for sommermånederne, da det observerede, over størstedelen af distancen, er indenfor området for standardafvigelsen. Samme tendens er ikke tilfældet for vintermånederne, da det observerede ikke er indenfor området for standardafvigelsen, i så stor en del af strækningen. Det fremgår ligeledes at standardafvigelsen varierer fra cirka 10 cm til ganske få, hvilket særligt er tilfældet for vintermånederne.



Figur 9.17. Tværsnitsprofil fra vest til øst over simuleret og observeret trykniveau, for henholdsvist vinter (til venstre) og sommer (til højre). Standardafvigelsen fremgår over og under det simulerede som et markeret område.

For sommermånederne er der ingen betydelig forskel, ved at medtage standardafvigelsen, og det fremgår ligeledes at standardafvigelsen er relativt konstant i dette simuleringsscenarie. For vintermånederne er

forbedringen mellem observeret og simuleret mere væsentlig, hvilket skyldes en større standardafvigelse, visse steder på strækningen.

9.4 Opsamling og diskussion

Ud fra resultater sammenlignet med observationer fra GRAVA-projektet, vurderes det, at der er overensstemmelse mellem, det simulerede og observerede trykniveau fra de manuelle målestationer. Dermed kan det valideres at resultaternes er realistiske, og kan benyttes til udtalelse om dybden til grundvandsspejlet, ved andre simuleringsscenarier. På baggrund af dette vil resultater fra andre scenarier undersøges. Sammenligningen er foretaget på forskellig vis, hvor der er sammenlignet både på lokalskala, spatialt på kort og som tværsnitsprofiler. De forskellige valideringsmetoder gennemgås og vurderes.

9.4.1 Validering på lokalskala

Validering på lokalskala blev foretaget ved at sammenligne beregnet trykniveau i celler med målestationer, med de målte værdier i en given periode inden for samme celle. Perioden som valideringen er fortager for, fremgår af tabel 9.1. Dermed sammenlignes geologiske variationer fra hydrostatiske beregninger, med tidslige variationer. Dette kan diskuteres, da dette er to forskellige variationer. Samtidig resulterer de geologiske variationer fra simuleringerne, i variationerne i trykniveau, tilsvarende til de tidslige, hvorfor målet om at belyse det mulige sandsynlighedsbaseret spænd i værdier opfyldes. Derfor er denne metode vurderet anvendelig til validering.

Ved den lokale validering er der blevet valgt målestationer, der er jævnt fordelt i området, samt nogle manuelle målestationer med hyppige indberetninger. Dette er gjort for at sikre et acceptabelt datagrundlag for sammenligning. Alle de automatiske målestationer er blevet sammenlignet, med undtagelse af dem, der er placeret ved et vandløb i modellen. Da værdierne i disse målestationer ikke kan sammenlignes direkte med de simulerede værdier, er de blevet fravalgt til valideringen.

Nogle målestationer varierer væsentligt i forhold til det simulerede, dette er illustreret på figur 9.5 og figur 9.7. Denne forskel i dybde til grundvandsspejlet kan skyldes forskellen i terrænkote. Forskellen er ligeledes illustreret i bilag på figur F.1. Jensen [2003] beskriver, hvordan forskelle i topografi indenfor en enkelt celle, kan medvirke til fejl, ved sammenligning med observeret data. Dette kunne muligvis undgås ved benyttelse af et andet topografikort, hvor det benyttede er $100 \cdot 100m$. Sammenligningen i valideringsafsnittet er foretaget ud fra dybden til grundvandsspejlet, som for modellen er beregnet ud fra et $100 \cdot 100m$ gitter, hvor det for observeringer er foretaget ved $0{,}4 \cdot 0{,}4m$ gitter.

Ved validering kan der forekomme usikkerheder med resultaterne fra simuleringerne. Dette skyldes, at den angivende værdi for en celle, er beregnet for cellens midtpunkt. Derfor kan der være en fejl i værdierne som der sammenlignes med, på op til halvdelen af cellestørrelsen, gange gradienten i trykniveau mellem cellerne. Da målestationen kan være placeret i yderkanten af en celle. [Jensen, 2003] Ved interpolation af trykniveau mellem cellemidtpunkter, kan afhjælpe fejlen, hvilket ikke er gjort, da dette projekt har relativt små cellestørrelser, på 15 m.

størstedelen af de manuelle målestationer har god overensstemmelse mellem observeret og simuleret. Dette er som nævnt baseret på målestationer med mange indberetninger. Som illustreret i bilag i afsnit F.1, er der flere målestationer med få indberetninger, hvor overensstemmelsen er mindre, eller der ikke er nogle indberetninger i perioden. Dette understreger vigtigheden af datamængden, som benyttes til validering af grundvandsmodeller.

9.4.2 Spatiale forskelle i trykniveau

Til de spatiale forskelle i trykniveau er der benyttet interpolerede kort over vandstandsmålinger, som er sammenlignet med simuleringerne. Analysen er udelukkende baseret på manuelt data, grundet usikkerheder med det automatiske data. De simulerede værdier er midlet over alle geologiske realiseringer og Monte Carlo realiseringer, for at det simulerede kan udtrykkes som en enkelt værdi. Ligeledes er der benyttet en kortere periode på en enkelt måned, sammenlignet med den lokale sammenligning, for at undersøge ekstremerne for årstiden. Alternativ kunne længere periode være benyttet, samt andre resultater end middelværdier fra simuleringerne. De spatiale forskelle i trykniveau er vurderet til at være i en acceptabel størrelsesorden. Årsagerne til de forskelle diskuteres senere.

Valideringen er baseret udelukkende på vandstandsmålinger fra GRAVA-projektet, og derfor er overensstemmelsen under Kærby ikke blevet undersøgt. Dette kan have medført fejl, da der potentielt kan være dårlig overensstemmelse vest for Kærby, hvilket igen kan have påvirket modellens præstation i den vestlige del. Det er vigtigt at være opmærksom på denne begrænsning i valideringen og dens potentielle påvirkning på resultaterne i den vestlige del af området.

9.4.3 Tværsnitprofiler

Tværsnitprofilerne er benyttet at illustrere forskellene imellem årstiderne for både observeret- og simuleret dybde til grundvandsspejlet. Samtidig kan dette benyttes til at diskutere mulige årsager til forskellene i observeret- og simuleret trykniveau. Af figurerne i afsnit 9.3, forekommer det flere steder at det simulerede grundvandsspejl er i samme kote som kloakledningerne. Af denne årsag er vejene, som kloakledningerne typisk er placeret under, forsøgt undgået. I et tæt bebygget område som Kærby, er det ikke muligt helt at undgå, hvorfor der nogle steder kan være kort afstand til en kloakledning, uden den fremgår af figurerne, hvilket kan være misvisende.

Til tværsnitprofilerne er der benyttet de interpolerede kort, over ekstremværdier for årstiden, som sammenlignes med middelværdier fra simuleringerne. Dette er formentlig årsagen til de større forskelle imellem årstiderne i det observerede, end for det simulerede, hvorfor dette ikke er helt retvisende.

For tværsnitsprofilerne er der markeret standardafvigelsen for de simulerede årstider, hvilket fremgår af figur 9.16 for nord mod syd og figur 9.17 for vest mod øst. Heraf fremgår det at dele af strækningerne har en variation i standardafvigelse. Dette tyder på at geologien varierer i betydningen hen over tværsnittet.

9.4.4 Årsager til afvigelser

Det fremgår ligeledes af valideringen for både tværsnit og interpolerede kort, at kloaksystemet har stor indflydelse visse steder i området. Kloakledningerne er fejlplaceret med mere end en meter nogle steder i området, hvilket kan have en væsentlig indflydelse på resultatet. Det fremgår at kloakledningerne i nogle dele af strækningen, har for stor indflydelse på den simulerede dybde til grundvandsspejlet, hvilket kunne indikere, at dræningaevnen skulle justeres i visse områder af Kærby. Af figur 9.10 fremgår det i begge scenarier, at der underestimeres i den sydøstlige del af Kærby, hvilket kan skyldes, at kloaksystemet er ældre i dette område, som fremgår af figur 4.5. De ældre kloakledninger er muligvis mere tætte end antaget og dermed have mindre drænene effekt end i resten af området. En anden påvirkning kan være mængden af omfangsdræn, som er tilsluttet kloakken. Dette vil ikke fremgå i simuleringerne, da dræningaevne er per meter kloakledning, hvilket yderligere argumenterer for lokal justering af dræningsevnen.

Resultaterne indikerer, at Vestre Landgrøft kunne dræne området i samme omfang som kloakledningerne, hvor den i modellen ikke er implementeret som dræn. Dette fremgår af figur 9.10 ved en overestimering af trykniveauet mod vest. En mulig årsag til overestimeringen mod vest, kan være at den rørlagte del af Vestre landgrøft, ikke er implementeret som dræn, hvilket er tilfældet for kloakledningerne. Overestimeringen kan også skyldes, at den rørlagte del af Vestre Landsgrøft har gennemgået en løbende renovation. Den

sydlige del af den rørlagte del af Vestre Landsgrøft er blevet renoveret i en mindre grad, hvorimod den nordlige del af blevet renoveret yderligere.

For vinterscenariet er trykniveauet i simuleringerne underestimeret i den østligste del af området, og underestimeret for sommer scenariet. Dette kan skyldes, hvordan Østerå er implementeret. Ved simuleringerne er Østerås vandspejl fastsat til 0,9 m under terræn, hvor dette ikke er afhængig af årstiden. Det kan forventes at Østerå har højere vandstand om vinteren, hvilket kan påvirke grundvandsspejlet. Dette kan være årsagen til at underestimeringen er mere markant om vinteren. Som tidligere beskrevet er der en del af diget mod Østerå forstærket af et egetræs spunsvæg, som skal modvirke Østerås påvirkning på grundvandsspejlet i Kærby. Det vides ikke præcist, hvor disse spunsvægge er placeret, men de er placeret i den sydøstlige del af Kærby. Spunsvæggene fungerer som en ikke naturlige barriere imod Østerå, og kan derfor godt have en indvirkning på trykniveauet i området. Spunsvæggene er ikke medtaget i grundvandsmodellen grundet, at den præcise placering, nuværende tilstand og effekt ikke er kendt. Underestimeringen i den østlige del af Kærby kan derfor også skyldes, at egetræsspunsvæggene har en vis effekt på grundvandsspejlet i Kærby.

Disse årsager til afvigelser, som ikke er direkte afhængige af geologien, kunne med fordel være kalibreret yderligere. Dette ville medføre højere nøjagtighed og et bedre beslutningsgrundlag for de øvrige scenarier.

10 Resultater for opstillede klimascenarier i Kærby

I følgende resultat afsnit simuleres grundvandsstanden i modelområdet for tre forskellige klimascenarier. Et nutidigt klima, nær fremtids klima og fjern fremtidsklima. For hvert klimascenarie simuleres et fælles- og separatkloakeret system, for både sommer og vinter. Opsætningen af hver af klimascenarierne er beskrevet i kapitel 5. Metoden som er benyttet i til vurderingen af resultaterne er beskrevet i kapitel 8. Dybden til grundvandsspejlet for områderne vil blive undersøgt på forskellige måder ved hjælp af middelværdierne og 25% fraktilerne for hver modelberegning. Ligeledes vil resultaterne for alle simuleringer i alle celler blive præsenteret. Der vises en kumulativ sandsynlighedsfordeling for resultaterne samt tilhørende histogram over værdierne. Det skal bemærkes, at områdernes størrelse varierer.

For resultaterne er der ligeledes vist resultaterne for GRAVA-projektet, for alle scenarierne. Dette er gjort, for at vise forskellen i beslutningsgrundlaget, ved medtagelse af den geologiske usikkerheder. For GRAVA-projektet er geologien implementeret ved at importere geologiske lag fra HIP-databasen Dataforsyningen [2022], hvor hvert lag er kalibreret efter vandstandsmålinger i modelområdet.

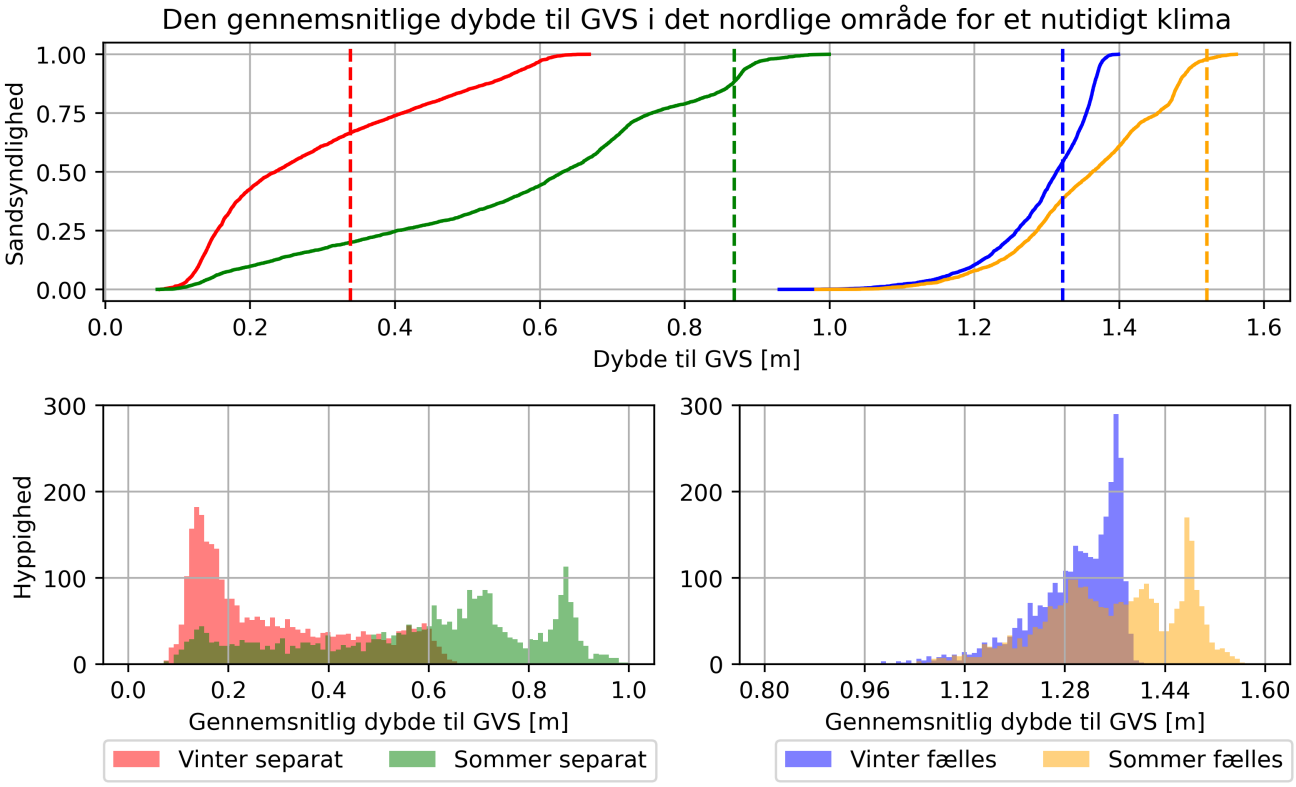
Dermed sammenlignes 3000 middelværdier og 25% fraktiler for hvert scenarie, med én middelværdi og én 25% fraktil for hvert scenarie fra GRAVA-projektet. Dertil sammenlignes resultaterne for alle cellerne fra én simulering fra GRAVA-projektet, med resultaterne for alle cellerne fra 3000 simulering fra dette projekt.

10.1 Sammenligning af forskellige scenarier for et nutidigt klima

Ved at undersøge resultaterne for de forskellige scenarier i hvert område visualiseres eventuelle konsekvenser. Dermed kan der også gives et bud på, hvor spændet for dybden til grundvandsspejlet forventes at ligge under forskellige forhold, såsom fælles- og separatkloakering i både sommer- og vinterscenarier. For at forbedre læsevenligheden forkortes "separatkloakeret"til "SK"og "fælleskloakeret"til "FK".

10.1.1 Gennemsnitlig dybde

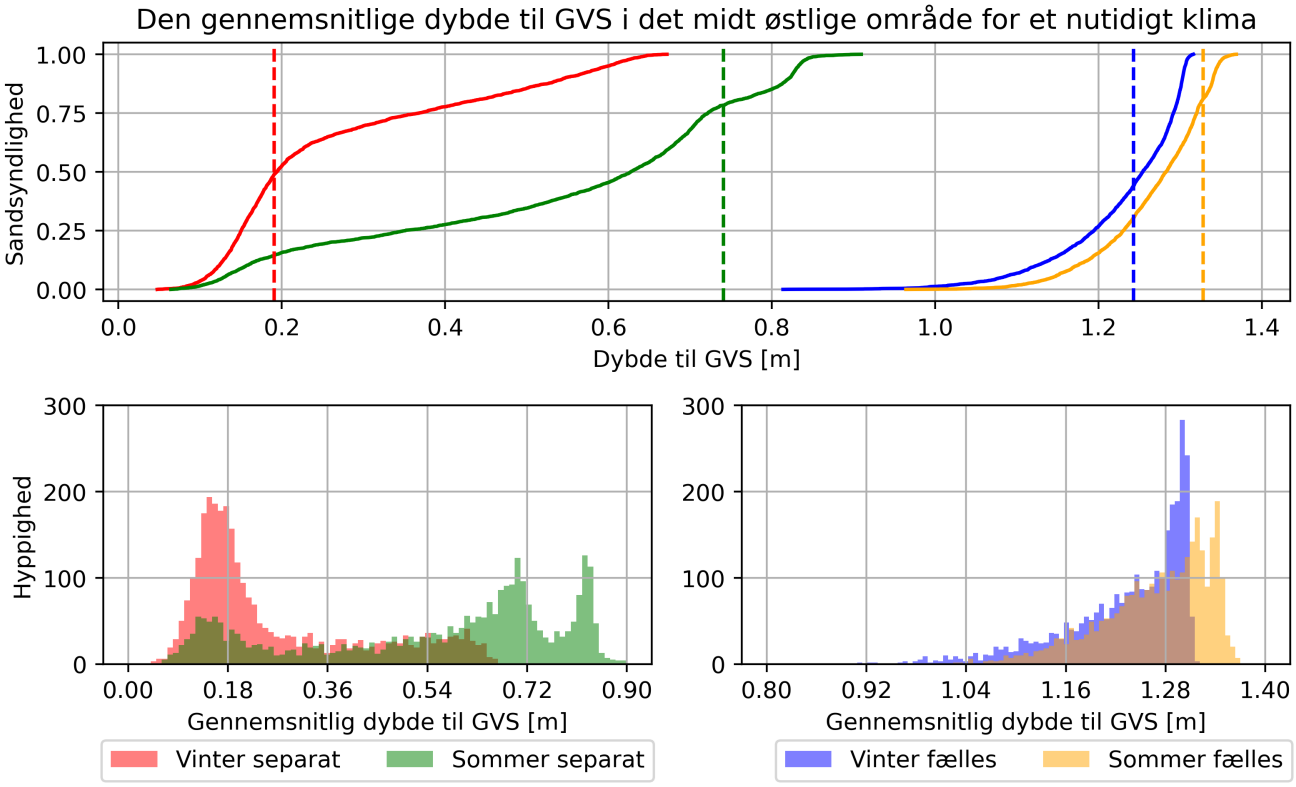
Det første område, der sammenlignes, er det nordlige område. På figur 10.1 vises den kumulative sandsynlighedsfordeling samt histogram for hvert scenarie. Resultatet fra GRAVA-projektet er markeret med en stiplet linje.



Figur 10.1.Sandsynlighed for den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet (GVS) i det nordlige område for de fire scenarier.

Af figuren fremgår det, at der er en tydelig forskel i spændet, når man sammenligner SK og FK. Der er også større variation mellem årstiderne for SK. Generelt er SK mere kritisk, da dybden til grundvandsspejlet er under en meter for hele spændet og henholdsvist 25% og 75% har under 40 cm til terræn. Resultatet fra GRAVA-projektet er for begge sommer scenarier placeret ved i de 15% af spændet med længst til terræn for dette projekt. For vinter FK er GRAVA-projektets estimatet få centimeter fra medianen for dette projekt, hvor det for vinter separatkloakeret er cirka 10 cm længere fra terræn, end dette projekts median.

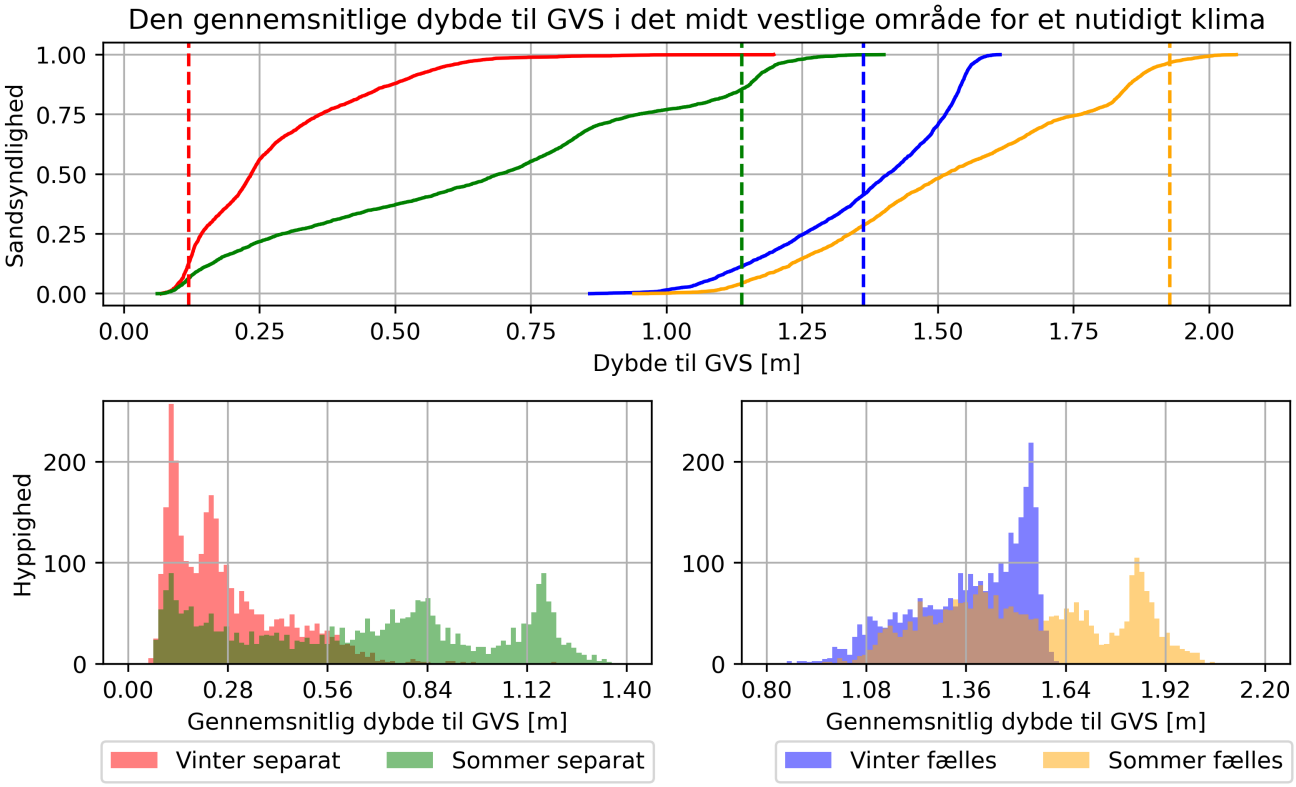
For det midt østlige område, fremgår den kumulative sandsynlighedsfordeling, samt histogram for hvert scenarie på figur 10.2, hvor gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet for scenarierne er anvendt. Resultatet fra GRAVA-projektet er markeret med en stiplet linje.



Figur 10.2.Sandsynlighed for den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i det midt østlige område for de fire scenarier.

Af figuren fremgår der mindre forskel mellem de FK scenarier, da forskellen mellem disse, er relativt konstant på cirka 5 cm, ligeledes er spændet for sommer FK cirka 20 cm mindre. For de SK scenarier er forskellen mellem det nordlige og midt østlige områder minimal, med undtagelse af enkelte værdierne længst fra terræn for sommer separat. For vinterscenarierne er GRAVA-projektets estimat få centimeter fra dette projekts median, GRAVA-projektets estimat er for sommerscenarierne cirka ved sandsynlighed 0,8.

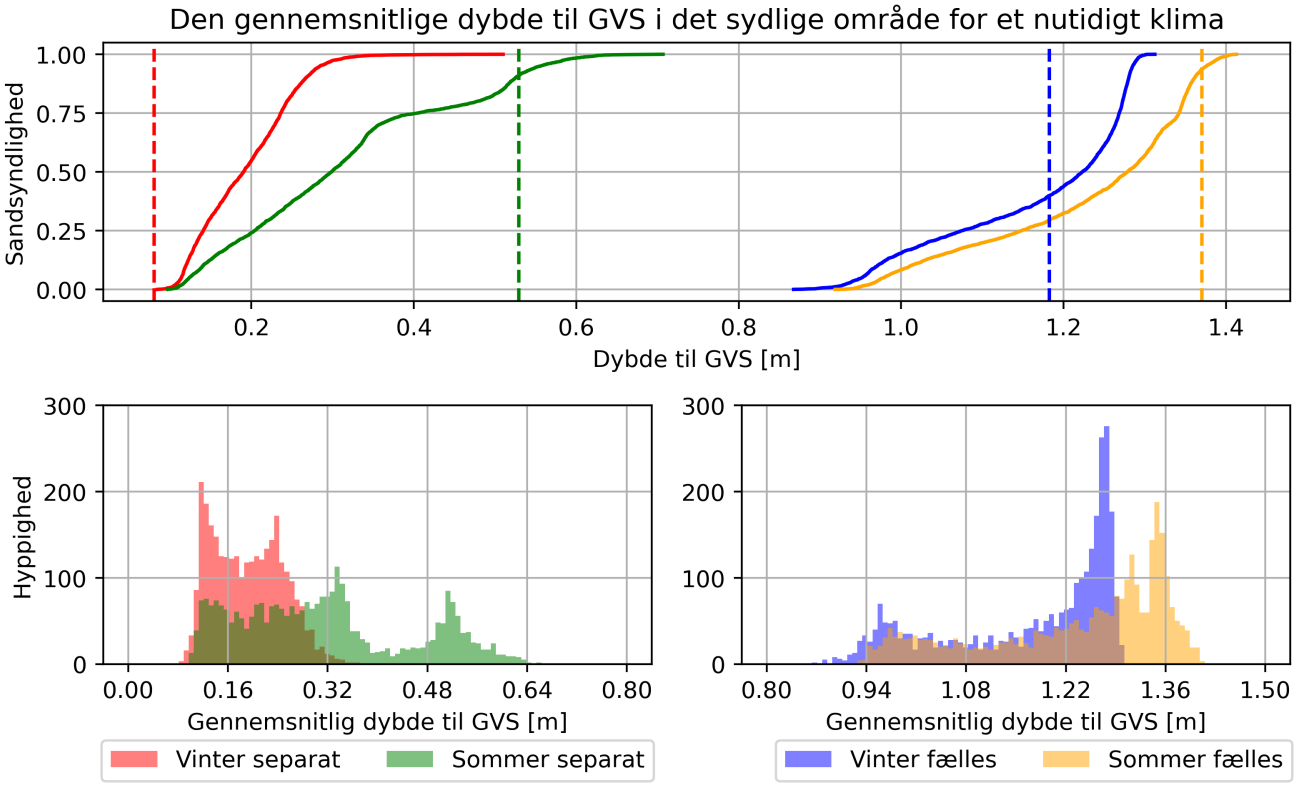
For det midt vestlige område, fremgår den kumulative sandsynlighedsfordeling, samt et histogram for hvert scenarie på figur 10.3, hvor gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet for scenarierne er anvendt. Resultatet fra GRAVA-projektet er markeret med en stiplet linje.



Figur 10.3.Sandsynlighed for den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i det midt vestlige område for de fire simuleringsscenarier.

Af figuren fremgår der mindre variationer mellem FK scenarier relativt små for den halvdel tættest på terræn, hvor variationen blev større i den halvdel længst fra terræn. Der fremgår en forskel på cirka en meter i GRAVA-projektets estimat for SK scenarier og cirka en halv meter for FK scenarier, hvilket er større end for de øvrige områder. GRAVA-projektets estimat for vinter SK er få centimeter fra dette projekts værdier tættest på terræn. For sommerscenarierne er GRAVA-projektets estimat i den del af spændet længst fra terræn, med henholdsvis sandsynlighed 0,85 og 0,95 for SK og FK i dette projekt. For vinter FK er GRAVA-projektets estimat få centimeter fra medianen for dette projekt. Samtlige scenarier er estimeret til at have et større spænd for det midt vestlige end for de øvrige områder.

For det sydlige område, fremgår den kumulative sandsynlighedsfordeling, samt histogram for hvert scenarie på figur 10.3, hvor gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet for scenarierne er anvendt. Resultatet fra GRAVA-projektet er markeret med en stiplet linje.

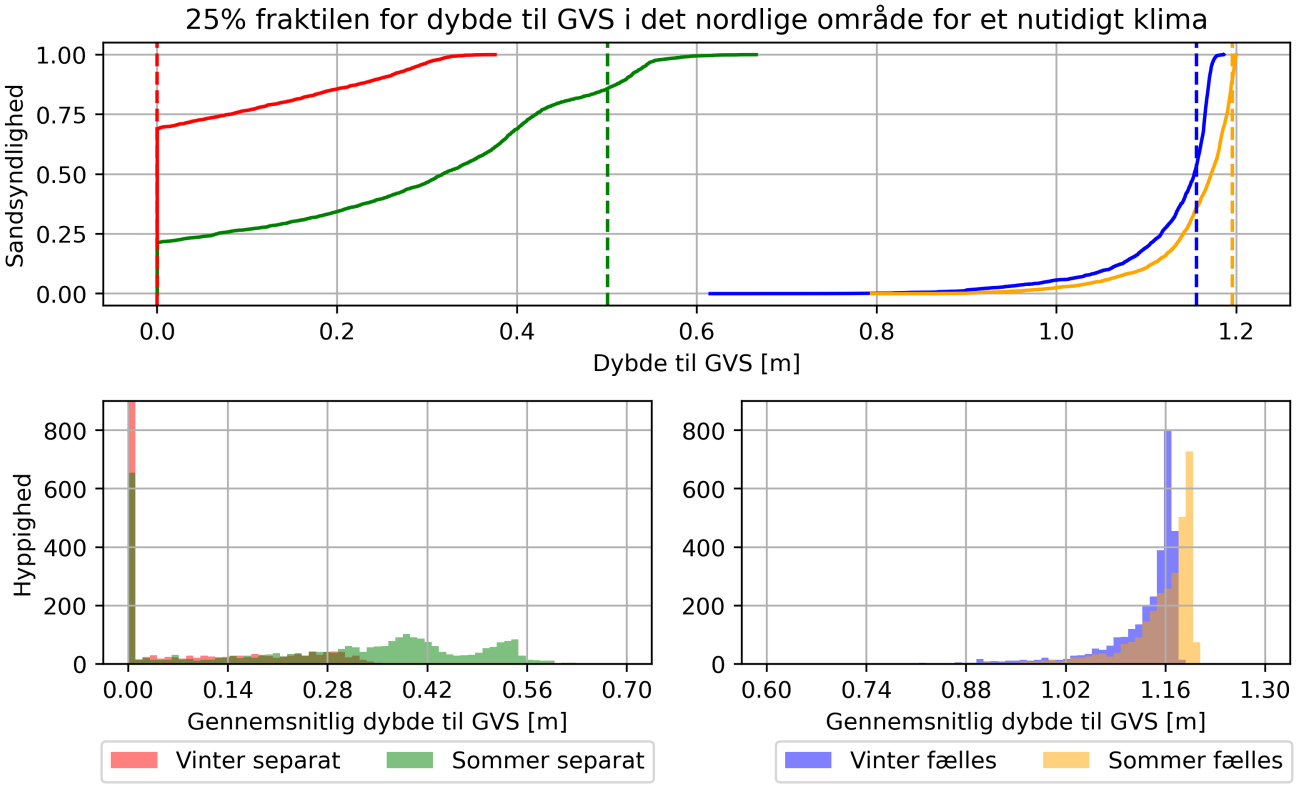


Figur 10.4.Sandsynlighed for den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i det sydlige område for de fire simuleringsscenarier.

Det sydlige område er estimeret til at være det mest kritiske område, da særligt de SK scenarier er tættere på terræn. Her er henholdsvist cirka 100% og 75% estimeret til at have under 40 cm til terræn for den gennemsnitlige værdi. Resultatet fra GRAVA-projektet er for sommer scenarierne ved en sandsynlighed på cirka 0,9 i begge tilfælde for dette projekt. Vinter SK fra GRAVA-projektet er ved dette projekts værdier tættest på terræn, hvor der for vinter FK er cirka 5 cm fra medianen.

10.1.2 25% fraktilen

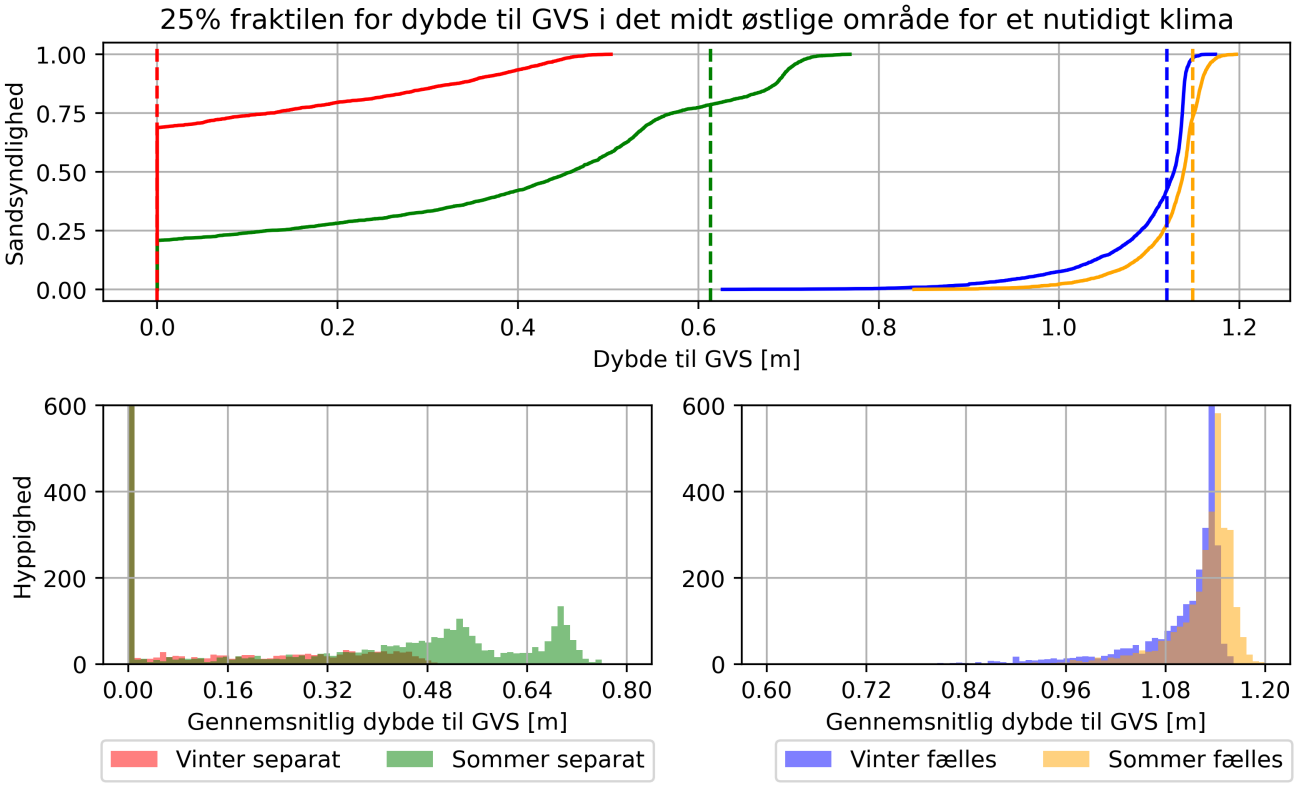
De fire simuleringsscenarier sammenlignes ligeledes på baggrund af 25% fraktilen, som kumulativ sandsynlighedsfordeling og de tilhørende histogrammer for hvert scenarie. Figur 10.5 viser dette for det nordlige område, hvor GRAVA-projektets resultater er markeret med en stiplet linje.



Figur 10.5.Sandsynlighed for 25% fraktilens dybde til grundvandsspejlet i det nordlige område for de fire simuleringsscenarier.

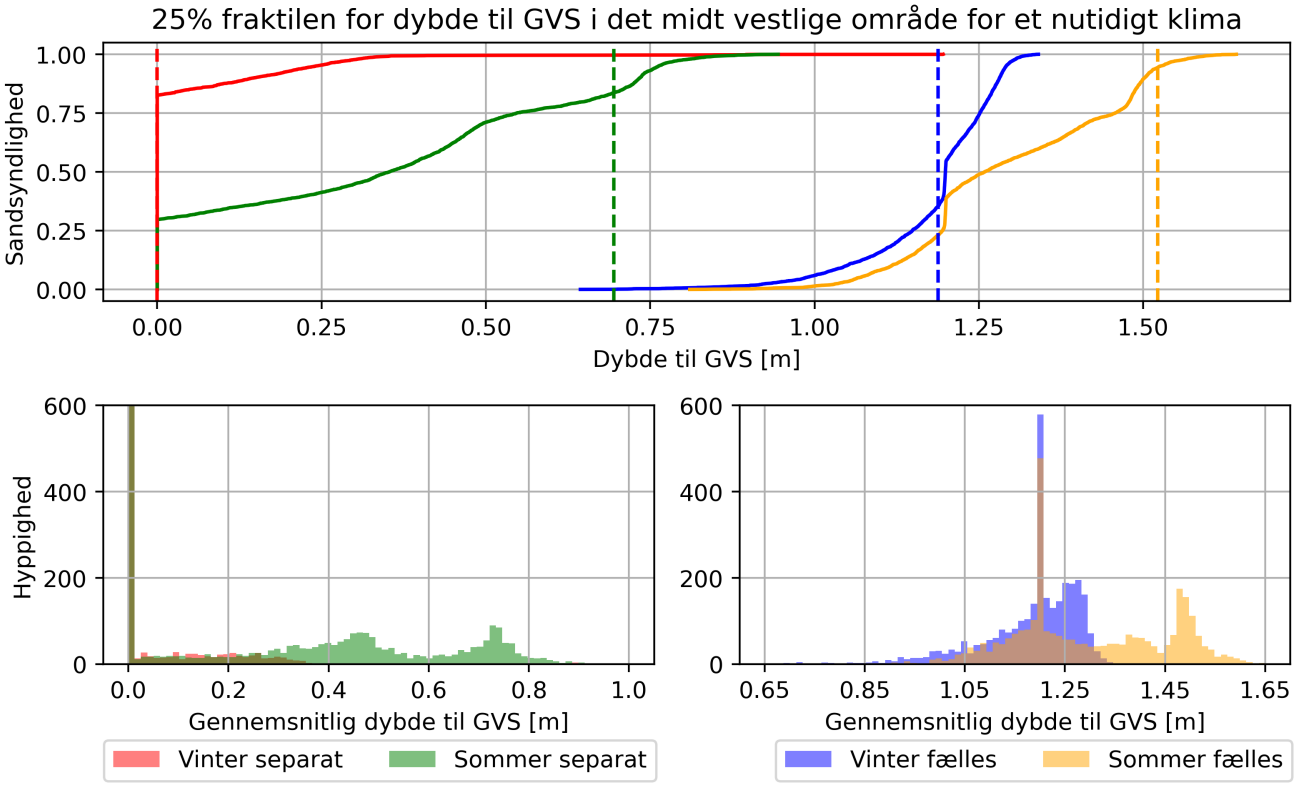
Af figur 10.5 fremgår der er en væsentlig forskel scenarierne imellem. For SK findes der vand på terræn for sommer- og vinter scenarierne i henholdsvis cirka 20 og 70 % af tilfældene. Hvor det ikke forekommer for det nordlige område ved FK. For FK er stort set samtlige værdier i spændet 1 til 1,2 m. De mest kritiske værdier for FK er henholdsvis cirka 0,6 og 0,8 m. For SK er de 20 % mindst kritiske værdier cirka fra 0,10 m til 0,40 m for vinter og fra 0,45 m til 0,65 m for sommer. GRAVA-projektet estimerer 25% fraktilen til at være på terræn ved vinter SK, hvilket også er tilfældet for de øvrige områder. Begge FK scenarier fra GRAVA-projektet er placeret få centimeter fra medianen for dette projekt. Ved FK sommer er værdien samtidig nær den øvre grænse for spændet. For sommer SK er GRAVA-projektets estimat placeret cirka ved sandsynlighed 0,85 for dette projekt.

Sammenlignes 25% fraktilen for det midt østlige område, som fremgår af figur 10.6, ses en sammenlignelig tendens som for det nordlige område.



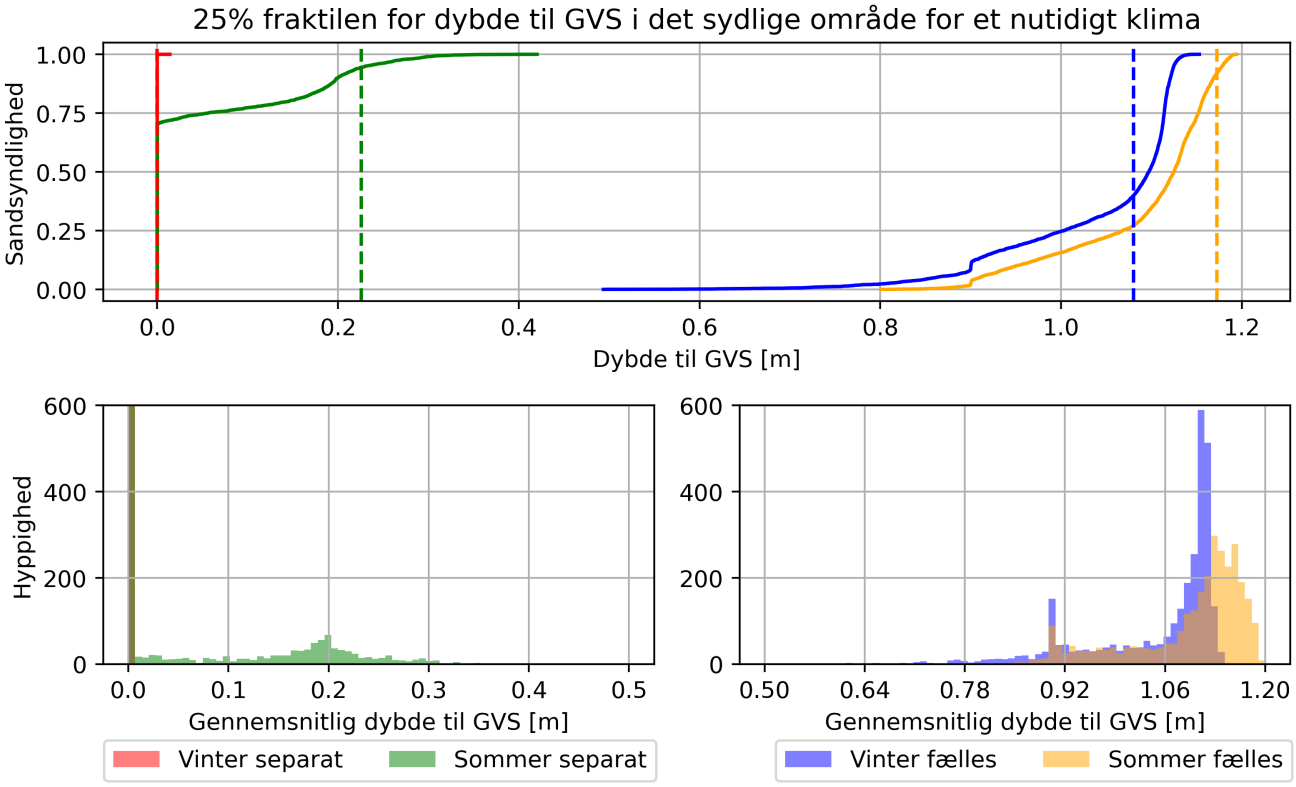
Figur 10.6.Sandsynlighed for 25% fraktilens dybde til grundvandsspejlet i det midt østlige område for de fire simuleringsscenarier.

For FK er områdernes fordeling næsten identiske, mens der er en mindre forskel for SK områderne imellem. Andelen med vand på terræn er den sammen for SK, hvor det midt østlige område har større spænd for de øvrige værdier. Tilsvarende til det nordlige område er GRAVA-projektets estimat for FK få centimeter fra medianen for dette projekt. For sommer SK er GRAVA-projektets estimat placeret cirka ved sandsynlighed 0,80 for dette projekt. Det midt vestlige område fremgår af figur 10.7.



Figur 10.7.Sandsynlighed for 25% fraktilens dybde til grundvandsspejlet i det midt vestlige område for de fire simuleringsscenarier.

Dette område har større andel af vand på terræn end de to førnævnte for SK områder. I dette område er det henholdsvis cirka 30 og 85 % af tilfældene for sommer- og vinterscenarierne. Derimod er spændet for både FK og SK større end for de to tidligere nævnte områder. Ved SK vinter er der ganske få værdier over 0,4 m der øger spændet markant. Ved SK sommer er spændet sammenlignelig med det midt østlige område, det midt vestlige har flere værdier på 0. For FK har sommer og vinter tilsvarende værdier, for de 35 % tættest på terræn, hvor de resterende 65 % afviger årstiderne fra hinanden. GRAVA-projektets resultat for FK vinter, er tilsvarende til det nordlige og midt østlige område, placeret få centimeter fra dette projekts median værdi. Begge sommer scenarier fra GRAVA-projektet er placeret i den øvre del af dette projekts spænd. 25 % fraktilen for det sydlige område fremgår af Figur 10.8 for de fire simuleringsscenarier.

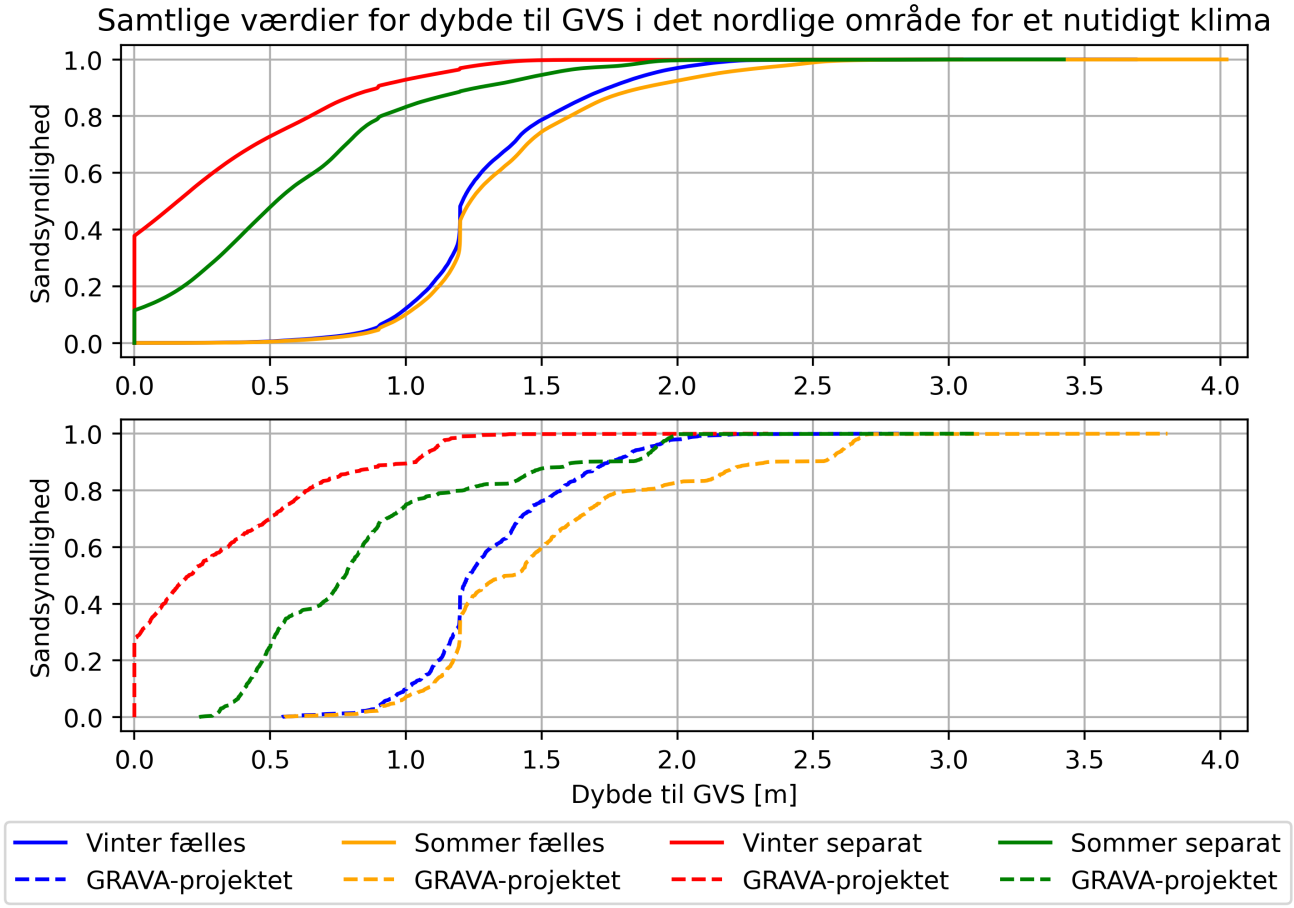


Figur 10.8.Sandsynlighed for 25% fraktilens dybde til grundvandsspejlet i det sydlige område for de fire simuleringsscenarier.

Det sydlige område kan observeres som værende det mest kritiske område, da næsten alle 25% fraktilerne for SK om vinteren er ved terrænniveau, og cirka 70% af resultaterne for SK om sommeren er ved terrænniveau. For fælleskloakering er resultaterne tilsvarende som for det nordlige og midt østlige område, med en større andel af værdier under en meters dybde til grundvandsspejlet. GRAVA-projektets estimater for begge sommerscenarier er placeret omkring sandsynlighed 0,9 for dette projekt, mens vinteren for FK er få centimeter fra medianen i dette projekt.

10.1.3 Samtlige værdier

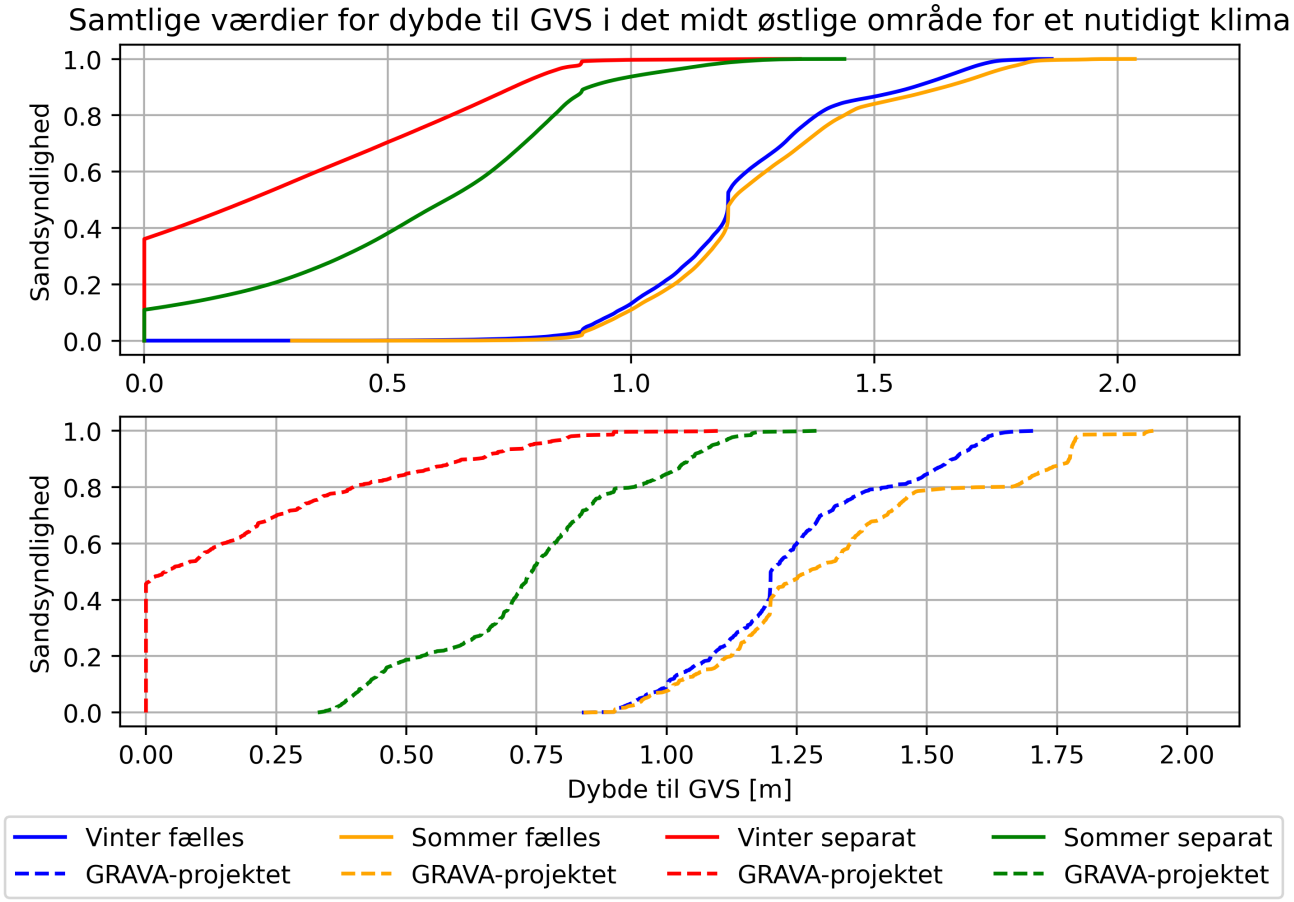
For hvert område kan samtlige af de simulerede værdier undersøges. Ud fra disse fremgår det, hvor stor en andel af de simulerede værdier, hvor grundvandet er på terræn. Ved at medtage samtlige resultater fremgår ekstremerne for de forskellige scenarier. Samtlige værdier fremgår af figur 10.9 for det nordlige område, hvor dette projekts resultater fremgår øverst og GRAVA-projektet nederst.



Figur 10.9.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det nordlige område for de fire simuleringsscenarier.

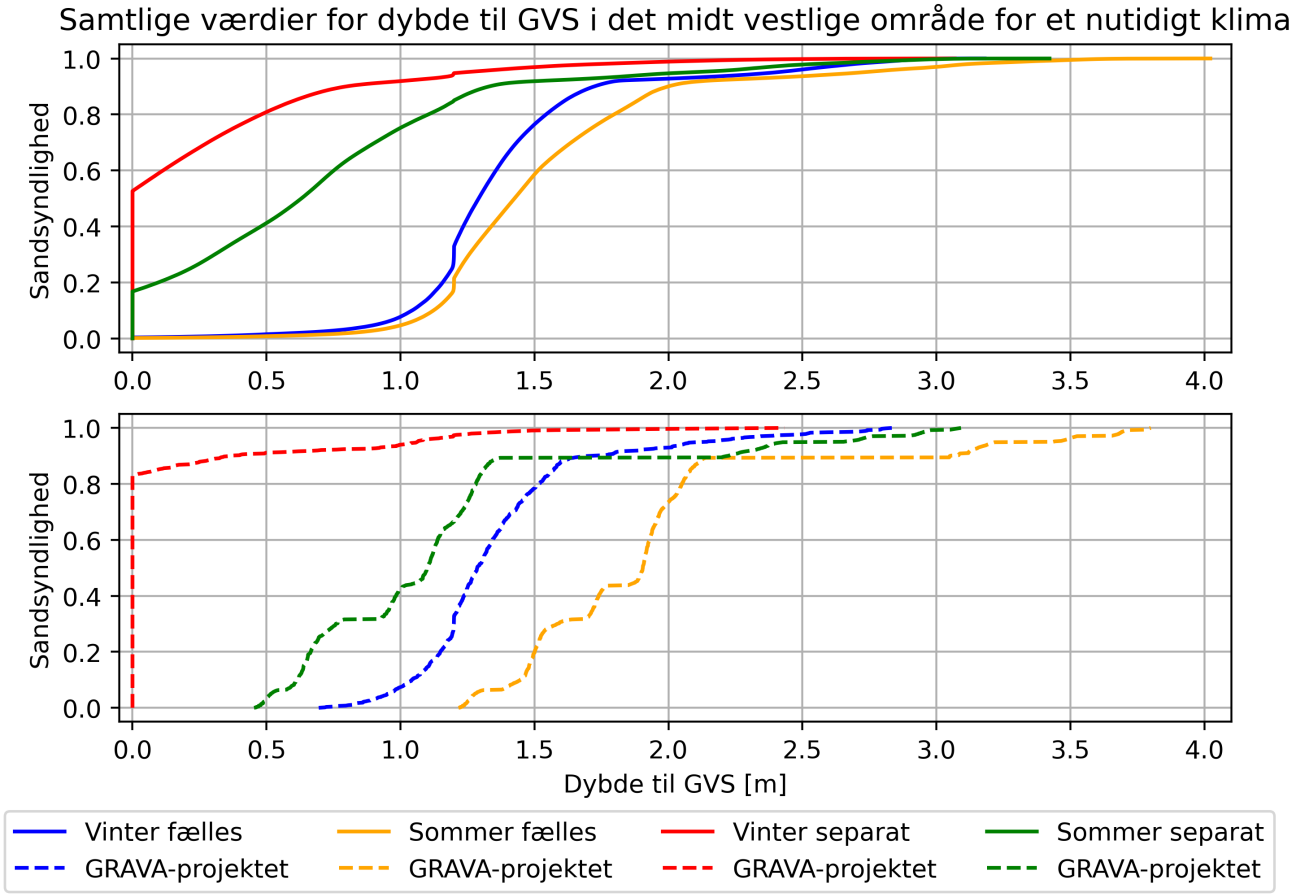
Af figuren fremgår der større variation SK og FK imellem end årstiderne imellem. Dette projekt finder større forskelle kloakeringsscenarierne imellem end GRAVA-projektet, hvor GRAVA-projektet finder større forskelle årstiderne imellem end dette projekt. For SK vinter i dette projekt er cirka 40% på terræn og cirka 90 % har under en meter til grundvandsspejlet. For GRAVA-projektet er der ligeledes cirka 90 % af værdierne med under en meter til grundvandsspejlet, hvorimod andelen på terræn udgør cirka 25%. Til sammenligning er der ved SK sommer i dette projekt cirka 15% på terræn og cirka 85 % har under en meter til grundvandsspejlet. For GRAVA-projektet er der cirka 75 % af værdier med under en meter til grundvandsspejlet, hvor den korteste dybde til grundvandsspejlet er cirka 25 cm. For FK scenarier er værdierne tilsvarende for de 40% mindste værdier, med undtagelse af de mest ekstreme værdier. Forskellen bliver delvist større for de resterende 60% ved sommer fælleskloakeret, hvor GRAVA-projektet estimerer længere til grundvandsspejlet.

Samtlige værdier fremgår af figur 10.10 for det midt østlige område, hvor dette projekts resultater fremgår øverst og GRAVA-projektet nederst.



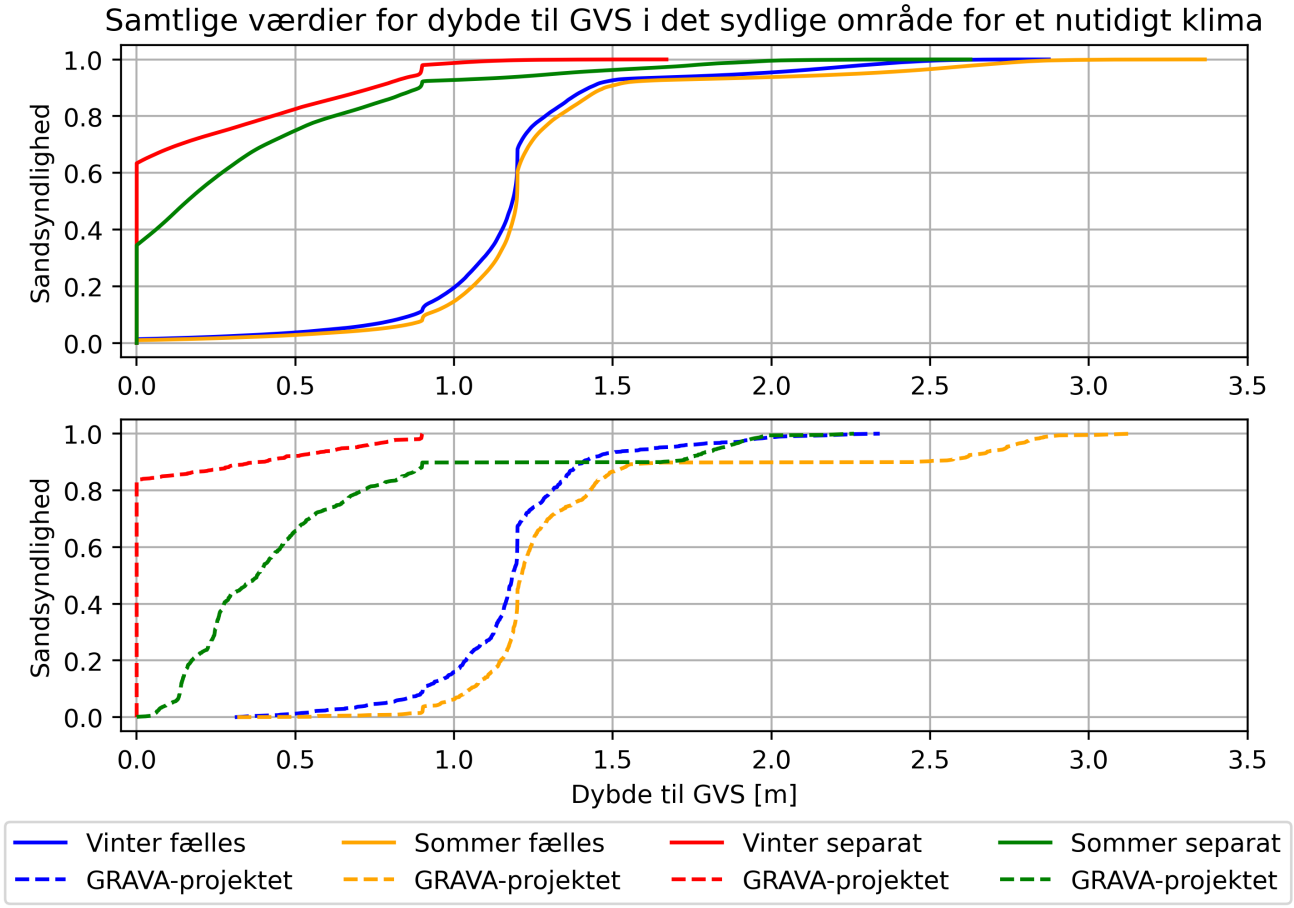
Figur 10.10.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det midt østlige område for de fire simuleringsscenarier.

Den væsentligste forskel mellem det nordlige af figur 10.9 og det midt østlige område af figur 10.10, er størrelsen på spændet, som for det nordlige område var op mod fire meter til grundvandsspejlet. Hvor det kun er enkelte værdier for det midt østlige område, som er over to meter fra terræn. De 50% korteste afstande til grundvandsspejlet er tilsvarende områderne imellem. Det fremgår, at GRAVA-projektet har estimeret flere værdier på terræn end dette projekt, for vinter SK, i modsætning til det nordlige område. Samtlige værdier fremgår af figur 10.10 for det midt vestlige område, hvor dette projekts resultater fremgår øverst og GRAVA-projektet nederst.



Figur 10.11.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det midt vestlige område for de fire simuleringsscenarier.

For det midt vestlige område fremgår det at have flere kritiske værdier, både med mange tæt på terræn og mange langt fra terræn. Det fremgår ved, at store andele med under meter og over to meter til grundvandsspejlet. Særligt vinter separat kloakeret har flere værdier på terræn, sammenlignet med det nordlige og midt østlige område. GRAVA-projektet estimerer sommer FK til at have cirka 25 % over to meter og cirka 10% over tre meter fra grundvandsspejlet. Dette projekt estimerer samme andel med disse afstande, hvorimod cirka 20% er estimeret kortere til grundvandsspejlet end GRAVA-projektets værdier tættest på terræn. GRAVA-projektet har ligeledes estimeret vinter FK tættere på sommer FK, end sommer FK. Dette er ikke tilfældet for nogle af de andre områder, for hverken GRAVA-projektet eller dette projekt. Dette projekt estimerer cirka 55% af værdierne på terræn, sammenlignet med cirka 80% for GRAVA-projektet. Samtlige værdier fremgår af figur 10.10 for det sydlige område, hvor dette projekts resultater fremgår øverst og GRAVA-projektet nederst.



Figur 10.12.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det sydlige område for de fire simuleringsscenarier.

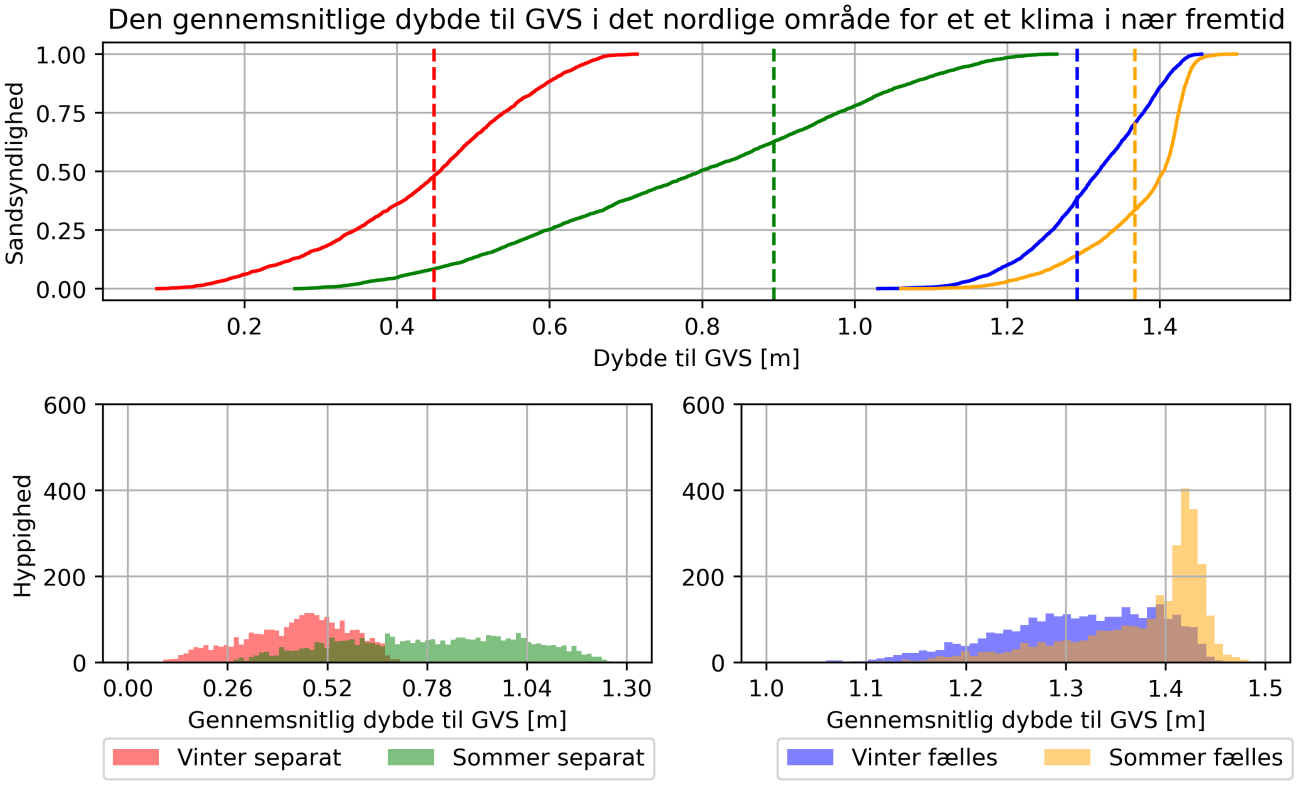
Det sydlige område fremgår som det mest kritiske område for begge projekter, hvilket fremgår ved andelen af værdier med under en meter til grundvandsspejlet. Samtidig er scenariet for sommer SK tættere på terræn for dette område end for de øvrige områder. Dette fremgår ved at cirka 35% af værdierne er på terræn for SK, hvor dette er cirka 15% for de øvrige områder, til sammenligning finder GRAVA projektet ikke vand på terræn i nogle af områderne i dette scenarie. De resterende scenerier er også estimeret tættere på terræn, hvilket ikke fremgår tydeligt.

10.2 Resultater for et klima en nær fremtid

Tilsvarende det nutidige klima, undersøges den gennemsnitlige dybde, 25 % fraktilen og samtlige værdier for hvert område. Dette gøres ved at vise den kumulative sandsynlighedsfordeling og histogrammer. De tilsvarende resultater fra GRAVA-projektet vil fremgå, for at undersøge forskellen projekterne imellem.

10.2.1 Gennemsnitlig dybde

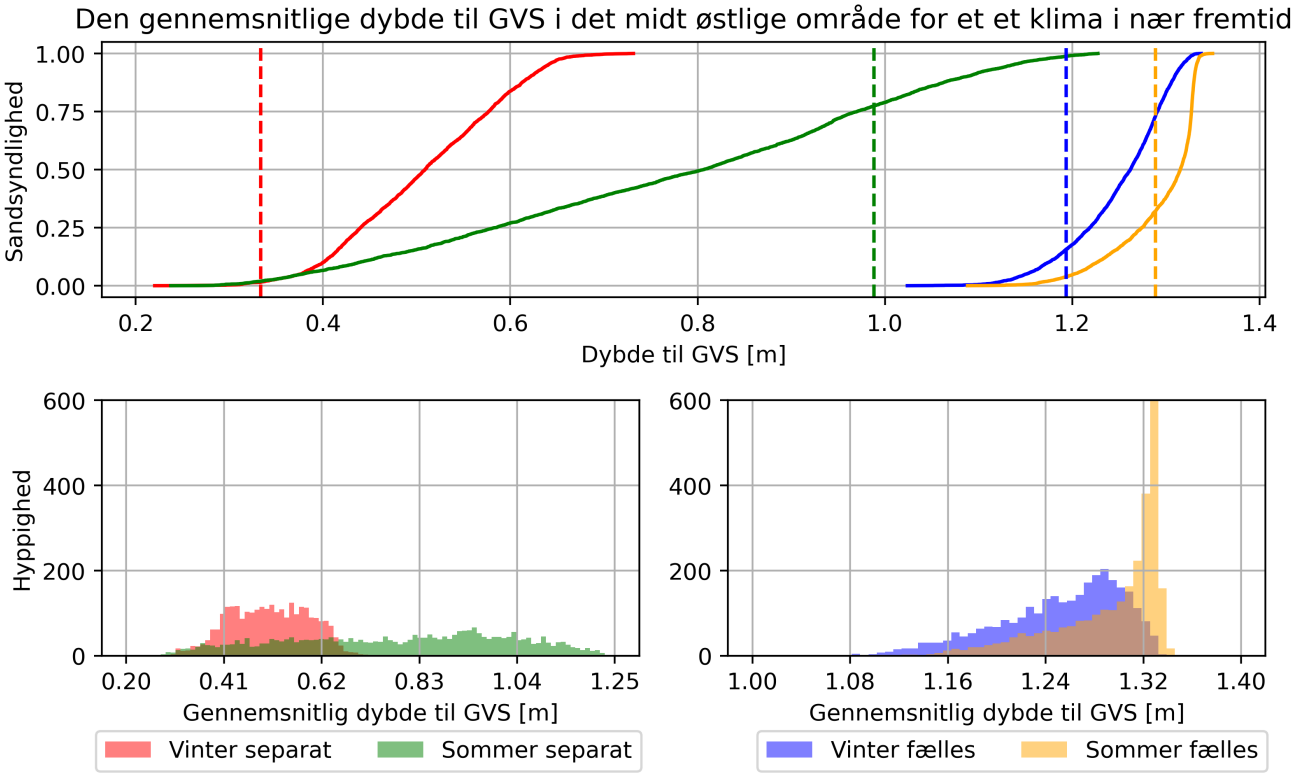
For den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet, fremgår det nordlige område af figur 10.13, hvor den stiplede linje indikerer resultatet fra GRAVA-projektet.



Figur 10.13.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det nordlige område for de fire simuleringsscenarier.

Der fremgår ingen betydelig forskel på FK scenarier for et nutidigt klima, som illustreret af figur 10.1 og et klima i nær fremtid af figur 10.13. Vinter SK af figur 10.13 er tilsvarende i spændets størrelse til det nutidige klima af figur 10.1, hvor sandsynlighederne er tættere på terræn for det nutidige klima. Tilsvarende er spændet for sommer SK større og længere fra terræn. Det fremgår af figur 10.13, at GRAVA-projektets resultater, er få centimeter fra medianen for vinter SK og de FK scenarier. GRAVA-projektet estimerer sommer SK centralt mellem vinter SK og de FK scenarier, og cirka ved sandsynligheden 0,6 sammenlignet med dette projekts simuleringer.

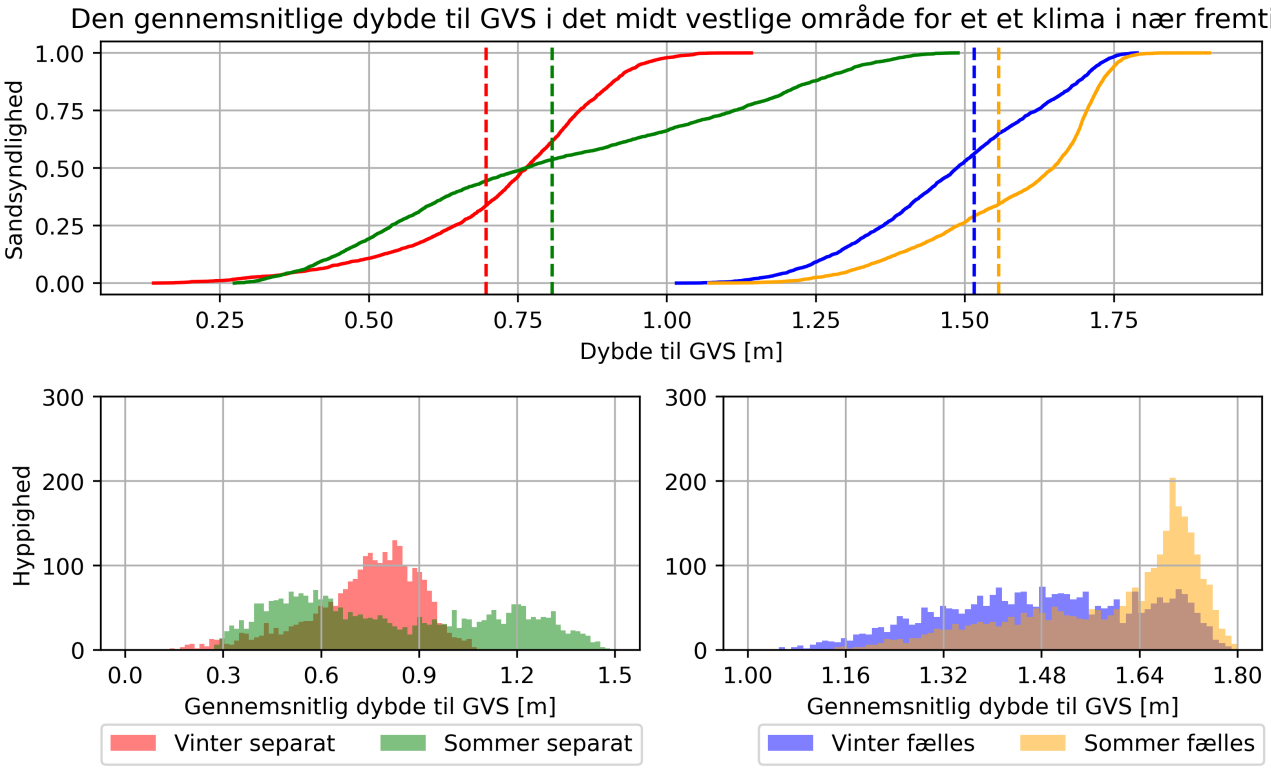
For det midt østlige område fremgår den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet af figur 10.14, hvor den stiplet linje indikerer resultatet fra GRAVA-projektet.



Figur 10.14. Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det midt østlige område for de fire simuleringsscenarier.

For det midt østlige område er GRAVA-projektets resultater cirka 5 cm fra medianen, for dette projektets sommer scenarier, hvorimod vinter scenarierne er det placeret i dette projekts ekstremværdier. De forskellige scenarier viser lignende tendenser for det midt østlige område, som for det nordlige område. SK scenarier er tilsvarende til det nutidige klima for området af figur 10.2, for de 15% af værdierne tættest på terræn, hvorefter forskellen øges. Sommer SK er estimeret til at have et stort spænd sammenlignet med de øvrige på cirka en meter. Sammenlignet med et nutidigt klima er der mindre forskelle imellem FK scenarierne, hvor SK vinter er estimeret cirka 10 cm længere fra terræn og for SK sommer er spændet større og længere fra terræn.

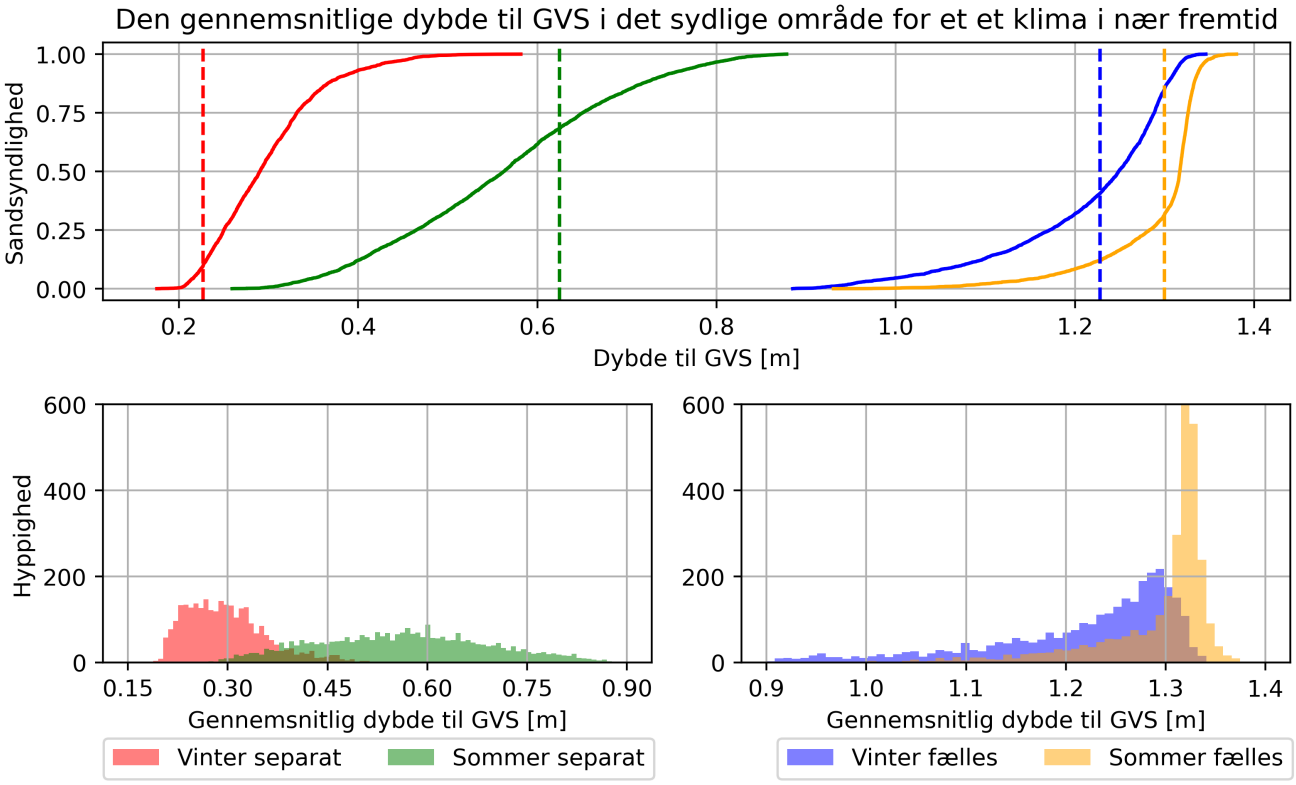
For det midt vestlige område fremgår den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet af figur 10.15, hvor den stiplede linje indikerer resultatet fra GRAVA-projektet.



Figur 10.15.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det midt vestlige område for de fire simuleringsscenarier.

For det midt vestlige område er forskellen mellem SK scenarier mindre sammenlignet med de øvrige områder. Ligeledes fremgår det at fra en sandsynlighed på cirka 0,10 til 0,5 har sommerscenariet værdier tættere på terræn end vinter scenariet. For SK scenarier har GRAVA-projektet estimeret dybden til grundvandsspejlet få centimeter fra dette projekts medianer for scenarierne. For begge FK scenarier, estimere GRAVA-projektet cirka 10 cm tættere på terræn end dette projekts median. Det midt vestlige område har estimeret et større spænd i dybden til grundvandsspejlet, for begge FK scenarier, sammenlignet med de øvrige områder. For begge sommer scenarier er spændet estimeret større end for et nutidigt klima af figur 10.3, hvorimod vinter tilfældene er tilsvarende i spænd, men med forskel i fordeling.

For det sydlige område fremgår den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet af figur 10.16, hvor den stiplet linje indikerer resultatet fra GRAVA-projektet.

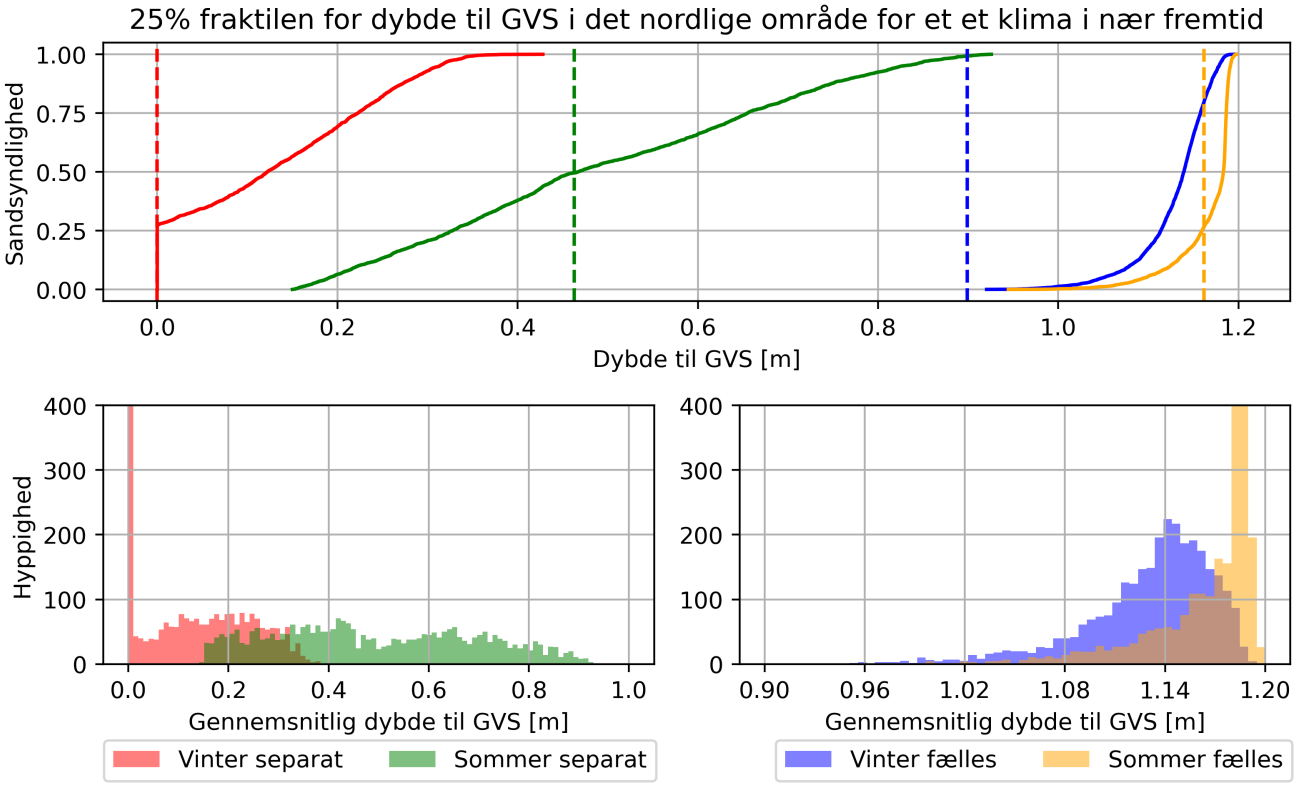


Figur 10.16.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det sydlige område for de fire simuleringsscenarier.

Dybden til grundvandsspejlet er kortere i det sydlige område i alle scenarier undtagen for sommeren i SK tilfælde, hvor der ikke er en betydelig afvigelse sammenlignet med de øvrige områder. For vinter SK, er næsten samtlige af middelværdierne under 60 cm fra terræn og cirka 85% under 40 cm fra terræn. GRAVA-projektets estimat er længere fra terræn end medianen for SK sommer og tættere på terræn end medianen for SK vinter. Ved FK er GRAVA-projektets estimat få centimeter fra dette projekts median for scenariet. Den eneste variation af betydning sammenlignet med det nutidige klima af figur 10.4, er at sommer SK er cirka 20 cm længere fra terræn i klimascenariet, nær fremtid.

10.2.2 25 % fraktilen

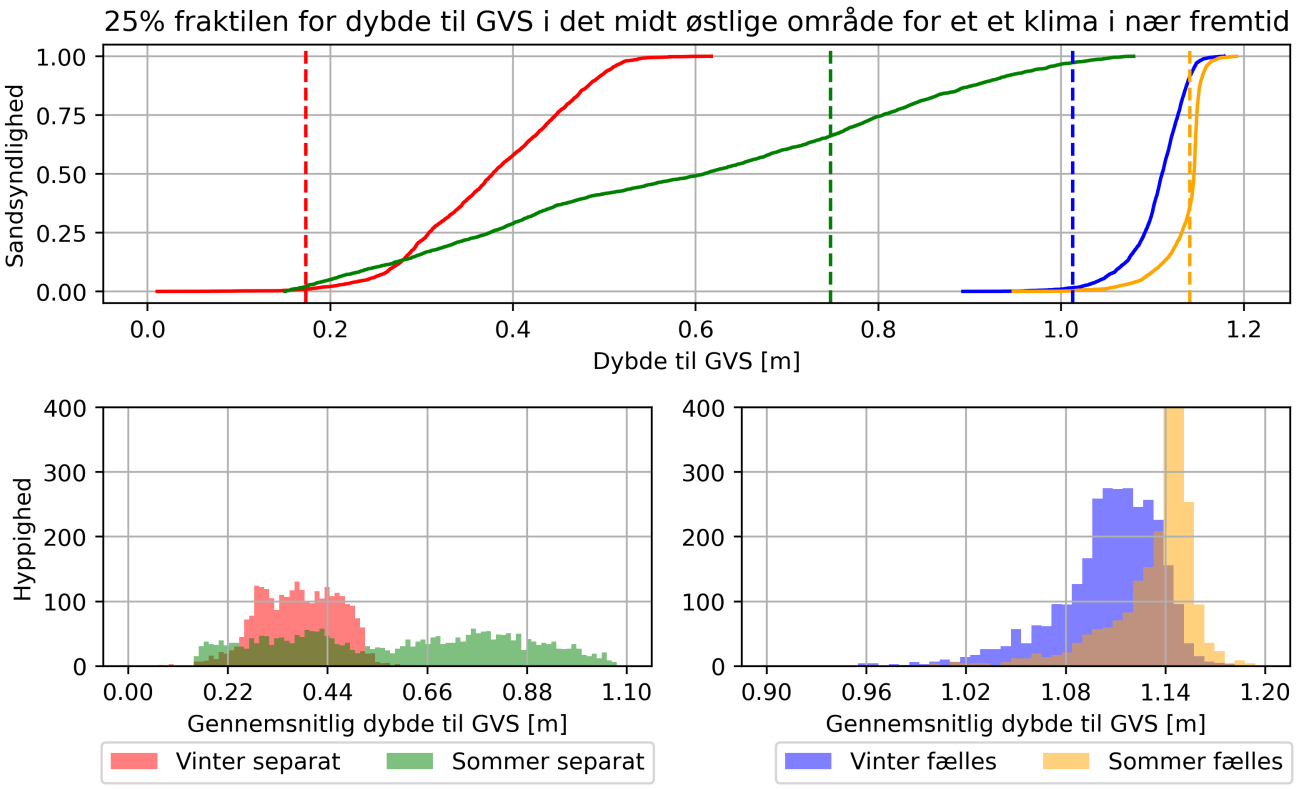
For det nordlige område fremgår 25 % fraktilen for dybden til grundvandsspejlet af figur 10.17, hvor den stiplet linje indikerer resultatet fra GRAVA-projektet.



Figur 10.17. Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det nordlige område for de fire simuleringsscenarier.

For det nordlige område fremgår det, at vinter SK, er estimeret til have cirka 30% af værdierne på terræn, hvor scenariets værdier med længst til terræn, er på cirka 45 cm for 25% fraktilen. Ved sommer SK har den kumulative sandsynlighedsfordeling et relativt lineært spænd, fra cirka 15 cm til cirka 90 cm. Begge FK scenarier har en estimeret en maksimal 25% fraktiler for dybde til grundvandsspejlet på 1,2 m, hvor den nedre grænse er under en meter fra terræn for de enkelte værdier i begge scenarier. Det kumulative sandsynlighedsplot er cirka fem centimeter tættere på terræn for vinter FK end for sommer FK, over størstedelen af spændet. GRAVA-projektet estimerer 25% fraktilen under dette projekts median, bortset fra sommer SK, hvor disse scenarier er placeret cirka ved projekts median. Ved sommer FK er GRAVA-projektets estimat få centimeter fra dette projekts median, hvorimod det for vinterscenariet er estimeret udenfor dette projekts spænd.

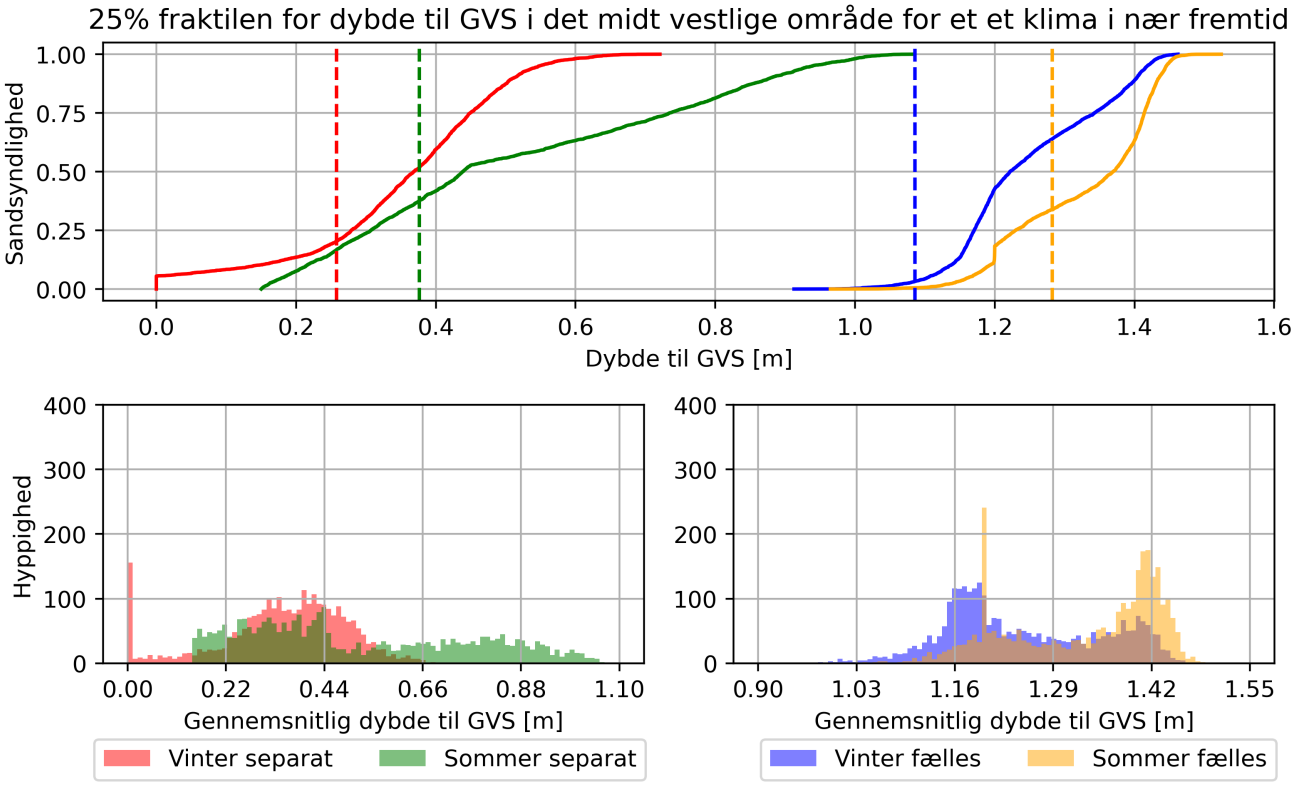
For det midt østlige område fremgår 25 % fraktilen for dybden til grundvandsspejlet af figur 10.17, hvor den stiplet linje indikerer resultatet fra GRAVA-projektet.



Figur 10.18.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det midt østlige område for de fire simuleringsscenarier.

Det midt østlige område fremgår der ingen betydelige forskel i det FK, sammenlignet med det nordlige område af figur 10.17, hvorimod der forskellen er mere tydelige for det SK. Begge SK scenarier har et cirka 20 cm større spænd, hvor SK vinter ikke er estimeret til at have værdier på terræn for 25% fraktilen. For begge vinter scenarier er GRAVA-projektets estimat ved ekstremværdierne for dette projekts spænd. For sommerscenarierne er GRAVA-projektets estimat ved medianen for FK og cirka 8 cm længere fra terræn ved SK.

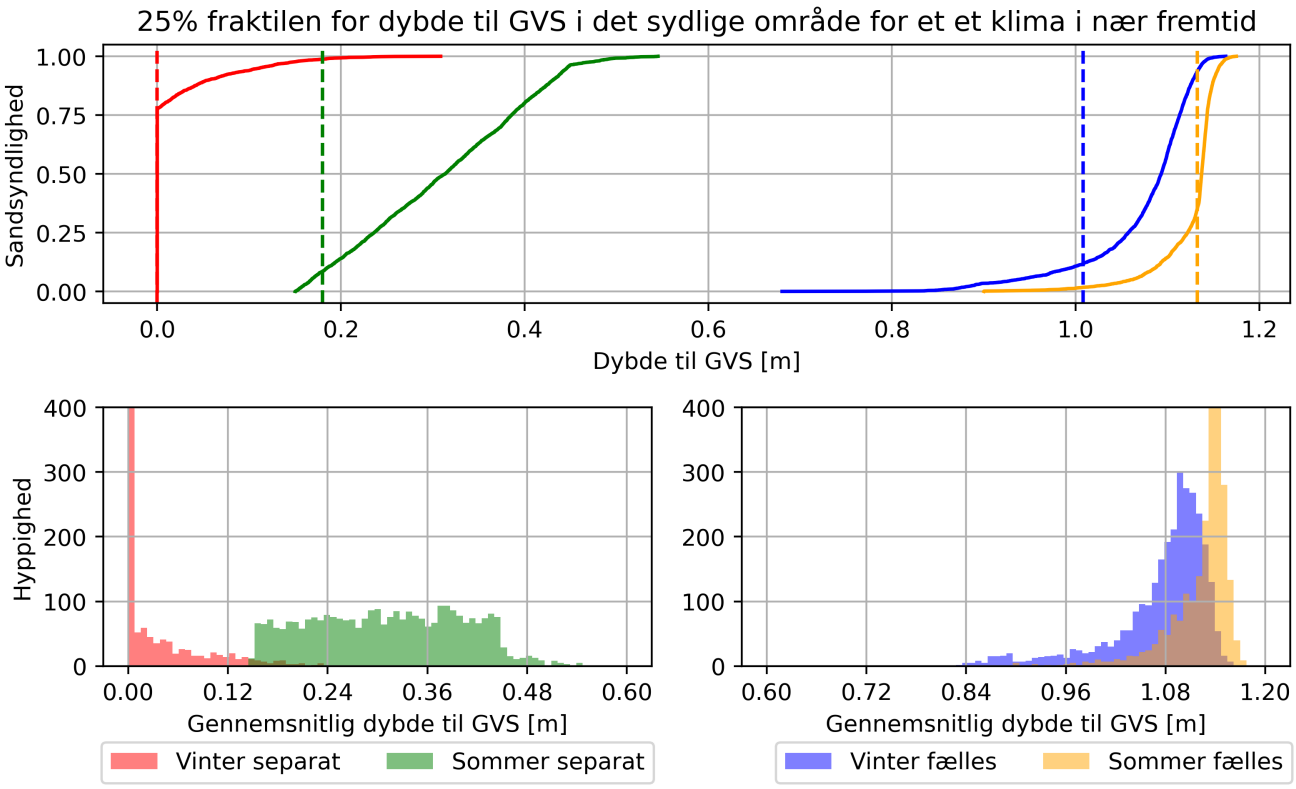
For det midt vestlige område fremgår 25 % fraktilen for dybden til grundvandsspejlet af figur 10.17, hvor den stiplet linje indikerer resultatet fra GRAVA-projektet.



Figur 10.19.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det midt vestlige område for de fire simuleringsscenarier.

Af figuren fremgår det, at 25% fraktilen er estimeret til at være på terræn, i cirka 5% af tilfældene for SK vinter. De FK scenarier er estimeret til at have et større spænd, sammenlignet med det nordlige område af figur 10.17 og midt østlige område af figur 10.18, hvor forskellen imellem de to scenarier, ligeledes er større. SK sommer er tilsvarende til scenariet fra det midt østlige område. GRAVA-projektet estimere kortere til grundvandsspejlet end dette projekts medianer for scenarierne. Ved sommer scenarierne er GRAVA-projektet cirka ved sandsynlighed 35%, hvor det for vinter er henholdsvist cirka 20% og 5% for SK og FK.

For det sydlige område fremgår 25 % fraktilen for dybden til grundvandsspejlet af figur 10.17, hvor den stiplet linje indikerer resultatet fra GRAVA-projektet.

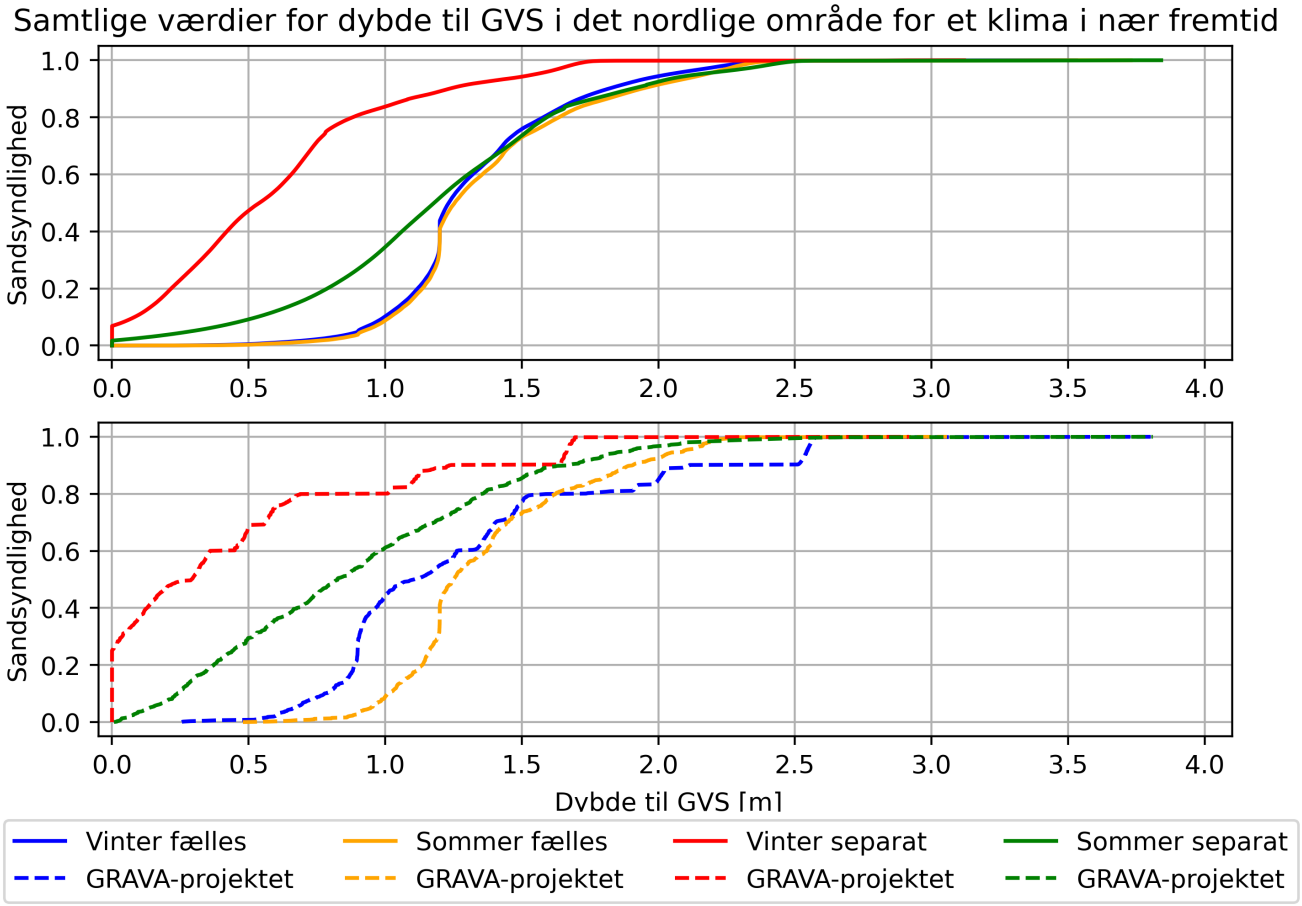


Figur 10.20.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det sydlige område for de fire simuleringsscenarier.

For det sydlige område er FK sammenlignelig med det nordlige og midt østlige område, hvor GRAVA-projektet estimering er tilsvarende til det midt østlige område sammenlignet med dette projekts resultater. GRAVA-projektet estimerer 25% fraktilen til at være på terræn for SK vinter, hvilken er i overensstemmelse med dette projekt, hvor cirka 75% af 25% fraktilerne er estimeret til at være på terræn. SK sommer har spænd på cirka 40 cm, hvilket er mindre end for de øvrige områder. GRAVA-projektet estimerer 25% fraktilen få centimeter fra dette projekts værdier tættest på terræn for SK sommer.

10.2.3 Samtlige simulerede værdier for scenarierne

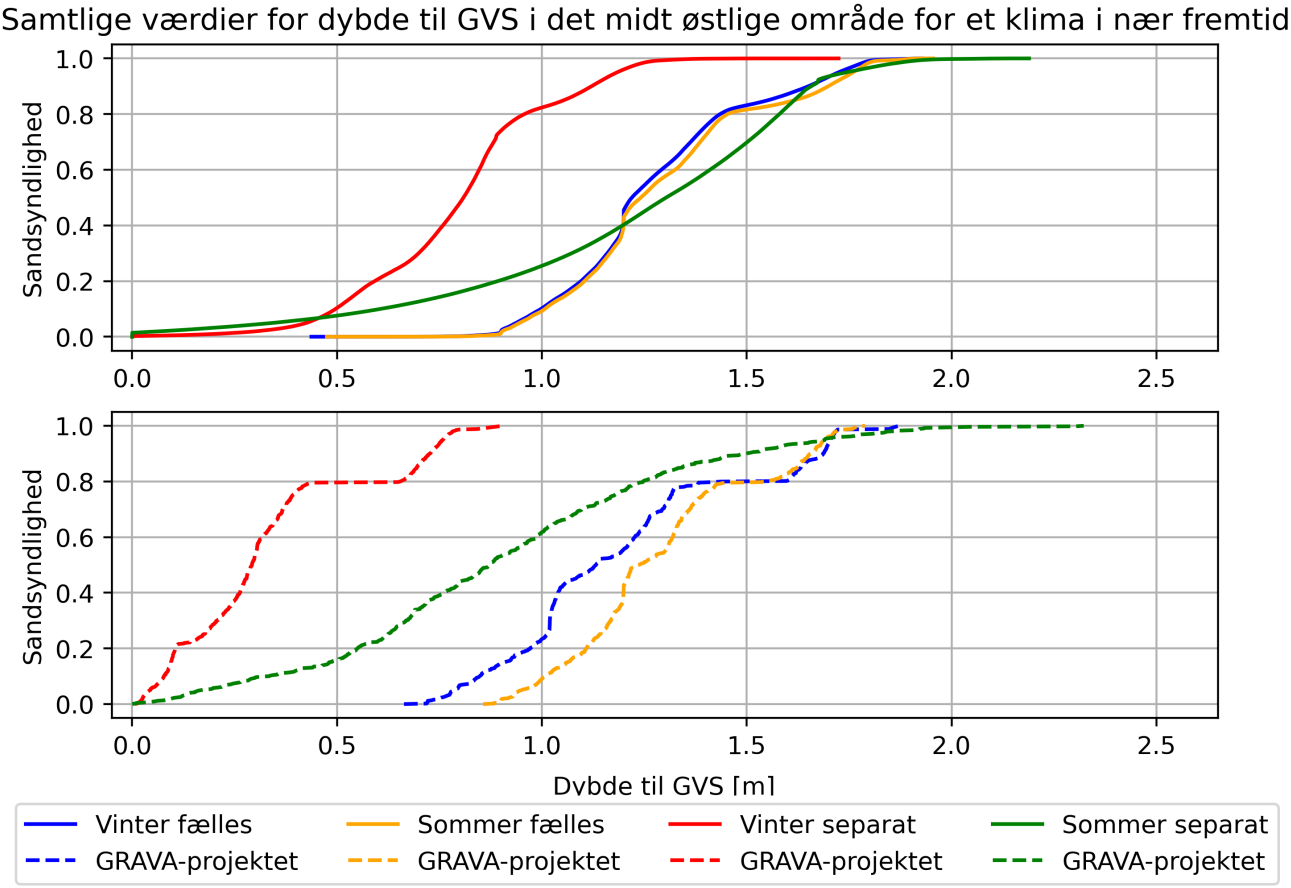
For de forskellige områder kan samtlige af de simulerede værdier ligeledes undersøges. Ud fra disse fremgår det, hvor stor en del af alle de simulerede værdier, hvor grundvandet er ved terræn. Samtlige simulerede værdier fremgår af figur 10.21 for det nordlige område, hvor dette projekts resultater er øverst og GRAVA-projektets nederst.



Figur 10.21.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det nordlige område for de fire simuleringsscenarier.

Af figur 10.21 fremgår det, at vinterscenariet SK er det mest kritiske i begge scenarier, hvor det for GRAVA-projektet er mest tydeligt, at disse scenarier med mest kritisk, da dette projekt har flere værdier på nul for vinter SK. For dette projekt er der mindre forskel imellem årstiderne for FK, end for GRAVA-projektet, hvor det modsatte er tilfældet for SK. For vinter separat er der lille forskel mellem GRAVA-projektet og dette projekt, da der er tilsvarende dybder til grundvandsspejlet ved de forskellige sandsynligheder. GRAVA-projektet simulerer generelt længere til grundvandsspejlet end dette projekt, hvilket særligt er tydeligt ved de øverste og nederste 20 %.

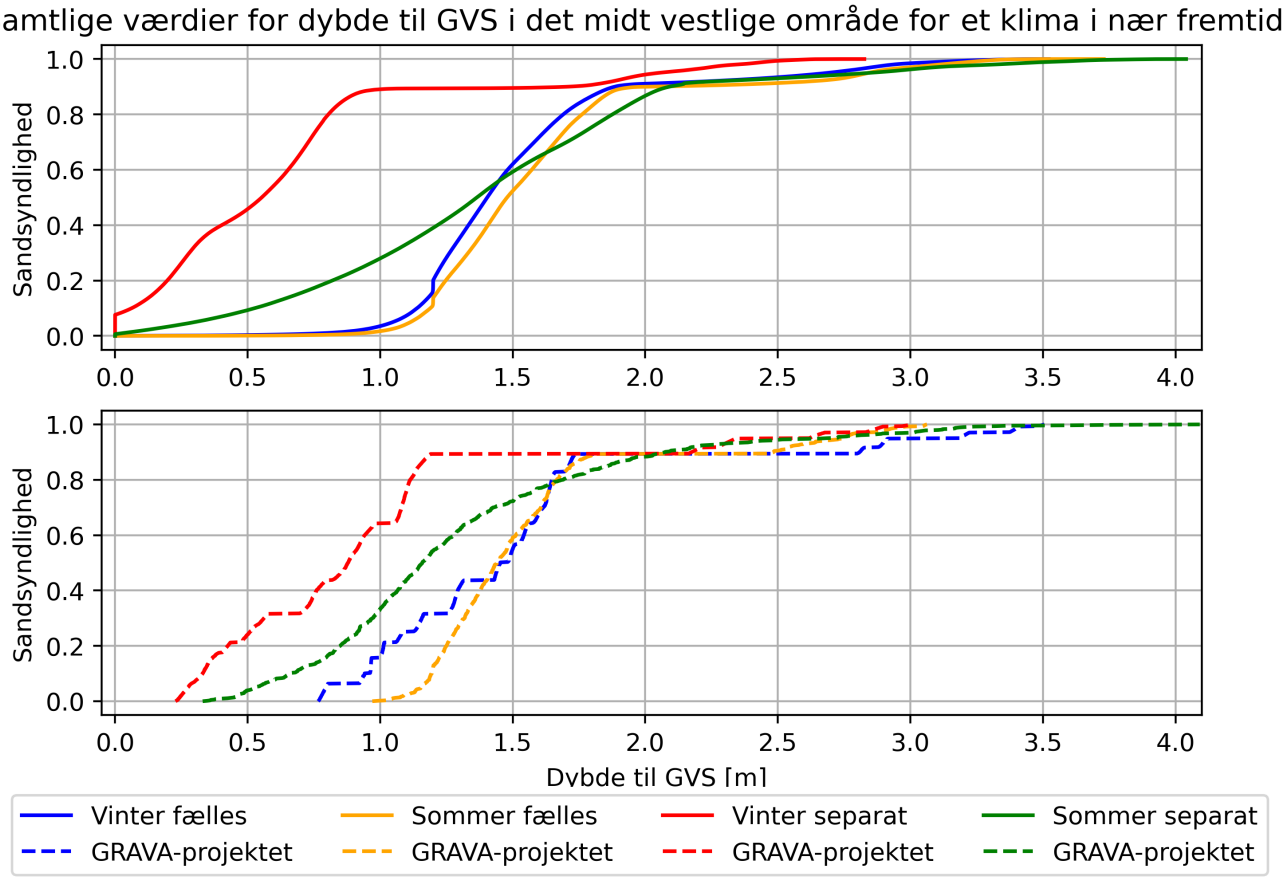
Samtlige simulerede værdier fremgår af figur 10.22 for det midt østlige, hvor dette projekts resultater er øverst og GRAVA-projektets nederst.



Figur 10.22.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det midt østlige område for de fire simuleringsscenarier.

Sammenlignet med det nordlige områder af figur 10.21, er det mindre tydeligt for det midt østlige, at vinter separatkloakeret er det mest kritiske for dette projekt. For GRAVA-projektet er dette mere tydeligt, hvor der ligeledes er mindre forskel scenarierne og kloaksystemerne imellem. For dette projekt er sommer SK både det scenarie med flest værdier på 0 og den største værdi. Tilsvarende til det nordlige område, er der begrænset forskel i de FK værdier for sommer og vinter i dette projekt. Spændet for det midt østlige område er mindre end for de øvrige områder, for både dette projekt og GRAVA-projektet, da spændet for dette område er henholdsvist cirka 2 m og cirka 1,5 m, hvor det for de øvrige områder er over 3 m.

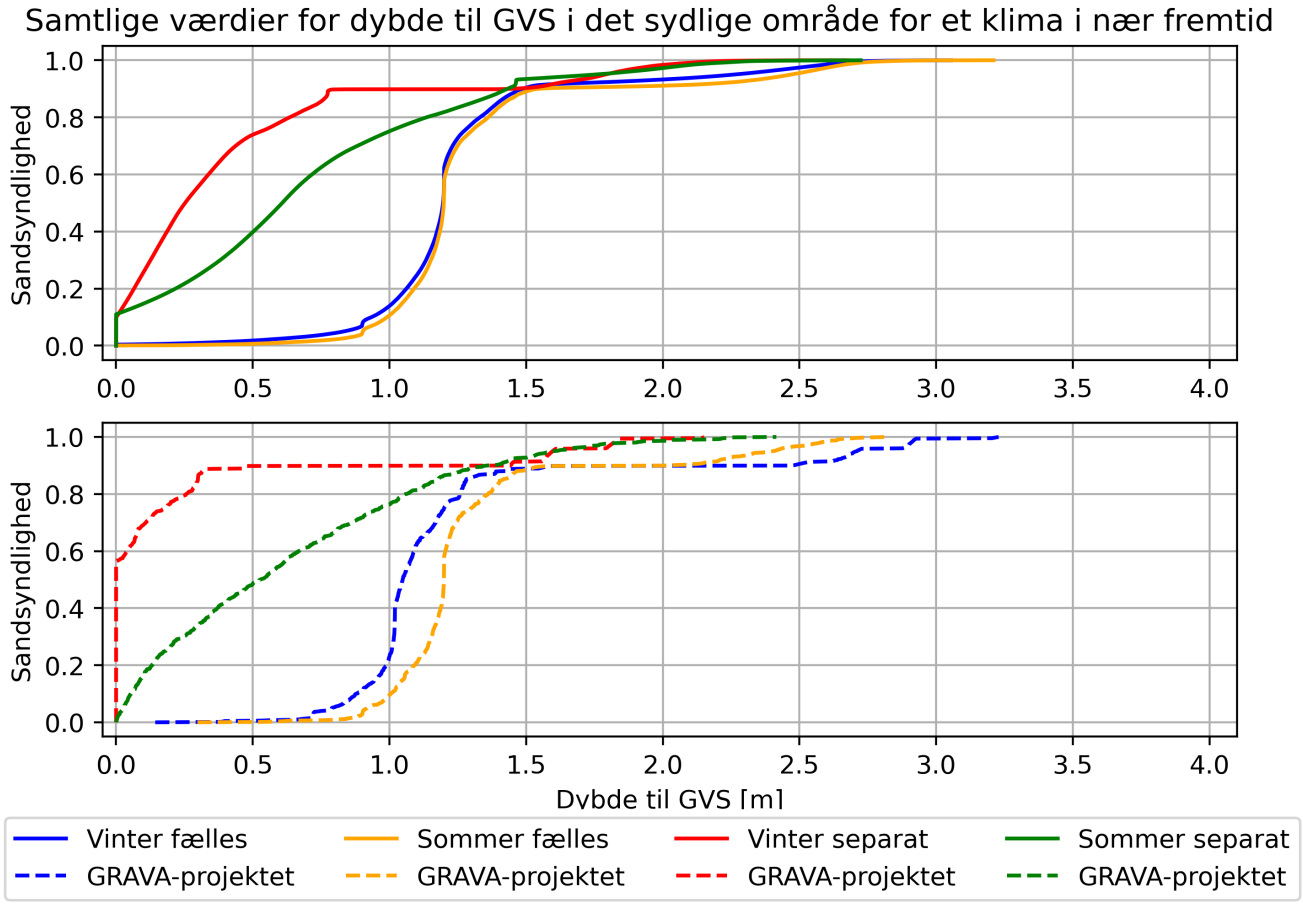
Samtlige simulerede værdier fremgår af figur 10.23 for det midt vestlige, hvor dette projekts resultater er øverst og GRAVA-projektets nederst.



Figur 10.23.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det midt vestlige område for de fire simuleringsscenarier.

Det midt vestlige område viser, at begge SK scenarier har cirka sammen andel af værdier på terræn, hvor forskellen i værdierne under en meter fra terræn er cirka 40%. Resultaterne fra FK scenarierne er sammenlignelige med de øvrige områder. Dette projekt estimerer SK i det midt vestlige område som mere kritisk end GRAVA-projektet gør, hvorfor resultatet fra GRAVA-projektet, viser mindre forskel imellem årstid og kloakering.

Samtlige simulerede værdier fremgår af figur 10.24 for det sydlige, hvor dette projekts resultater er øverst og GRAVA-projektets nederst.



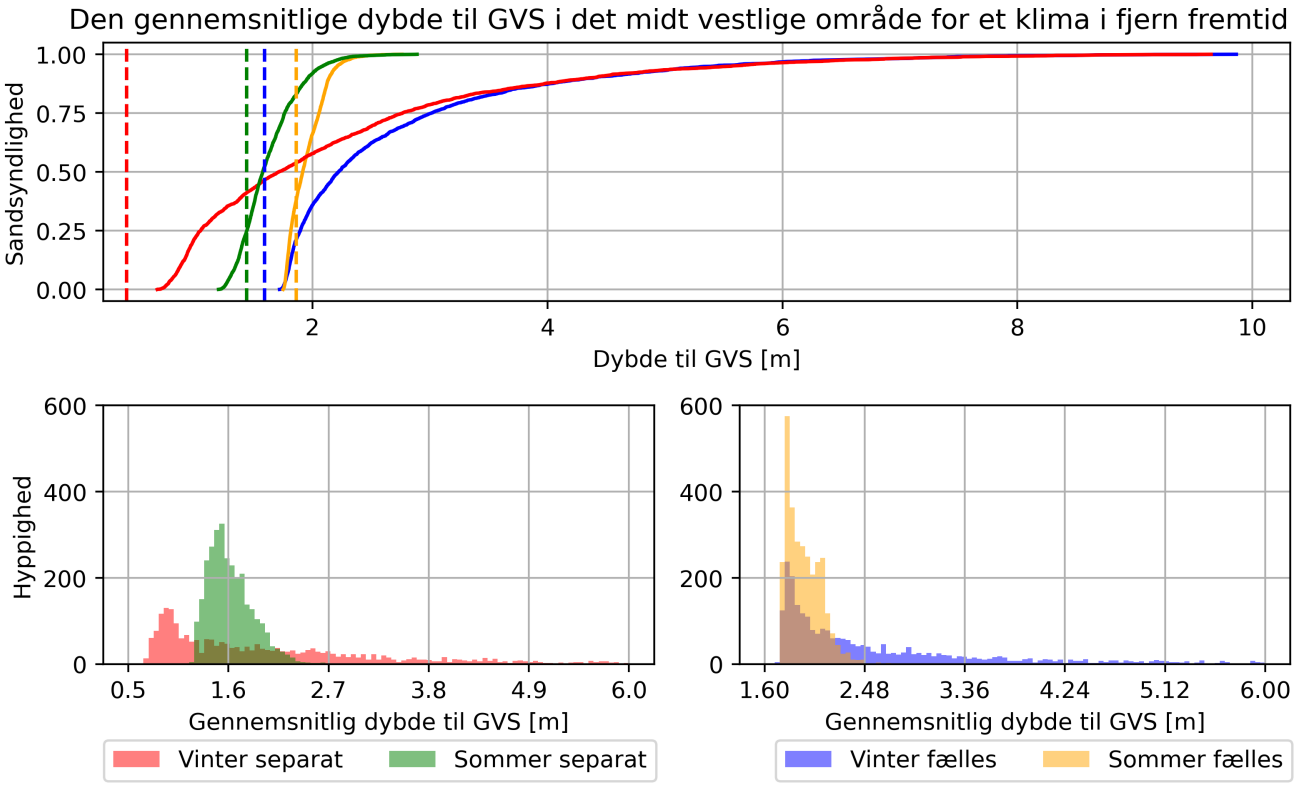
Figur 10.24.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det sydlige område for de fire simuleringsscenarier.

For det sydlige område estimerer GRAVA-projekt og dette projekt cirka samme dybde til grundvandsspejlet for sommer FK, hvor GRAVA-projektet estimerer vinter FK tættere på terræn. GRAVA-projektet estimerer ligeledes en større andel af værdierne på terræn for vinter SK end dette projekt, hvor det modsatte er tilfældet ved sommer SK. Forskellen mellem scenarierne for kloaksystemerne er generelt større for GRAVA-projektet.

10.3 Resultater for et klima i en fjern fremtid

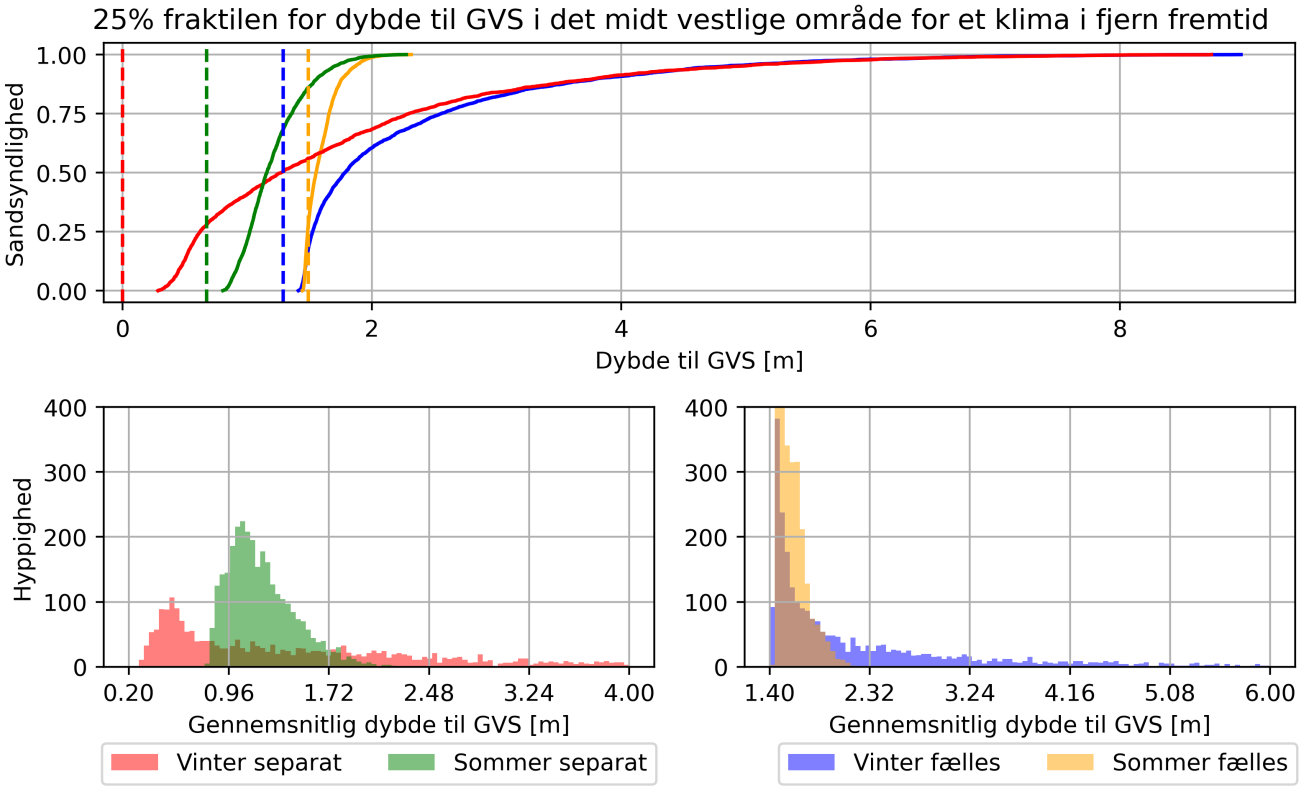
Dette projekts resultater for fjern fremtid er vurderet til at være mindre brugbare. Dette kan skyldes ustabilitet i simuleringerne, hvilket har resulteret i, at mange af modellerne ikke opfylder konvergeringsbetingelserne og derfor ikke har et resultat. De modeller som konvergerede, har varierende resultater, hvor nogle virker realistiske og andre urealistiske. De urealistiske resultater kendetegnes ved at have meget langt til grundvandsspejlet, hvor længden overstiger terrænkoten. Dette er vurderet til at være grundet ustabilitet, hvorfor disse kun er vist i bilag G.

For at illustrerer ustabiliteten i modellen er der vist resultater fra det midt vestlige område, hvor dette er mest tydeligt. Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet for det midt vestlige område, fremgår af figur 10.25, hvor GRAVA-projektets resultater er markeret med en stiplet linje.



Figur 10.25.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det midt vestlige område for de fire simuleringsscenarier.

Figuren viser, at begge vinter scenarier har et spænd for den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet på over 8 m. Dette er cirka en faktor 8 i forskel til de øvrige klimascenarier, hvorfor dette er vurderet usandsynligt. Topografien i området er primært fra kote [2-5], som vist på figur 4.4, hvorfor modellen har estimeret værdier under kote 0, som er vurderet usandsynligt. Sommerscenarierne er vurderet realistiske. Samme konklusion kan foretages ud 25% fraktilen for dybde til grundvandsspejlet, som fremgår af figur 10.26, hvor GRAVA-projektets resultater er markeret med en stiplet linje.



Figur 10.26.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det midt vestlige område for de fire simuleringsscenarier.

10.4 Opsamling og diskussion

Resultaterne viser, at en separatkloakering vil medføre vand på terræn for de forskellige områder. Andelen af vand på terræn varierer områderne imellem, hvor det særlig er kritisk for det sydlige område. Ved fælleskloakering observeres der ikke store variationer i resultaterne, for de forskellige områder og klimascenarier. Generelt observeres der størst variation årstiderne imellem ved separatkloakering, hvor denne forskel forstørres ved klimafremskrivning. Fjern fremtid viser urealistiske resultater for vinterscenarierne, hvorfor de resultater er negligeret. Sammenligning mellem dette projekts resultater og resultaterne fra GRAVA-projektet viser generelt tilsvarende resultater, hvor der er variation i, hvor kritisk de forskellige scenarier er vurderet for de forskellige områder. For eksempel vurderer GRAVA-projektet vinter separatkloakeret mere kritisk end dette projekt.

For resultaterne kan både metoden til at analysere resultaterne og resultaterne for både områderne og klimascenarier indlede til diskussion, hvorfor disse gennemgås.

10.4.1 Den benyttede metode til analyse af resultater

Beregningerne af dybden til grundvandsspejlet er foretaget ud fra det topografikort, som anvendes i simuleringerne. Alternativt kunne et topografikort med højere opløsning være anvendt, for at gøre topografien mere repræsentativ. Det kan diskuteres om dette skulle gøres. Dette er ikke gjort grundet, at forskellen i topografi for visse celler overstiger 2 meter, hvilket kan føre til misvisende resultater. Forskellen i topografien er illustreret i bilag på figur F.1. Samtidig er der en prædefineret geologi i det øverste lag af modellen, hvilket kunne have indflydelse på dette trykniveau.

Resultaternes delområder fra figur 8.8 er som tidligere nævnt, baseret på geografi, topografi og afløbssystem. Effekten af alternative inddelinger er ikke undersøgt, hvilket kan diskuteres om det skulle være gjort. Ligeledes kunne resultaterne have været mere relateret til grundejerne, hvor hver grund enten

var vist eller indgik som en værdi. Dermed var resultaterne mere konkrete for den enkelte grundejer, og beslutningerne kunne træffes på baggrund af, hvor mange og hvilke grunde som blev påvirket. Der kan derimod argumenteres for, at det er mere hensigtsmæssigt at undersøge på baggrund af områderne, hvilket formentlig også er den skala løsningerne vil blive udarbejdet på.

Analyserne er foretaget ud fra gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet og 25% fraktilen for dybden til grundvandsspejlet, for hver simulering. Ligeledes er samtlige værdier vist på tværs af alle simuleringer. Årsagen til disse valg er, at ved at vise værdier for gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet og 25% fraktilen for dybden til grundvandsspejlet, belyses effekten af den geologiske usikkerhed. Dermed kan der identificeres andelen af simuleringer, hvor 25% fraktilen er på terræn for hvert område. Samtidig kan dette suppleres med alle værdierne, på tværs af simuleringerne, hvor den globale 25% fraktil kan identificeres. Den gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet giver samtidig et udtryk for den generelle tendens for området, mens 25% fraktilen for dybden til grundvandsspejlet angiver, hvor terrænnært en fjerdedel af værdierne som minimum er.

Tilsvarende kunne valget af fraktil diskuteres, da der kunne være anvendt mindre fraktiler, hvilket er fravalgt, da der for visse scenarier har simuleret vand på terræn for over halvdelen af gennemregningerne. Samtidig ønskes det at illustrere kritiske værdier, som ligeledes er gældende for en vis del af området, hvorfor 25% fraktilen er valgt. Der kunne argumenteres for at inkludere 75% fraktilen for dybden til grundvandet, da stigende dybde til grundvandsspejlet ligeledes kan være kritisk. Dette havde primært været relevant, hvis kloaksystemet forbliver uændret, hvorfor dette ikke er vist.

Generelt kan det vurderes ud fra dette projekt, at separatkloakering vil medføre en væsentlig forværring af den nuværende situation. GRAVA-projektet når til samme konklusion. Overensstemmelse i modelresultaterne mellem GRAVA-projektet og dette projekt, variere dermed ikke i den overordnede konklusion, men variationer forekommer i, hvor kritisk scenarierne er vurderet. Da det er tydeligt, at separatkloakering vil medføre en væsentlig ændring, hvorfor nuanceringen dette projekt kan tilføje, ikke er nødvendig, for at nå denne konklusionen. Metoden kunne derimod anvendes til vurdering af lokale løsningsforslag, der påvirkes af lokal geologisk heterogenitet.

10.4.2 Resultater for områderne i Kærby

Resultaterne for områderne i Kærby viser generelt, at det sydlige område er mest kritisk, i forhold til vand på terræn, som vist på figur 10.4 og figur 10.8. Dette fremgår ved separatkloakerede scenarier, hvor forskellen imellem områder for fælleskloakerede tilfælde er mindre. Dette er i god overensstemmelse med, hvad valideringen viste, hvor kloaksystemets betydning i det simulerede er større end for det observerede trykniveau. Dette kunne indikere, at forskellen mellem kloaksystemerne, ikke er så markante som dette projekt har fundet dem til. Det observerede trykniveau har større variation mellem årstiderne end det simulerede. Dette underbygger teorien vedrørende, at kloaksystemet begrænser forskellene mellem årstiderne. Ligeledes er det midt vestlige område det er næst mest kritisk i forhold til vand på terræn, hvilket fremgår af figur 10.3 og figur 10.7. Dette kan skyldes færre kloakledninger i dette område, se figur 4.5 for kloakering og figur 8.8 for inddeling af områder. Det vestlige område er som det eneste ikke har Østerå op til området. Yderligere er Vestre Landgrøft ikke er implementeret som dræn, hvilket gør området til det mindst drænede i modellen. Det kan diskuteres om flere omfangsdræn er placeret i det midt vestlige område, da der er færre kloakledninger i dette område til at dræne grundvandet.

Af figuren 10.10 fremgår det, at det midt østlige område har det mindste spænd for dybden til grundvandsspejlet på tværs af alle simuleringer. Dette kan skyldes den omfattende kloakering og den korte afstand til Østerå, samt mindre geologisk betydning i dette område.

10.4.3 Resultaterne for opstillede klimascenarier

For de klimafremskrevne scenarier, kan der observeres tvetydige resultater i forhold til, hvorvidt dette er mere eller mindre kritisk end det nuværende klima. Dette kan til dels tilskrives den geologiske betydning på modelresultaterne og den opsætning af selve modellen.

Den geologiske betydning fremgår ved det store sandsynlighedsspænd for dybden til grundvandsspejlet og variationerne områderne imellem. Dermed begrænser den belyste geologiske usikkerhed, betydningen af klimafremskrivning. Klimafremskrivning er forbundet med usikkerheder, hvorfor et enkelt resultat formentlig er utilstrækkeligt, hvorimod dette projekt udtrykker et sandsynlighedsbaseret spænd for dybden til grundvandsspejlet. Samtidig er det ikke usikkerheden ved klimafremskrivning der belyses, men en usikkerhed mere der tilføjes.

For et klima fremskrevet til nær fremtid, fremgår det mindre kritisk for Kærby. For fælleskloakerede scenarier er der ingen betydelig forskel, hvilket formentlig skyldes kloaksystemets drænende effekt. Dette er tilsvarende til resultater fra Seidenfaden et al. [2022]. For sommerscenariet ved separatkloakering er der generelt dybere til grundvandsspejlet, hvilket følger forventningen om mindre regn i sommerhalvåret i fremtiden. Samtidig er grundvandsspejlet ved vinterscenariet separatkloakeret også længere fra terræn, på trods af forventninger om stigende mængder af nedbør i vinterhalvåret. En årsag til dette kan være, at for byområder, vil grundvandsspejlet falde mere om sommeren, end det vil stige om vinteren, på grund af høj befæstelsesgrad og tilslutningsgrad til afløbssystemet. På landsplan fandt Seidenfaden et al. [2022] at det terrænnære grundvand ville stige med [0-18 cm], hvorfor resultaterne kan diskuteres.

Ved sammenligning med GRAVA-projektet er variationer mellem resultaterne større for et klima i nær fremtid end for et nutidigt. Det fremgår ved, at GRAVA-projektets estimat, er placeret udenfor dette projekts sandsynlighedsbaserede spænd for dybde til grundvandsspejlet for figur 10.17, som viser 25% fraktilen for det nordlige område. Dette kan skyldes, at GRAVA-projekts model, er mere påvirkelig overfor klimaforandringer end dette projekts model, på grund af mindre hydrologiske gradienter.

Der foreligger også en usikkerhed angående modellen, i form af dens stabilitet. Ved de klimafremskrevne simuleringer var der nogle simuleringer, der ikke konvergerede, og derfor blev disse ikke inkluderet i resultaterne. En oversigt over, hvor mange simuleringer der konvergerede ved forskellige klimascenarier og kloaksystemer fremgår af tabel 10.1.

Tabel 10.1.Oversigt over, hvor mange simuleringer der konvergerede ved forskellige klimascenarier og kloaksystemer. Fælleskloakeret er angivet med FK og separatkloakeret er angivet med SK.

Scenarie	**Nutid**	**Nær fremtid**	**Fjern fremtid**
Vinter FK	3000	2995	2609
Sommer FK	3000	2998	2997
Vinter SK	3000	2736	2411
Sommer SK	3000	2998	2997

Nogle af de konvergerede værdier fra klimascenariet for fjern fremtid, er urealistiske, hvilket indikerer en delvis ustabil model. Derfor kunne det være berettiget at anvende mere kritiske betingelser for til konvergeringen. Dette kunne have resulteret i flere simuleringer som ikke konvergere, som ville mindske den geologi usikkerhed der bliver belyst. En mulig årsag til ustabiliteten kan være, at der opstår for store gradienter i grundvandsmodellen. Dette kan skyldes, at grundvandsdannelsen og potentialekortet har større variation og grovere opløsning, da gradienterne i en grov klimamodel projekteres ned til et finere diskretisering. Ved at interpolere imellem midtpunkterne i klimamodellen, kunne gradienterne mindskes. Ligeledes kunne større horisontal diskretisering afhjælpe dele af problemet.

Netop diskretiseringen er valgt på baggrund af at kunne opnå de bedste forhold for den stokastiske

generering af geologiske realiseringer. Grundet metoden anvendt i T-PROGS muliggør diskretiseringen at de gennemsnitlige udbredelser kan implementeres, så dette i større grad overholdes. Ud fra den mindste horisontale udbredelse som fremgår af tabel 7.6 kunne diskretiseringer være 20 m.

11 Følsomhed af boringers densitet

I dette kapitel vil effekten af antal boringer i Kærby blive undersøgt, på generering af geologiske realiseringer i T-PROGS. Denne analyse foretages på grund af observerede tendenser, på geologiske realiseringer, i områder med høj boringsdensitet, som beskrevet i kapitel 7. Formålet med analysen er, at bestemme et boringsmængde optimum til generering af lokalskala heterogenitet. Analysen foretages ved at sammenligne forskellene i de geologiske parametre, som T-PROGS benytter til at generere geologiske realiseringerne, og hvordan dette påvirker det simulerede trykniveau. De geostatistiske parametre udgør; volumetrisk fordeling, vertikal jordtype udbredelse og midlet hydraulisk ledningsevne.

11.1 Boringsmængdens effekt på den rumlige geologiske fordeling

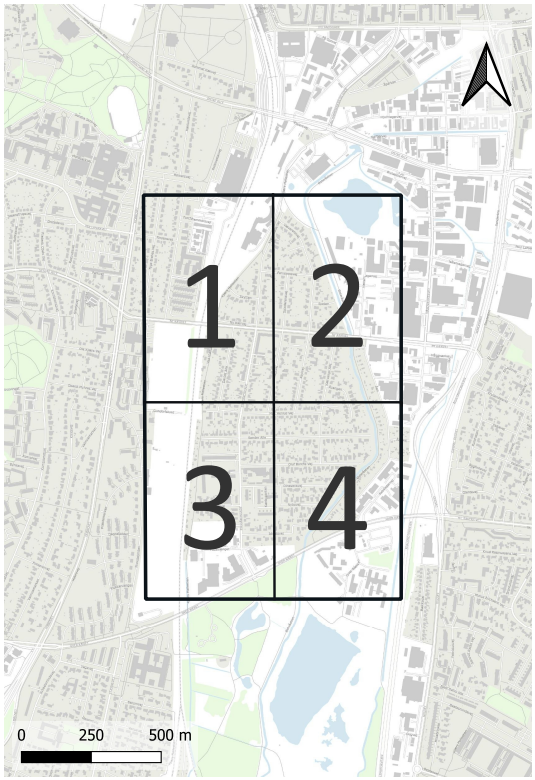
På grund af T-PROGS's beregningsmetode baseret på boreprofilsdata, og variationerne i boringer, er det nødvendigt, at udvælgelsen er tilfældig og er undersøgt på flest mulige scenarier. Da T-PROGS opererer med jordtyper, er det nødvendigt at parametrisere disse for at estimere lokale ændringer i de geologiske elementer. Parametriseringen er baseret på en fast hydraulisk ledningsevne for hver jordtype.

Det skal bemærkes, at der er negligeret lokalskala heterogenitet inden for de prædefinerede celler. En fast hydraulisk ledningsevne er blevet tildelt hver jordtype som en del af parametriseringen. De tildelte hydrauliske ledningsevner for hver jordtype er angivet i tabel 11.1.

Tabel 11.1.Hydraulisk ledningsevne for analysen fortaget i T-PROGS

Jordkategori	**Hydrauliske ledningsevne benyttet til analysen** $[m/s]$
Sand	10e-4
Kalk	10e-5
Fyld	10e-3
Ler	10e-10
Organiske jorde	10e-7

Der benyttes samme metode som tidligere beskrevet i afsnit 8, hvor den hydrauliske ledningsevne midles vertikalt. Dette resulterer i et todimensionelt område, der inddeles i fire delområder, som vist på figur 11.1. Opdelingen har til formål at kvantificere forskellene mellem hver iteration, da de volumetriske andele for de genererede geologiske realiseringer er varierende afhængig af boringerne. Den geostatistiske analyse er baseret på estimering af løbende middel for de volumetriske andele, hydraulisk ledningsevne. Inddelingen af det reducerede modelområde er fremgår af 11.1.



Figur 11.1. Inddelinger af Kærby i 4 2D sektioner.

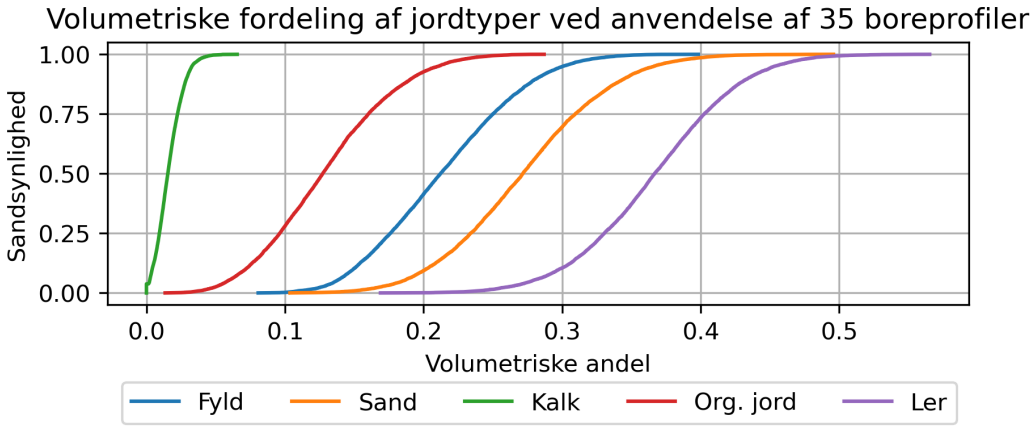
Det er vurderet nødvendigt at reducere modelområdet i den indledende geostatistiske analyse baseret på fjernelse af boreprofildata, hvilket betegnes som "reduktionsanalysen". Beregningstiden for fjernelse af boreprofildata og generering af geologiske realiseringer er meget omfattende for modellen som beskrevet i kapitel 5. For den fulde model tager det cirka 8 minutter at generere en geologisk model, mens det kun tager 10 sekunder for den reducerede model. Dette reducerer beregningstiden fra 2,5 måned til 3-4 dage. Den statistiske tilgang til teoretisk fjernelse af boringer bør omfatte alle tænkelige kombinationer. Ved modellering af det reducerede modelområde på cirka $1{,}5, \mathrm{km}^2$ med 125 boringer er densiteten væsentligt højere end for den fulde geologiske model, som har 39,5 boringer pr. kvadratkilometer.

Antallet af mulige kombinationer er beskrevet i bilag H.1, og skulle samtlige kombinationer undersøges, ville det medføre 4.25×10^{37} forskellige scenarier. Dette antal er vurderet som urealistisk at undersøge, grundet den lange beregningstid.

11.1.1 Bestemmelse af antal nødvendige iterationer

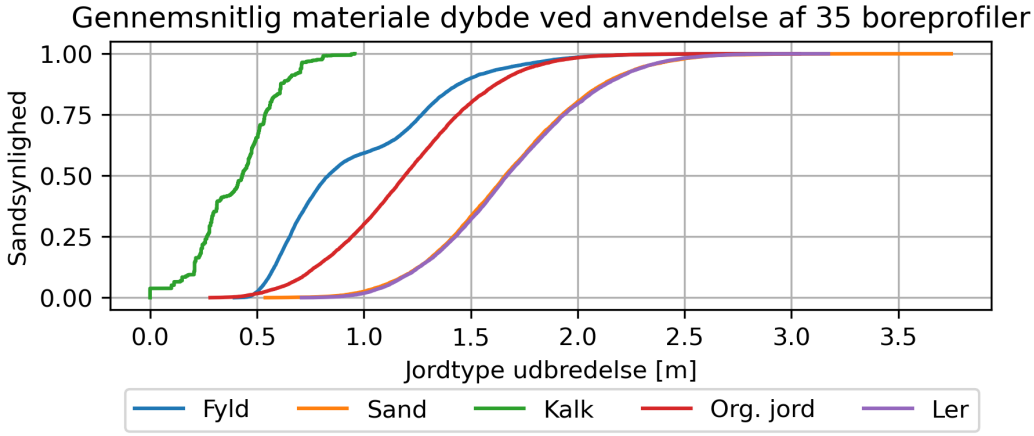
Det er fundet umuligt at teste for alle $4{,}25e + 37$ mulige kombinationer ved fjernelse af boringer. Hvorfor reduktionsanalysen er fortaget ved anvendelse af 35 boreprofiler 10000 gange på den reduceret geologiske model.

I forbindelse med reduktionsanalysen er resultaterne for hver enkelt reduktionsscenarie vist i bilag H.2.1. Dette inkluderer de beregnede gennemsnitlige hydrauliske ledningsevner, den vertikale udbredelse, samt den volumetriske andel af de 5 jordtyper for hver inddeling. Figur 11.2 viser den kumulative sandsynlighedsfordeling for hver af de 5 jordtypers volumetriske andel.



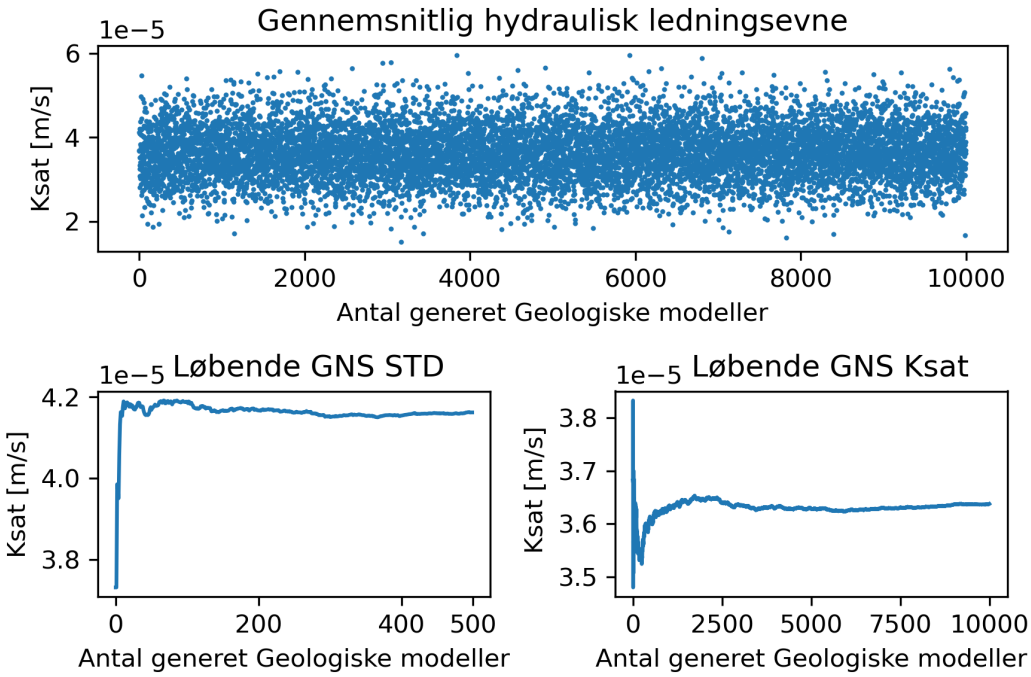
Figur 11.2.Den kumulative sandsynlighedsfordelingen for den volumetriske andel af jordtyperne ved anvendelse af 35 boreprofiler 10000 gange, vist for inddeling 1.

Vurderes den volumentriske andel på figur 11.2, kan et relativt stort spænd observeres på 4 jordtyper, som ikke er gældende for jordtypen kalk. Af figuren kan ler og sand observeres som værende de mest dominerede jordtyper i Kærbyområdet. Den volumetriske andel af jordtyperne for hver iteration, er vist i bilag på figur H.2, hvilket antyder ingen betydelig effekt ved mere end cirka 2000 iterationer. Nedenstående figur 11.3, viser den kumulative sandsynlighedsfordeling for hver af de 5 jordtypers udbredelse.



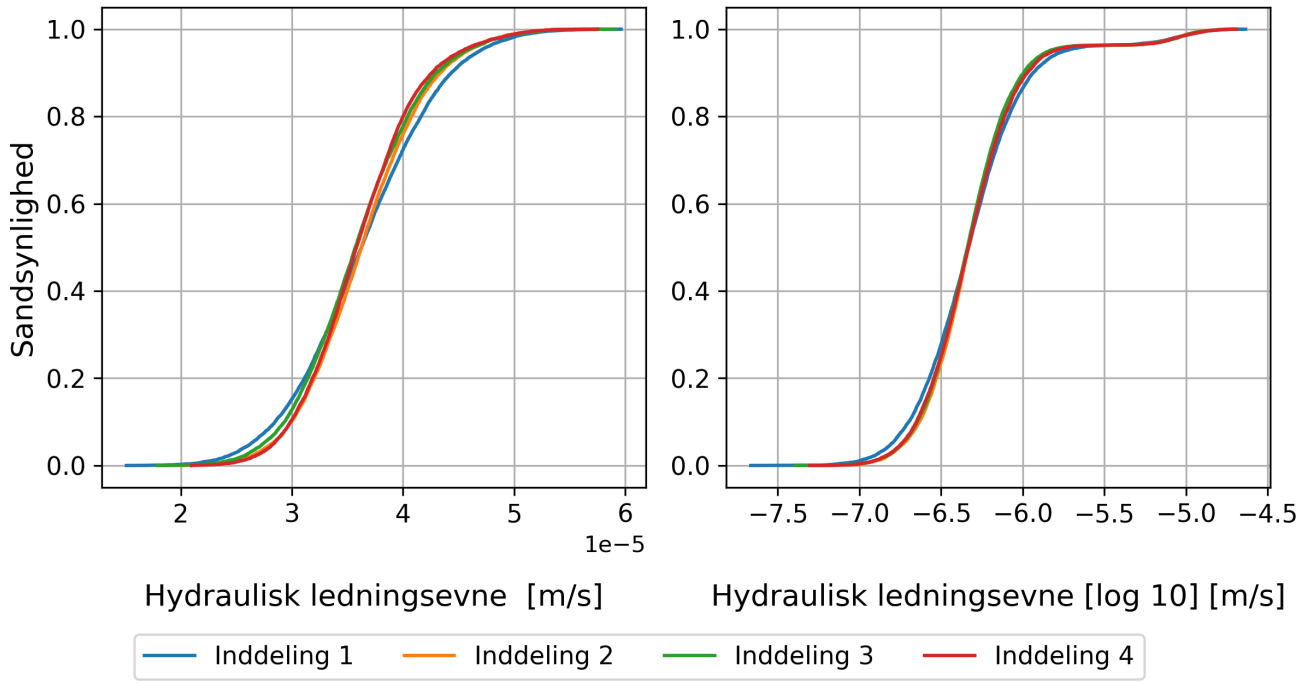
Figur 11.3.Den akkumulerede sandsynlighedsfordelingen for den gennemsnitlige udbredelse af jordtyperne ved anvendelse af 35 boreprofiler 10000 gange, vist for inddeling 1.

Af figur 11.3 fremgår det, at kalken har en relativt lille gennemsnitlig udbredelse. Dette kan skyldes, at størstedelen af boringerne i Kærby er cirka 3 meter dybe, mens kalken typisk er aflejret dybere. Fyld og organisk jord har en lignende sandsynlighedsfordeling for deres udbredelse. Ler og sand er de dominerende jordtyper i Kærby-området, og figur 11.3 viser, at udbredelsen af disse jordtyper er stort set identisk. Dette skyldes, den førnævnte dybde på størstedelen af boringerne kun går ned til maksimalt 3,5 meters dybde, hvilket begrænser den vertikale udbredelse af ler og sand. Den gennemsnitlige udbredelse for hver af de 10000 iterationer fremgår af bilaget på figur H.3, hvilket antyder, at der ikke er nogen betydelig effekt af at have mere end cirka 2000 iterationer. Den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne og det løbende middel den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne og standardafvigelsen for denne, for inddeling nr. 1 kan ses på figur 11.4.



Figur 11.4.Det løbende gennemsnit (GNS) for standardafvigelsen (std) og hydraulisk ledningsevne (Ksat) for hver geologisk realisering for inddeling nr. 1.

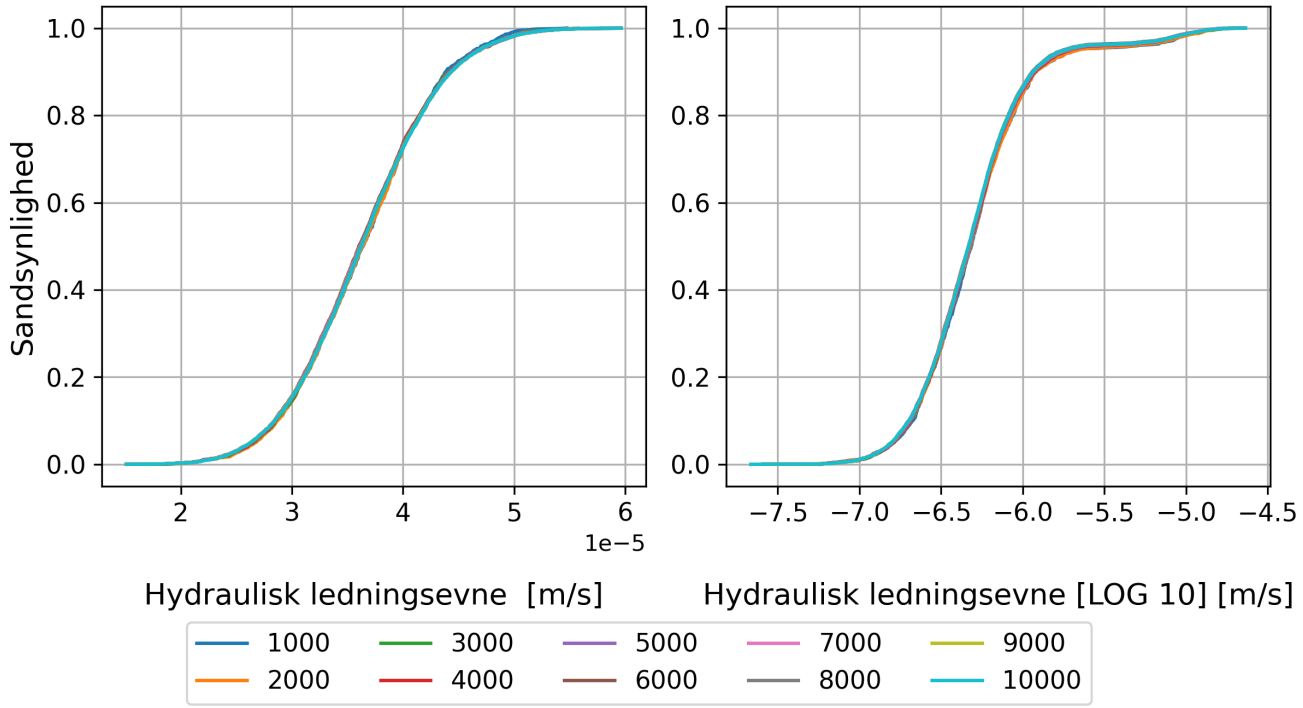
Nederst på figur 11.4 kan der observeres at det løbende middel for standardafvigelse og for den hydrauliske ledningsevne. Det løbende middel for den hydrauliske ledningsevne vurderes at konvergere mod en stabil værdi efter omkring 3000 iterationer. Den samme tendens kan observeres for standardafvigelsen, som stabiliseres efter cirka 200 iterationer. Figur 11.5 viser den kumulative sandsynlighedsfordeling for den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne (både normal og 10-tals logaritmisk) for hver af de 4 inddelinger.



Figur 11.5.Figuren viser den kumulative sandsynlighedsfordeling af den midlet hydrauliske ledningsevne, normal og 10-tals logaritmisk, for hver af de 4 inddelinger.

Figur 11.5 viser den kumulative sandsynlighedsfordeling af den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne

(både normal og 10-tals logaritmisk) for hver af de 4 inddelinger. Der kan ikke observeres nogen væsentlig forskel i den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne mellem de fire delområder, hverken i den normale eller logaritmiske fordeling. Den logaritmiske skala er valgt for at illustrere eventuelle mindre variationer i den hydrauliske ledningsevne. Resultaterne indikerer minimale variationer mellem de fire delområder. Det antages derfor, at samme konklusion kan drages, uanset hvilken inddeling der analyseres. På figur 11.6 kan den kumulative sandsynlighedsfordeling af den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne (både normal og logaritmisk) observeres i 1000 iterationsintervaller for inddeling 1.



Figur 11.6.Figuren viser den kumulative sandsynlighedsfordeling af den midlet hydrauliske ledningsevne, normal og 10-tals logaritmisk, observeres ved inddeling af 1000 iterationsintervaller,

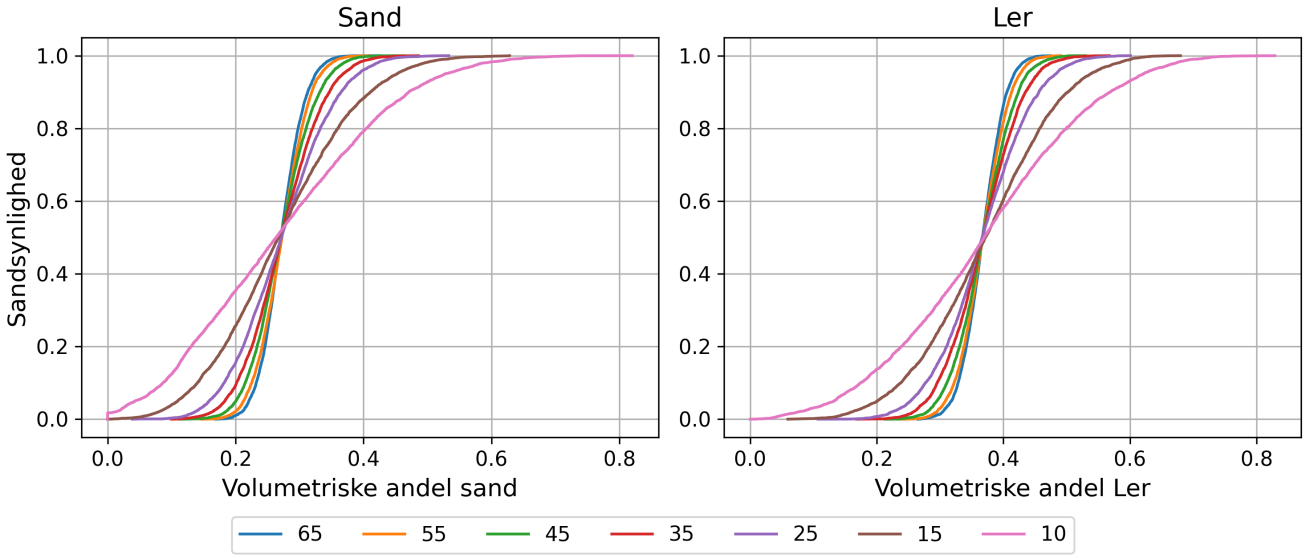
På figur 11.6 kan den kumulative sandsynlighedsfordeling af den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne (både normal og logaritmisk) observeres ved inddeling af 1000 iterationsintervaller. Analysen er udført for at vurdere betydningen af antallet af iterationer. Dette er baseret på de observationer af ensartede variationer, der generelt er blevet observeret i den indledende iterations analyse, som fremgår af bilag på figurerne H.2 og H.3. Som det fremgår af figur 11.6, kan der ikke observeres nogen signifikant forskel mellem resultaterne for 1000 og 10000 iterationer i den kumulative sandsynlighedsfordeling af den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne. På baggrund af dette, kan det konkluderes, at en reduktion af antallet af iterationer er mulig uden en signifikant indflydelse på resultaterne.

Analysen viser at 5000 iterationer af tilfældig udvælgelse af boringer er tilstrækkeligt. Dette er baseret på geostatistiske parametre T-PROGS benytter og parametisering af geologiske realiseringer. Dette antal iterationer er blevet valgt som en acceptabel balance mellem præcision og beregningstid. Ved at udføre 5000 iterationer for hvert scenarie sikres en tilstrækkelig mængde variation og repræsentativitet i de genererede geologiske realiseringer. Dette giver mulighed for en pålidelig analyse af effekten af fjernelse af boreprofiler på de geologiske parametre.

11.1.2 Bestemmelse af antal nødvendige boringsreduktioner

Til analysen af boringsdensitetens effekt på realiseringer af geologiske realiseringer og modellering af geologisk heterogenitet, er 5000 iterationer valgt og anvendelse af [10,15,25,35,45,55,65] boreprofiler. Disse intervaller er valgt, med henblik på at bestemme den nødvendige densitet af boreprofil.

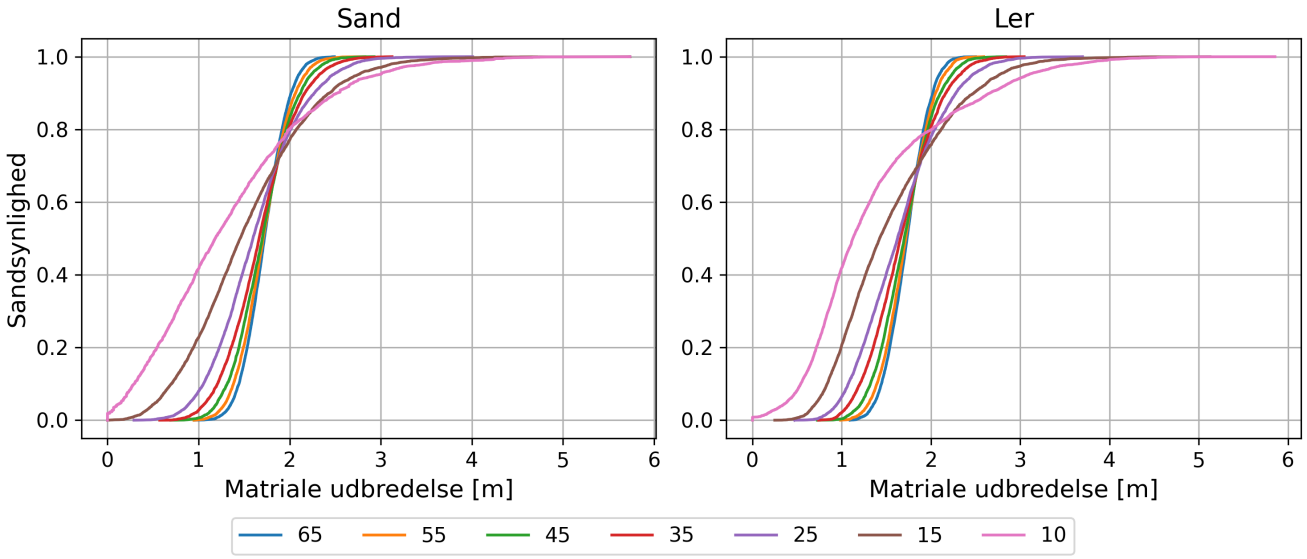
Analysen foretages ud fra ændringen i den volumetriske jordtype fordeling, gennemsnitlige jordtype udbredelse og gennemsnitlig hydrauliske ledningsevne. Nedenstående figur 11.7, viser den kumulative sandsynlighedsfordeling for den volumetriske fordeling af sand og ler for det reduceret modelområde.



Figur 11.7. Volumetriske fordeling af sand og ler, ved anvendelse af syv intervaller af boreprofiler.

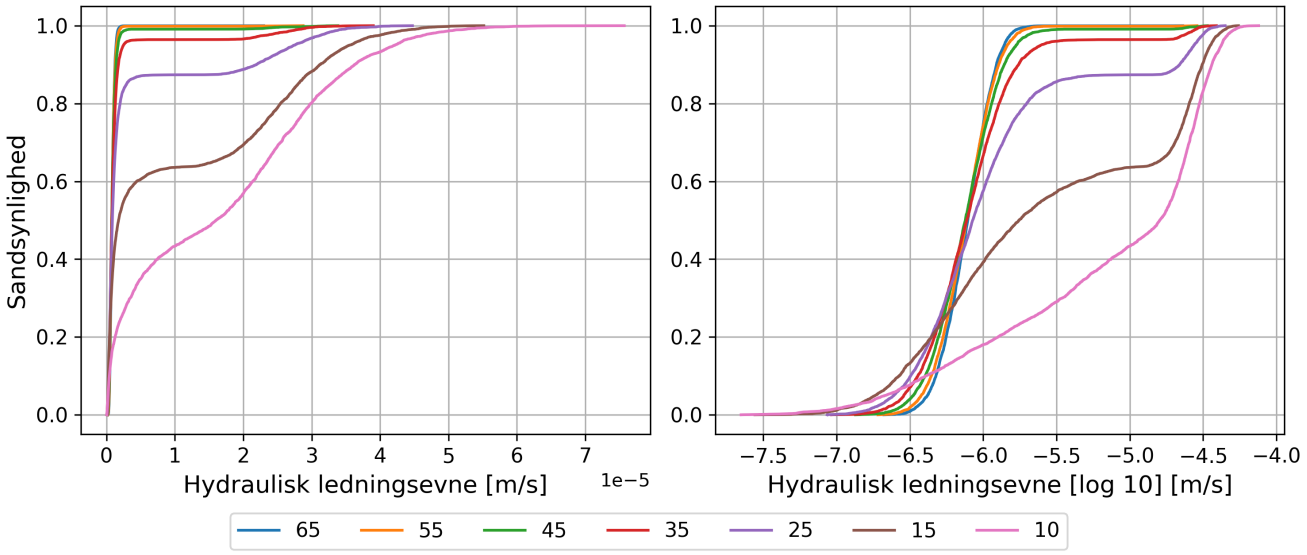
Figur 11.7 viser de 2 mest dominerende jordtyper i Kærby, hvor ler kan observeres som den mest dominerede i størstedelen af tilfældene. Det kan yderligere observeres, at en reduktion af boringer i modellen har en effekt på den volumetriske fordeling af jordtyperne. På baggrund af figuren kan det antages, at effekten ved anvendelse af [35-65] boreprofiler, er uvæsentlig, da sandsynlighedsfordelingerne for disse er sammenlignelige, hvorfor antallet af boringer som fjernes, er mere væsentligt, end hvilke boringer, som fjernes. Ved anvendelse af $[10 - 25]$ boreprofiler, observeres en tydelig ændring i den volumetriske fordeling af sand og ler. Ud fra ovenstående figur 11.7, kunne en hypotese være, at disse sand og ler linser er meget lokalt dominerende, da disse er meget varierende ved væsentlig reduktion af boringer. Den volumetriske fordeling af sand og ler, varierer henholdsvis fra [0 - 0,6] og fra [0 - 0,8] ved generering af geologiske realiseringer med 10 boreprofiler. Den kumulative sandsynlighedsfordeling for de tre resterende jordtyper fremgår af bilag på figur H.5.

Den volumetriske fordeling af de 5 jordtyper har stor variation, ved generering af geologiske realiseringer og reduktion af anvendte boringer. I bilag af tabel H.4 fremgår minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for den volumetriske fordeling for hver af de fem jordtyper af de syv boringsreduktioner. Nedenstående figur 11.8, viser den vertikale udbredelse af sand og ler på det reducerede modelområde.



Figur 11.8.Den vertikale udbredelse af sand og ler, ved anvendelse af 10 - 65 boreprofiler.

Figur 11.8 viser den gennemsnitlige udbredelse af sand og ler i det reducerede modelområde. Den gennemsnitlige udbredelse for de 3 resterende jordtyper kan ses i bilaget på figur H.6. Det kan observeres af figur 11.8, at sand og ler har cirka samme gennemsnitlige jordtype udbredelse i Kærby-området. Ved anvendelse af [35 - 65] boreprofiler, fremgår der ikke en tydelig forskel i den kumulative jordtype udbredelse for sand og ler. Den observerede tendens ændres ved yderligere reduktion af boringer. Ved anvendelse af $[10 - 25]$ boreprofiler, observeres en tydelig ændring i den vertikale udbredelse af sand og ler. Ud fra ovenstående figur 11.8, kunne en hypotese være, at som førnævnt er sand og ler lokalt dominerende, hvilket også fremgår af jordtype udbredelsen. Den gennemsnitlige udbredelse af sand og ler er næsten identisk. Den vertikale jordtype udbredelse af sand og ler, varierer henholdsvis [0 - 6 m] ved generering af geologiske realiseringer ud fra 10 tilgængelige boreprofiler. I bilag af tabel H.5 fremgår minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for den gennemsnitlige udbredelse, for hver af de fem jordtyper af de syv boringsintervaller. Da den horisontale jordtype udbredelse er beregnet, ved skalering af den vertikale udbredelse som beskrevet i 7.4, er disse ikke vist i dette kapitel. Figur 11.9, viser den hydrauliske ledningsevne for det reducerede modelområde inddeling nr. 1.

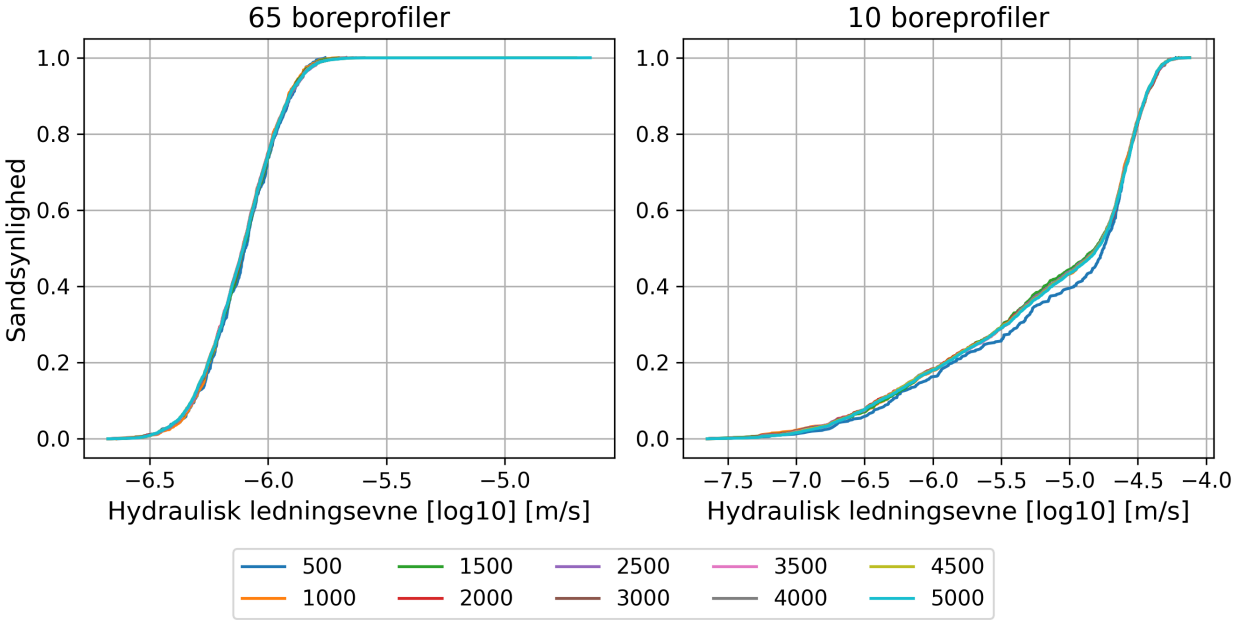


Figur 11.9.Den hydrauliske ledningsevne for det reducerede modelområde inddeling nr. 1, henholdsvis normalt og 10-tals logaritmisk

Figur 11.9, viser den hydrauliske ledningsevne for det reduceret modelområde inddeling nr. 1, både normalt og 10-tals logaritmisk. Det kan yderligere observeres, at reduktion af boringer har en tydelig effekt på den hydrauliske ledningsevne. Fordelingen af den hydrauliske ledningsevne, vist til venstre på figur 11.9, viser væsentligt mindre variation ved de lave værdier, sammenlignet med fordelingen af den logaritmisk hydrauliske ledningsevne. De tre resterende inddelinger er vist i bilag på figur H.7 og figur H.8. Da de kumulative sandsynlighedsfordelinger er sammenlignelige for anvendelse af [35-65] boreprofiler, antages det at den tilfældige udvælgelse af boringer er af mindre betydning. Dette skyldes, at den hydrauliske ledningsevne er en parametrisering af de volumetriske jordtype andele, og derfor følger den samme tendens. Den observerede tendens ændres, som også vist på figur 11.7 ved yderligere reduktion af boringer. Ved anvendelse af $[25 - 10]$ boreprofiler, observeres der en tydelig ændring i den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne. Dette kan tilskrives, at der er en faktor én million i forskel på den hydrauliske ledningsevne for sand og ler

Ud fra ovenstående figur 11.9, antyder fordelingen af den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne for inddeling nr. 1, at være væsentligt påvirket af mængden af boringer benyttet til geologiske realiseringer. Det kan observeres, at den hydrauliske ledningsevne stiger ved fjernelse af boringer. Dette indikerer, at de geologiske jordtyper med mindst hydraulisk ledningsevne bliver dominerende, for det reduceret modelområde ved anvendelse af 35 boreprofiler eller mindre. I bilag af tabel H.6 fremgår minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for den hydrauliske ledningsevne, for hver af de fem jordtyper af de syv boringsreduktioner.

På nedenstående figur 11.10, kan den kumulative sandsynlighedsfordeling af den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne logaritmisk, observeres ved inddeling i iterations intervaller, ved anvendelse af 10 og 65 boreprofiler for inddeling nr. 1. Analysen fortaget i forbindelse med denne figur, har til formål at vurdere, antallet af nødvendige iterationer. Den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne er inddelt i 500 iterationsintervaller for at undersøge effekten på sandsynlighedsfordelingen af den hydrauliske ledningsevne.



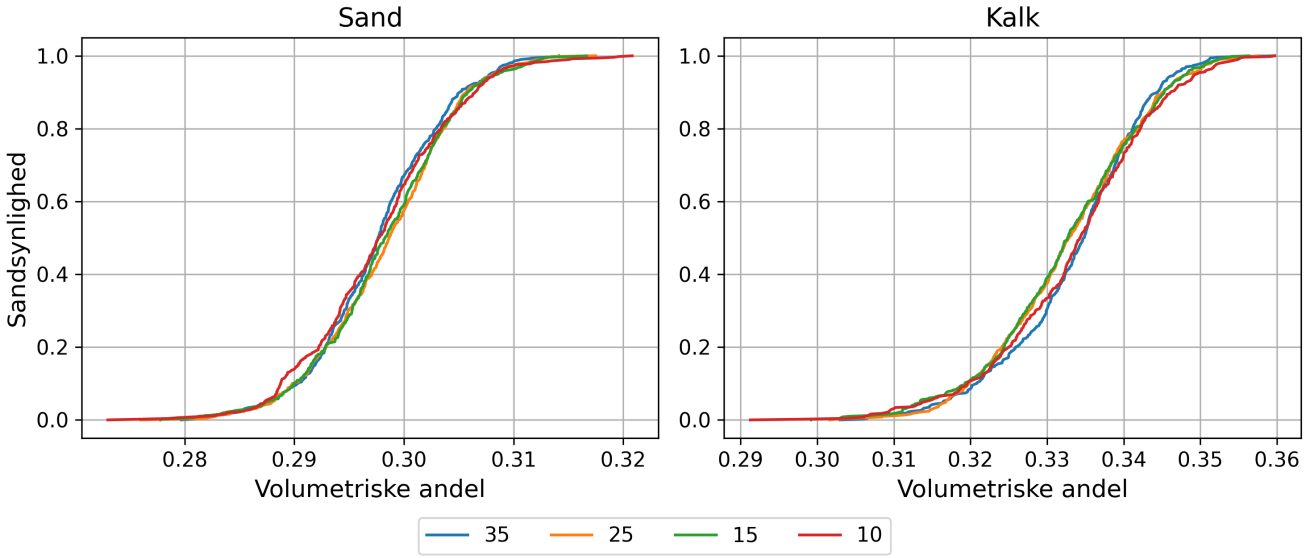
Figur 11.10.Den hydrauliske ledningsevne for det reduceret modelområde inddeling nr. 1, henholdsvis normalt og logaritmisk inddelt i intervaller af 500 iterationer

Ved anvendelse af 65 og 10 boreprofiler observeres der en mindre afvigelse mellem 500 og 5000 iterationer. Dette indikerer, at 500 iterationer er tilstrækkeligt til generering af geologiske realiseringer og beregning af terrænnært grundvand. De resterende reduktioner og deres påvirkning fremgår i bilag på figur H.9

11.1.3 Effekten af boringsreduktion på den fulde model

For grundvandsmodellen udarbejdet i forbindelse med dette projekt, er effekten af boringsdensiteten undersøgt5.4. Dette er gjort ved analyse af den volumetriske andel, vertikale jordtype udbredelse og fordeling af hydraulisk ledningsevne vist ved generering af 500 stokastiske geologiske realiserer.

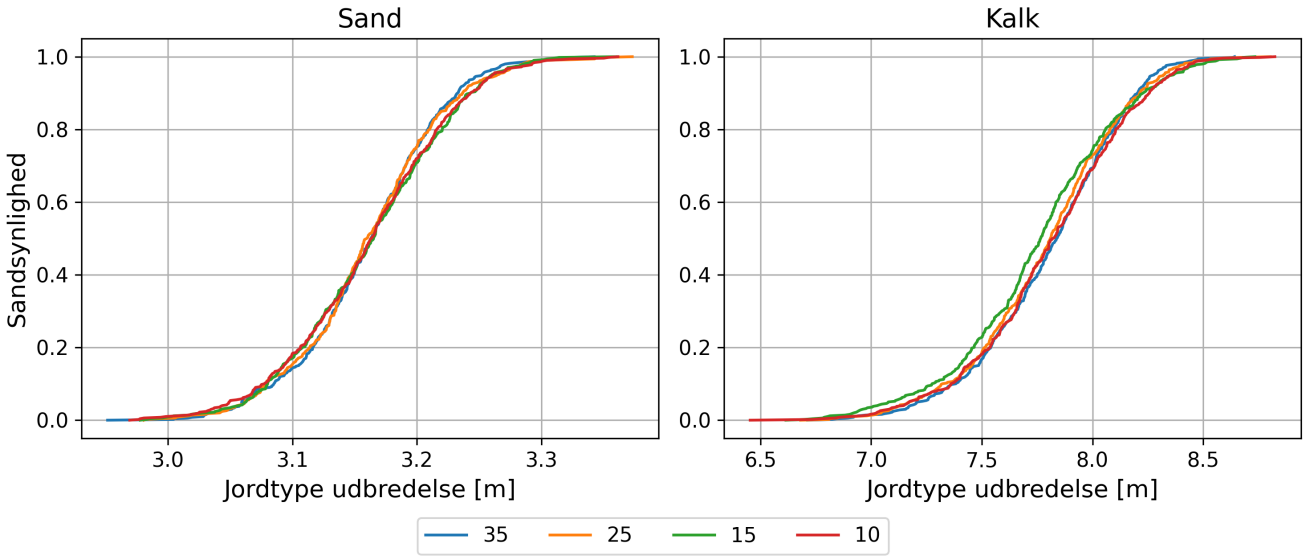
Det må tilskrives, af den statistiske analyse for reduktion af boreprofiler og dennes effekt på generering af geologiske realiserer i T-PROGS, er baseret på en reduceret model. Dette giver en sammenligning med resultaterne fra den reducerede model og giver indsigt i forskellene mellem de to tilgange. Hvorfor det er ønsket at analysere på eventuelle forskelle i kumulative fordelinger. Nedenstående figur 11.11, viser den kumulative sandsynlighedsfordeling for den volumetriske fordeling for sand og ler for den fulde geologiske model.



Figur 11.11. Volumetriske fordeling af sand og ler, ved anvendelse af 10 - 35 boreprofiler i Kærby for den fulde model.

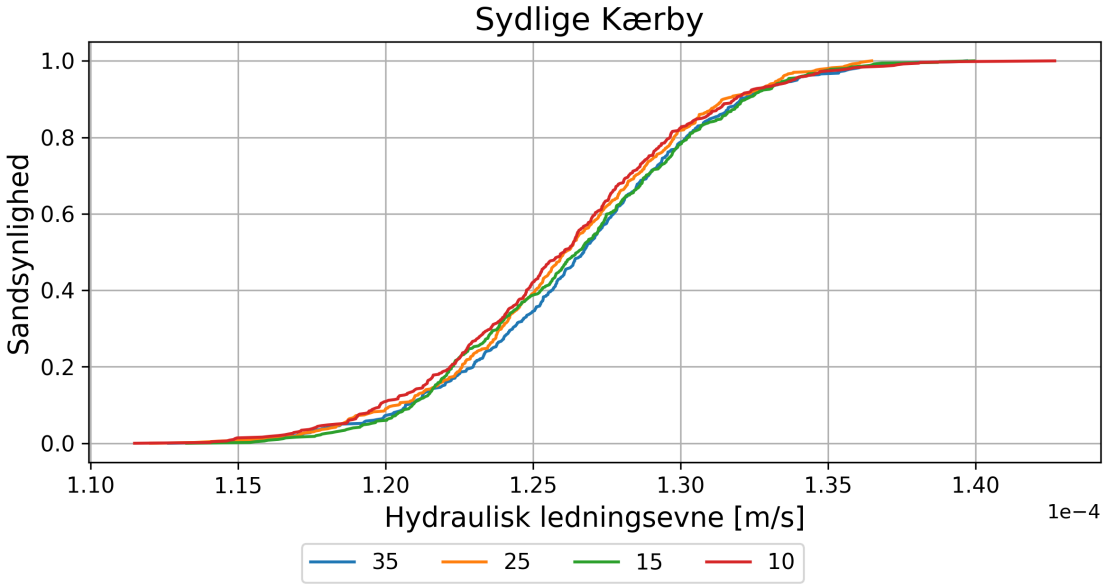
Figur 11.11 illustrerer den volumetriske fordeling for kalk og sand, hvor kalk kan observeres som værende den mest dominerede i størstedelen af tilfældene. Hvilket er i overensstemmelse med at kalk er baggrundsmateriale. Det kan observeres, at en reduktion af boringer i modellen ikke har en væsentlig effekt på den volumetriske fordeling af jordtyperne. Derfor kan en hypotese være, at effekten af at fjerne boringerne i Kærbyområdet, er uvæsentlig, da sandsynlighedsfordelingerne for disse er sammenlignelige. Yderligere indikerer det, at antallet af boringer fjernet og hvilke boringer der fjernes begge er uvæsentlig. Ud fra ovenstående figur 11.11, kunne en hypotese være, at kalk og sand linser til stede i Kærbyområdet, er meget små, set i forhold til det fulde modelområde. Den kumulative sandsynligheds fordeling for de 3 resterende jordtyper er vist i bilag på figur H.10.

Den volumetriske fordeling af de 5 jordtyper udviser mindre variation, ved generering af geologiske realiseringer end ved den reduceret model for Kærbyområdet. Nedenstående figur 11.12, viser den vertikale udbredelse af sand og kalk den fulde geologiske model.



Figur 11.12.Den vertikale udbredelse af sand og ler, ved anvendelse af 10 - 35 boreprofiler i Kærby for den fulde model.

Figur 11.12 viser de to mest dominerende jordtyper i Kærby, hvor størst vertikal udbredelse kan observeres for kalk efterfulgt af sand. Der fremgår ikke væsentlig forskel i den kumulative sandsynlighedsfordeling af jordtype udbredelse for sand og kalk, ved anvendelse af $[10-35]$ i Kærbyområdet. Ud fra ovenstående figur 11.12, kunne en hypotese være, at som førnævnte sand og kalk udbredelser er dominerende uden for Kærby, hvilket også kan siges om jordtype udbredelsen. Den vertikale jordtype udbredelse af sand og kalk, varierer henholdsvis cirka 0,3 meter for sand og cirka 2 meter for kalk. Hvilket indikerer at den midlet vertikale udbredelse for kalk er væsentlig påvirket at den høje geologiske heterogenitet af kalk i Kærby. Den gennemsnitlige udbredelse for de tre resterende jordtyper, er vist i bilag på figur H.11. Figur 11.13 viser fordelingen af den hydrauliske ledningsevne i det sydlige område af Kærby.



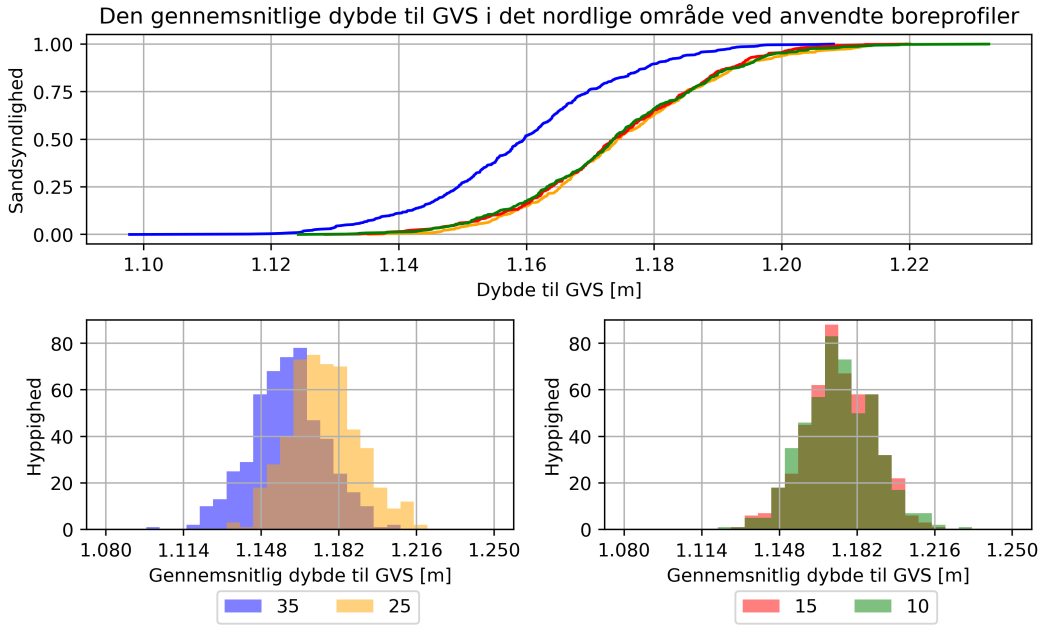
Figur 11.13.Den hydrauliske ledningsevne for det sydlige område af Kærby, ved anvendelse af 10 - 35 boreprofiler i Kærby for den fulde model.

Det kan observeres på ovenstående figur, at en reduktion af boringer ikke påvirker den hydrauliske ledningsevne i særligt omfang. Da de kumulative sandsynlighedsfordelinger er sammenlignelige for anvendelse af [10-35] boreprofiler, antages det, at den tilfældige udvælgelse af boringer er uden betydning.

Dette skyldes, at den hydrauliske ledningsevne er en parametrisering af de volumetriske jordtype andele, og derfor følger den samme tendens. De volumetriske andele fremgår af figur 11.12 og figur H.11. Ud fra ovenstående figur 11.13, indikerer fordelingen af den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne for det sydlige område, ikke er påvirket af mængden af boringer benyttet til geologiske realiseringer fra Kærby. Det kan observeres, at den hydrauliske ledningsevne er svagt stigende ved reduktion af boringer. Dette indikerer, at de geologiske jordtyper med højere hydraulisk ledningsevne bliver svagt dominerende, for det sydlige område i Kærby. De resterende områder i Kærby viser samme tendens, og er derfor vist i bilag på figur H.12.

11.2 Antallet af boringers effekt på det simulerede trykniveau

I denne geologiske analyse af reduktion af boringer, simuleres trykniveauet for modellen fra kapitel 5 for et nutidigt klima og et fælleskloakeret system. Dybden til grundvandsspejlet for de forskellige områder, vil blive undersøgt på forskellig vis, ved middel og 25% fraktiler for områderne. Inddelingerne er tilsvarene dem vist på figur 8.8. For resultaterne vises den kumulative sandsynlighedsfordeling, samt histogrammer over dybder til grundvandsspejlet. På nedenstående figur 11.14, observeres de kumulative sandsynlighedsfordelinger for den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet, samt histogrammer over værdierne for det nordlige område i Kærby.



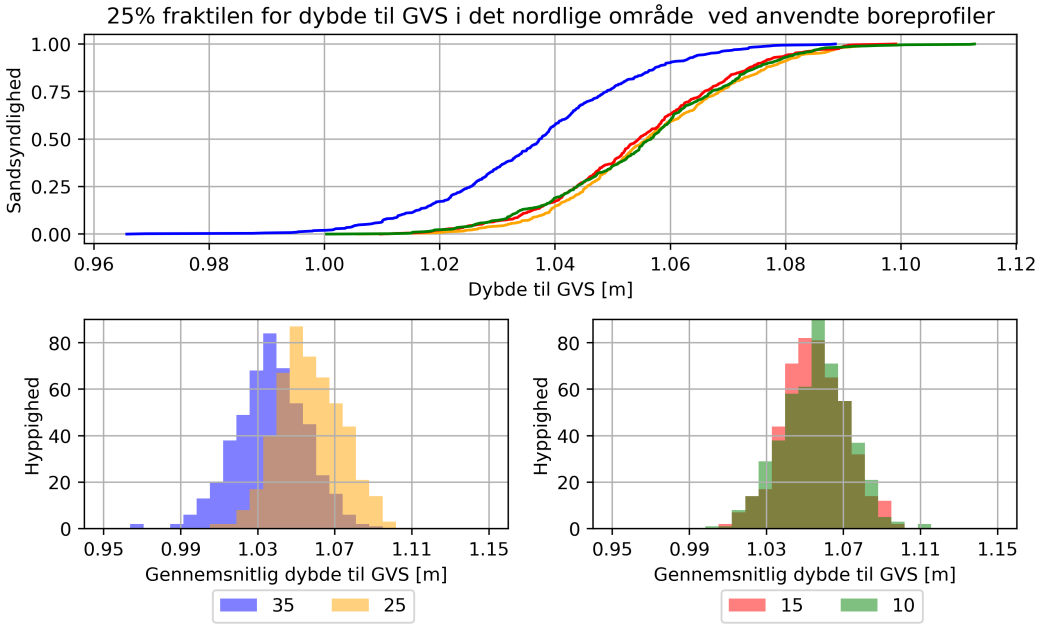
Figur 11.14. Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i det nordlige område, for 500 forskellige scenarier ved anvendelse af $[10 - 35]$ boreprofiler i Kærby.

Af figuren 11.14 kan det observeres, at den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet afviger ved anvendelse af 35 boreprofiler til generering af geologiske realiseringer, sammenlignet med anvendelse af $[10 - 25]$ boreprofiler. Afvigelsen er stabil med cirka 2 cm kortere afstand til terræn ved anvendelse af 35 boreprofiler. Simuleringerne for de øvrige reduktioner varierer minimalt, og overstiger kun 1 cm ved ekstremerne i top og bund, ved anvendelse af 10 boreprofiler. Histogrammerne af dybden til grundvandsspejlet for det nordlige område i Kærby, viser spredningen mellem værdier ved anvendelse af 15 og 10 boreprofiler, som ikke fremgår tydeligt af den kumulative sandsynlighedsfordeling. Det midt østlige og midt vestlige område af Kærby følger en tilsvarende tendens, som også er gældende til det nordlige område. På dette grundlag, er resultaterne for den vest og østlige del af Kærby vist i bilag H.4. I tabel 11.2 nedenfor, vises minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelsen for dybden til grundvandsspejlet, for hvert reduktionsinterval i det nordlige område.

Tabel 11.2.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet, for hvert reduktionsinterval i det nordlige område.

Antal boringer	**35**	**25**	**15**	**10**	**Enhed**
Minimum	1,098	1,135	1,128	1,124	$[m]$
Gennemsnit	1,160	1,176	1,174	1,174	$[m]$
Maksimum	1,208	1,219	1,220	1,232	$[m]$
STD	0,016	0,015	0,015	0,016	$[m]$

Af ovenstående tabel 11.2 fremgår den minimale afvigelse mellem minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet. Dette fremgår ligeledes af ovenstående kumulative sandsynlighedsfordeling på figur 11.14. Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i det nordlige område er varierende med 1,7 cm, hvilket anses som ubetydeligt. Ved standardafvigelsen kan samme tendens observeres, hvor ændringen er 0,1 cm, hvilket anses som ubetydeligt. På figur 11.15 fremgår 25% fraktilen for det nordlige område ved en kumulative sandsynlighedsfordelinger og histogrammer over værdierne.



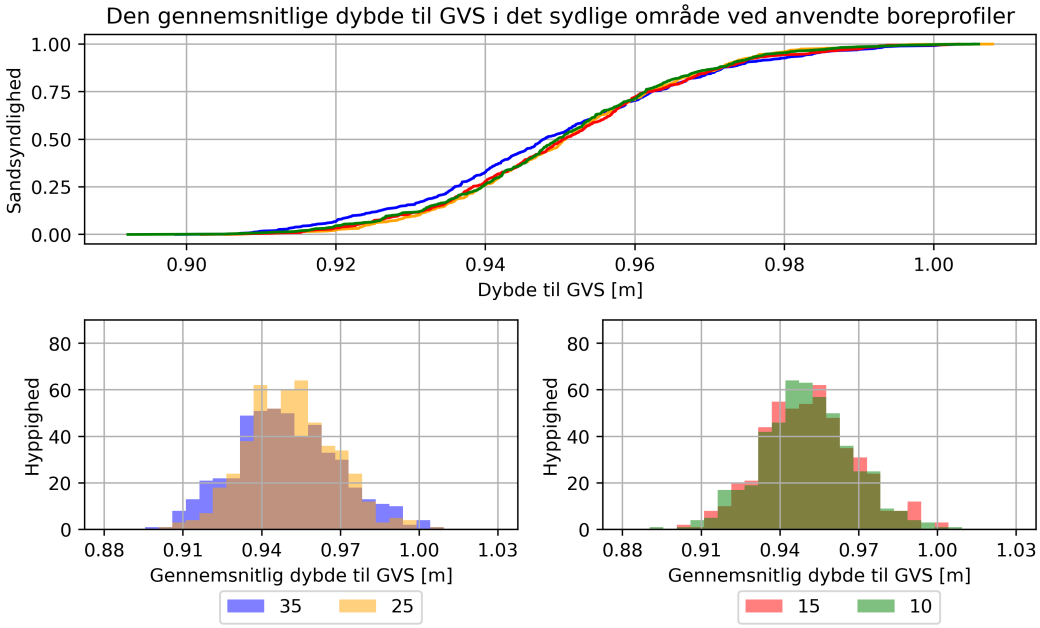
Figur 11.15.25% fraktilen for dybde til grundvandsspejlet i det nordlige område, for 500 forskellige scenarier ved anvendelse af $[35 - 10]$ boreprofiler.

På ovenstående figur 11.15 illustreres 25% fraktilen for det nordlige område. Generelt kan samme tendens ved 25% fraktilen og den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet af figur 11.14 og figur 11.15. Af figuren 11.15 kan anvendelsen af 35 boreprofiler observeres som værende afvigende i forhold til anvendelse af $[25 - 10]$ boreprofiler. Afvigelsen er stabil med cirka 2 cm kortere afstand til terræn ved anvendelse af 35 boreprofiler. Resultaterne for de øvrige reduktioner varierer minimal og overstiger kun 1 cm ved ekstremerne i top og bund ved anvendelse af 10 boreprofiler. Dette er tilsvarende til tendensen for den genne. Histogrammerne over værdierne for 25% fraktilen af det nordlige område i Kærby, viser spredningen mellem værdier ved anvendelse af 15 og 10 boreprofiler i Kærby, som ikke fremgår tydeligt af den kumulative sandsynlighedsfordeling. I tabel 11.2 nedenfor, vises minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for 25% fraktilen af dybden til grundvandsspejlet, for hvert reduktionsinterval i det nordlige område.

Tabel 11.3.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet for 25 fraktilen, af hvert reduktionsinterval i det nordlige område.

Antal anvendte boringer	**35**	**25**	**15**	**10**	**Enhed**
Minimum	0,966	1,006	1,010	1,000	$[m]$
Gennemsnit	1,037	1,057	1,055	1,056	$[m]$
Maksimum	1,089	1,099	1,099	1,113	$[m]$
STD	0,018	0,016	0,016	0,017	$[m]$

Af ovenstående tabel 11.3 fremgår den minimale afvigelse mellem minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet. Dette fremgår ligeledes af ovenstående kumulative sandsynlighedsfordeling på figur 11.15. Den gennemsnitlige 25% fraktil for dybden til grundvandsspejlet i det nordlige område er varierende med 2 cm reduktionerne af boringer imellem, hvilket anses som værende uden betydning. Ved standardafvigelsen kan samme tendens observeres, hvor ændringen er 0,2 cm, hvilket ligeledes anses som værende ubetydeligt. På nedenstående figur 11.16, observeres de kumulative sandsynlighedsfordelinger for den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet, samt histogrammer dybden til grundvandsspejlet for det sydlige område i Kærby.



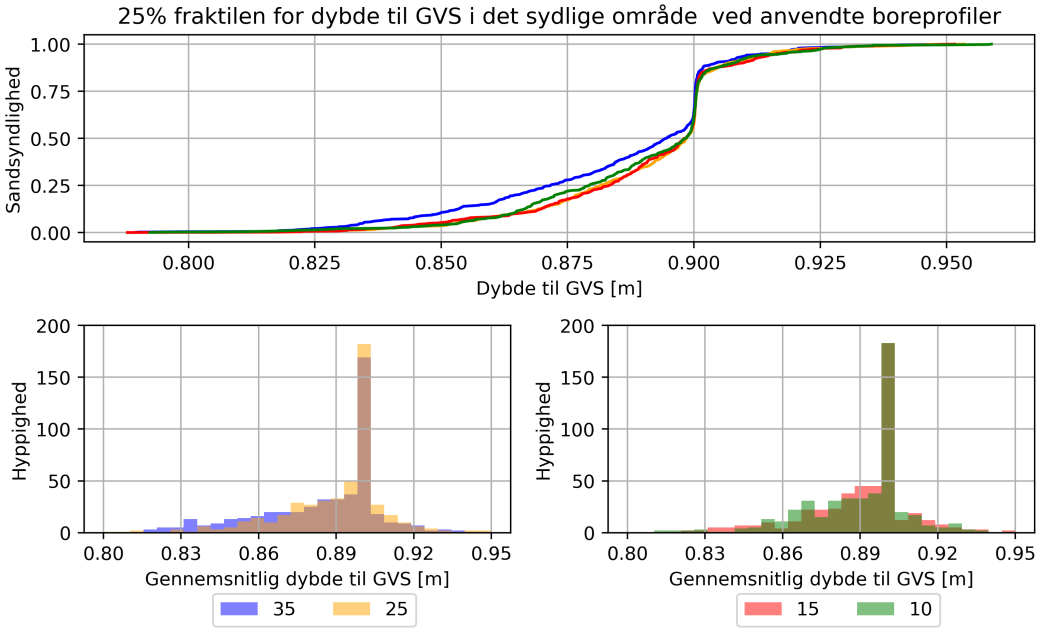
Figur 11.16.Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i det sydlige område, for 500 forskellige scenarier ved anvendelse af $[35 - 10]$ boreprofiler.

Af figuren 11.16 kan det observeres, at ved anvendelse af $[35 - 10]$ boreprofiler, varierer trykniveauet relativt til antallet af anvendte boreprofiler, sammenlignet med det nordlige område. Af den kumulative sandsynlighedsfordeling, kan anvendelse af 35 boreprofiler observeres til at være under en centimeter tættere på terræn ved sandsynlighed fra 0 - 0,5, hvorefter ingen signifikant forskel observeres. I tabel 11.4 nedenfor, vises minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for gennemsnitlig dybden til grundvandsspejlet, for hvert reduktionsinterval i det sydlige område.

Tabel 11.4.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet for 25 fraktilen, af hvert reduktionsinterval i det sydlige område.

Antal anvendte boringer	**35**	**25**	**15**	**10**	**Enhed**
Minimum	0,899	0,905	0,902	0,892	$[m]$
Gennemsnit	0,949	0,951	0,951	0,950	$[m]$
Maksimum	1,005	1,008	1,003	1,006	$[m]$
STD	0,020	0,017	0,018	0,017	$[m]$

Af ovenstående tabel 11.4 fremgår den minimale afvigelse mellem minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet. Dette fremgår ligeledes af ovenstående kumulative sandsynlighedsfordeling på figur 11.16. Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i det nordlige område er varierende med 0,2 cm, hvilket anses som ubetydeligt. Ved standardafvigelsen kan samme tendens observeres, hvor ændringen er 0,3 cm, hvilket ligeledes anses som ubetydeligt. På nedenstående figur 11.17 vises 25% fraktilen for det sydlige område.



Figur 11.17.25% fraktilen for dybde til grundvandsspejlet i det sydlige område, for 500 forskellige scenarier ved anvendelse af $[10-35]$ boreprofiler i Kærby.

På ovenstående figur 11.17 illustreres 25% fraktilen for det sydlige område. Generelt kan samme tendens observeres ved 25% fraktilen og den gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet for det sydlige område af figur 11.16. Af figuren 11.17 kan anvendelse af 35 boreprofiler ikke observeres som værende signifikant afvigende i forhold til anvendelse af $[25-10]$ boreprofiler, hvilket der observeres for det nordlige område. Histogrammerne over dybden til grundvandsspejlet for det sydlige område i Kærby, viser en spredning af værdierne, hvor cirka 25% af værdierne er på 0,9 m fra terræn. De mange værdier, på 0,9 m til terræn, antages at være dybden Østerå er implementeret i modellen.

Det observeres ved inddeling af Kærbyområdet, en lokal afvigelse mellem resultaterne. Dybden til grundvandsspejlet er upåvirket af boringsreduktionen, som er mindst afvigende for det sydlige område. I tabel 11.5 nedenfor, vises minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for 25% fraktilen af dybden til grundvandsspejlet, for hvert reduktions interval i det sydlige område.

Tabel 11.5.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet for 25% fraktilen, af hvert reduktions interval i det sydlige område.

Antal anvendte boringer	**35**	**25**	**15**	**10**	**Enhed**
Minimum	0,789	0,802	0,788	0,792	[−]
Gennemsnit	0,885	0,891	0,891	0,890	[−]
Maksimum	0,952	0,954	0,952	0,959	[−]
STD	0,025	0,020	0,020	0,021	[−]

Af ovenstående tabel 11.5 fremgår den minimale afvigelse mellem minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet. Dette fremgår af ovenstående kumulative sandsynlighedsfordeling på figur 11.17. Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i det nordlige område er varierende med 0,6 cm, hvilket anses som ubetydeligt. Ved standardafvigelsen kan samme tendens observeres, hvor ændringen er 0,5 cm, hvilket ligeledes anses som ubetydeligt.

11.3 Opsamling og diskussion

For den reduceret model har undersøgelsen af boringsreduktionens effekt på ændringen i den volumetriske andele, gennemsnitlige jordtype udbredelse og hydrauliske ledningsevne, har påvist ændring i samtlige parametre. Ændringer er mest signifikante ved [25- 10] anvendte boringer for det reducerede modelområde. Denne observerede effekt på de geologiske parametre, for det reducerede område, er ikke til stede for de geologiske parametre og beregninger af trykniveau på den fulde geologiske model som anvendes i dette projekt. Der er observeret minimale afvigelser i det beregnede trykniveau for det nordlige, midt vestlige og midtøstlige område, som ikke er til stede i det sydlige område.

Ved reduktionsanalysen, for den reducerede model og fulde grundvandsmodel, er der ikke fundet et optimum for boringsdensiteten. Dette kan tilskrives den geologiske modelleringstilgangen som videre vil blive diskuteret.

Ud fra den valgte geostatistiske tilgang på den reducerede model er et muligt boringsdensitetsoptimus estimeret til 45 boringer for den reducerede model, hvilket er tilsvarende 35 boringer pr. km^2.

11.3.1 Reduktions analysen

Beregningsmetoden benyttet af T-PROGS er væsentlig påvirket af variabiliteten i boringerne, både medhensyn til densitet, dybde og indberetningsinterval. Derfor er det nødvendigt, at udvælgelsen er tilfældig og undersøgt på flest mulige scenarier. Relativt til omfanget af dette projekt, er det fundet umuligt at teste for alle $4{,}25e^{37}$ mulige kombinationer ved fjernelse af boringer. Hvorfor en reduktionsanalyse er fortaget ved fjernelse af 90 boringer 10000 gange. På trods af de 10000 iterationer, ved tilfældig fjernelse af boringer, observeres der ikke væsentlige variationer mellem de geostatistiske parametre. Som det fremgår af figur 11.6, observeres der ikke noget væsentlige forskelle mellem 1000 og 10000 iterationer på den kumulative sandsynlighedsfordeling af den midlet hydrauliske ledningsevne. Baseret på dette, kan antallet iterationer reduceres uden signifikant indflydelse på resultaterne. Analysen er baseret på fjernelsen af borehuller baseret på 5000 iterationer, for hvert scenarie og geostatistiske beregninger af de geologiske realiseringer. Denne konklusion er baseret på midlet værdier over de valgte inddelingssektioner. Det kan diskuteres hvorvidt, der kunne observeres en væsentlig forskel hvis 100.000 iterationer var testet. Det må antages at dette ikke er relevant, da der ved de 10.000 iterationer ikke observeres nogen væsentlig variation i geostatistiske parametre.

Reduktionsanalysen er baseret på inddelingen af Kærbyområdet, som er beskrevet i 8.2. Denne er baseret på i midlet værdier over de 2 - 6 sektioner, da alle geologiske parametre er konstante over hele den

geologiske model. Som det fremgår af figur E.6, og illustrationen af løbende middel for den hydraulisk ledningsevnes standardafvigelse, observeres der en stigende variation mellem sektionerne ved forøgelse af inddelinger. Det kan derfor diskuteres, om tendensen ville forstærkes af en yderligere forøgelse af sektioner fra 8 til 12, eller ved benyttelse af samme inddelinger fra figur 8.8, som anvendes til dybden til grundvandsspejlet. Det er vurderet, at denne effekt af flere sektioner, med stor sandsynlighed ikke vil påvirke resultaterne. Dette skyldes samme tendens kan observeres for P-værdien på figur E.7, ved de 3 inddelings intervaller. Hvorfor det er antaget, at valget af sektions antal ikke har noget væsentlig betydning for antal nødvendige tilfældige udvælgelser af boringer.

11.3.2 Effekt af boringsreduktion på geostatistiske parametre

Til analysen af boringsdensitetens effekt på realiseringer af geologiske modeller og modellering af geologisk heterogenitet, er der foretaget 5000 iterationer med følgende antal boreprofiler [65,55,45,35,25,15,10]. Disse intervaller er valgt, med henblik på at estimere et boringsdensitets optimum, og opretholde modelleringspræcisionen af den geologiske heterogenitet. Ved modellering af det reducerede modelområde på cirka $1{,}5\,\mathrm{km}^2$ med 125 boringer, er densiteten væsentlig højere end for den fulde geologiske model med $39{,}5\,\frac{\text{boringer}}{\mathrm{km}^2}$. Ved at anvende 45 boreprofiler er boringsdensiteten i den reducerede model, tilsvarende til den for den fulde model, før fjernelse af boringer. Yderligere betyder dette, at det fjernede antal boringer, overstiger det antal, der er boret i forbindelse med GRAVA projektet. Placeringen af boringerne er illustreret på figur 6.1 og 6.2.

Effekten af fjernelse af præcis de boringer fra GRAVA-projektet er ikke fortaget, hvorfor denne analyse i stedet er for potentiel manglende geologisk viden, til modellering af geologisk heterogenitet i Kærby. Det kan diskuteres, hvor stor betydning for modellering af geologisk heterogenitet, det vil have at fjerne præcis GRAVA-projektets boringer. De 125 boringer placeret i det reducerede modelområde, har alle lignende dybde og indberetningsinterval, som er vurderet af størst betydning for T-PROGS generering af geologiske realiseringer. Dette er ikke mulig at verificere, uden yderligere geologisk analyse.

Det kan yderligere diskuteres, om den tilfældige udvælgelse er boringer er implementeret korrekt. Implementeringsmetoden for dette er, ved tilfældig udvælgelse over hele den reducerede model. En alternativ tilgang, havde været at opdele Kærby i zoner og på denne måde valgt en større spatial udbredelse af boreprofiler ved hver fjernelse, hvilket er undladt da en spatial fordeling af boringer ikke er garanteret. Dette vil potentielt give et mere nuanceret billede af den geologiske heterogenitet i Kærby.

Der observeres generelt en signifikant ændring i volumetrisk jordtype andele, midlet jordtype udbredelse og hydrauliske ledningsevne, når der anvendendes [10 - 35] borepofiler. Som tidligere beskrevet er 45 anvendte boreprofiler ensbetydende med at boringsdensiteten er cirka den boringsdensitet, der observeres for den primære model. Hvorfor det kan diskuteres om boringerne i GRAVA-projektet har en væsentlig betydning for modellering af den rumlige geologiske fordeling. De lokale dominerende jordtyper er tilstrækkelig repræsenteret ved anvendelse af [10 - 25] boreprofiler. Fordelingen er meget afhængig af, hvilke boringer der benyttes til beregningerne i T-PROGS. He et al. [2015]; Troldborg [2004a] fandt det tilstrækkeligt med helt ned til 2 boringer pr. km^2, hvor yderligere geologisk information, i form af TEM, blev benyttet til udfærdigelse af de geologiske realiseringer. Derfor kan det diskuteres om færre boringer var tilstrækkelig, hvis dette blev suppleret med TEM analyse.

Det kan diskuteres, om et boringsoptimum kan konkluderes at være ved anvendelse af [45 - 65] boreprofiler, grundet den lille afvigelse i geostatistiske parametre ved tilfældig udvælgelse. Den reducerede model er konstrueret med henblik på at dække Kærbyområdet og de omkringliggende boringer. Dette betyder, at den geologiske model udelukkende er 4 meter dyb, som resulterer i en god spatial og vertikal repræsentation af boreprofiler til generering af geologiske heterogenitet for området. Hvilket ikke er tilfældet for den fulde model, med 841 boringer, hvor få er helt gennemgående. Derfor kan det diskuteres om denne statistiske analyse af fordelingen af geologiske elementer og deres parametrisering, har sine begrænsninger.

11.3.3 Effekten på trykniveau ved simulering af reduktions intervaller

Det er valgt at simulere geologiske realiseringer ved anvendelse af [10 - 35] boreprofiler i Kærby, baseret på den statistiske analyse. Simuleringerne af trykniveauet for modellen for et nutidigt klima og et fælleskloakeret system illustreres ved dybden til grundvandsspejlet for de forskellige områder. Disse har ikke påvist væsentlige ændringer i det beregnede trykniveau, hverken i form af middel eller 25% fraktiler. Den største observerede effekt i beregnet trykniveau, på 1,7 cm, er fra det nordlige område i Kærby, hvilket anses, som ubetydeligt set relativ til de generelle usikkerheder forbundet med grundvandsmodellering. Alternativ kunne analysen være foretages ved et separatkloakeret område, da dette viser større variationer i resultaterne. Der er valgt at anvende et fælleskloakeret system, da dette er de nuværende forhold i Kærby.

Som det kan observeres af figur 11.14, ved anvendelse af 35 boreprofiler er denne afgivende i forhold til en yderligere reduktion og anvendelse af [10 - 25] boreprofiler. Afvigelsen er stabil med cirka 2 cm kortere afstand til terræn ved anvendelse af 35 boreprofiler. Histogrammerne for det nordlige område i Kærby, viser spredningen mellem værdier for 15 og 10 boringer, som ikke fremgår så tydeligt. Det må derfor antages som minimale og uden nogen effekt på resultatet. Den centrale del af Kærby, midt vest og midt øst, følger samme tendens som det observerede i det nordlige område. Det kan potentielt tilskrives den lignende boringsdensitet for de 3 områder. Som nævnt i He et al. [2015]; Troldborg [2004b] har densiteten af borehuller en tydelig effekt på generering i T-PROGS, hvorfor lignende densitet af boreprofiler kunne påvirke resultaterne.

Resultaterne for simuleringerne af den sydlige del af Kærby fremgår af figur 11.16, og det kan observeres ved anvendelse af [35 - 10] boreprofiler, at trykniveauet er mindre varierende sammenlignet med de resterend områder. Det kan diskuteres, hvorvidt det kan tilskrives den væsentlige højere boringsdensitet i den sydlige del, hvorfor dette område, ikke er påvirket i samme omfang. Hvor også [Troldborg, 2004a; He et al., 2015] foreslår, at boringsdensiteten er af væsentlig betydning. Det sydlige område defineret i figur 8.8, er væsentligt mere kompakt, og indeholder en meget høj boringsdensitet. Derfor kan det diskuteres, om den statistiske analyse havde været optimeret ved benyttelse af samme inddelings type, som benyttet i resultaterne. Resultaterne viser minimale afvigelser, hvorfor det er konkluderet at denne afvigelse er minimal for den samlede konklusion. Hvor et borehuls optimum, for Kærby modellen er de allerede tilstedeværende boringer i Kærby, uden GRAVA-projektet. cirka 35 boringer pr. km^2

12 Diskussion

Der vil i dette kapitel blive diskuteret de væsentligste punkter ved udarbejdelse af dette projekt. Dertil vil der være henvisninger til tidligere afsnit, hvor diskussioner suppleres og uddybes.

Kærby har haft udfordringer med terrænnært grundvand i mange år, hvilket betyder, at de private og offentlige løsninger, som er anvendt til at modvirke dette, ikke altid er registreret korrekt. Dette er tilfældet med spunsvæggene som er placeret i den vestlige del af diget ved Østerå. Spunsvæggens omfang og stand er ukendt, hvilket medfører usikkerheder for grundvandsmodellering. Dette er også gældende for den nordlige strækning af den rørlagte del af vestre landsgrøft blevet renoveret, hvortil omfanget er ukendt. Aalborg forsyning ønsker at renovere de ældre kloakledninger, hvorfor omfanget af denne effekt på grundvandssystemet er undersøgt.

Disse lokale omstændigheder i Kærby, kan have en stor indvirkning på modelresulstaterne. Hvor det kan diskuteres om disse er korrekt implementeret i en grundvandsmodel. Dette er i form vandløb som ikke varierer afhængig af årstiden og kloakeringen som har en fast dræningsevne på trods af forskellige aldre i området, hvorfor dette kunne være ændret. Dette beskrives dybdegående i afsnit 5.5.

Problemerne med terrænnært grundvand har medført at GRAVA-projektet blev startet, hvilket har resulteret i en betydelig mængde data for geologien og for målinger af dybden til grundvandsspejlet. Disse målinger af dybden til grundvandsspejlet kan diskuteres, i form af placering af automatiske målestationer langs Østerå, hvilket giver et misvisende estimat for placeringen af grundvandsspejlet i Kærby. Derfor kan den varierende kvalitet og kvantitet af manuelle- og automatiske målinger diskuteres, på baggrund af opsætningen og indberetningshyppigheden. Dette vil blive uddybet og suppleret i afsnit 6.5.

Det geologiske data implementeres i grundvandsmodellen ved stokastisk generering af geologiske realiseringer på et geostatistisk grundlag. Implementeringen har sine diskussionspunkter da geologien bliver forsimplet ned til fem jordtyper, hvilket fjerner nogle nuancer i geologien. Derudover har de mange anvendte boringer forskelligheder i dybde og indberetningsinterval, hvilket påvirker de geostatistiske parametre og derfor de geologiske realiseringer. Dette diskuteres yderligere og suppleres i afsnit 7.4.

Det nødvendige omfang af de genererede geologiske realiseringer og parametriseringen, blev undersøgt, hvor følgende kunne diskuteres. De forskellige metoder fandt cirka 30 nødvendige geologiske realiseringer, hvilket var tilsvarende til værdier fra litteraturen [He et al., 2015], hvorfor dette projekts metoder vurderes tilstrækkelige. Nødvendige antal Monte Carlo realiseringer for den hydrauliske ledningsevne blev yderligere analyseret, hvor 100 Monte Carlo realiseringer blev fundet tilstrækkelige, uden effekt på det simuleret trykniveau, hvorfor dette er vurderet tilstrækkeligt. Dette diskuteres yderligere i afsnit 8.4.

Til at bestemme validiteten af den fulde grundvandsmodel, er det nutidige klima og den nuværende fælleskloakering fra grundvandsmodellen sammenlignet med manuelle vandstandsindberetninger fra GRAVA-projektet. Valideringen blev udført baseret på GRAVA-projektets indberetninger, hvor usikkerhederne i dataindsamlingen blev inkluderet i grundvandsmodellen.

Det fremgår af valideringen for det opstillede tværsnitsprofil af figur 9.14 og de interpolerede kort for det observerede- og simulerede trykniveau af figur 9.10, at afvigelserne i trykniveau det vestlige og sydøstlige

del af Kærby. I den vestlige del af Kærby er der simuleret et for højt trykniveau, hvortil det kan diskuteres, hvorvidt dette skyldes, at den rørlagte del af Vestre Landsgrøft dræner grundvandsmodellen i en betydelig grad. Det vestlige område er som det eneste ikke kontakt med Østerå. Det kan dertil diskuteres om der i dette område er flere omfangsdræn, da der er færre kloakledninger i dette område til at dræne grundvandet.

Ud fra resultater sammenlignet med observationer fra GRAVA-projektet, vurderes det, at der er overensstemmelse mellem, det simulerede og observerede trykniveau fra de manuelle målestationer. Dermed kan det valideres at resultaternes er realistiske, og kan benyttes til udtalelse om dybden til grundvandsspejlet, ved andre simuleringsscenarier. På baggrund af dette vil resultater fra andre scenarier undersøges. De forskellige valideringsmetoder gennemgås og vurderes yderligere i afsnit 9.4

Resultaterne er inddelt i delområder fra figur 8.8, hvor inddelingen er baseret på geografi, topografi og afløbssystem. Effekten af alternative inddelinger er ikke undersøgt, hvilket kan diskuteres om det skulle være gjort. Resultaterne for områderne i Kærby viser generelt, at det sydlige område er mest kritisk, i forhold til vand på terræn, som vist på figur 10.4 og figur 10.8. Dette fremgår ved separatkloakering af Kærby, hvor kloakkernes drænene effekt fjernes, at forskellen imellem områder for fælleskloakerede tilfælde er mindre. Det kan diskuteres om dette er retvisende, da valideringen indikerede at kloakkens dræningsevne er overestimeret særligt i den østlige del af Kærby. Dermed kan resultaterne være misvisende da kloakkens dræningsevne burde være kalibreret mere lokalt. Det næst mest kritisk område er det midt vestlige, hvilket fremgår af figur 10.3 og figur 10.7. Dette skyldes formentlig de førnævnte dræn og Vestre Landgrøft.

For et klima fremskrevet til nær fremtid, fremgår det mindre kritisk for Kærby. For fælleskloakerede scenarier er der ingen betydelig forskel, hvilket formentlig skyldes kloaksystemets drænende effekt. Dette er tilsvarende til resultater fra Seidenfaden et al. [2022]. For simuleret sommerklima ved separatkloakering er der generelt dybere til grundvandsspejlet, hvilket følger forventningen om mindre regn i sommerhalvåret i fremtiden. Samtidig er grundvandsspejlet ved simuleret vinterklima og separatkloakeret også længere fra terræn i nær fremtid, på trods af forventninger om stigende mængder af nedbør i vinterhalvåret. Det kan diskuteres om dette skyldes, at grundvandsspejlet vil falde mere om sommeren, end det vil stige om vinteren, på grund af den høje befæstelsesgrad og tilslutningsgrad til afløbssystemet i byområder. Yderligere diskussion af resultaterne fremgår af afsnit 10.4.

Generelt kan det vurderes ud fra dette projekt, at separatkloakering vil medføre en væsentlig forværring af den nuværende situation. GRAVA-projektet når til samme konklusion. Overensstemmelse i modelresultaterne mellem GRAVA-projektet og dette projekt, variere dermed ikke i den overordnede konklusion, men variationer forekommer i, hvor kritisk scenarierne er vurderet. Da det er tydeligt, at separatkloakering vil medføre en væsentlig ændring, hvorfor det kan diskuteres om nuanceringen dette projekt kan tilføje, ikke er nødvendig, for at nå denne konklusionen. Metoden kunne derimod anvendes til vurdering af lokale løsningsforslag, der påvirkes af lokal geologisk heterogenitet.

Boringsreduktionens effekt blev påvist på samtlige geostatistiske parametre for et reducerede modelområde. Ændringer er mest signifikante ved [10- 25] anvendte boringer. Denne observerede effekt på de geologiske parametre, for det reducerede område, er ikke til stede for de geologiske parametre og beregninger af trykniveau på den fulde grundvandsmodel. Der er observeret minimale afvigelser i det beregnede trykniveau for det nordlige, midt vestlige og midt østlige område, som ikke er til stede i den sydlige område. Det kan derfor diskuteres om et optimum for boringsdensiteten kan påvises ud fra den valgte geostatistiske analyse tilgang. Dette projekt opnår et potentielt estimat på 35 boringer pr. km^2, fortaget på en analyse på et reduceret modelområde som udelukkende indeholder Kærby. Hvilket er tilsvarende den allerede tilstedeværende boringsdensitet for hele modelområdet. Dette diskuteres yderligere i afsnit 11.3.

13 Konklusion

Dette projekt har til formål at undersøge effekten af at benytte stokastisk modellering, til at belyse de geologiske usikkerheder ved terrænnært grundvand i Kærby. Hertil, hvilken påvirkning dette har på beslutningsgrundlaget. Ud fra dette kan der foretages følgende konklusioner.

I dette projekt er den stokastiske modellering foretaget ved at anvende T-PROGS, som bruger observeret geologiske tendenser fra boringer til at generere geologiske realiseringer. Dette er kombineret med Monte Carlo realisering af den hydrauliske ledningsevne, hvilket resulterer i sandsynlighedsbaserede spænd for dybden til grundvandsspejlet i projektområdet. Det kan konkluderes, at ved stokastisk generering af geologiske realiseringer øges intervallet for dybden til grundvandsspejlet fra cirka [1,02-1,13m], mens Monte Carlo realiseringer for samme geologiske realisering øger intervallet for dybden til grundvandsspejlet fra cirka [0,9-1,4m]. Denne tilgang benyttes til at belyse den geologiske usikkerhed ved grundvandsmodellering og kan overføres til undersøgelse af løsningsforslag til terrænært grundvand eller andre projekter.

Det kan konkluderes at grundvandsspejlet vil stige ud over det acceptable ved separatkloakering. Dette er baseret på resultater af simuleringerne for den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet vil være [0,5-1m] tættere på terræn for vinterscenarier, og [0,15-1m] tættere på terræn for sommerscenarier, afhængigt af området. GRAVA-projektet vurderer forskellen til henholdsvist [0,75-1] for vinterscenarier og [0,7-0,5] sommerscenarier, afhængigt af området. Dette projekt vurderer ved sommerscenarier med separatkloakeret at [20-70%] af 25% fraktilerne for dybden til grundvandsspejlet er på terræn, afhængigt af området. GRAVA-projektet vurderer ikke 25% fraktilen for dybden til grundvandsspejlet på terræn, for samme sommerscenarie og separatkloakeret i nogle af områderne. Der kan også observeres væsentlige forskelle i alle simulerede værdier baseret på minimumsværdierne. På baggrund af dette kan det konkluderes, at dette projekt giver en mere nuanceret vurdering af dybden til grundvandsspejlet.

Ved at benytte fremskrevne klimascenarier kan et spænd af sandsynlige værdier ligeledes simuleres for fremtidige klimascenarier. Ud fra dette kan det konkluderes, hvorvidt forskellige scenarier vil være mere eller mindre kritiske i et fremtidigt klima. For Kærby blev det vurderet, at et fremtidigt klima vurderes som mindre kritisk, både i GRAVA-projektet og i dette projekt. Dette kan ses ved et fald i andelen af 25% fraktiler med vand på terræn fra [20-75 %] afhængigt af området ved vinter separatkloakering. Derudover er den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet for sommer separatkloakering cirka [20-30 cm] længere fra terrænet og med større spredning for de forskellige områder.

Der blev påvist en effekt, ved reduktion af antallet af boringer, på de geostatistiske parametre anvendt til generering af geologiske realiseringer for et reducerede modelområde omkring Kærby. En indledende geostatistisk analyse blev udført på et reduceret område som kun indeholder Kærby. Det kan konkluderes, at de mest signifikante ændringer kunne observeres ved [10- 25] anvendte boringer. Fra analysen kan der konkluderes en væsentlig påvirkning af de geologiske parametre, som ikke var til stede for de geologiske parametre og beregninger af trykniveau på den fulde grundvandsmodel. Der er observeret minimale afvigelser i det beregnede trykniveau for det nordlige, midt vestlige og midt østlige område på maksimalt 2 cm, som ikke er til stede i det sydlige område i Kærby. Derfor er et optimum for boringsdensiteten ikke påvist ud fra den valgte geostatistiske analysetilgang. Dette projekt opnår et potentielt estimat for boringsdensitets optimum, på 35 boringer pr. km^2, fortaget på analysen på det reduceret modelområde.

Denne boringsdensitet er tilsvarende den allerede tilstedeværende borings mængde for hele modelområdet.

De manuelle vandstandsmålinger, der blev foretaget med "citizen science"måleprogrammet i forbindelse med GRAVA-projektet, kan konkluderes at være mere brugbare end automatiske målinger til validering af grundvandsmodellen. Dette skyldes den spatiale fordeling og placeringen af manuelle målestationer på borgernes grund, hvilket er området af primær interesse, hvorimod størstedelen af de automatiske målestationer er placeret uhensigtsmæssigt tæt ved vandområder.

Sommer- og vinterperioderne er blevet midlet over en 3-måneders periode for at kunne anvendes til validering af den stationære model, der er udarbejdet i dette projekt. Dertil kan det konkluderes, at ikke alle manuelle målestationer har et tilfredsstillende antal indberetninger, hvilket medførte, at ikke alle målestationer kunne inkluderes i valideringen. Det kan derfor konkluderes, at manuelle målestationer kan bidrage med samme kvalitet til videnskabelige undersøgelser som automatiske målestationer, så længe der foretages tilstrækkeligt mange indberetninger for at kunne udtrykke pålidelige værdier for de sæsonbetingede forhold, der modelleres.

14 Perspektivering

I perspektiveringen vil der blive diskuteret forbedringsmuligheder og supplerende analyser. Formålet med dette er at beskrive potentielle ændringer, der kunne have været implementeret i analysen, samt at identificere hvilke yderligere analyser der kunne udføres i fremtidige arbejde med dette projekt.

14.1 Hydrologiske påvirkning

Der kunne identificeres forbedringspunkter i forhold til dræningsevne for kloakker og rørlagte åer som kunne implementeres som dræn. Dette skyldes den varierende alder af kloakledningerne, som beskrevet i afsnit 4. I nogle områderne Kærby er kloaksystemet fra 1930'erne, hvor andre dele er fra 1960'erne og 1990'erne. Derfor kunne der med fordel anvendes en aldersopdeling i kloakledningerne til at optimere dræningsevnen lokalt og forbedre grundvandsmodellen. Som tidligere nævnt er dette projekts placering af kloakledningerne vertikal, varierende fra det virkelige, hvilket fremgår af figur 9.13. Et forbedringspunkt for dette kunne være at tilgå dybdeinformationer for alle ledninger og dermed optimere modellen. Derudover kan det af figuren 9.14 observeres, at den rørlagte del af Vestre Landgrøft kan være en stor dræningsfaktor for Kærby. En fremtidig implementering af hele Vestre Landgrøft som et dræn, vil derfor kunne fungere som en forbedring af den nuværende model, og vil derfor modvirke dele af overestimeringerne af trykniveauet i den vestlige del af Kærby.

I forbindelse med klimafremskrevne scenarier, er der yderligere identificeret forbedringspunkter. En usikkerhed vedrørende det modellerede område ved klimafremskrivning, er havniveauet i den nordlige del af modelområdet. I forbindelse med fastsættelse af trykniveauet for modellens nordlige afgrænsning til Limfjorden, er der for det nutidige klimascenarie valgt kote 0. Denne værdi blev ikke ændret til de klimafremskrevne modeller, hvilket kunne have været et forbedringspunkt.

Havniveauet forventes at stige i de fremtidige klimascenarier, hvorfor det fastholdt trykniveau i modellens nordlige randbetingelse, burde være justeret alt efter klimascenariet. Af Danmarks Meteorologiske Institut [2023] fremgår det at for perioden nær fremtid forventes havniveauet at stige med 17 cm og 24 cm for henholdsvist RCP 4.5 og RCP 8.5. For fjernfremtid forventes havniveauet at stige med 29 cm og 51 cm for henholdsvist RCP 4.5 og RCP 8.5. Ud fra dette, kunne havstigningerne implementeres ved at være henholdsvist 20,5 cm for nærfremtid og 40 cm for fjernfremtid. En oversigt over dette fremgår af tabel 14.1.

Tabel 14.1. Oversigt over forventet havniveau ved forskellige klimascenarier. Værdierne er angivet i cm. [Danmarks Meteorologiske Institut, 2023]

	RCP 4.5	**RCP 8.5**	**Anvendt værdi**
Nutid	[-]	[-]	0
Nær fremtid	17	24	20,5
Fjern fremtid	29	51	40

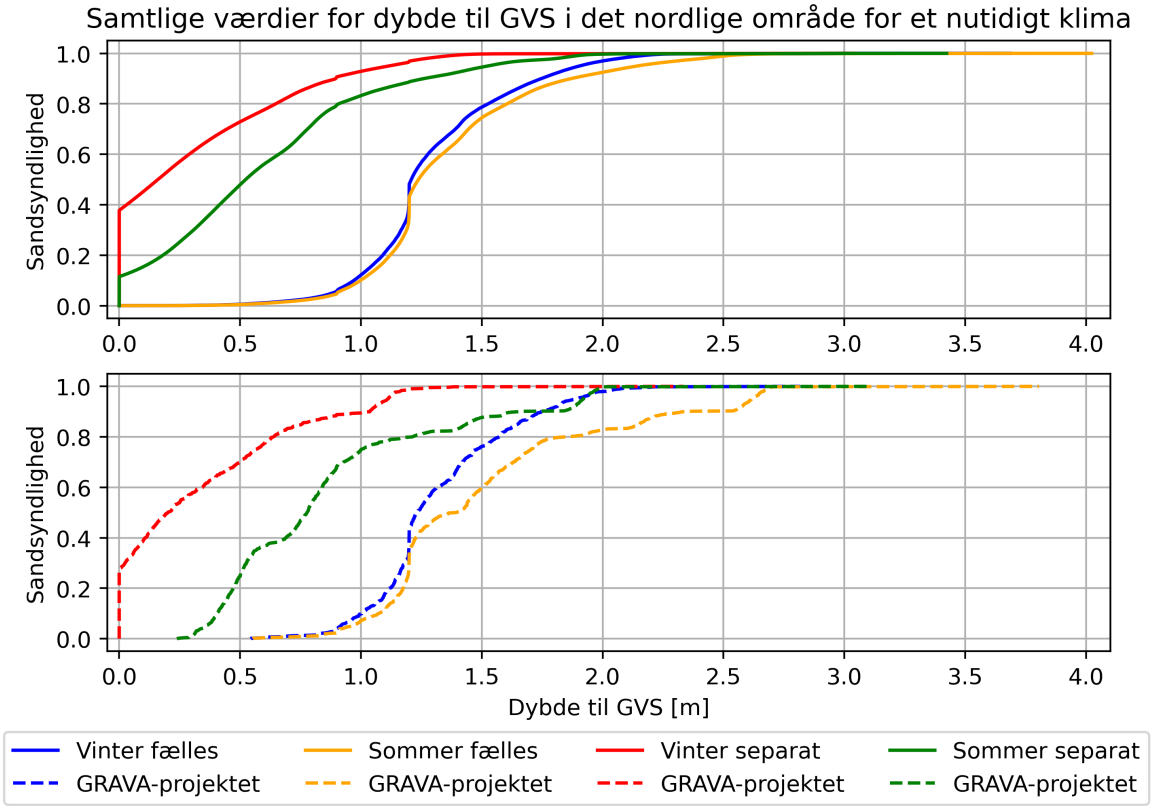
Som det fremgår af tabel 14.1 kunne en der være valgt en klimabaseret værdi for havvandsstanden i de

simulerede klimascenarier. Dette kunne med fordel være implementeret i grundvandsmodellen.

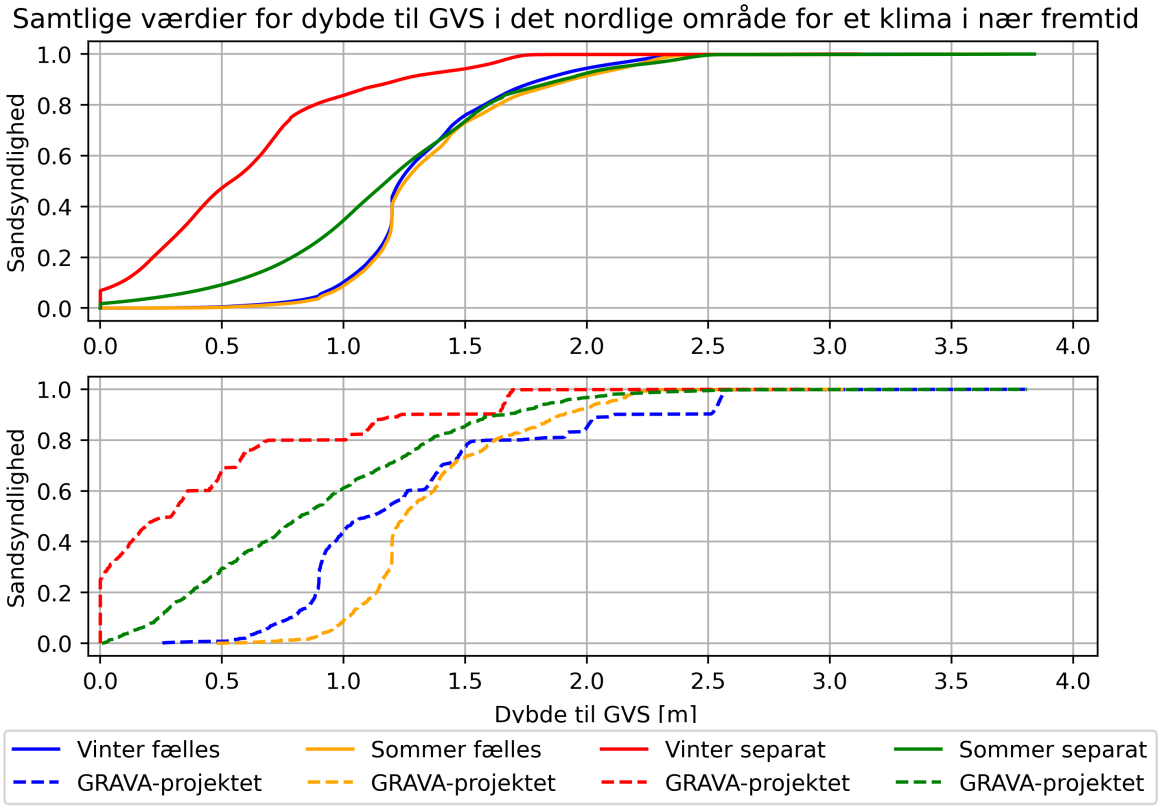
Ved simulering af klimascenarier var særlig fjern fremtid ustabil. Årsagen til dette antages at være store gradienter i grundvandmodeller, på grund af potentialekortene og grundvandsdannelsens grove opløsning på $500m \cdot 500m$. Derfor kunne der være interpoleret mellem cellemidtpunkterne, for at undgå store gradienter på modellens $15m \cdot 15m$ gitter. Dette ville muligvis kunne afhjælpe ustabiliteten.

14.2 Mulig analyse af klimafremskrivningens betydning

Studier har fået forskellige resultater for, hvad der udgør den mest betydelige usikkerhed af klimafremskrivning og hydrologi [Refsgaard et al., 2016]. Resultaterne varierer fra at klimamodellerne udgjorde en større usikkerhed end hydrologien, til at de havde lige stor betydning, og at hydrologien havde størst betydning [Refsgaard et al., 2016]. Sådan en analyse kan ikke foretages, da dette projekt midler over de 22 klimamodeller, frem for at undersøge, hver enkel af dem. Ved mere tid kunne sådanne analyse være interessant at foretage, da dette kunne medføre ekstremværdier for terrænnært grundvand. Derimod kan betydningen af geologien, sammenlignet med klimafremskrivningen analyseres, hvorfor alle værdierne for nordlige område sammenlignes, for et nutidigt klima på figur 14.1 og et klima i nær fremtid på figur 14.2. Effekterne af de øvrige hydrologiske usikkerheder indgår ikke i analysen. Et klima i fjern fremtid er ikke medtaget i denne analyse, da resultaterne for dette projekt ikke er brugbare. Da GRAVA-projektet har brugbare resultater, kunne dette indikere geologien er medvirkende til ustabilitet.



Figur 14.1. Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det nordlige område for de fire simuleringsscenarier i et nutidigt klima.



Figur 14.2.Sandsynlighed for dybde til grundvandsspejlet i det nordlige område for de fire simuleringsscenarier i et klima i nær fremtid.

Ved at sammenligne GRAVA-projektets resultater i de to klimascenarier, fremgår betydningen af klimafremskrivningen, hvorimod hvis dette projekts resultater sammenlignes med det fra GRAVA-projektet, fremgår betydningen af de geologiske usikkerheder. Klimafremskrivningens betydning fremgår som mindre væsentlig end geologien, ud fra at forskellen på dette projekt og GRAVA-projektet imellem, er større end klimafremskrivningerne imellem.

14.3 Alternative tilgange til den stokastiske modellering

Igennem projektets arbejdsproces med det anvendte geostatistiske software T-PROGS, er flere optimeringspunkter blevet identificeret for mulige forbedringer af de geologiske realiseringer og dermed resultaterne for det simulerede trykniveau. Det kan diskuteres, om det havde været en mere korrekt tilgang at undlade ikke geologiske elementer fra boreprofiler og i stedet udelukkende defineret infiltrationsjorden i de øverste 0,5 meter af de geologiske realiseringer, som beskrevet i [He et al., 2015]. Dette ville samtidig give mulighed for en jordtype mere, hvis fyld var undladt.

En alternativ tilgang til geologiske realisering, ved anvendelser af finere diskretisering i et mindre område, havde potentielt været mere optimal. Fremgangsmåden kunne være, en kaliberet model for hele modelområdet, undtagen selve Kærby, hvor T-PROGS kunne anvendes på et højtopløseligt gitter, hvor den geologiske heterogenitet derfor kunne repræsenteres med væsentlig højere præcision. Dertil vil der kun blive benyttet boringer fra projektområdet, hvorfor de geostatistiske parametre som benyttes, er tilsvarende til området der undersøges. Dette kunne med fordel være gjort, da det udelukkende er Kærby som ønskes undersøges.

Litteratur

Aalborg Kommune, **2021**. Aalborg Kommune. *Forslag: Spildevandsplan 2021-2032*. https://referater.aalborg.dk/usercontrols/AalborgKommune/Referater/Pdf.aspx?pdfnavn=22124331-24305490-1.pdf&type=bilag&pdfid=123958, 2021. Besøgt 27-03-2023.

Aalborg Kommune, **2023**. Aalborg Kommune. *Spildevandsplanen*. https://aalborgkommune.viewer.dkplan.niras.dk/plan/33#/, 2023. Besøgt 27-03-2023.

Aalborg Kommune, **2006**. Aalborg Kommune. *Kærby - Kommuneplan*. http://www.aalborgkommuneplan.dk/kommuneplanrammer/vest-aalborg/kaerby/default.aspx, 2006. Besøgt 31-05-2023.

Bredehoeft, **2005**. John Bredehoeft. *The conceptualization model problem - Surprise*. Hydrogeology Journal, (13), 2005.

Carle, **1999**. Steven F. Carle. *T-PROGS, Transition Probability Geostatistical Software*. 1999.

Carle et al., **1998**. Steven F. Carle, Gary S. Weissmann Eric M. Laboll and og David van Brocklin. *Conditional Simulation of Hydrofacies Architecture: A Transition Probability/Markov Approach*. (Hydrogeologic Models of Sedimentary Aquifers, Concepts in Hydrogeology and Environmental Geology, (1), 1998.

Cooley og Christensen, **2006**. Richard L. Cooley og Steen Christensen. *Bias and uncertainty in regression-calibrated models of groundwater flow in heterogeneous media*. Advances in Water Resources, 2006.

Danmarks Meteorologiske Institut, **2023**. Danmarks Meteorologiske Institut. *Data i Klimaatlas: Fremtidens klima*. https://www.dmi.dk/klima-atlas/data-i-klimaatlas/?paramtype=sea&maptype=kyst, 2023. Besøgt 2-3-2023.

Danva og KL, **2019**. Danva og KL. *National indsats imod Stigende overfladenært grundvand*. https://www.kl.dk/kommunale-opgaver/teknik-og-miljoe/vand-og-natur/klimatilpasning/stigende-overfladenaert-grundvand/, 2019. Besøgt 25-03-2023.

Dataforsyningen, **2023**. Dataforsyningen. *Styrelsen for dataforsyning og infrastryktur*. https://dataforsyningen.dk/, 2023. Besøgt 26-05-2023.

Dataforsyningen, **2022**. Dataforsyningen. *Hydrologisk Informations- og Prognosesystem: Data*. https://hip.dataforsyningen.dk/, 2022. Besøgt 10-10-2022.

Elfeki og Dekking, **11 2005**. Amro Elfeki og F. Dekking. *Modelling Subsurface Heterogeneity by Coupled Markov Chains: Directional Dependency, Walther's Law and Entropy*. Geotechnical and Geological Engineering, 23, 721–756, 2005. doi: 10.1007/s10706-004-2899-z.

Elfeki, **2006**. Amro M.M. Elfeki. *Prediction of contaminant plumes (shapes, spatial moments and macrodispersion) in aquifers with insufficient geological information*. Journal of Hydraulic Research, (6), 2006.

GEUS, **2023**. GEUS. *Data og kort*. https://data.geus.dk/, 2023. Besøgt 20-02-2023.

Global Environment Facility, **2023**. Global Environment Facility. *Groundwater*. https://www.thegef.org/what-we-do/topics/groundwater, 2023. Besøgt 11-04-2023.

He et al., **2014**. Xin He, Julian Koch, Torben O. Sonnenborg, Flemming Jørgensen, Cyril Schamper og Jens Christian Refsgaard. *Transition probability-based stochastic geological modeling using airborne geophysical data and borehole data*. Water Ressources Research, 2014.

He et al., **2015**. Xin He, Anker Lajer Højberg, Flemming Jørgensen og Jens Christian Refsgaard. *Assessing hydrological model predictive uncertainty using stochastically generated geological models*. Hydrological Processes, 2015.

Henriksen et al., **2020a**. Hans Jørgen Henriksen, Annesofie Jakobsen og Torben Sonnenborg. *Vurdering af klimaændringers påvirkning af vandmiljøet i forhold til ændringer af grundvandsstanden (NIFA)*. https://www.geus.dk/media/6825/rapportnifa.pdf, 2020a. Besøgt 27-03-2023.

Henriksen et al., **2020b**. HJ Henriksen, SJ Kragh, J Gotfredsen, M Ondracek, M van Til, A Jakobsen, RJM Schneider, J Koch, L Troldborg, P Rasmussen, E Pasten-Zapata og S Stisen. *Dokumentationsrapport vedr. modelleverancer til Hydrologisk Informations- og Prognosesystem*, De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, https://sdfi.dk/Media/637558092694178542/5majHIP4Plus_dokumentationsrapport_v23FEB.pdf, 2020b.

Intergovernmental Panel on Climate Change, **2015**. Intergovernmental Panel on Climate Change. *AR5 Synthesis Report: Climate Change 2014*. IPPC, 1. ed. edition, 2015.

Intertek, **2020**. Intertek. *Groundwater Issues in Construction*. https://www.intertek.com/blog/2020-11-10-groundwater/, 2020. Besøgt 11-04-2023.

Jacob et al., **04 2014**. Daniela Jacob, Juliane Petersen, Bastian Eggert, Antoinette Alias, Ole Christensen, Laurens Bouwer, Alain Braun, Augustin Colette, Michel Déqué, Goran Georgievski, Elena Georgopoulou, Andreas Gobiet, Laurent Menut, Grigory Nikulin, Andreas Haensler, Nils Hempelmann, Colin Jones, Klaus Keuler, Sari Kovats og Pascal Yiou. *EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research*. Regional Environmental Change, 14, 2014. doi: 10.1007/s10113-013-0499-2.

Jacob Birk Jensen, **2003**. Parameter and Uncertainty Estimation in Groundwater Modelling. phd., Aalborg University, 2003.

Karlsen og Sørensen, **2014**. Erik Karlsen og Inga Sørensen. *Vandforsyning*. Nyt teknisk forlag, 3 edition, 2014. ISBN: 978-87-571-2799-7.

Koreimann et al., **1996**. C Koreimann, J Grath, G Winkler, W Nagy og W R Vogel. *Groundwater monitoring in Europe*, European Environment Agency, https://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-032-4, 1996. ISBN: 92-9167-032-4.

Ma et al., **2016**. Liang Ma, Chunguang He, Hongfeng Bian og Lianxi Sheng. *MIKE SHE modeling of ecohydrological processes: Merits, applications, and challenges*. Ecological Engineering, 96, 137–149, 2016. ISSN 0925-8574. doi: https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.01.008. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857416300088. SI: Function, Restoration, and Ecosystem Service of Riverine Wetlands in Temperate Zone.

Miljøstyrelsen, **2023**. Miljøstyrelsen. *Miljødata*. https://miljoedata.miljoeportal.dk/, 2023. Besøgt 30-03-2023.

Miljøstyrelsen, **2004**. Miljøstyrelsen. *Typologi og parametre på velkendte ådalslokaliteter*. https://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2004/87-7614-492-5/html/kap06.htm#6.2, 2004. Besøgt 7-11-2022.

Neuman og Wierenga, **01 2003**. S. Neuman og P. Wierenga. *A comprehensive strategy of hydrogeologic modeling and uncertainty analysis for nuclear facilities and sites*. 2003.

Neuman, **2003**. SP Neuman. *Maximum likelihood Bayesian averaging of uncertain model predictions*. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, (17), 2003.

Nielsen og Thorndahl, **2022**. Rasmus Vest Nielsen og Søren Liedtke Thorndahl. *GRAVA-projektet*. http://grava.dk/index.html, 2022. Besøgt 1-12-2022.

Niswonger et al., **2011**. Richard G. Niswonger, Sorab Panday og Motomu Ibaraki. *MODFLOW-NWT, A Newton Formulation for MODFLOW-2005*. https://pubs.usgs.gov/tm/tm6a37/pdf/tm6a37.pdf, 2011.

og Aalborg Forsyning, **2023**. Aalborg Kommune og Aalborg Forsyning. *Tilslutning i dit lokalområde*. https://minkloak.dk/se-hvordan-din-ejendom-er-kloakeret/5, 2023. Besøgt 28-03-2023.

Poeter og Anderson, **2005**. Eileen Poeter og David Anderson. *The conceptualization model problem - Surprise*. Groundwater, (43), 2005.

Qi et al., **2015**. Xiao-Hui Qi, Dian-Qing Li, Kok-Kwang Phoon, Zi-Jun Cao og Xiao-Song Tang. *Simulation of geologic uncertainty using coupled Markov chain*. Engineering Geology, (207), 2015.

Refsgaard et al., **2016**. J.C. Refsgaard, T.O. Sonnenborg, M.B. Butts, J.H. Christensen, S. Christensen, M. Drews, K.H. Jensen, F. Jørgensen, L.F. Jørgensen, M.A.D. Larsen, S.H. Rasmussen, L.P. Seaby, D. Seifert og T.N. Vilhelmsen. *Climate change impacts on groundwater hydrology - where are the main uncertainties and can they be reduced?* Hydrological Sciences Journal, (61:13), 2016.

Refsgaard et al., **2006**. Jens Christian Refsgaard, Jeroen P. van der Sluijs, James Brown og Peter van der Keur. *A framework for dealing with uncertainty due to model structure error*. Advances in Water Resources, (29), 2006.

Refsgaard et al., **2007**. Jens Christian Refsgaard, Jeroen P. van der Sluijs, Anker Lajer Højberg og Peter A. Vanrolleghem. *Uncertainty in the environmental modelling process - A framework and guidance*. Environmental Modelling and Software, (2), 2007.

Refsgaard et al., **2012**. Jens Christian Refsgaard, Steen Christensen, Torber O. Sonnenborg, Dorte Seifert, Anker Lajer Højberg og Lars Troldborg. *Review of strategies for handling geological uncertainty in groundwater flow and transport modeling*. Advances in Water Resources, (36), 2012.

Rojas et al., **2008**. Rodrigo Rojas, Luc Feyen og Alain Dassargues. *Conceptual model uncertainty in groundwater modeling: Combining generalized likelihood uncertainty estimation and Bayesian model averaging*. Water Resources Research, (44), 2008.

Rojas et al., **02 2010**. Rodrigo Rojas, Okke Batelaan, Feyen L og Alain Dassargues. *Assessment of conceptual model uncertainty for the regional aquifer Pampa del Tamarugal – North Chile*. Hydrology and Earth System Sciences, 14, 171–192, 2010. doi: 10.5194/hess-14-171-2010.

SCALGO, **2022**. SCALGO. *SCALGO LIVE*. https://scalgo.com/live/global?res=38.21851414258813&ll=9.979261%2C57.037128&lrs=mapbox_basic%2Cglobal%2Fhydrosheds%3Adem, 2022. Besøgt 9-10-2022.

Seidenfaden et al., 2022. Ida K. Seidenfaden, Torben O. Sonnenborg, Simon Stisen og Jacob Kidmose. *Quantification of climate change sensitivity of shallow and deep groundwater in Denmark*. Journal of Hydrology: Regional Studies, 41, 101100, 2022. ISSN 2214-5818. doi: https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101100. URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214581822001136.

Sonnenborg og Henriksen, 2005. Torben Obel Sonnenborg og Hans Jørgen Henriksen. *Håndbog i grundvandsmodellering*. Danmarks og Grønlands geologiske undersøgelser: Miljøministeriet, 1. ed. edition, 2005.

Spitz og Moreno, 1996. Karlheinz Spitz og Joanna Moreno. *A Practical Guide to Groundwater and Solute Transport Modeling*. John Wiley And Sons Ltd, 1. ed. edition, 1996.

Séveno, 2022. Victoria Séveno. *Shortage of drinking water imminent, Dutch water companies warn*. https://www.iamexpat.nl/expat-info/dutch-expat-news/shortage-drinking-water-imminent-dutch-water-companies-warn%E2%80%8B, 2022. Besøgt 24-05-2023.

Thorling et al., 2021. Lærke Thorling, Christian Nyrop Albers, Claus Ditlefsen, Birgitte Hansen, Anders R. Johnsen, Mette Hilleke Mortensen og Lars Troldborg. *GRUNDVANDSOVERVÅGNING: Status og udvikling 1989 – 2020*, De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, https://www.geus.dk/vandressourcer/overvaagningsprogrammer/grundvandsovervaagning, 2021. ISBN Online: 978-87-7871-553-1.

Tonkin og Doherty, 2009. Matthew Tonkin og John Doherty. *Calibration-constrained Monte Carlo analysis of highly parameterized models using subspace techniques*. Water Resoures, (45), 2009.

Lars Troldborg, 2004a. The influence of conceptual geological models on the simulation of flow and transport in Quaternary aquifer systems. phd., DTU, 2004a.

Troldborg, 2004b. Lars Troldborg. *The influence of conceptual geological models on the simulation of flow and transport in Quaternary aquifer systems*. Ph.D. thesis, 2004b.

UN Water, 2023. UN Water. *Groundwater Scarcity*. https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity, 2023. Besøgt 11-04-2023.

Vandkoncern, 2023. Vandkoncern. *Kloakkort til AAU til prøvetagning App*. https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=aa67fdd3d8c64af78b66366995b128bb, 2023. Besøgt 13-04-2023.

WatsonC, 2023. WatsonC. *Calypso*. https://map.calypso.watsonc.dk/app/jupiter/chemicals,sensor,system/?config=137180100000113.json&session=s%3A_j1FAJxvYZSm7MWtTsjD7dWwpihjuIpc.z43Z7%2FLRKUapXc3oq2sjqfWPKu%2Bs7bB%2B%2FJOKG%2BmJqyY&license=eyJhbGciOiJIUzI1NiIsInR5cCI6IkpXVCJ9.eyJsaWNlbnNlIjoiZnJlZSJ9.BVM2cQTOSLi9+3kigXxBQDggDU2U9a0ZylPNkYWMg4c#osm/7/11.0268/56.1266/, 2023. Besøgt 28-03-2023.

WSP et al., 2021. WSP, Smith innovation, Teknologisk Institut og Lundgrens. *Terrænnært grundvand i danske byer*. https://www.wsp.com/da-dk/nyheder/2022/udfordringer-med-terraennaert-grundvand, 2021. Besøgt 27-03-2023.

Xiao et al., 2017. Te Xiao, L. Zhang, Xueyou Li og Dian-Qing Li. *Probabilistic Stratification Modeling in Geotechnical Site Characterization*. ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering, 3, 2017. doi: 10.1061/AJRUA6.0000924.

Ziegler et al., 2023. Anja Sloth Ziegler, Søren Liedtke Thorndahl, Rasmus Nielsen, Morten Westergaard og Ida Kemppinen Vester. *SAMSPIL MELLEM GRUNDVAND, AFLØBSSYSTEM OG VANDLØB I BYER (GRAVA)*. https://danva.dk/publikationer/vudp-rapporter/samspil-mellem-grundvand-afloebssystem-og-vandloeb-i-byer-grava/, 2023.

A Numerisk model

Til den numeriske beregning i grundvandsmodellen benyttes "A Newton formulation for Modflow"herefter angivet som NWT. NWT er en udvidelse til MODFLOW-2005, hvorfor den kan vælges som "Solver"i GMS modeller. MODFLOW-2005 er en "finite-difference model"som kan beregne både hydrostatisk og over en periode. [Niswonger et al., 2011]

Formålet med NWT er at beregne ikke lineære flow systemer, hvilket er til stede ved frie magasiner og ikke lineære randbetingelser. Det gør den ved at benytte et "upstream weighthing"princip, angivet UPW, som forhindre flow fra tørre celler. [Niswonger et al., 2011]

Solveren benytter for hydrostatisk trykniveau de fastlagte startbetingelser for trykniveauet, til at beregne en et nyt trykniveau. Denne benyttes i næste iteration, indtil iterationsfejlene imellem er mindre end de valgte startbetingelser. [Niswonger et al., 2011]

Til dette er der valgt en maksimal tolerance på 0,01 m, for forskellen i trykniveau iterationerne imellem. Der er ligeledes valgt et maksimalt antal af iterationer på 200. Øvrige værdier er standard værdier for solveren.

MODFLOW anvender 3D "finite-difference"flow ligninger som angivet i ligning (A.1), hvor der implementeres koefficienter for ledningsevnerne i de forskellige retninger [Niswonger et al., 2011].

$$\begin{aligned} &CV_{i,j,k-1/2} \cdot h_{i,j,k-1} + CR_{i,j-1/2,k} \cdot h_{i,j-1,k} + CC_{i-1/2,j,k} \cdot h_{i-1,j,k} + (-CV_{i,j,k-1/2} \\ &-CR_{i,j-1/2,k} - CC_{i-1/2,j,k} - CV_{i,j,k+1/2} - CR_{i,j+1/2,k} - CC_{i+1/2,j,k} + HCOF_{i,j,k}) \cdot h_{i,j,k} + \\ &CV_{i,j,k+1/2} \cdot h_{i,j,k+1} + CR_{i,j+1/2,k} \cdot h_{i,j+1,k} + CC_{i+1/2,j,k} \cdot h_{i+1,j,k} = RHS_{i,j,k} \end{aligned} \tag{A.1}$$

Hvor

(i,j,k)	Indeks for henholdsvis række, søjle og lag
CV	Ledningsevne koefficient for cellen vertikalt
CR	Ledningsevne koefficient for cellen horisontal langs rækkerne
CC	Ledningsevne koefficient for cellen horisontal langs søjlerne
h	Trykniveau for cellen
$HCOF$	Samlet betegnelse for udtryk som ikke afhænger af ledningsevne koefficienten
RHS	Samlet betegnelse for udtryk på højre side af ligmedtegnet (magasinerings udtryk og randbetingelser)

Disse ledningsevne koefficienter tager udgangspunkt i Darcy's lov, for en-dimensionele strømninger igennem en prisme af et porøst materiale. Ligningen for dette er angivet i (A.2) for strømning imellem celle 1 og celle 2. [Niswonger et al., 2011]

$$Q_{1,2} = \left[\frac{K \cdot A}{L}\right]_{1,2} \cdot (h_1 - h_2) \tag{A.2}$$

Hvor

$Q_{1,2}$	Flow mellem celle 1 og 2
K	Hydraulisk ledningsevne mellem celler i flowretningen
A	Tværsnitsarealet vinkelret på flowretningen
L	Længden af prismen parallel til flowretningen
h_1	Trykniveau for celle 1
h_2	Trykniveau for celle 2

Her samles dele af udtrykket til en ledningsevne koefficient, som angivet i ligningen (A.3). [Niswonger et al., 2011]

$$C_{1,2} = \left[\frac{K \cdot A}{L}\right]_{1,2} = \left[\frac{K \cdot b \cdot w}{L}\right]_{1,2} \tag{A.3}$$

Hvor

w	Bredden af grænsefladen mellem cellerne
b	Bredden af den vandmættede grænseflade mellem cellerne

UPW metoden benytter den gennemsnitlige hydrauliske ledningevne mellem cellerne, hvor den vandmættede grænseflade bliver bestemt opstrøms for flowretningen. Dermed kan ligning (A.3) omskrives til ligning (A.4), L og w er erstattet med celle parametre, og b er erstattet med et udtryk for den vandmættede grænseflade. [Niswonger et al., 2011]

$$CR_{i,j-1/2,k} = \Delta C_i \frac{K_{ave}}{\Delta R_{j-1}} \cdot (h_{up} - BOT_{up}) \tag{A.4}$$

Hvor

ΔC_i	Søjlens bredden for cellen
K_{ave}	Gennemsnitlig hydraulisk ledningsevne for cellerne
ΔR_{j-1}	Afstanden mellem centrum af cellernes
h_{up}	Den maksimale trykhøjde for enten $h_{i,j-1,k}$ eller $h_{i,j,k}$
BOT_{up}	Bundkoten for cellen tilhørende til h_{up}

I tilfælde, hvor h_{up} er større end koten for cellens øvre flade, benyttes denne kote. Ved $h_{up} < BOT_{up}$ angives $\Delta C_i = 0$. [Niswonger et al., 2011]

Til at bestemmelse af den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne er der benyttet vægtet harmonisk middel, der beregnes som illustreret i ligning (A.5).[Niswonger et al., 2011]

$$K_{ave} = K_{i,j-1/2,k} = 2\Delta R_{j-1} \frac{K_{i,j-1,k} \cdot K_{i,j,k}}{\Delta R_j K_{i,j-1,k} + \Delta R_{j-1} K_{i,j,k}} \tag{A.5}$$

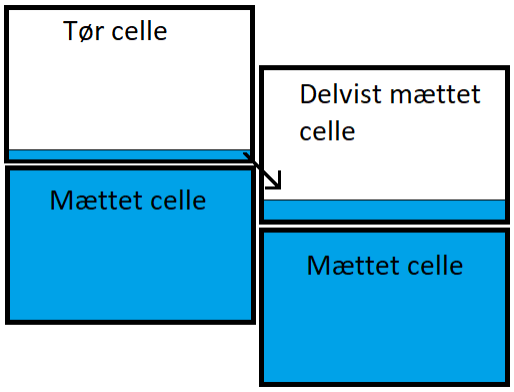
Ved enten meget høj eller lav mætningsgrad af cellen, benyttes en andengradspolynomium over yderpunkterne i funktionen for hydraulisk ledningsevne. Der vælges en afstand under 1×10^{-5} m, hvor polynomiet implementeres i hver ende af funktionen for hydraulisk ledningsevne. For yderligere information om dette, henvises til rapporten Niswonger et al. [2011].

Ved ikke fuldtmættede celler, fyldes disse med andelen af vand nedefra, hvor det resterende indhold antages at være luft. [Niswonger et al., 2011] Dermed ignoreres det kapillærer vandspejl.

Tørre celler antages ikke som no-flow betingelse i UPW, som de typisk bliver ved øvrige principper. UPW kan beregne et trykniveau i en "tør"celle, hvis trykniveauet for en sidestående delvist mættet celle er under

den tørre celles bund, vil vandet blive fordelt over til den sidestående delvist mættet celle. [Niswonger et al., 2011]

Dette koncept er illustreret på figur A.1. Grænseværdier for, hvornår en tør celle skal forblive tør, er angivet til 0,005 m



Figur A.1.Konceptuel illustration over, hvornår vand kan overføres fra en tør celle til en delvist mættet celle. Redigeret fra Niswonger et al. [2011]

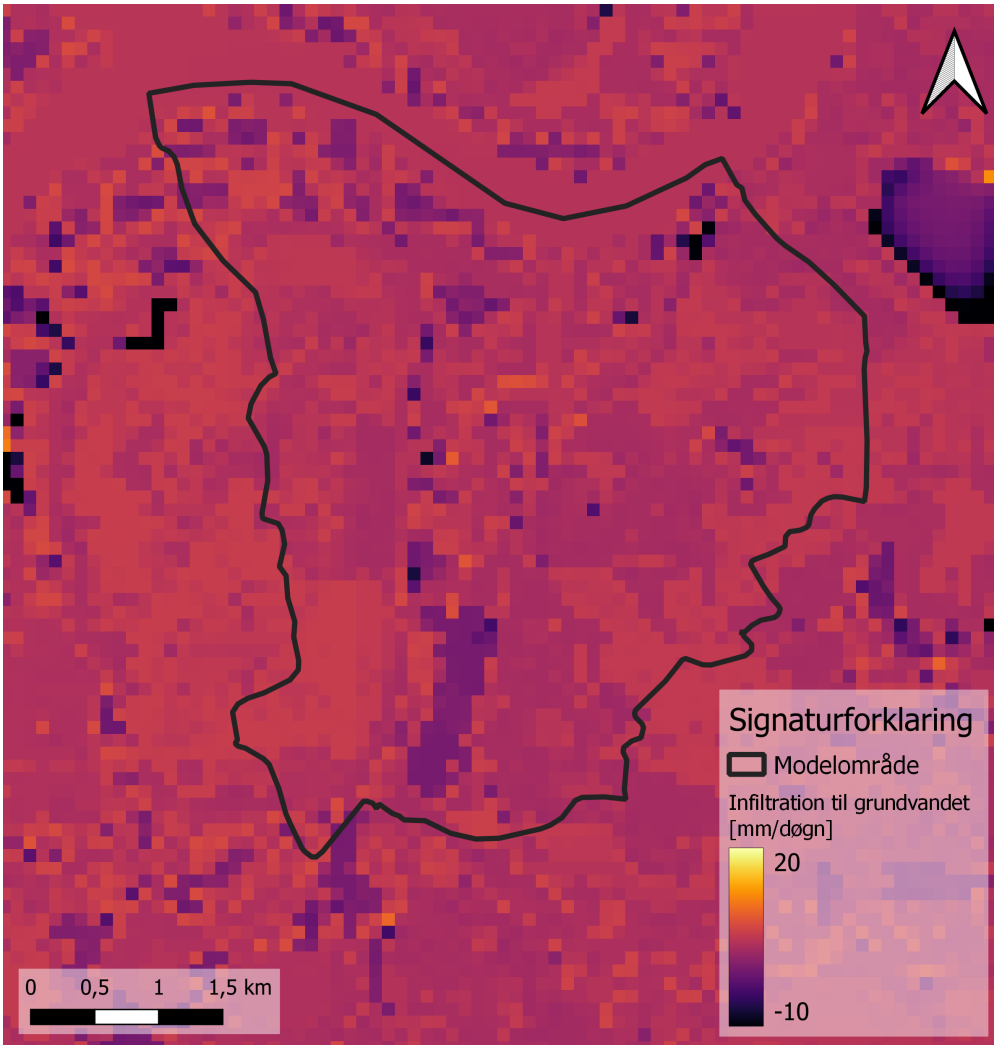
Hvis vand tilføres til en tør celle, vil vandet tilføres direkte til cellen under, i tilfælde af, at denne celle ikke er fuldt vandmættet. [Niswonger et al., 2011]

De resterende elementer af NWT, afviger ikke betydeligt fra øvrige solvere i MODFLOW-2005, derfor er disse ikke beskrevet. For yderligere information angående de resterende elementer af NWT, henvises der til Niswonger et al. [2011].

B Modelopsætning

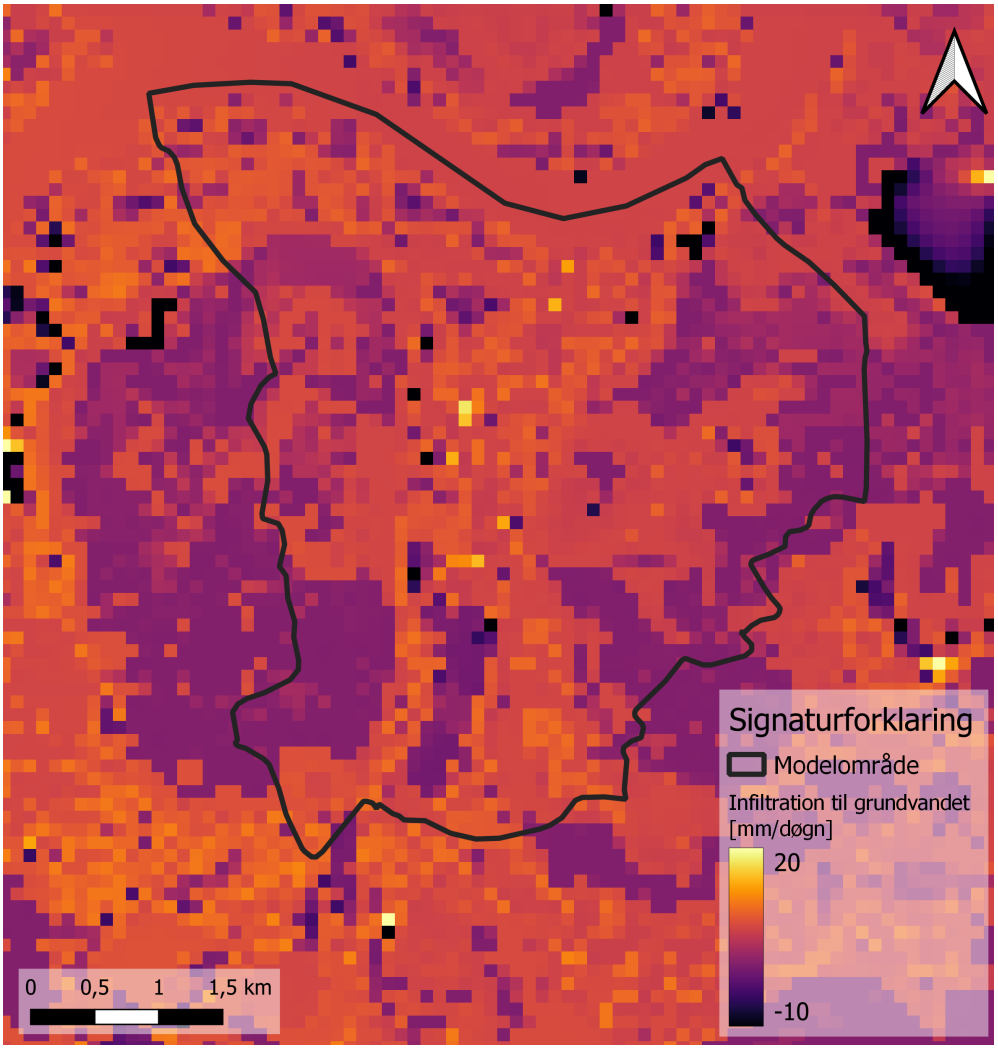
B.1 Modelopsætningsinput

Inputdata for infiltration til grundvandet for sommer på celle niveau fremgår af figur B.1 fra [Dataforsyningen, 2022].



Figur B.1. Infiltration til grundvand for en sommerperiode udtrukket fra [Dataforsyningen, 2022]

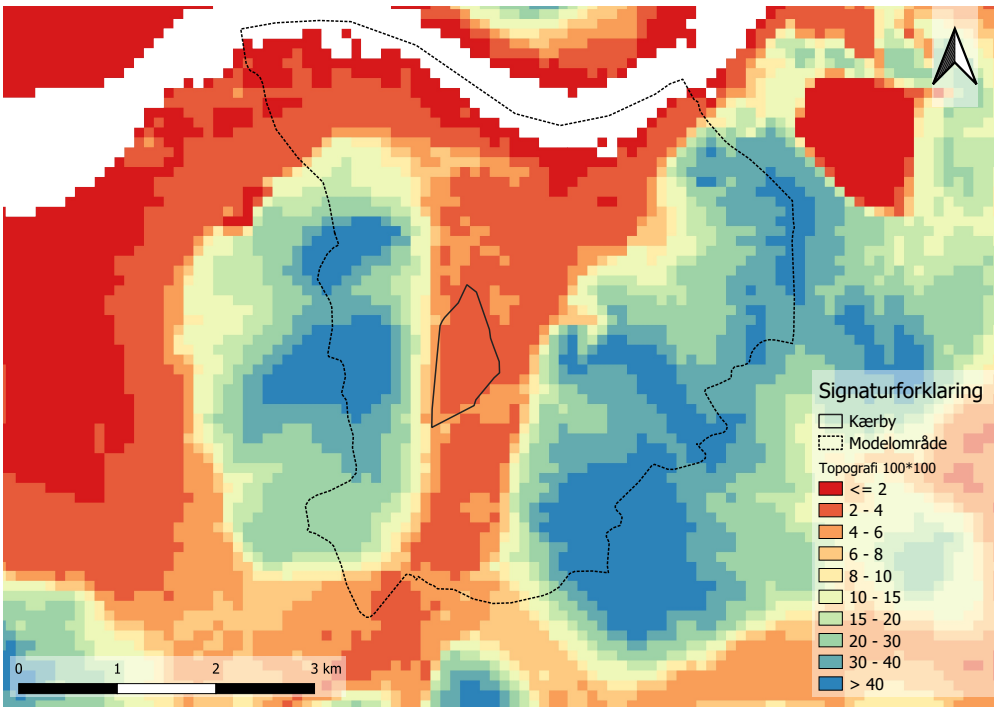
Inputdata for infiltration til grundvandet for vinterhalvåret fremgår af figur B.2 fra [Dataforsyningen, 2022].



Figur B.2. Infiltration til grundvand for en vinterperiode udtrukket fra [Dataforsyningen, 2022]

B.2 Topografi

Den anvendte topografi til opsætning af grundvandsmodel fremgår af figur B.3 udtrykket fra [Dataforsyningen, 2022].



Figur B.3.Den benyttede topografi til grundvandsmodellen.

B.3 Jordtyper i fyld

Indberetninger som er placeret i jordkategorien fyld:

- Ukendt lag
- Sten
- Ingen prøve
- Postglacial vekslende små saltvandslag
- Vekslende små ferskvandslag
- Glacial moræne silt
- Vekslende små lag
- Jernbeton
- Brønd
- Skaller
- Belægningssten
- Fliser
- Fyld?
- Fyld: tørv
- Græs
- Asfalt
- Fyld:gytje
- Fyld.fyld
- Muld sten
- Ler ingen prøve
- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- bb gul

- Sand note lerblandet
- Fyld: silt
- Fyld: kridt
- Ubefæstet
- Fyld: kalk

C Vandstandsmålere

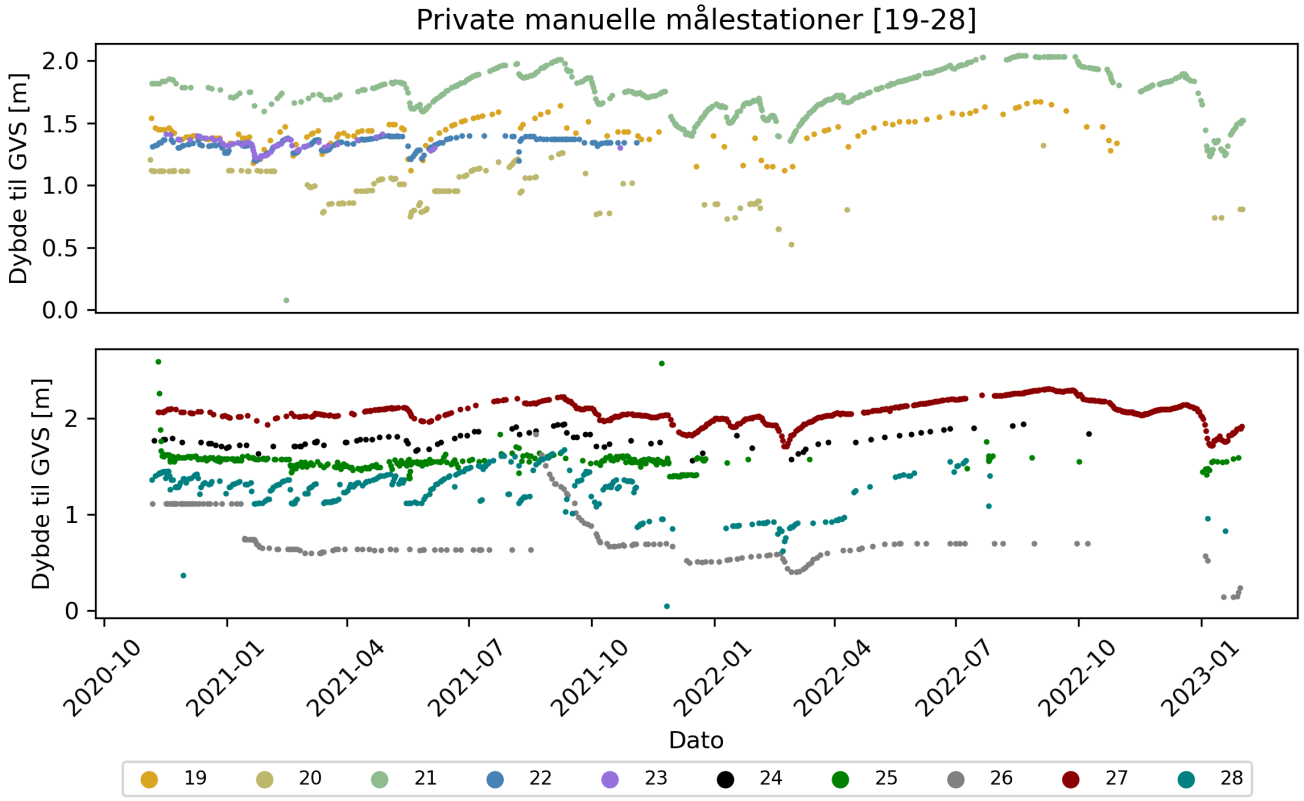
C.1 Aflæsnings vanskeligheder

Figur C.1.Kondens i manuel målestation. [Ziegler et al., 2023]

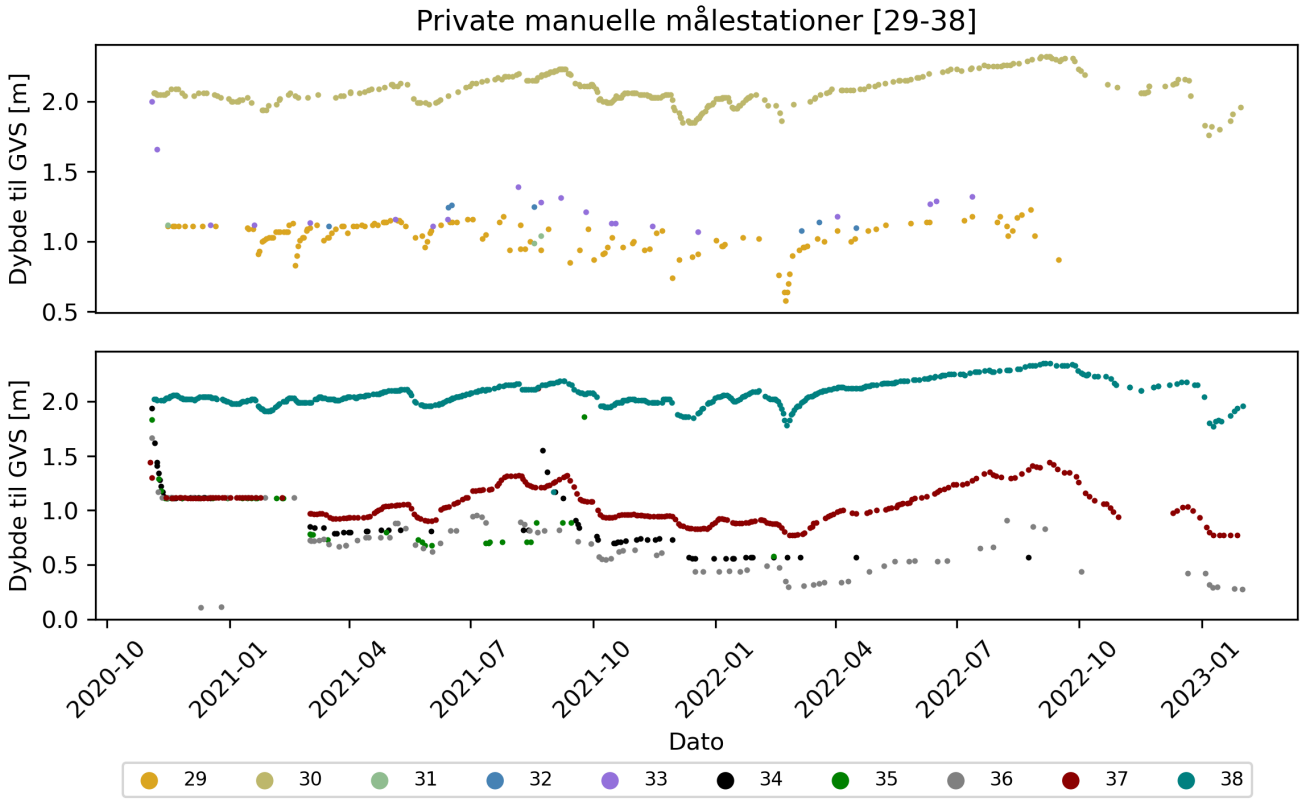
Figur C.2.Illustratoin af besværligheden ved aflæsning grundet vegetation

C.2 Private Målestatoiner

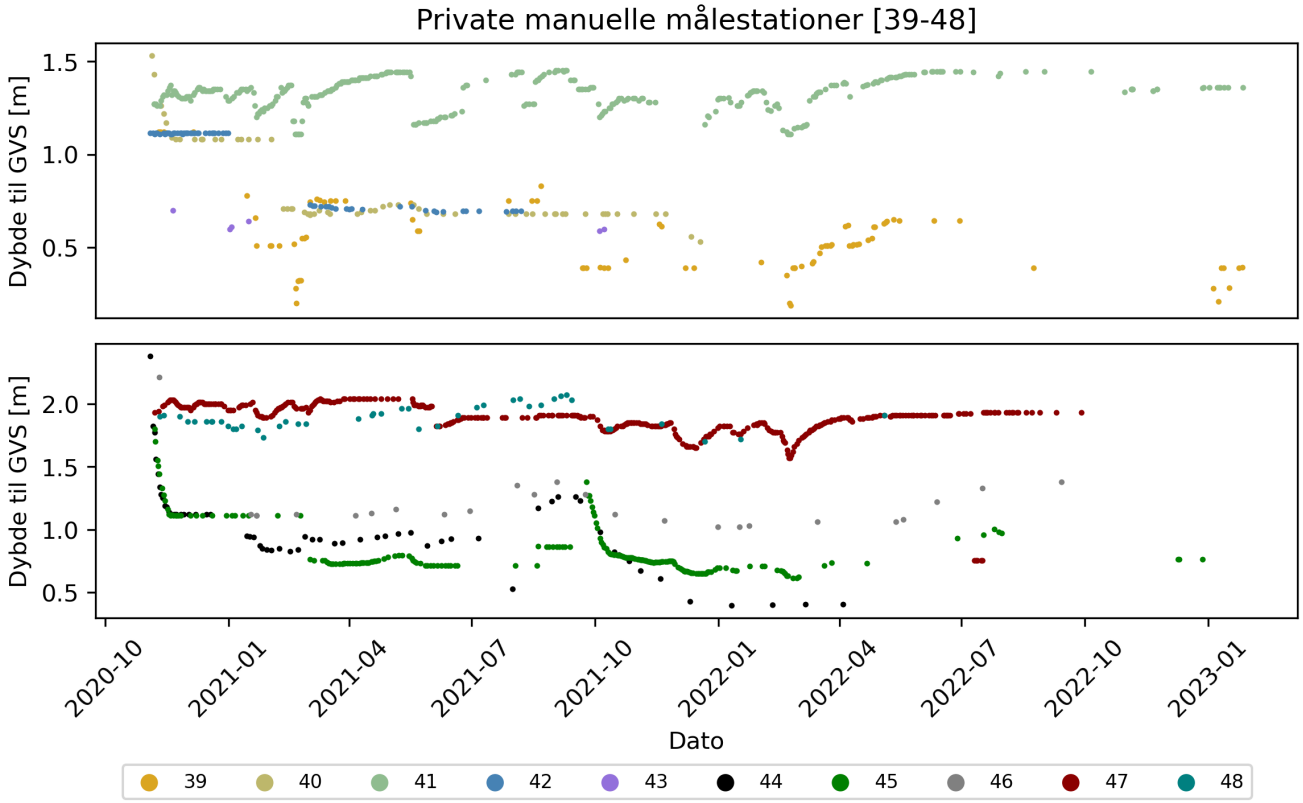
Dette bilag har til formål at illustrerer den tidslige variation i de private målestationer gennem GRAVA-projektet. Det kan observeres at der er meget varierende indberetninger mellem grundejerne i Kærby.



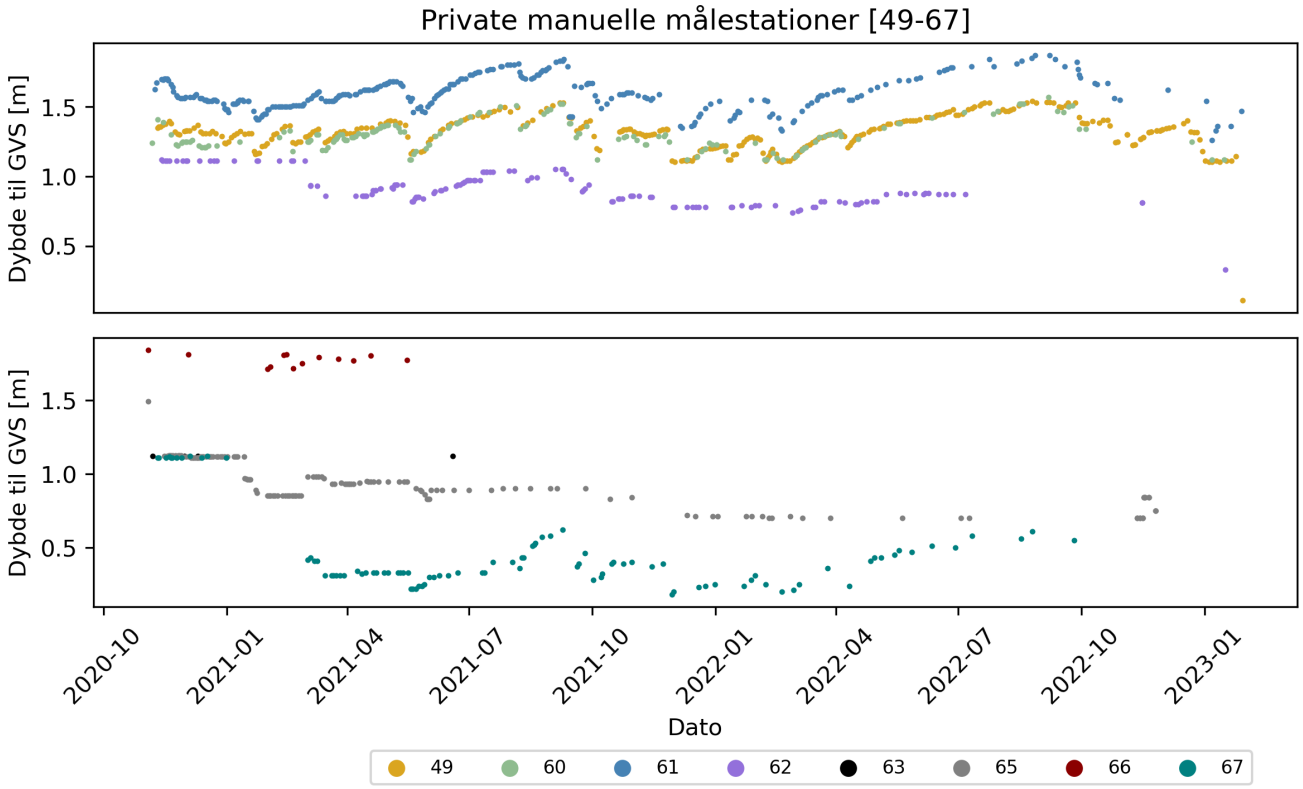
Figur C.3. Vandstandsmålinger fra private målestationer 19 - 28



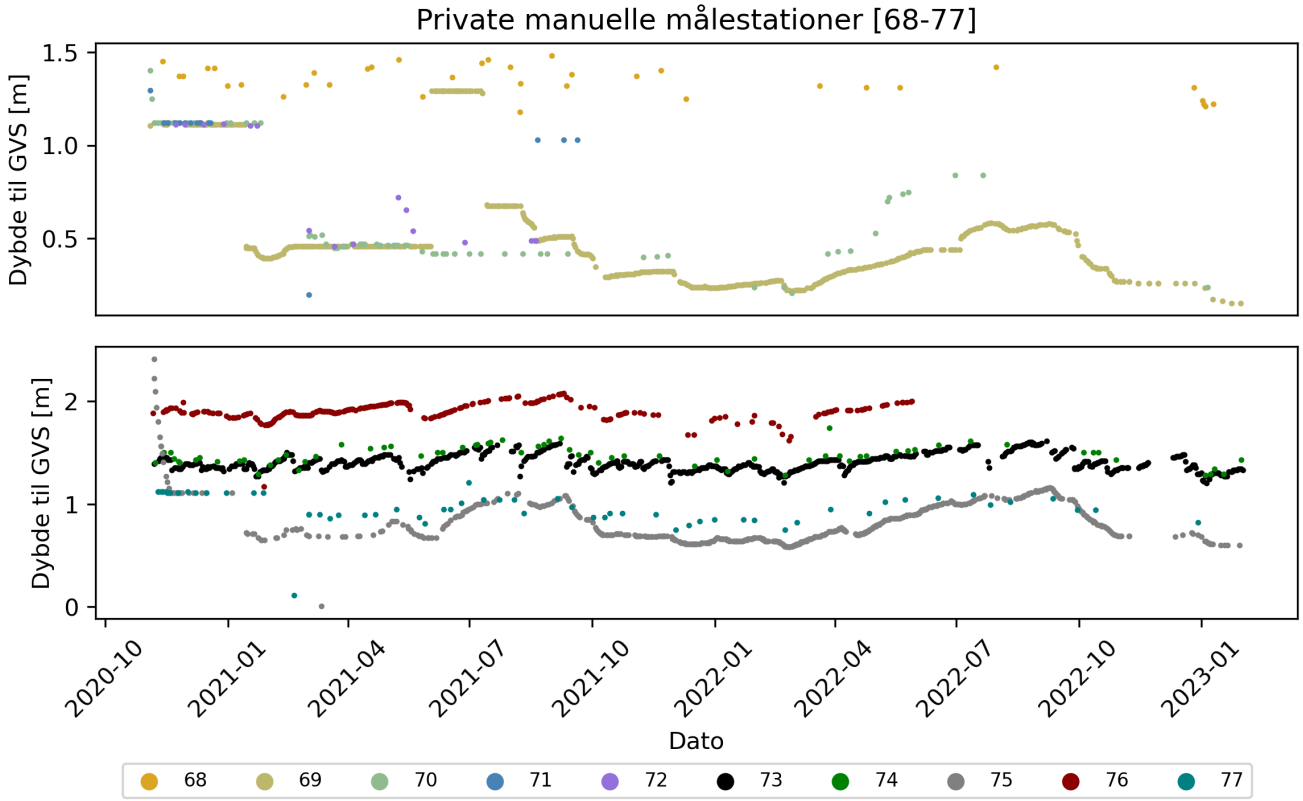
Figur C.4. Vandstandsmålinger fra private målestationer 29 - 38



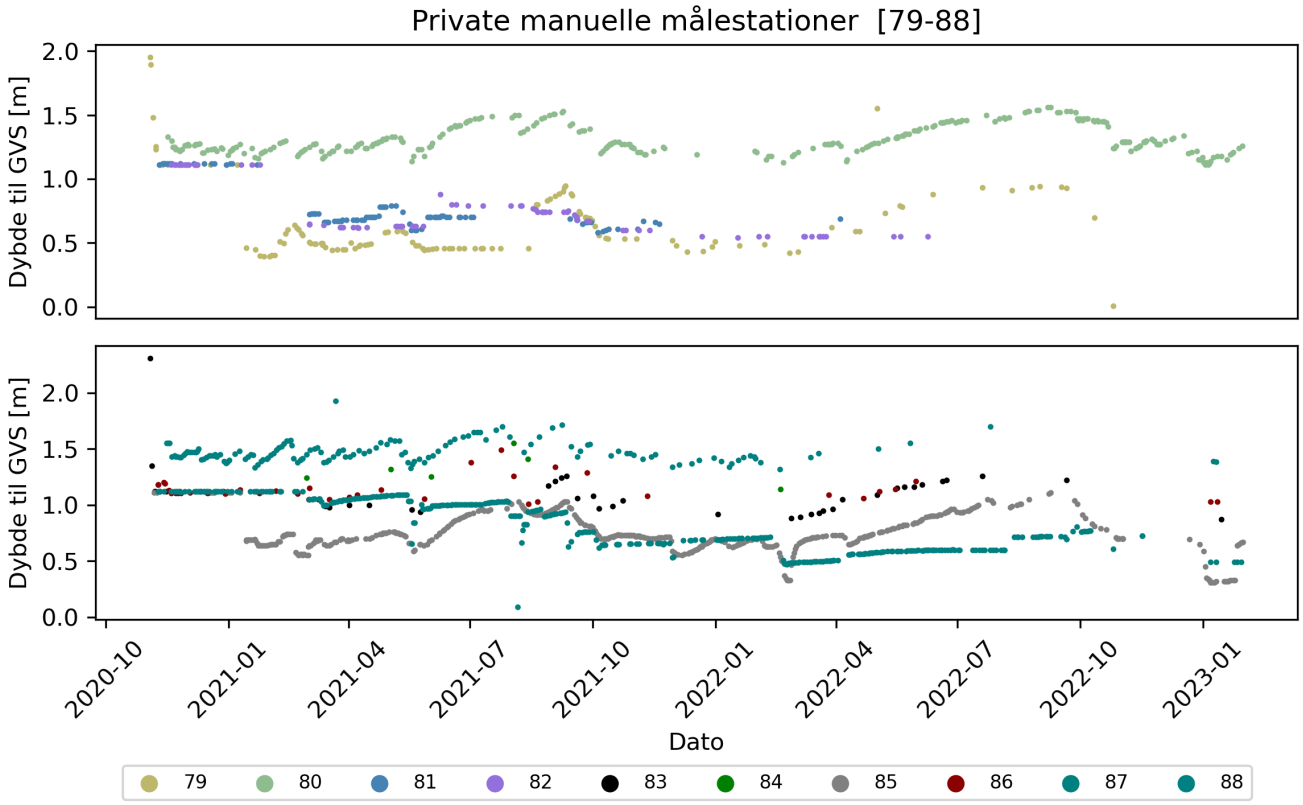
Figur C.5. Vandstandsmålinger fra private målestationer 39 - 48



Figur C.6. Vandstandsmålinger fra private målestationer 49 - 67



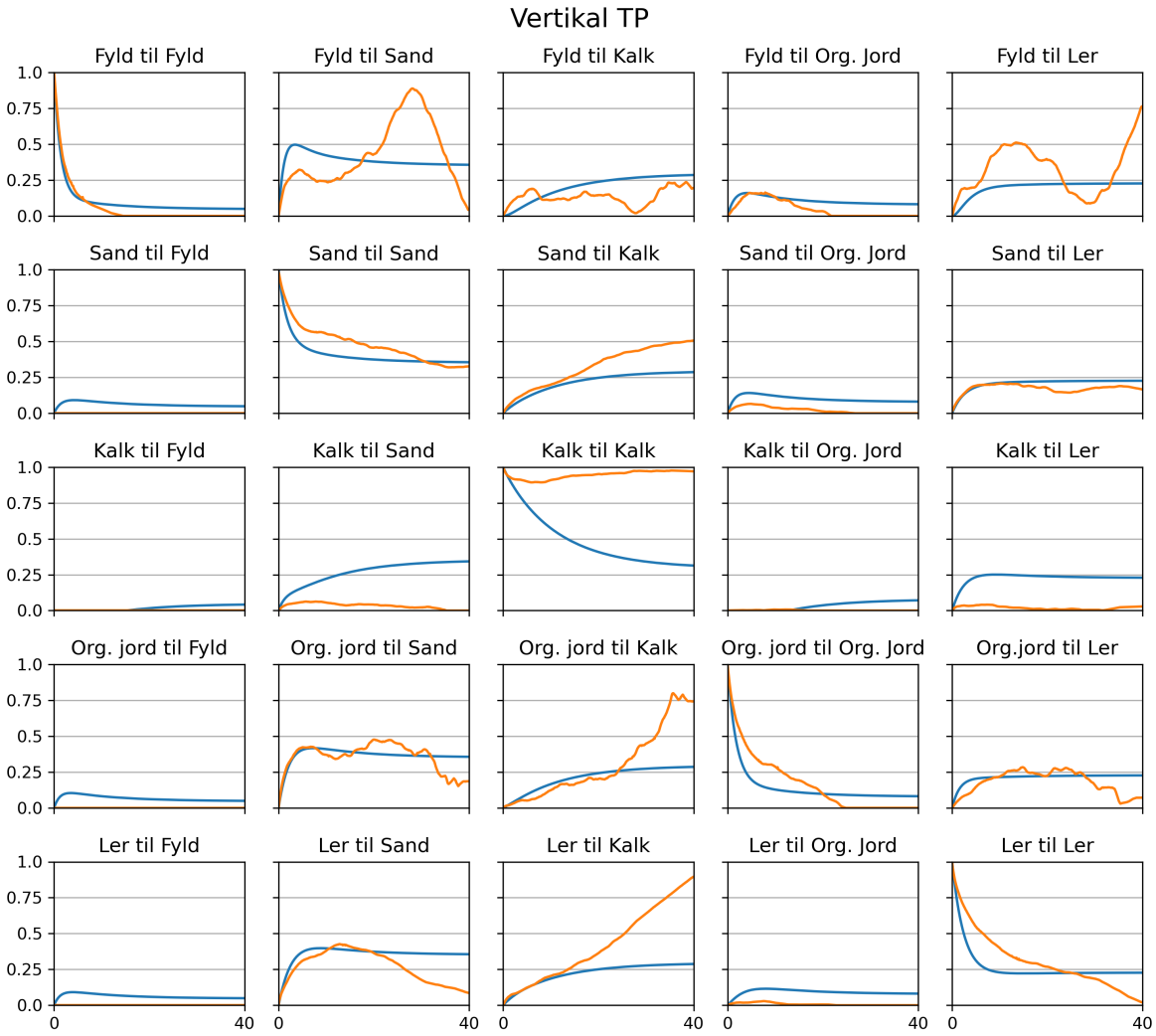
Figur C.7. Vandstandsmålinger fra private målestationer 68 - 77



Figur C.8. Vandstandsmålinger fra private målestationer 68 - 77

D T-PROGS

Figur D.1, illustrerer den observerede TP i vertikal retning.

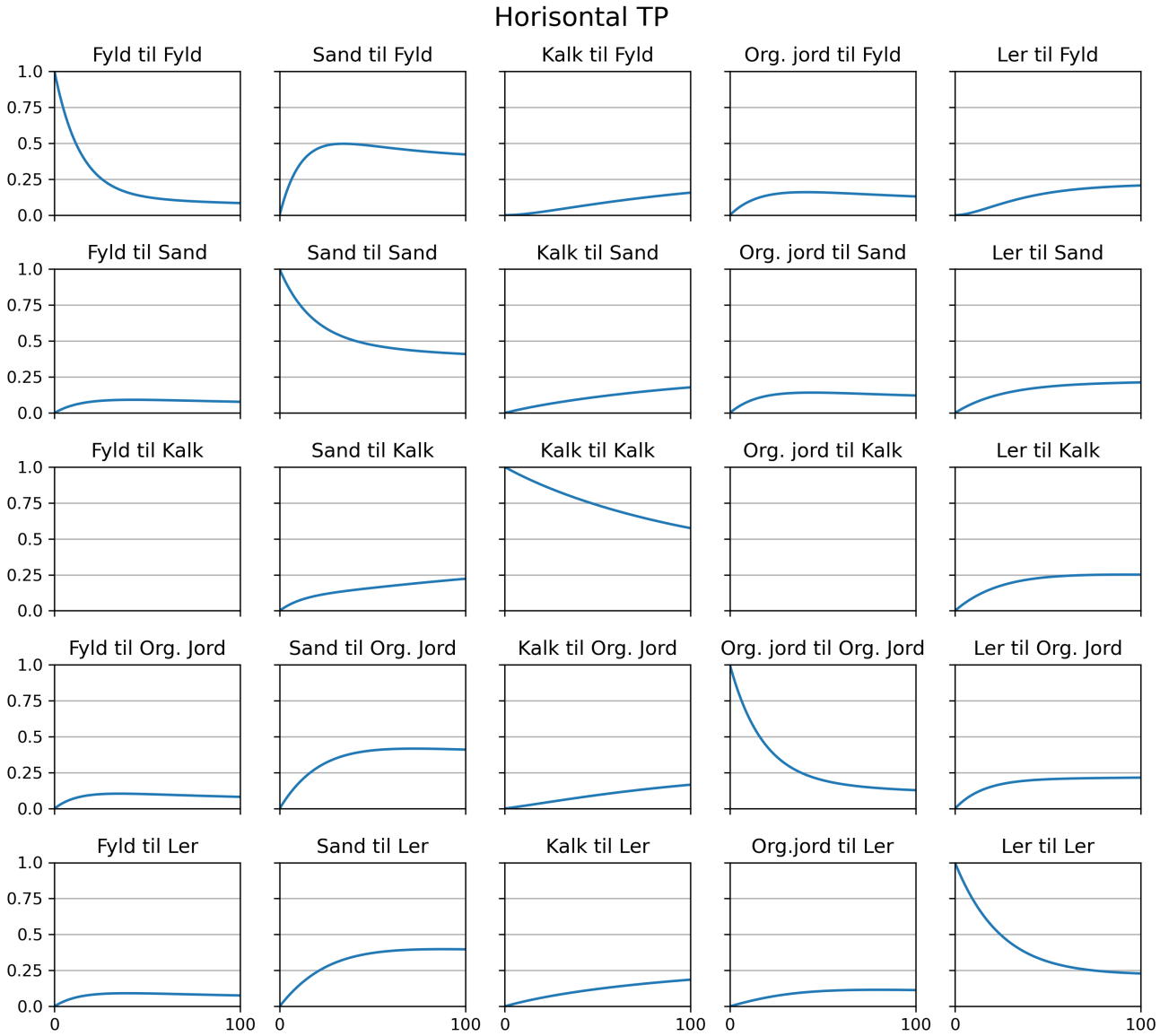


Figur D.1.Overgangs sandsynlighed i z retningen. Observeret er markeret med orange og estimeret er markeret med blå.

Som det fremgår af figuren D.1 har de observerede overgangssandsynligheder TP_z, indikeret med blå, en tilpasning, der er vurderet tilstrækkelig, til de observerede sandsynlighederTP_z, som er indikeret med orange. Som beskrevet i afsnit 5, er dybden til danien kalken defineret til 50 meter, hvorfor generering af geologiske lag med T-PROGS, udelukkende er fortaget i 0,5 - 50 meters dybde. Det kan observeres på figur D.1, at den estimerede overgangssandsynlighed, for jordtypen fyld, ikke følger en varierende tendens. Det må tilskrives, at fyld som beskrevet i afsnit 5.4, er en samling af flere jordtyper, primært menneskeskabt overfladejord, hvorfor overgang fra dybere jordlag til denne ikke forekommer. Derfor er denne tendens

ikke mulig at replikkere, og vurderet ubetydelig, da det følgende geologiske interval [0 - 0,5 meter] er prædefineret til fyld.

Overgangssandsynlighed for en jordkategori til kalk, kan observeres som værende underestimeret, dette kan tilskrives manglende boringer i dybden 50 - 100 meter. Yderligere skyldes det med stor sandsynlighed, at når kalklagene nås i boringerne i det omkring liggende område, er lagtykkelsen væsentlige dybere end, hvad der kan observeres i de korte boringer som forekommer i Kærby. På dette grundlag er det ikke muligt at replikkere dybe observeringer i korte boreprofiler. Overgangssandsynlighederne for sand, organisk jord, og ler, kan antages som en tilstrækkelig tilpasning til den observerede tendens. Nedenstående figur D.2, illustrerer de horisontale $TP_{x,y}$, for de geologiske realiseringer.

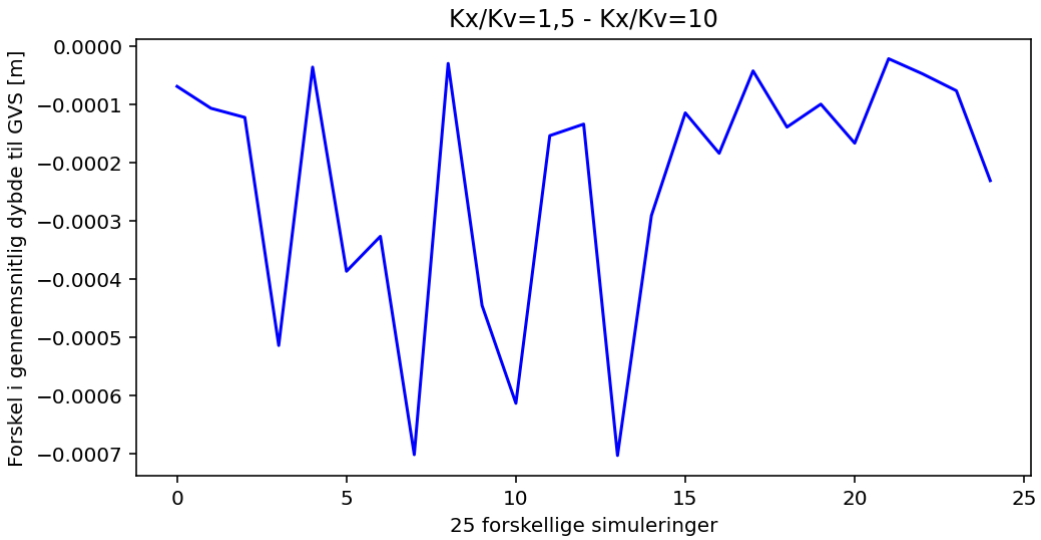


Figur D.2.midlertidig

Figur D.2, illustrerer de horisontale $TP_{x,y}$, som er benyttet til estimering af den rumlige fordeling af jordtyper i de geologiske realiseringer. $TP_{x,y}$ er som beskrevet i kapitel 7.4, identiske med TP_z, hvor jordtype udbredelsen er skaleret med en faktor. Det skyldes at geologisk materiale aflejres i vertikal retning og horisontale retninger med samme sekvens, men med forskellige skala [Elfeki og Dekking, 2005]. Hvor diagonalen som repræsentere den skallerede horisontal jordtype udbredelses, vist i tabel 7.6.

E Følsomhedsanalyse

Figur E.1 viser betydningen af forholdet mellem den vertikale hydrauliske ledningsevne (kv) og horisontale hydrauliske ledningsevne (kx) på henholdsvist 1,5 og 10.



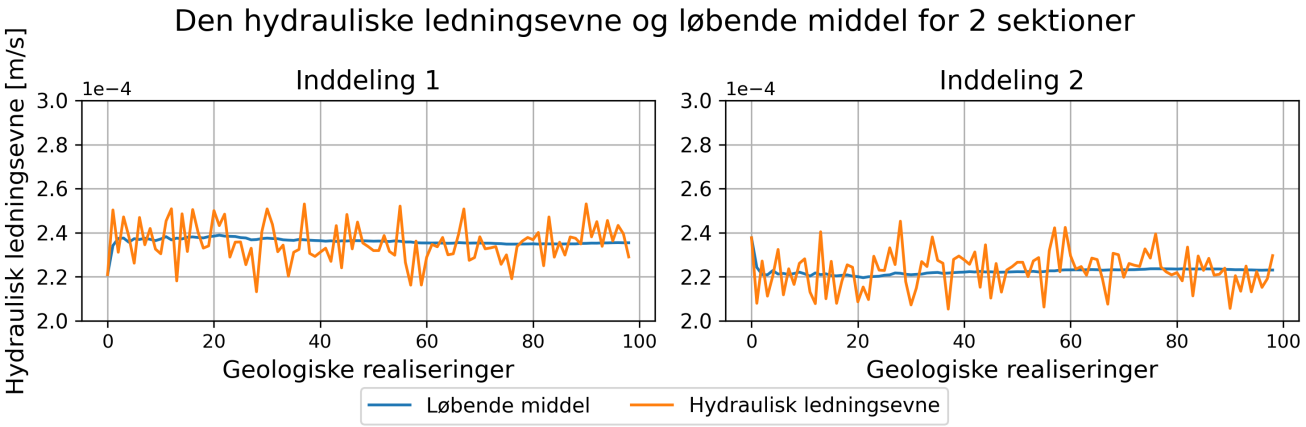
Figur E.1.Forskel i den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet (GVS) for forholdet mellem den vertikale hydrauliske ledningsevne (kv) og horisontale hydrauliske ledningsevne (kx) på henholdsvist 1,5 og 10.

E.1 Inddeling af projet området

Af nedenstående figur E.2, er de 3 forskellige inddeling intervaller benyttet i følsomhedsanalysn illustreret.

Figur E.2.Inddelings intervallet benyttet til følsomhedsanalysen

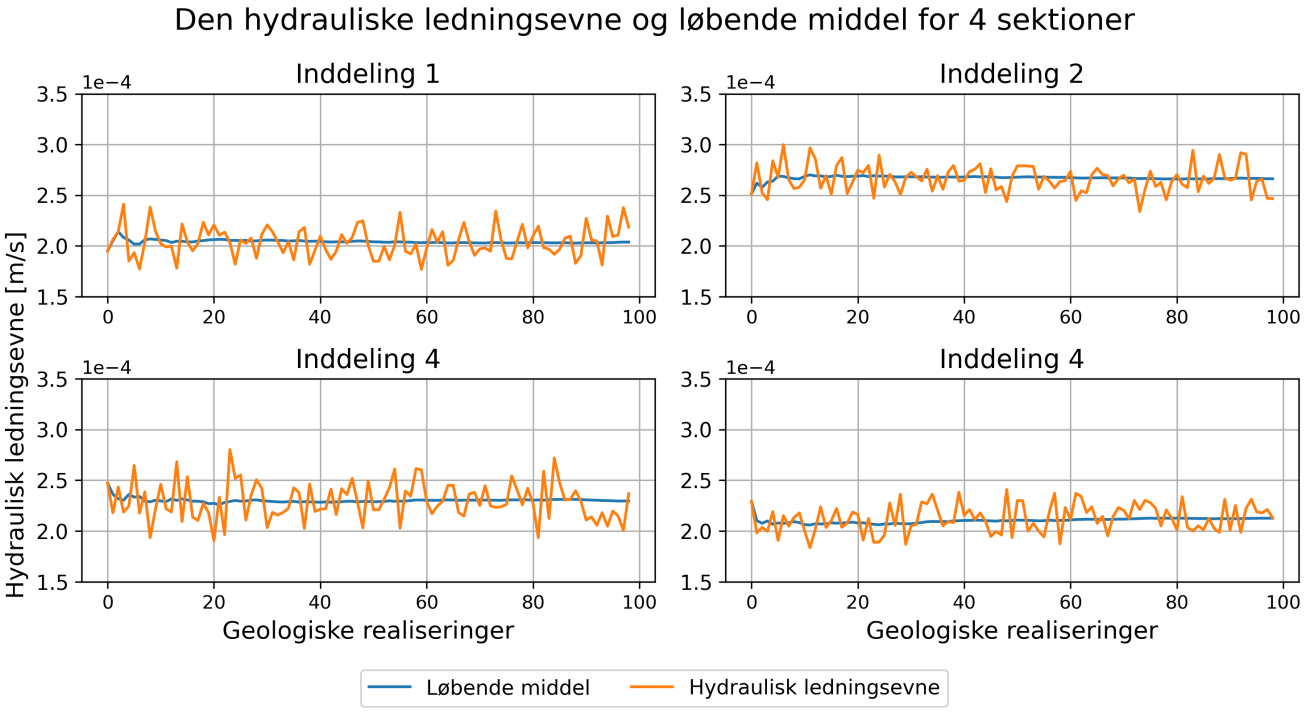
Det er forsøgt estimeret, hvor mange geologiske realiseringer, som er statistisk nødvendige. Analysen tager udgangspunkt i to metoder. En analyse af den midlet hydrauliske ledningensevne og ændringen heraf for de geologiske realiseringer, og en analyse af resultatet i form af trykniveau for hver geologisk model. Dermed undersøges, hvor meget geologien ændres og dennes betydning på resultaterne. Da denne analyse af vist lignende resultater for de valgte inddelinger, er det fulde omfang af analysen vist i dette bilag. Den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne og løbende middel er vist for området inddelt i to inddelinger på figur E.3.



Figur E.3.Hydraulisk ledningsevne og løbende middel for 2 sektioner

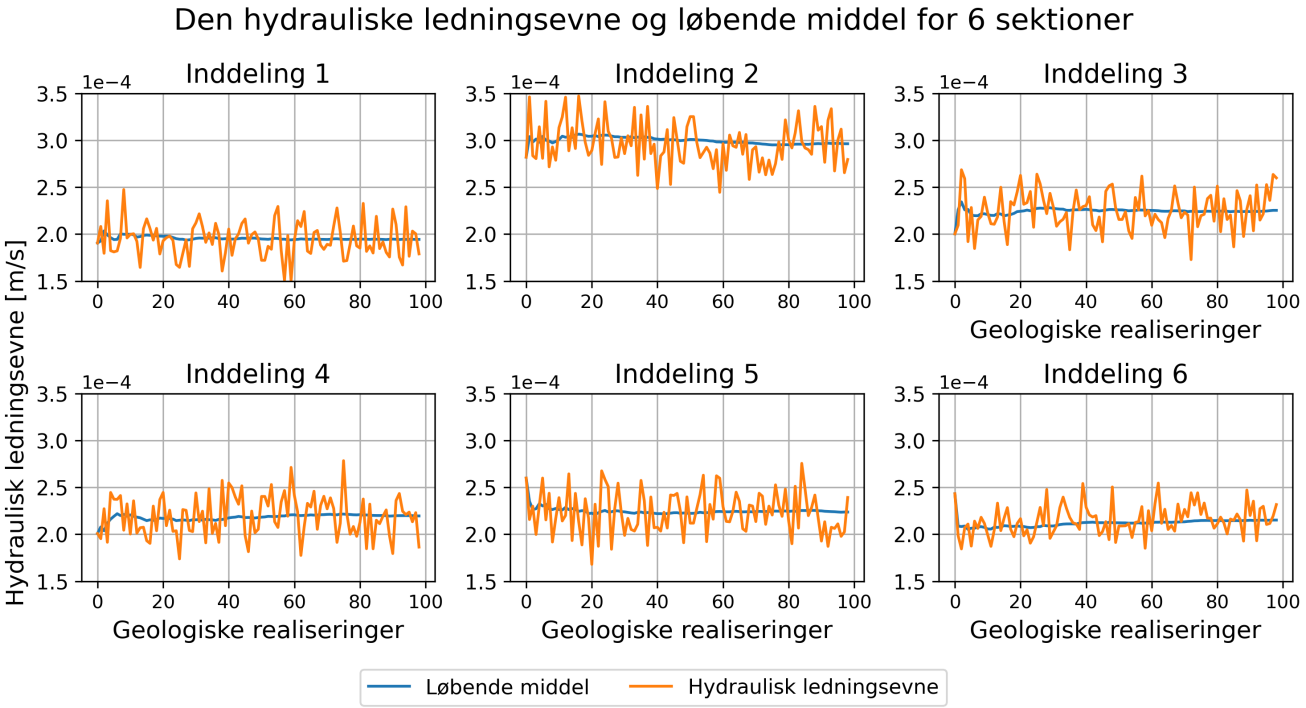
Den hydrauliske ledningsevne kan observeres som værende varierende gennem 99 geologiske realiseringer for hver de 2 inddelinger. Generelt har inddeling nr. 2 ind lavere hydraulisk ledningsevne end observeret for inddeling nr. 1. Dette må tilskrives at den sydlige del af Kærby er domineret af jordtyper med en lavere hydraulisk ledningsevne. Det beregnet løbende middel for hydrauliske ledningsevne, konvergere allerede efter geologiske realiseringer. Som vist på Figur E.3, er denne mindre variernede i intervallet $[2.2 \cdot 10^{-04} - 2.35 \cdot 10^{-04}]$, og stabiliseres efter cirka 10 realiseringer.

Den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne og løbende middel er vist for inddeling af området i fire på figur E.4.



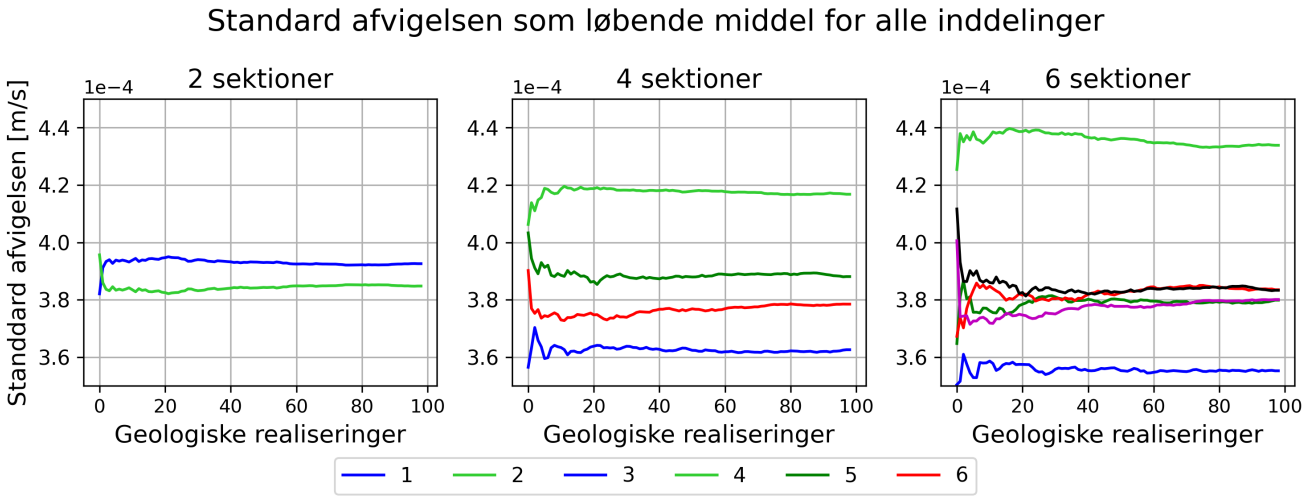
Figur E.4. Hydraulisk ledningsevne og løbende middel for 4 sektioner

Den hydrauliske ledningsevne kan observeres som værende varierende gennem 99 geologiske realiseringer for hver de 4 inddelinger. Generelt har inddeling nr. 2 en lavere hydrauliskledningsevne end observeret for de resterende 3 inddelinger. Som det fremgår af figur E.4 har inddeling nr. 1 og nr. 4 højest observeret hydrauliske ledningsevne. Det beregnet løbende middel for hydrauliske ledningsevne, konvergere allerede efter få geologiske realiseringer. Som vist på figur E.3, konvergerer den løbende midlet hydrauliske ledningsevner efter cirka 10 realiseringer for alle 4 inddelinger. Den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne og løbende middel er vist for de 6 delområder på figur E.5.



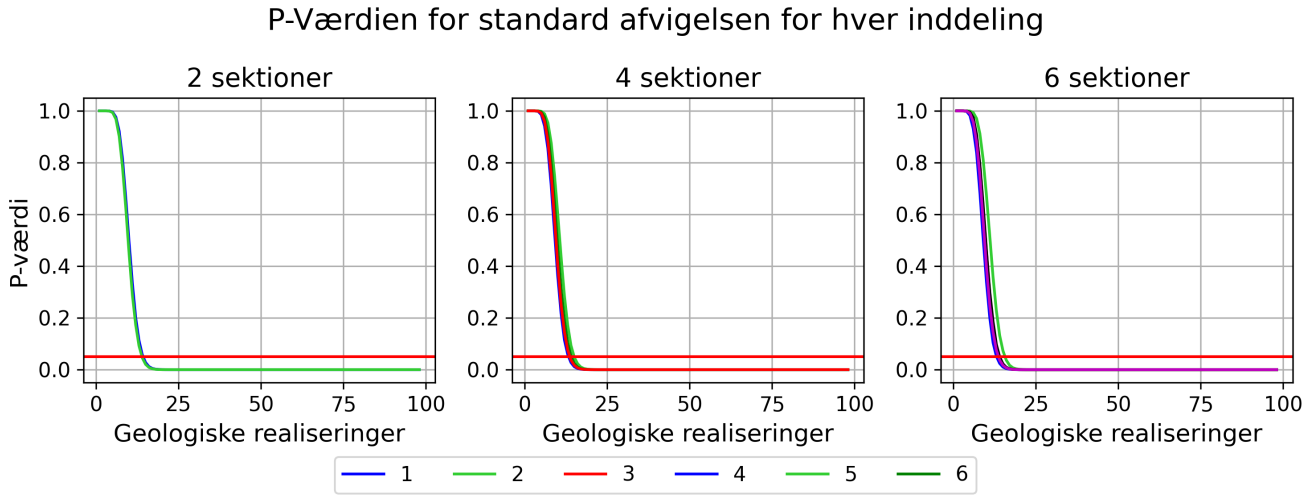
Figur E.5. Hydraulisk ledningsevne og løbende middel for 6 sektioner

Den hydrauliske ledningsevne kan observeres som værende varierende gennem 99 geologiske realiseringer for hver de 6 inddelinger. Generelt har inddeling nr. 2 en lavere hydrauliskledningsevne end observeret for de resterende 5 inddelinger. Som det fremgår af figur E.5 har inddeling 1 og 6 højest observeret hydrauliske ledningsevne. Det beregnet løbende middel for den hydrauliske ledningsevne, konvergere allerede efter få geologiske realiseringer. Som vist på figur E.3, konvergerer det løbende middel for den hydrauliske ledningsevner efter cirka 10 realiseringer for alle 6 inddelinger. På nedenstående figur E.6 illustreres standardafvigelsen for den hydraulisk ledningsevne og løbende middel for alle inddeling 1 - 6.



Figur E.6.Standardafvigelsen for den hydraulisk ledningsevne og løbende middel for alle inddelinger.

Som det fremgår af figuren E.6, observeres der en forskel i standardafvigelsen for den hydraulisk ledningsevne som løbende middel over de geologiske realiseringer, ved de 3 forskellige inddelingsintervaller. For standardafvigelsen observeres en større spredning, som øges ved stigende antal af inddelingssektioner. Dette er samme effekt, som observeres på fordelingen af den hydrauliske ledningsevne på figur E.3, figur E.4 og figur E.5. Dette må tilskrives at lokale variationer i jordtyper og at parametrisering bliver mere tydlige, jo mindre et område der analysers. På dette grundlag er det undersøgt, hvornår standardafvigelsen ikke længere kan antages at være signifikant afvigende for det globale gennemsnit for standardafvigelsen, som er baseret på den gennemsnitlige værdi over de 99 geologiske realiseringer. På nedenstående figur E.7 er P-værdien for standardafvigelsen for 3 inddelingers intervaller illustreret.



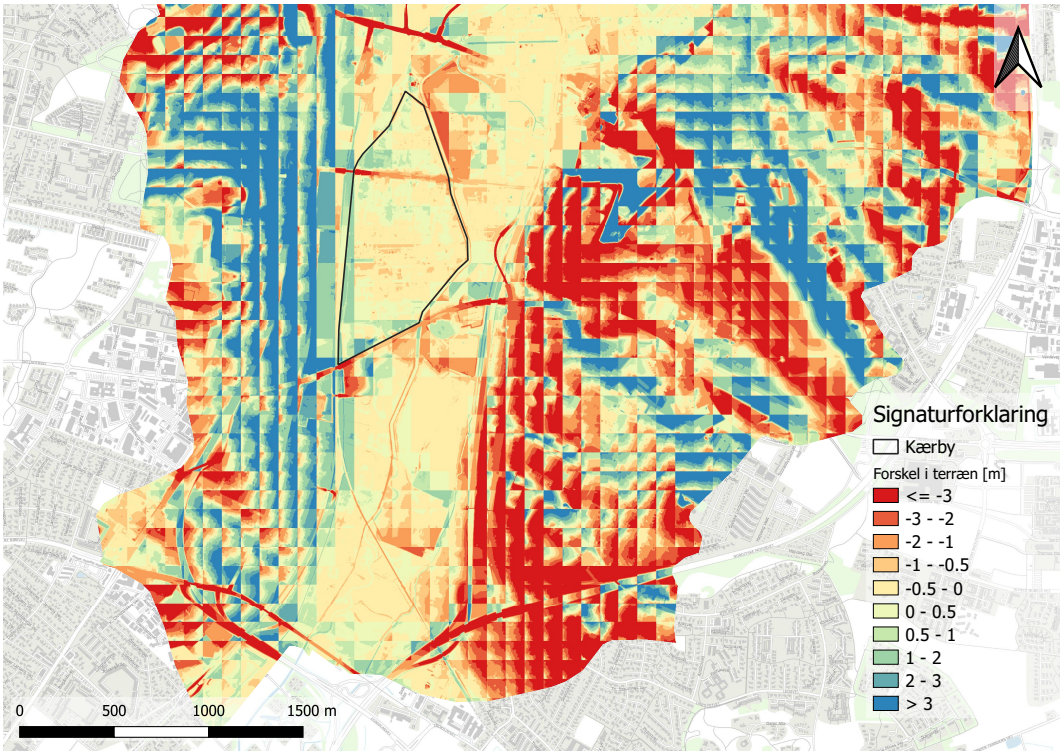
Figur E.7.Standardafvigelsen for den hydrauliske ledningsevne og løbende middel for alle inddelinger

Som det fremgår af figuren E.6, observeres der en væsentlig forskel i P-værdien for standardafvigelsen, some

er beregnet af løbende middel over de geologiske realiseringer, ved de 3 forskellige inddelings intervaller. Der observeres ingen sammenhæng mellem den lokale og globale standardafvigelse, som funktion af de første 10 geologiske realiseringer, hvor P-værdien er stærkt faldende. Ved cirka 10 geologiske realiseringer, kan der observeres en stabiliserende tendens. P-værdien kommer under 95% signifikansniveauet (0.05) ved iteration 14. Signifikansniveauet ligger herefter stabilt og de geologiske realiseringer kan ikke længere antages som værende signifikant forskellige, og dermed forkastes nulhypotesen. Den samme tendens kan observeres ved de 3 inddelings intervaller, hvorfor det er antaget at valget af sektions antal, ikke har noget væsentlig betydning for analysen.

F Validering

Modellens grundvandspotentialekort benytter et rasterlag på $[100 \cdot 100m]$, hvor benyttelse af finere topografikort, kan resultere i vand på terræn som startbetingelse. Ligeledes er cellestørrelsen i modellen $[15 \cdot 15m]$, hvorfor finere diskretisering end dette kan være misvisende. Forskellen i topografien fra de to topografi lag er illustreret på figur B.3 fra Dataforsyningen [2022] og figur 4.4 fra SCALGO [2022] fremgår af figur F.1.



Figur F.1. Forskellen i topografi ved $[0{,}4 \cdot 0{,}4m]$ fra SCALGO [2022] og $[100 \cdot 100m]$ fra Dataforsyningen [2022] opløsning.

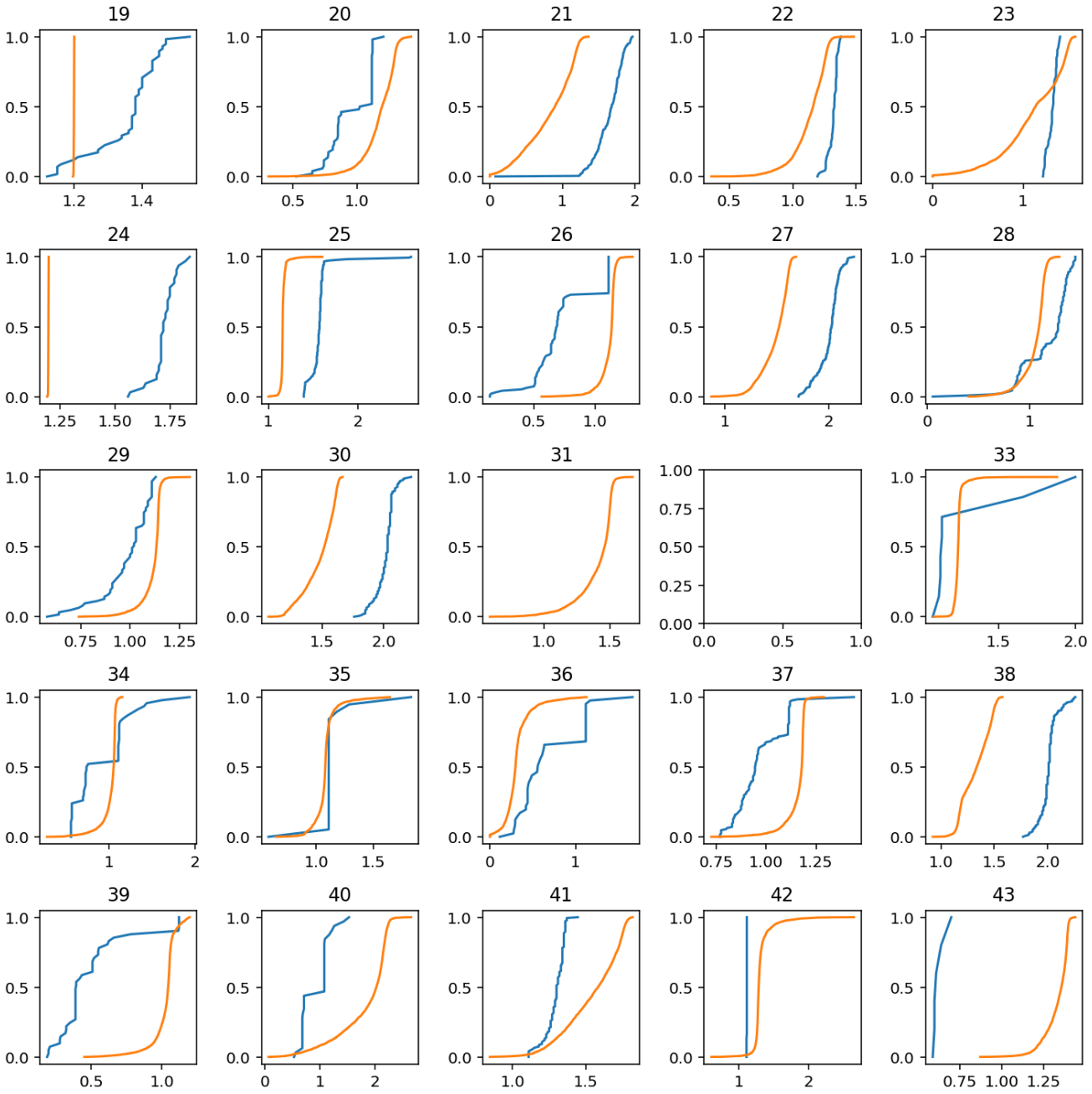
Af figuren fremgår det, at topografien varierer væsentligt flere steder i området. Visse steder i modelområdet er forskellen markant større, dette fremgår ikke af figuren for at opnå bedre opløsning mellem intervallerne i Kærby.

F.1 Manuelle målestationer

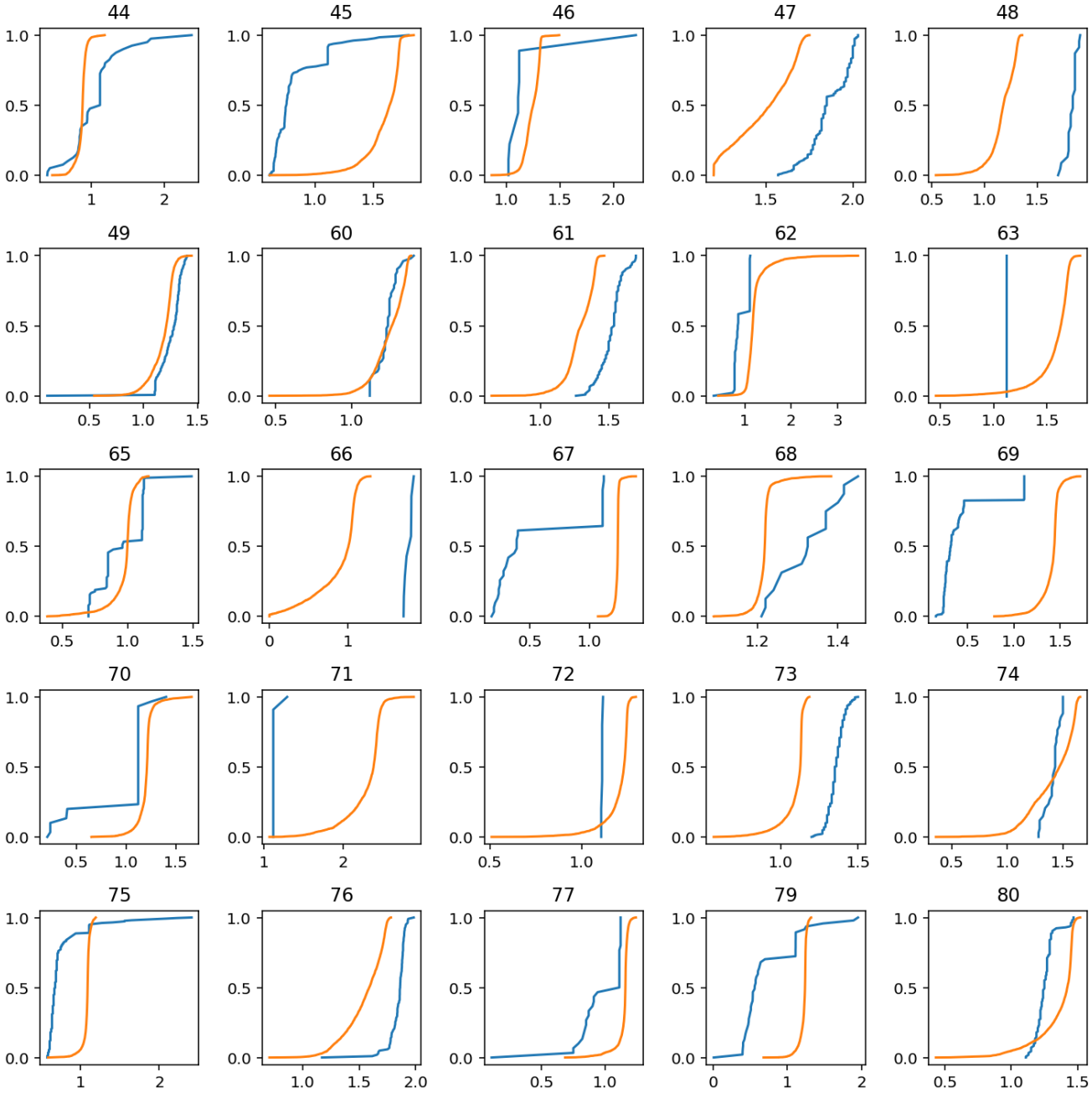
Heraf fremgår en sammenligning af det simulerede- og observerede dybder til grundvandsspejlet for manuelle målestationer. Tomme felter i efterfølgende figurer, er for tilfælde, hvor målestationen ikke havde nogle indberetninger for årstiden. Valideringen er opdelt i henholdsvist sommer og vinter, og sammenligningerne foretages ud fra kumulative sandsynlighedsfordelinger for værdierne. Målestationernes nummer er angivet over hver graf.

F.1.1 Validering ud fra vintermåneder

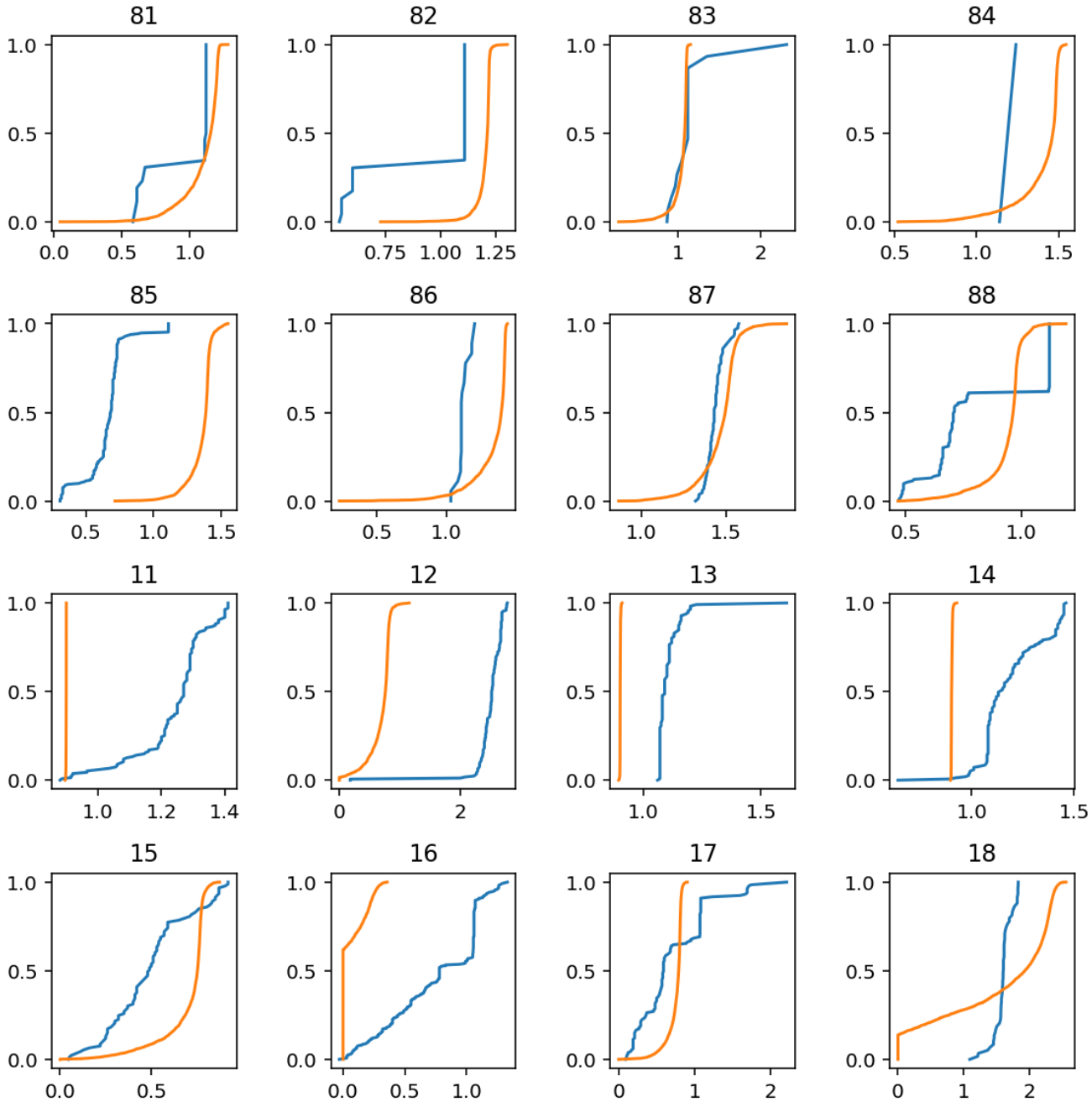
Forskellen mellem observerede- og simulerede dybder til grundvandsspejlet for vintermånederne fremgår af figur F.2, figur F.3 og figur F.4



Figur F.2.Forskellen mellem observerede og simulerede dybden til grundvandsspejlet for vintermånederne. Observeret er markeret med blå og simuleret med orange.



Figur F.3.Forskellen mellem observerede og simulerede dybden til grundvandsspejlet for vintermånederne. Observeret er markeret med blå og simuleret med orange.

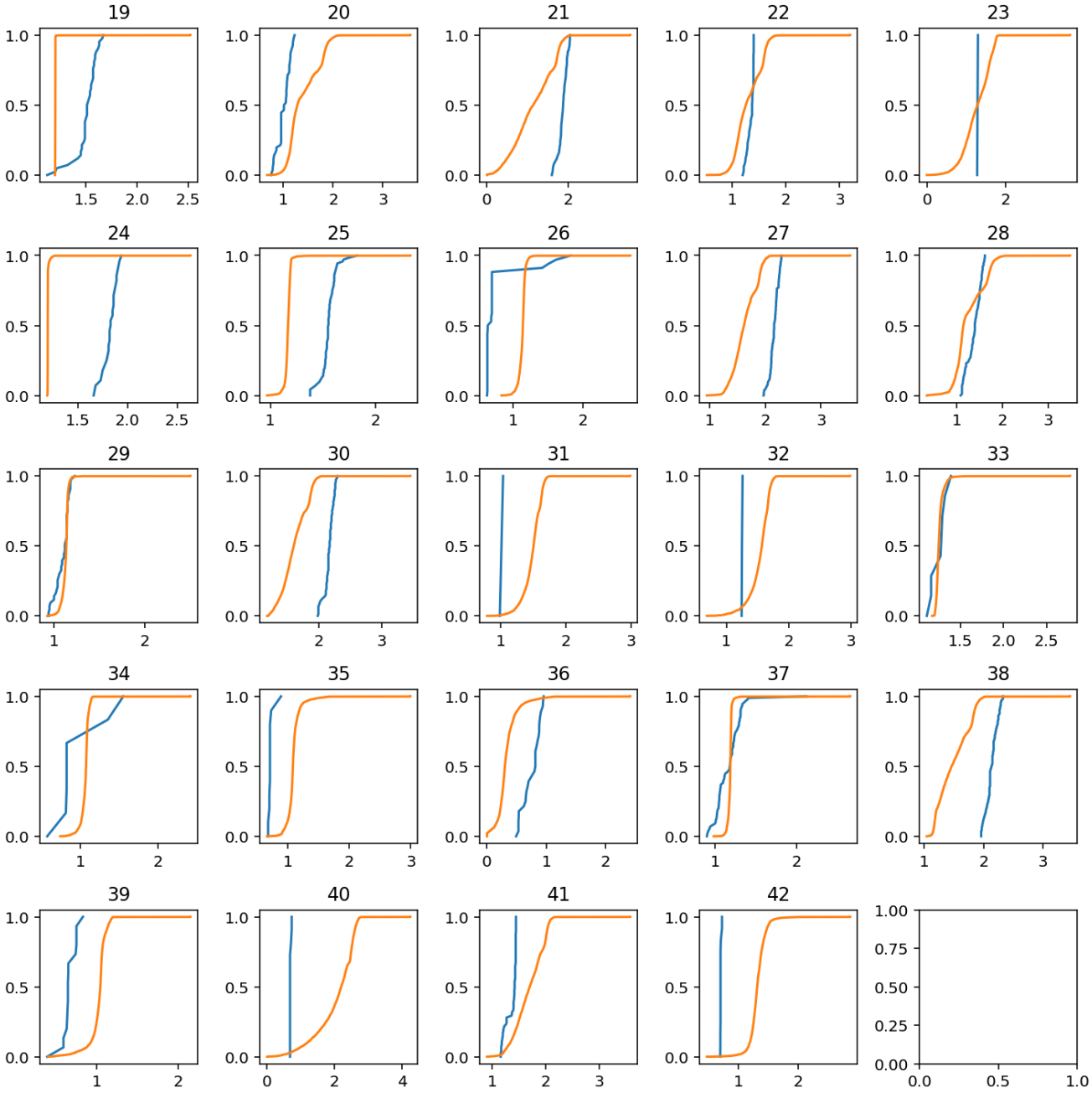


Figur F.4. Forskellen mellem observerede og simulerede dybden til grundvandsspejlet for vintermånederne. Observeret er markeret med blå og simuleret med orange.

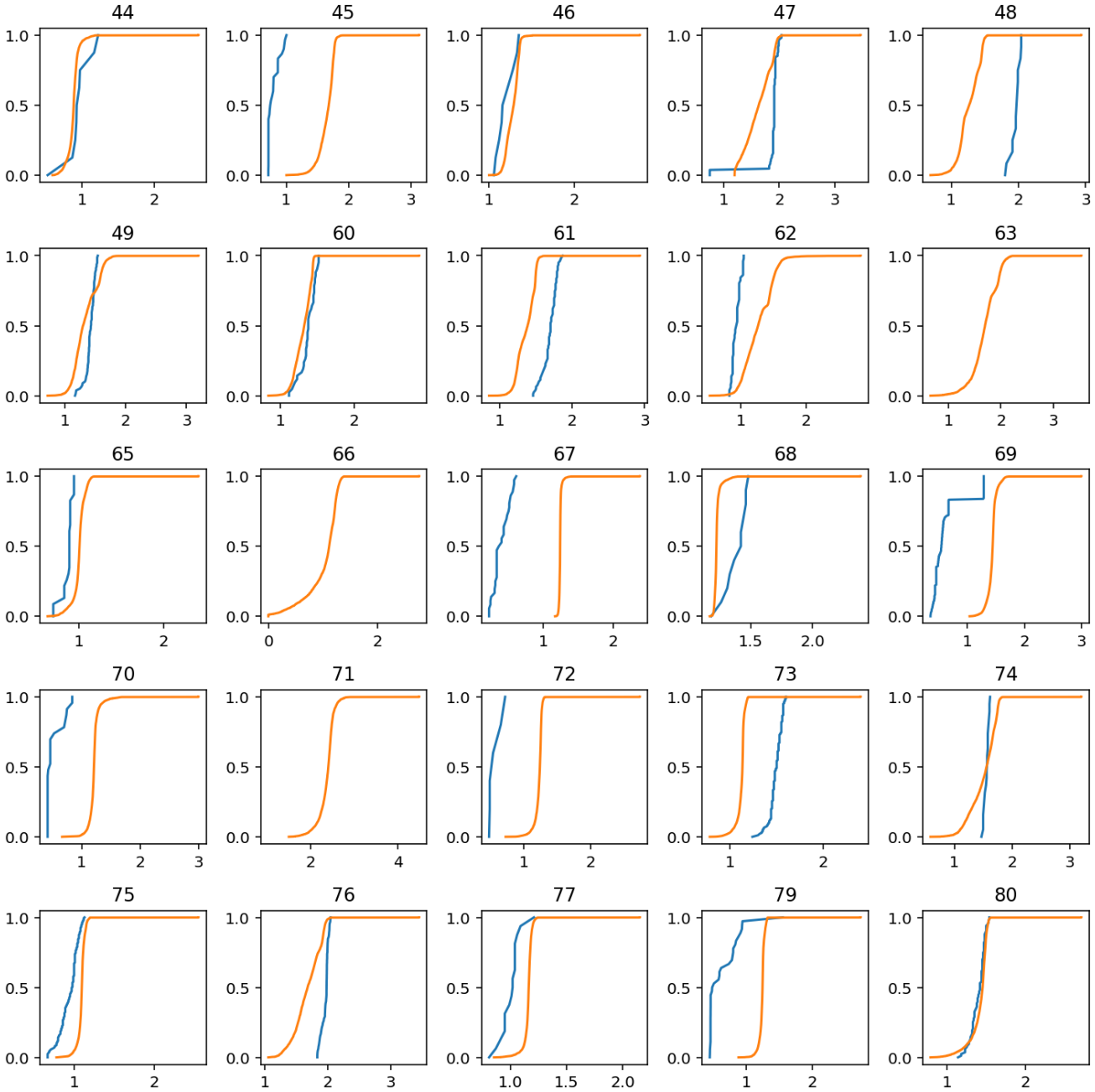
Af figuren fremgår det, at sammenhængen mellem de observerede og simulerede dybder til grundvandsspejlet er varierende, hvor nogle har god overensstemmelse og andre mindre god. Der er 2 målestationer uden indberetninger i perioden og 3 med en enkelt indberetning.

F.1.2 Validering ud fra sommermåneder

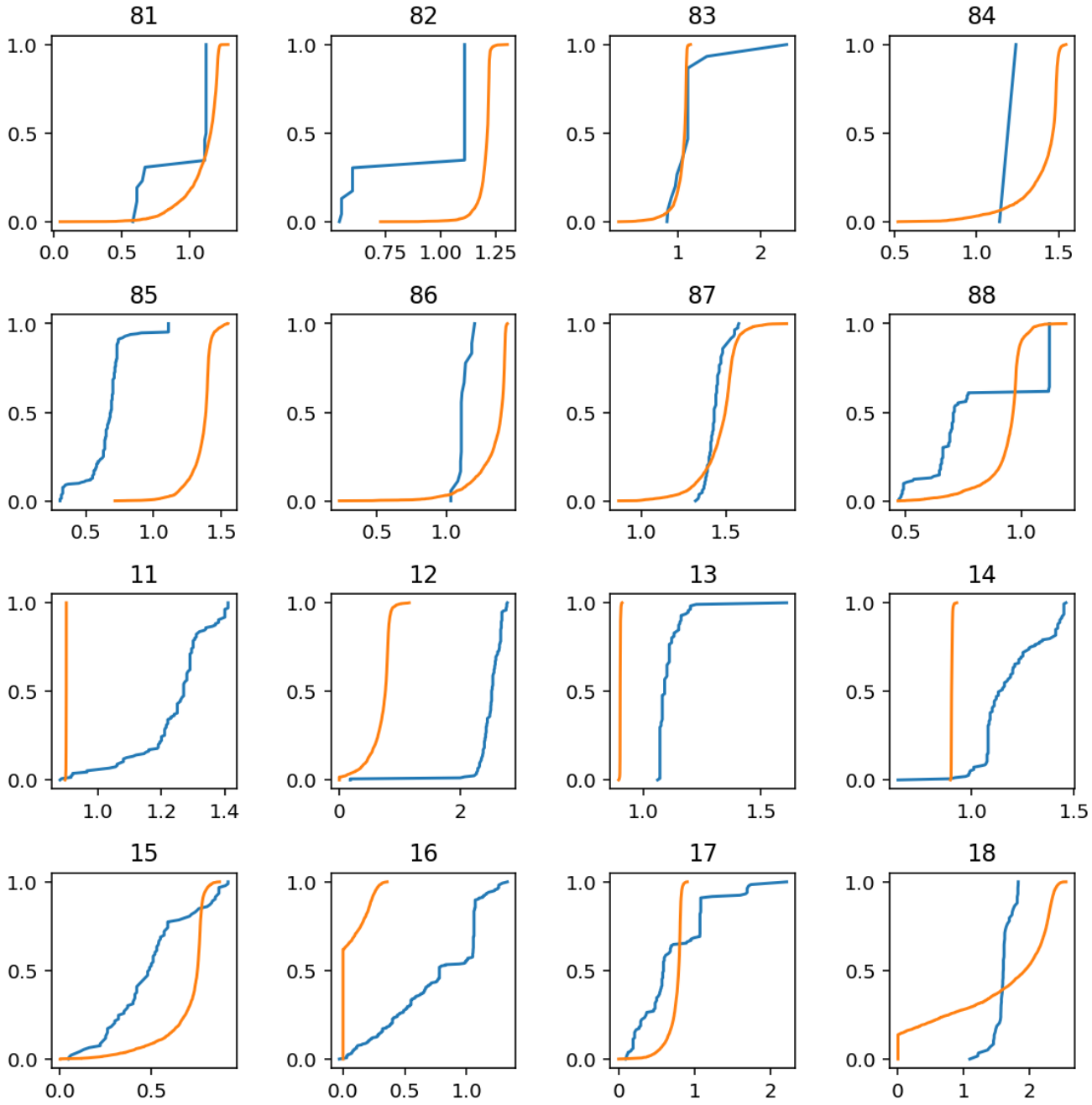
Forskellen mellem observerede- og simulerede dybden til grundvandsspejlet for sommermånederne fremgår af figur F.5, figur F.6 og figur F.7



Figur F.5.Forskellen mellem observerede og simulerede dybden til grundvandsspejlet for sommermånederne. Observeret er markeret med blå og simuleret med orange.



Figur F.6.Forskellen mellem observerede og simulerede dybden til grundvandsspejlet for sommermånederne. Observeret er markeret med blå og simuleret med orange.

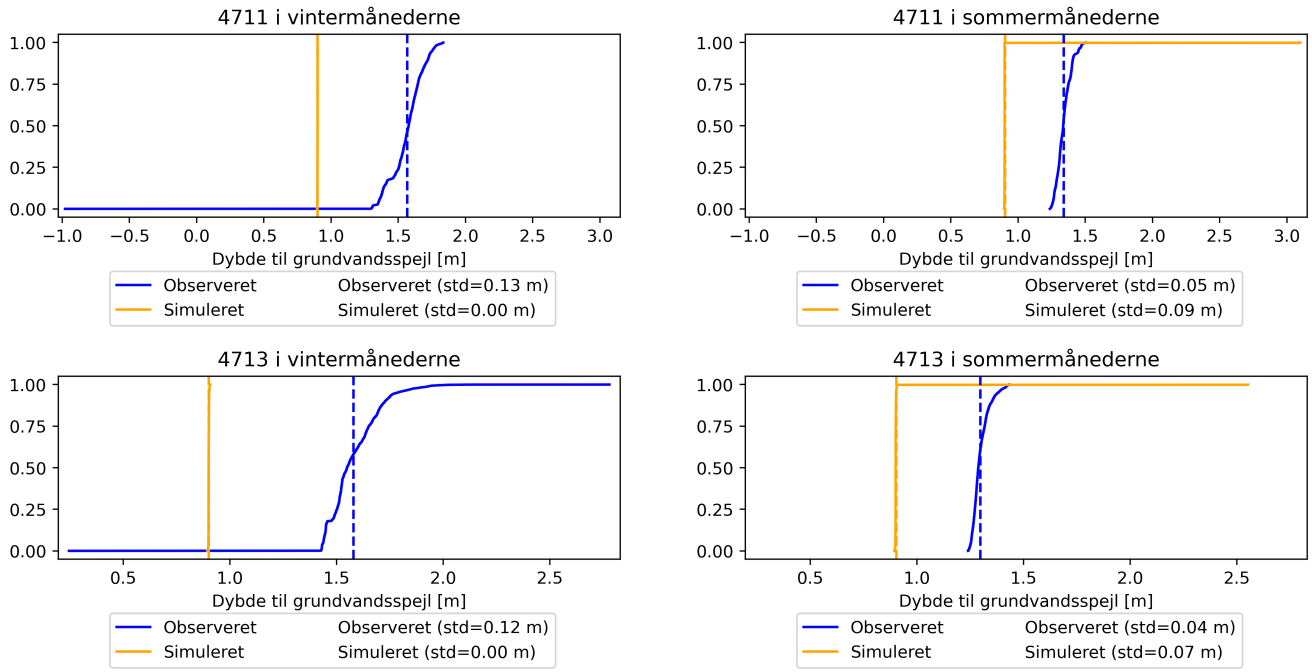


Figur F.7.Forskellen mellem observerede og simulerede dybden til grundvandsspejlet for sommermånederne. Observeret er markeret med blå og simuleret med orange.

Af figuren fremgår det, at sammenhængen mellem de observerede- og simulerede dybder til grundvandsspejlet er varierende, hvor nogle har god overensstemmelse og andre mindre god. Der er 4 målestationer uden indberetninger i perioden og 5 med en enkelt indberetning.

F.2 Automatiske målestationer

Af figur F.8 fremgår observerede og simulerede dybder til grundvandsspejlet for de automatiske målestationer 4711 og 4713.



Figur F.8. Sammenligning mellem observeret og simuleret dybde til grundvandsspejlet, for henholdvist vinter og sommer.

Af figuren fremgår det, at alle de simulerede værdier er placeret i 0,9 m fra terræn, med enkelte undtagelser for sommersimuleringerne, hvilket er dybden Østerå er implementeret i. Derfor indgår disse ikke i valideringen af modellen.

G Resultater

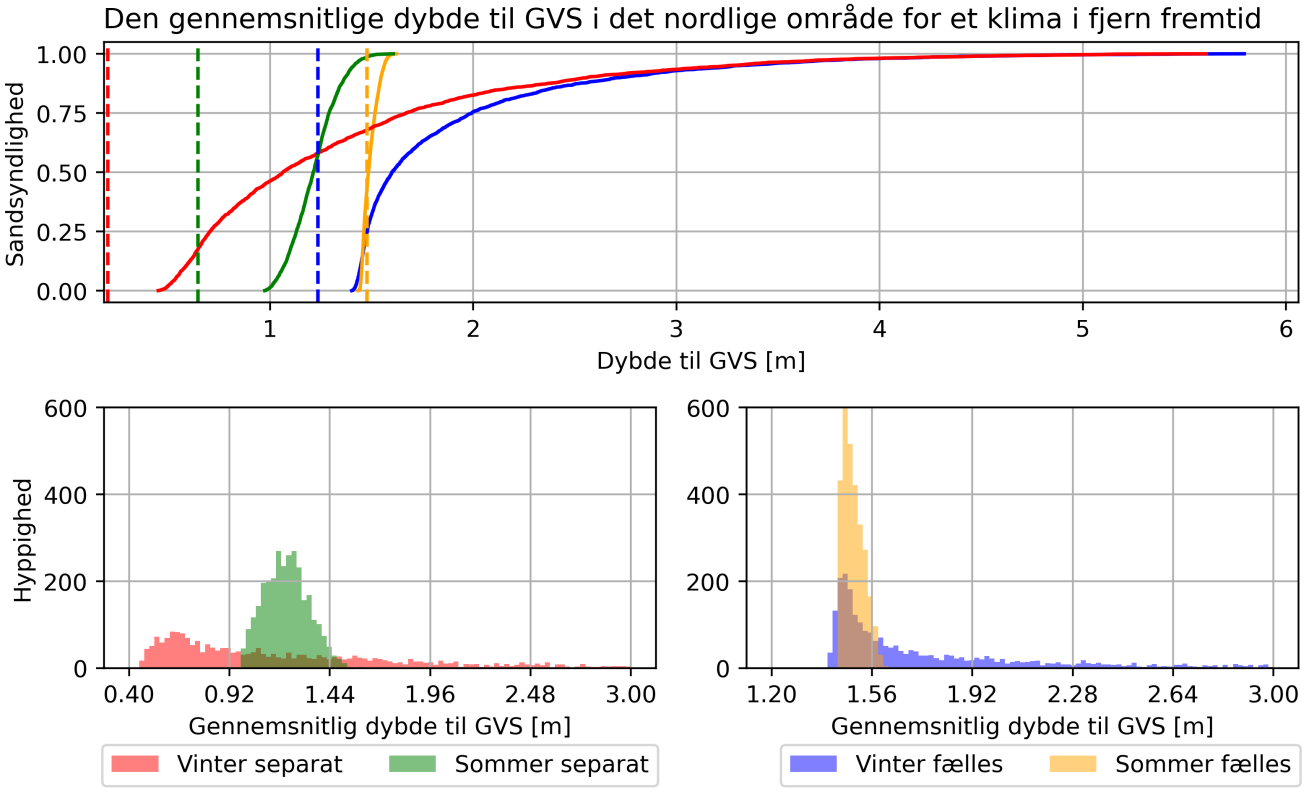
På grund af urealistiske resultater for fjern fremtid fremgår disse ikke af alle kapitel 10.

G.1 Resultater for et klimascenarie i fjern fremtid

Resultaterne for et klimascenarie i fjern fremtid vil blive præsenteret som den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet og 25 % fraktilen for dybden til grundvandsspejlet for hver simuleringer som kumulative sandsynlighedsfordeling. Hvortil alle simulerede værdier fremgår som kumulative sandsynlighedsfordelinger. Disse vil hver fremgå som et underafsnit.

G.1.1 Gennemsnitlig dybde for fjern fremtid

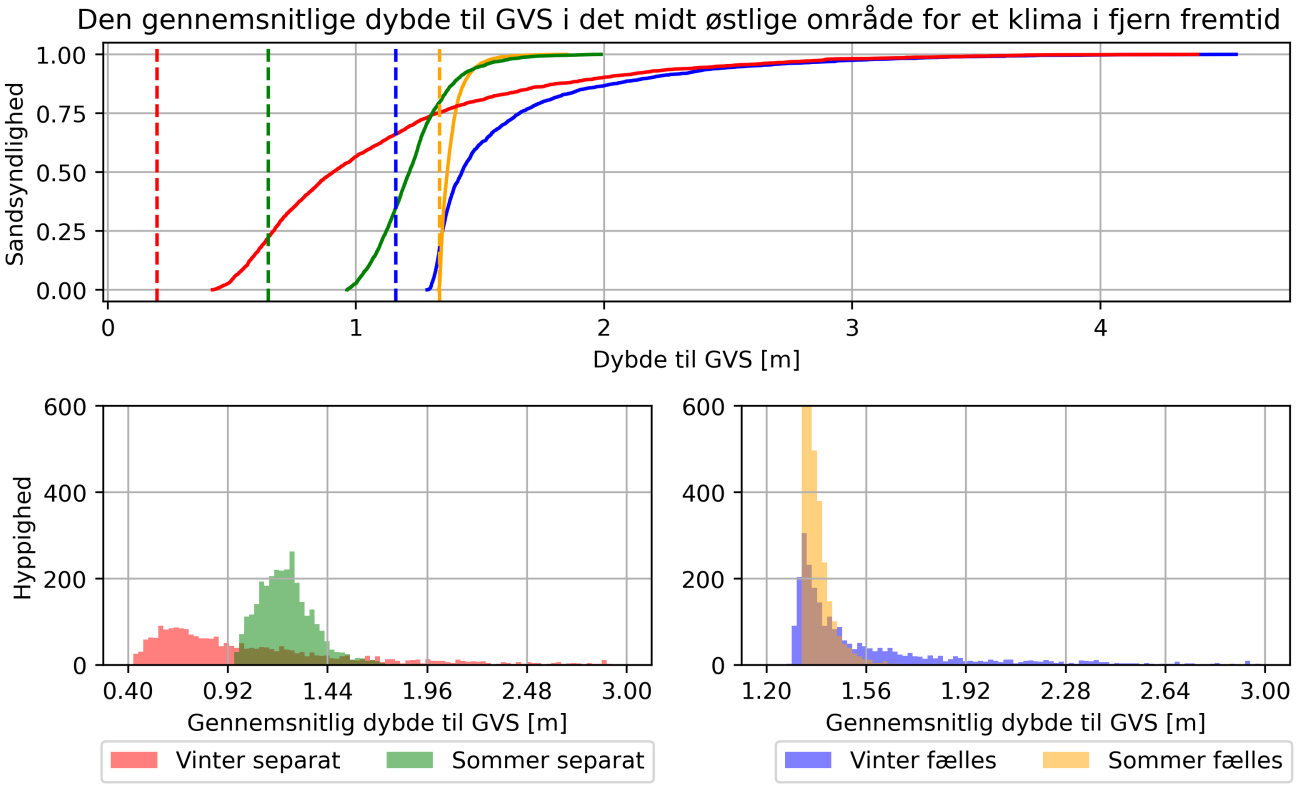
De kumulative sandsynlighedsfordelinger for den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i de forskellige scenarier fremgår for det nordlige område af figur G.1, hvor histogrammer for dybderne til grundvandsspejlet ligeledes vil fremgå under. GRAVA-projektets resultat fremgår som en stiplet linje.



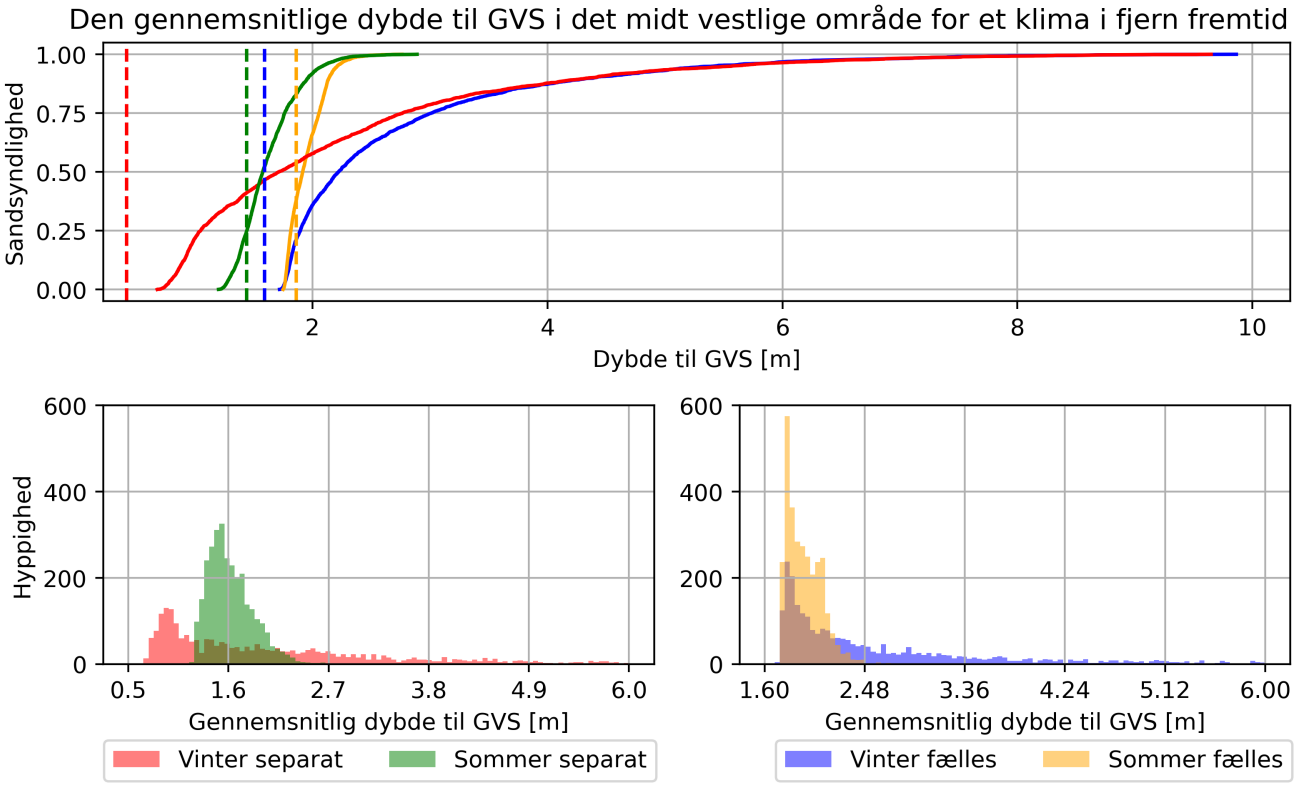
Figur G.1. Sandsynligheden for dybden til grundvandsspejlet i det nordlige område for de fire simuleringsscenarier.

Af figuren fremgår der væsentlige forskelle i dette projekts og GRAVA-projektets resultat, da sommer

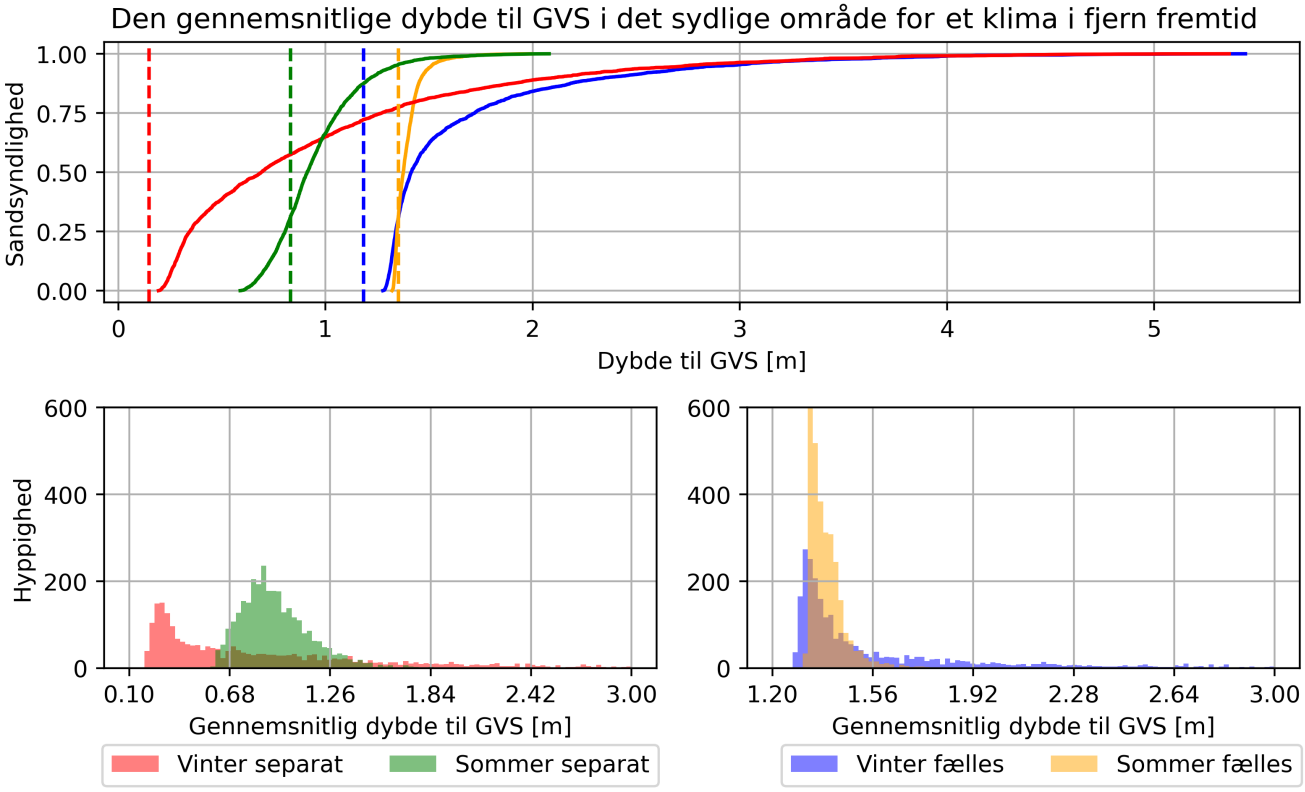
FK er det eneste scenarie hvor GRAVA-projektets resultat indgår indenfor spændet fra dette projekt. Derudover har dette projekt simuleret en urealistisk dybde til grundvandet, som overstiger terrænkoten for vinterscenarierne, hvorfor disse er vurderet ustabile og upålidelige. Tilsvarende tendenser fremgår af de øvrige områder, som fremgår af figur G.2 for det midt østlige område, figur 10.25 for det midt vestlige område og figur G.4 for det sydlige område.



Figur G.2.Sandsynlighed for dybden til grundvandsspejlet i det midt østlige område for de fire simuleringsscenarier.



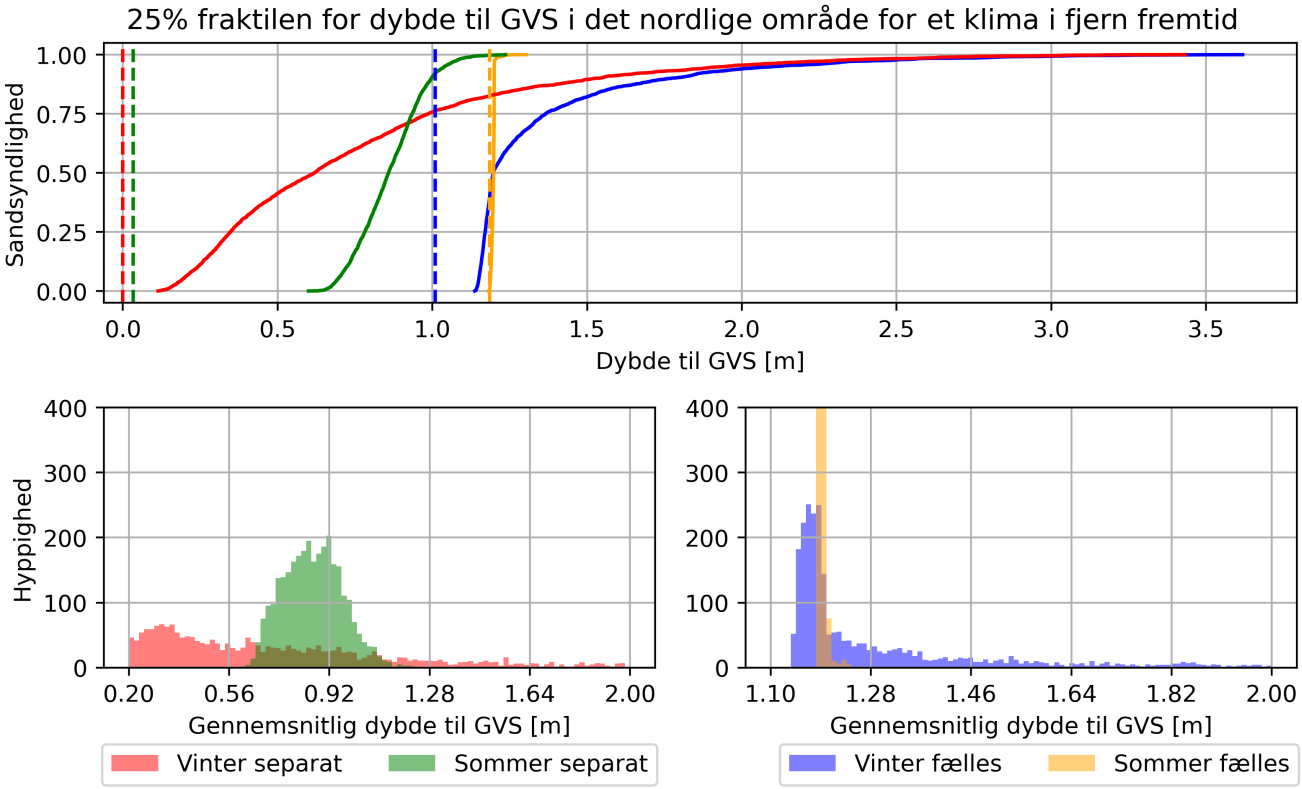
Figur G.3. Sandsynlighed for dybden til grundvandsspejlet i det midt vestlige område for de fire simuleringsscenarier.



Figur G.4. Sandsynlighed for dybden til grundvandsspejlet i det sydlige område for de fire simuleringsscenarier.

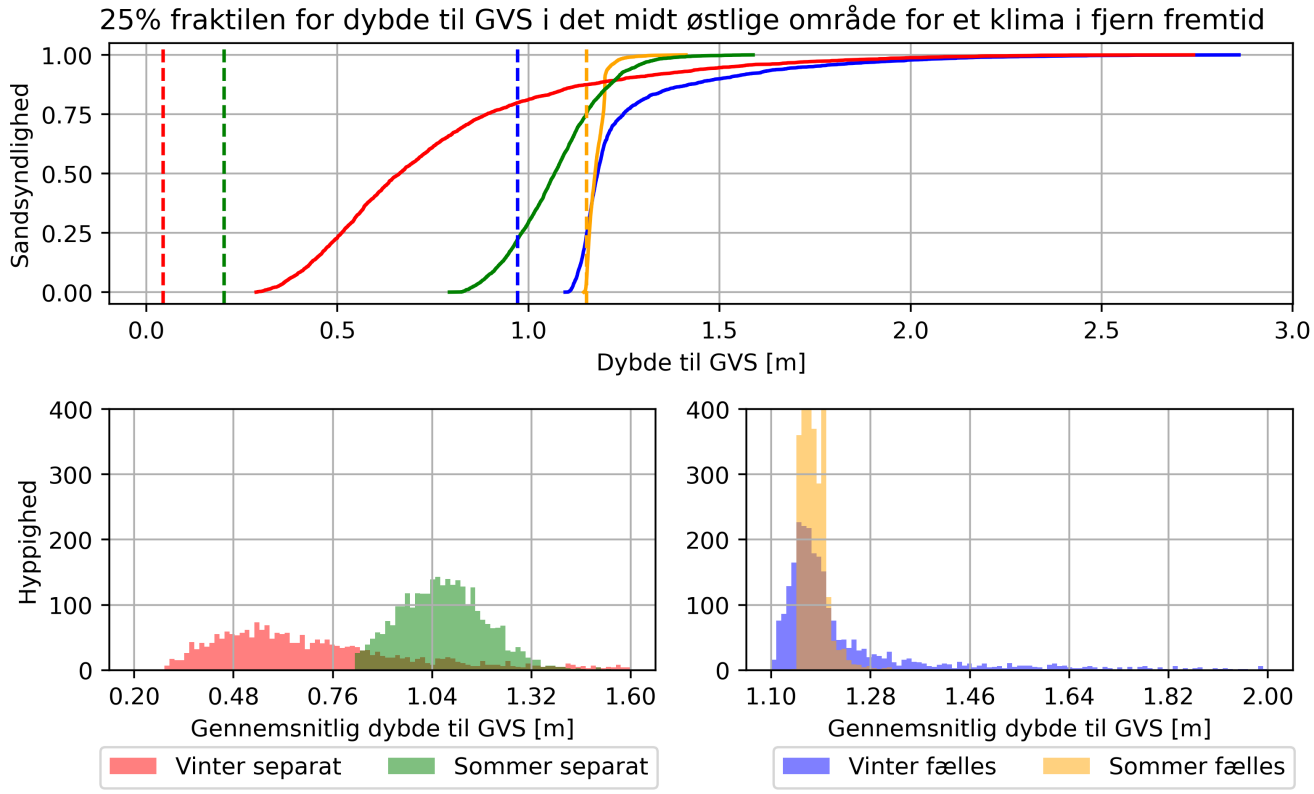
G.1.2 25% fraktilen for fjern fremtid

De kumulative sandsynlighedsfordelinger for 25% fraktilen for dybde til grundvandsspejlet i de forskellige scenarier fremgår for det nordlige område af figur G.5. Histogrammerne for dybden til grundvandsspejlet vil fremgå under, og GRAVA-projektets resultat fremgår som en stiplet linje.

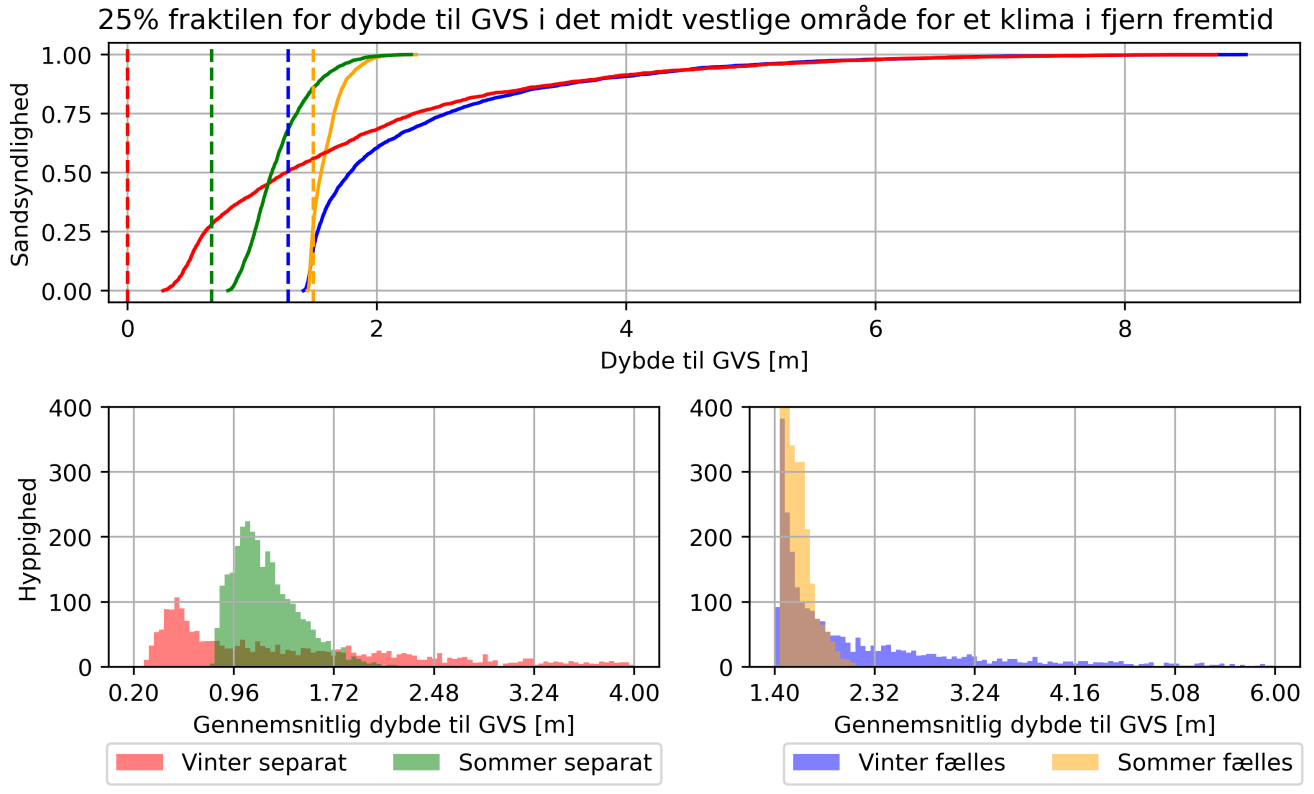


Figur G.5. Sandsynlighed for dybden til grundvandsspejlet i det nordlige område for de fire simuleringsscenarier.

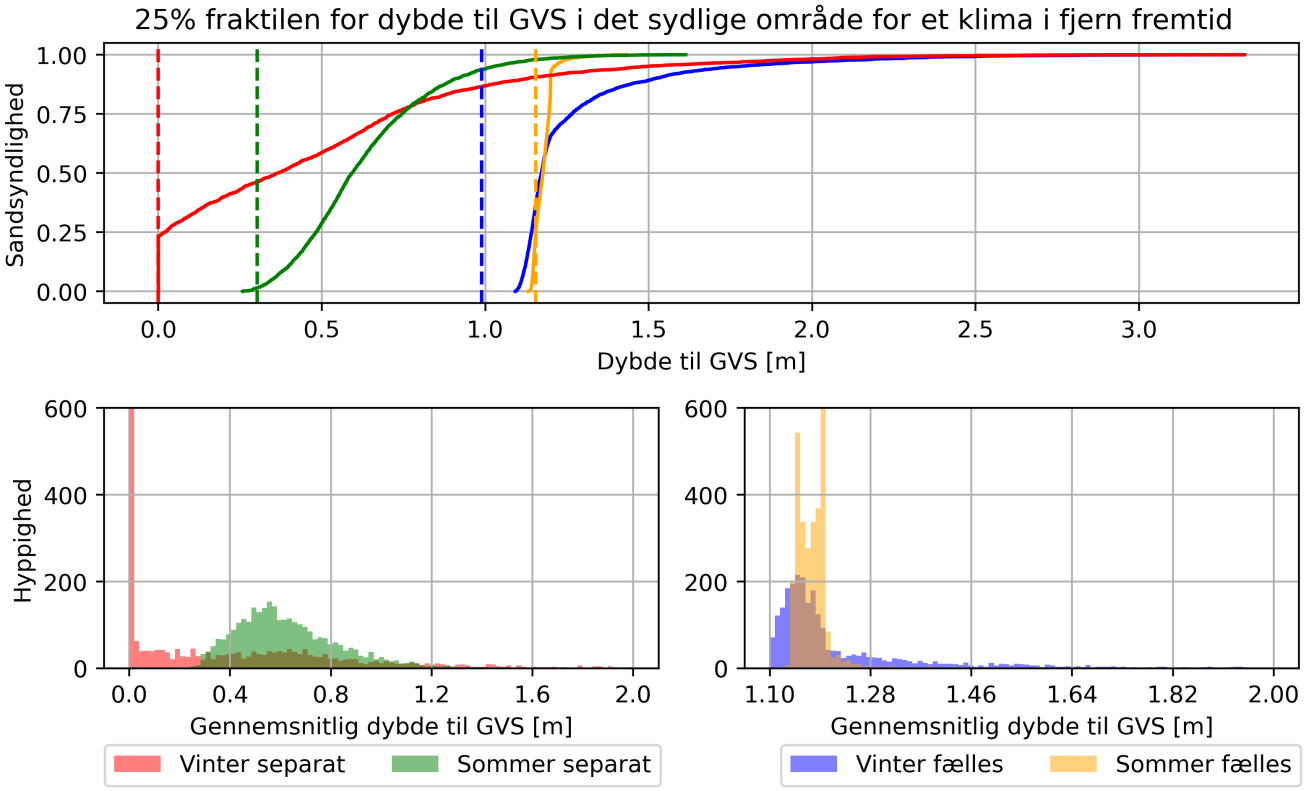
Af figuren fremgår der væsentlige forskelle i dette projekts og GRAVA-projektets resultat, da sommer FK er det eneste scenarie hvor GRAVA-projektets resultat indgår i spændet fra dette projekt. Derudover har dette projekt simuleret en urealistisk dybde til grundvandet, som overstiger terrænkoten for vinterscenarierne, hvorfor disse er vurderet ustabile og upålidelige. Tilsvarende tendenser fremgår af de øvrige områder, som fremgår af figur G.6 for det midt østlige område, figur 10.26 for det midt vestlige område og figur G.8 for det sydlige område.



Figur G.6. Sandsynlighed for dybden til grundvandsspejlet i det midt østlige område for de fire simuleringsscenarier.



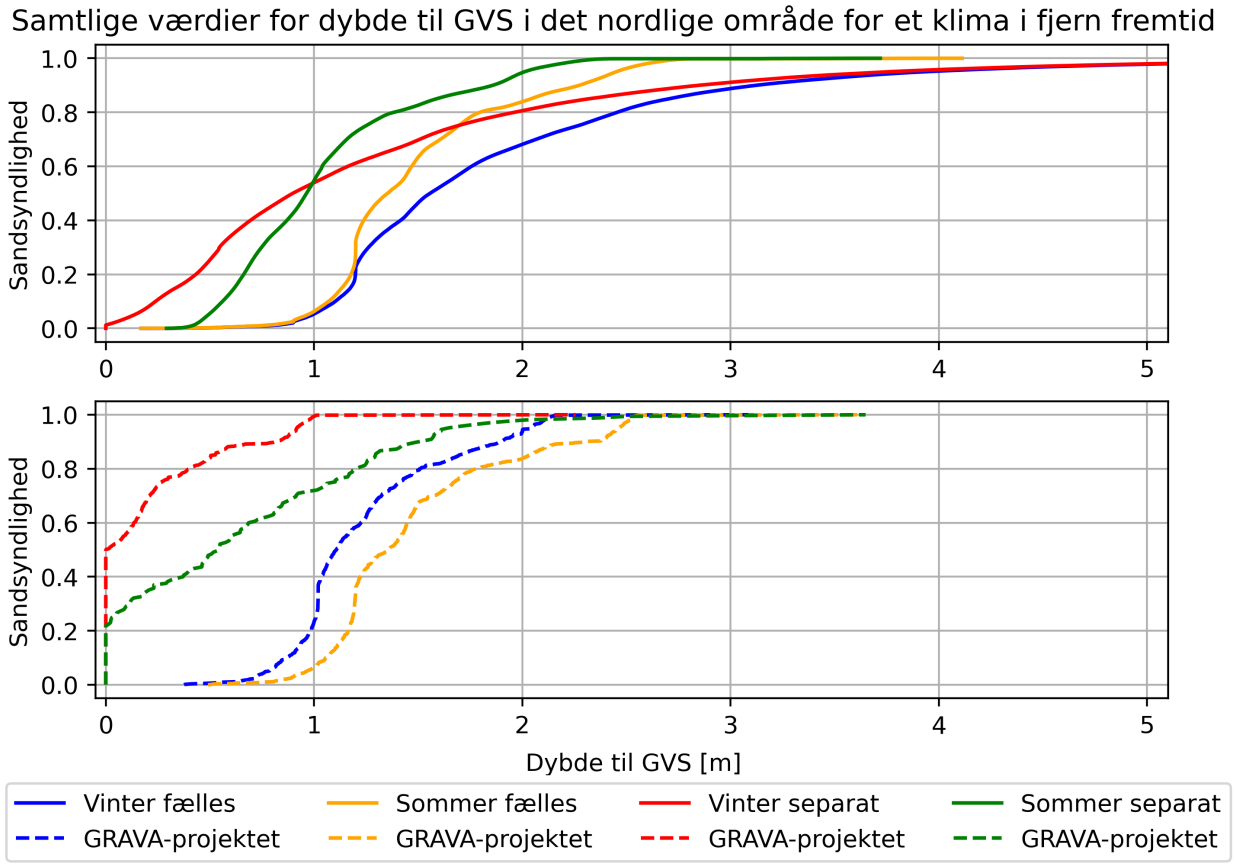
Figur G.7. Sandsynlighed for dybden til grundvandsspejlet i det midt vestlige område for de fire simuleringsscenarier.



Figur G.8.Sandsynlighed for dybden til grundvandsspejlet i det sydlige område for de fire simuleringsscenarier.

G.1.3 Samtlige værdier for fjern fremtid

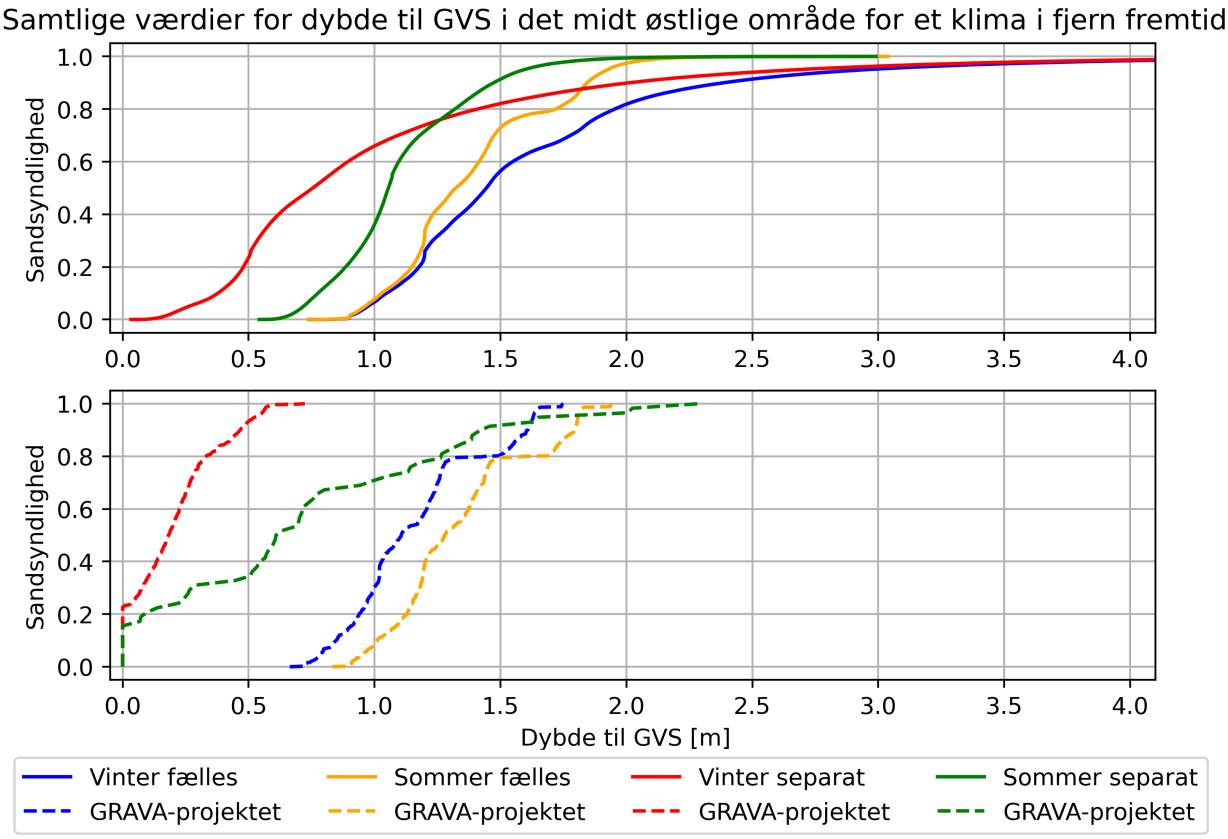
De kumulative sandsynlighedsfordelinger for samtlige simulerede dybder til grundvandsspejlet i de forskellige scenarier fremgår for det nordlige område af figur G.5, hvor GRAVA-projektets resultat fremgår som en stiplet linje nederst på figuren. Hele sandsynlighedsspændet for dybden til grundvandsspejlet fremgår ikke af alle scenarier af visuelle årsager.



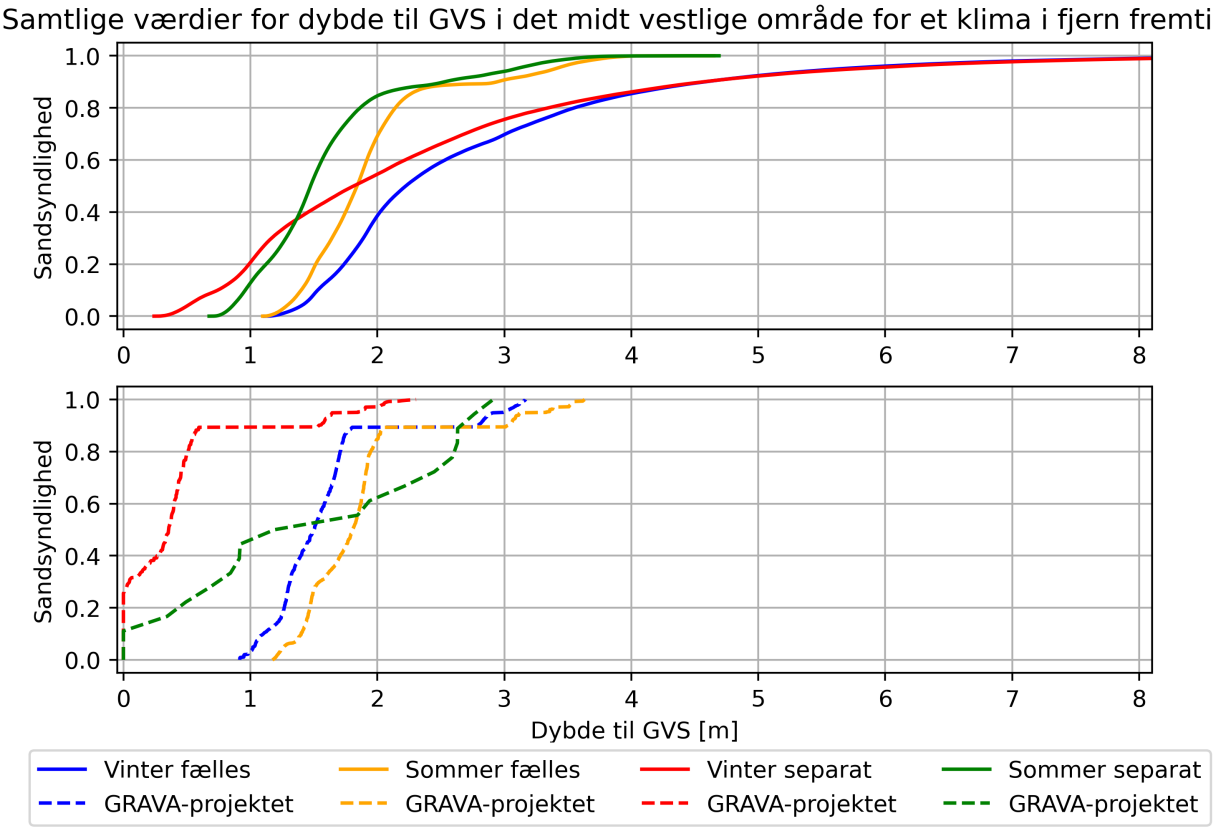
Figur G.9.Sandsynlighed for dybden til grundvandsspejlet i det nordlige område for de fire simuleringsscenarier.

Af figuren fremgår der væsentlige forskelle mellem dette projekt og GRAVA-projektet. Dette er både i form af antallet af værdier på terræn og størrelsen af spændet for vinterscenarierne. For vinterscenarierne estimerer dette projekt urealistisk langt til grundvandsspejlet. Sommerscenarierne er tilsvarende i minimum og maksimum dybder, hvorimod GRAVA-projektet finder cirka 20 % af værdierne på terræn for sommer separatkloakeret, hvor dette projekt ikke finder nogle værdier på terræn for scenariet.

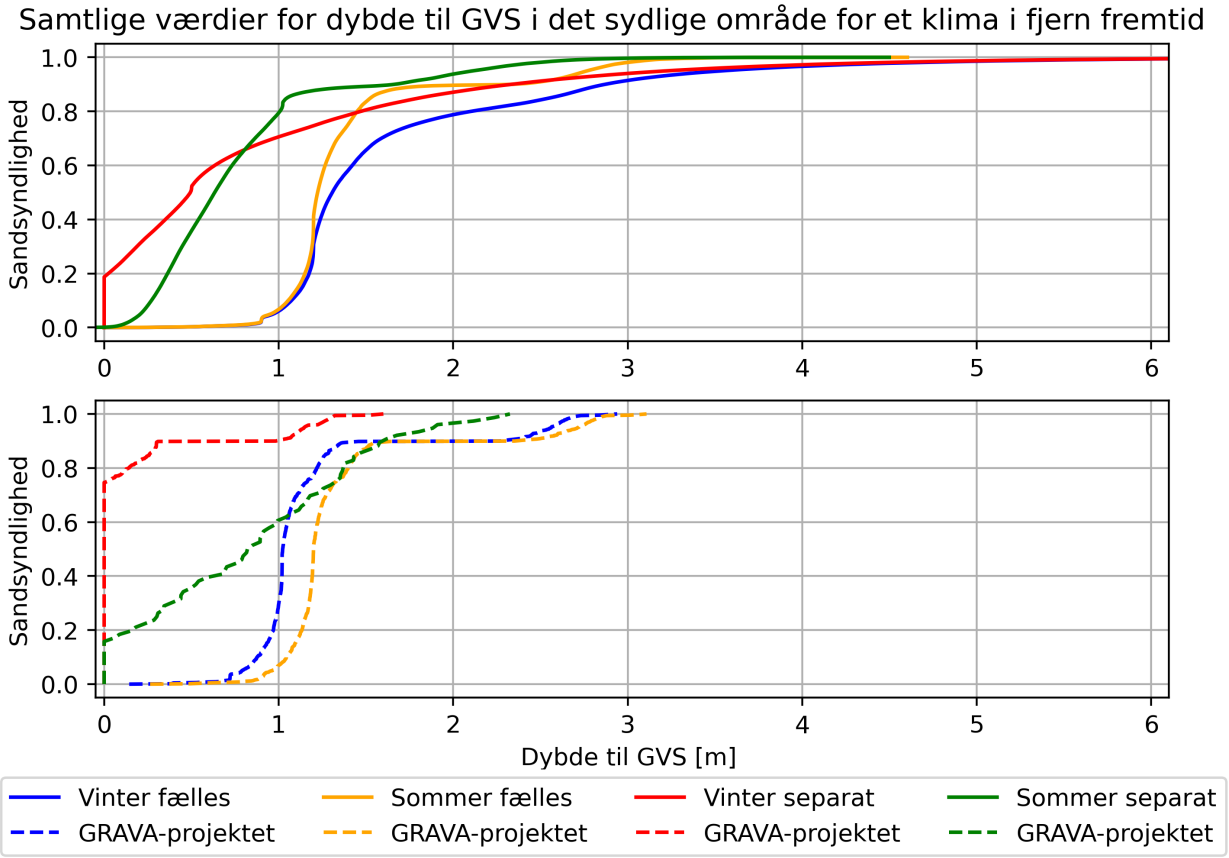
Tilsvarende tendenser fremgår for de øvrige områder, hvilket fremgår af figur G.10 for det midt østlige område, figur G.11 for det midt vestlige område og figur G.12 for det sydlige område.



Figur G.10. Sandsynlighed for dybden til grundvandsspejlet i det midt østlige område for de fire simuleringsscenarier.



Figur G.11. Sandsynlighed for dybden til grundvandsspejlet i det midt vestlige område for de fire simuleringsscenarier.

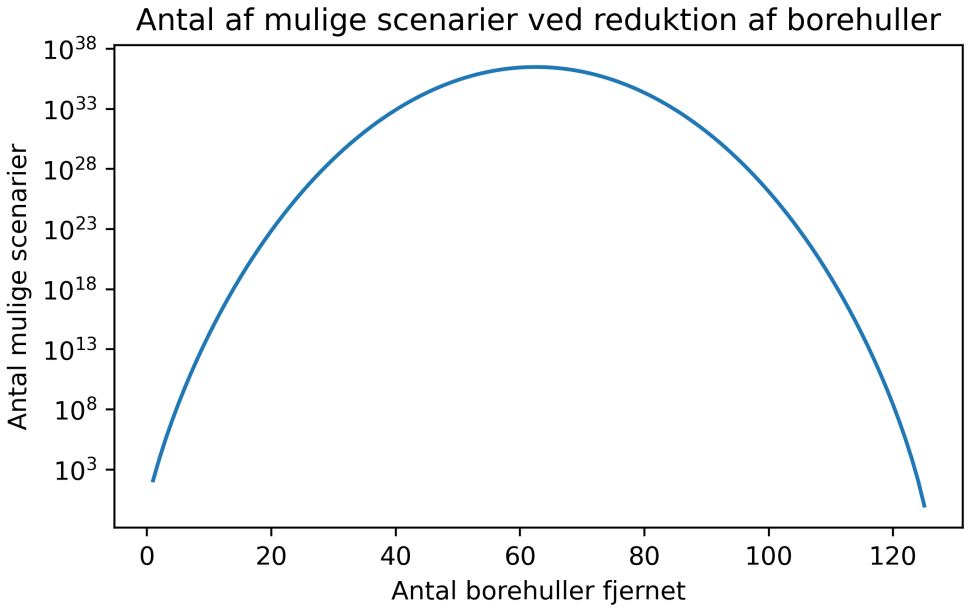


Figur G.12. Sandsynlighed for dybden til grundvandsspejlet i det sydlige område for de fire simuleringsscenarier.

H Geologisk Analyse

H.1 Antal mulige scenarier ved fjernelse af borehuller

Figur H.1 viser antallet af mulige scenarier, alt efter, hvor mange borehuller som er fjernet.



Figur H.1. Antal af mulige scenarier per borehul fjernet fra modellen.

Beregningen af antallet af mulige scenarier, er foretaget ud fra ligning (H.1). Der er benyttet denne ligning, da rækkefølge ikke har nogen betydning.

$$K_{n,r} = \frac{n!}{r! \cdot (n-r)!} \tag{H.1}$$

Hvor:

n	Antallet af boringer i området
r	Antallet af boringer som fjernes fra området
$K_{n,r}$	Antallet af kombinationer, ved fjernelse af r boringer fra de n borehuller i området

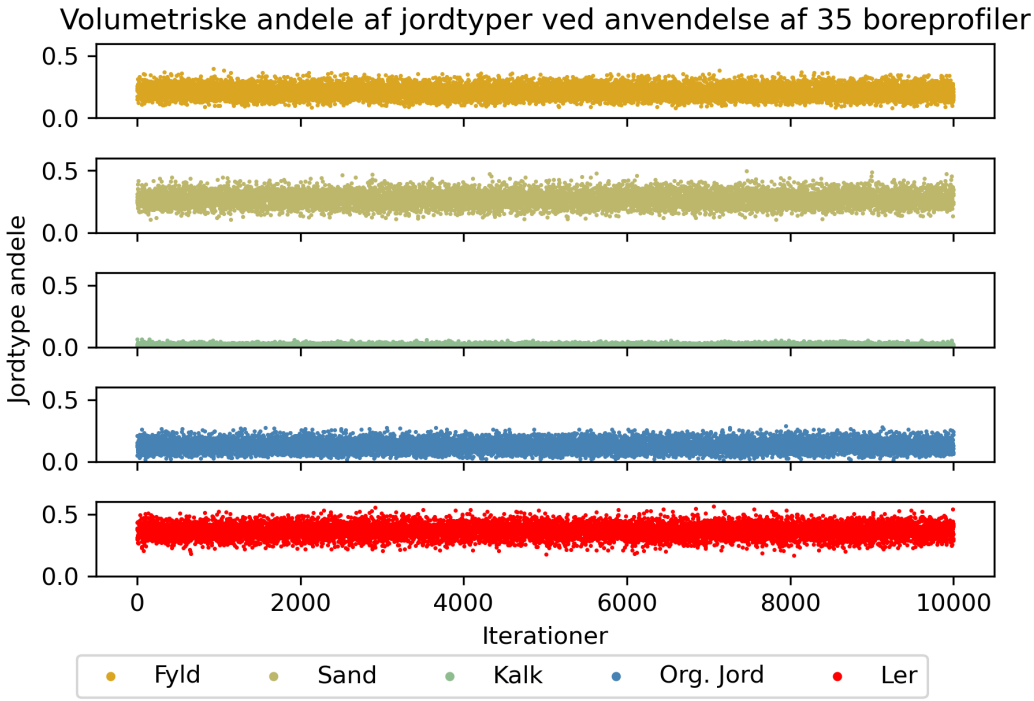
H.2 Fjernelse af boringer

Bilaget har til formål at vise data og resultaterne, som er fravalgt at vise i den primære rapport, grundet det supplerende data udviser samme tendenser som dataen allerede vist i den primære rapport.

H.2.1 Indledende reduktion af iterationer

Da det som beskrevet, er fundet udenfor dette projekts omfang at teste alle $4{,}25e^{37}$ mulige boreprofils reduktions kombinationer, er en potentiel reduktion i iterationer blevet undersøgt. Reduktions analysen er fortaget ved anvendelse af 35 boreprofiler ved 10000 iterationer, på den reduceret geologiske model.

Det omfatter de beregnede gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne for hver inddeling, jordtype udbredelse for hver af de 5 jordtyper, den volumetriske fordeling af jordtyperne og variation i TP matricerne. Det kan observeres på de 3 nedenstående figurer, at en variationerne i det anviste data er uniformt og udviser samme tendens allerede efter cirka 1000 iterationer. Nedenstående figur H.2, viser den volumetriske fordeling for hver af de 5 jordtyper.



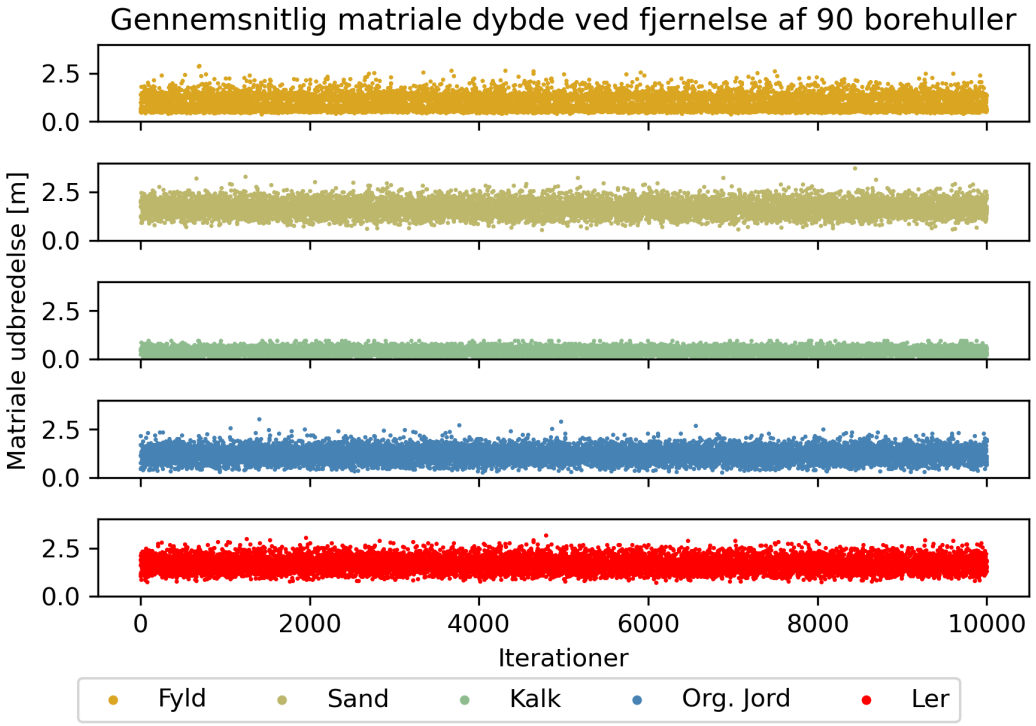
Figur H.2. Volumetrisk fordeling af de forskellige jordtyper ved anvendelse af 35 boreprofiler.

Figur H.2, viser den volumetriske fordeling for hver af de 5 jordtyper. Ler efterfulgt af sand, kan observeres som de mest dominerende jordtyper, hvorefter fyld, organiske jorder og kalk. Af figuren fremgår det at den samme uniforme variation kan observeres allerede efter 1000 iterationer ved alle 5 jordtyper. Yderligere kan det ses at minimum og maksimums værdierne for den volumetriske jordtype fordeling ligeledes udviser samme tendens gennem de 10000 gennemførte iterationer.

Minimum, maksimum, gennemsnitlig og standardafvigelse for volumetrisk jordtype fordeling, for hver af de 5 jordtyper, kan observeres på nedenstående tabel H.1. Af figuren fremgår, at fordelingen af de 5 jordtyper er meget varierende, ved variation af hvilke boringer fjernes. Ler og sand variere mest, som også fremgår af ovenstående figur H.2. Kalk kan observeres som være den mindst dominerende jordtype, hvor tilstedeværelsen af kalk er meget afhængig af bestemte boringer i Kærbyområdet.

Tabel H.1.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse (STD) for volumetrisk jordtype fordeling, for hver af de 5 jordtyper.

Jordtype	Fyld	Sand	Kalk	Org. Jord	Ler
Minimum	0,080	0,103	0,000	0,013	0,168
Gennemsnit	0,214	0,272	0,016	0,129	0,366
Maksimum	0,398	0,495	0,065	0,287	0,565
STD	0,050	0,055	0,010	0,045	0,053



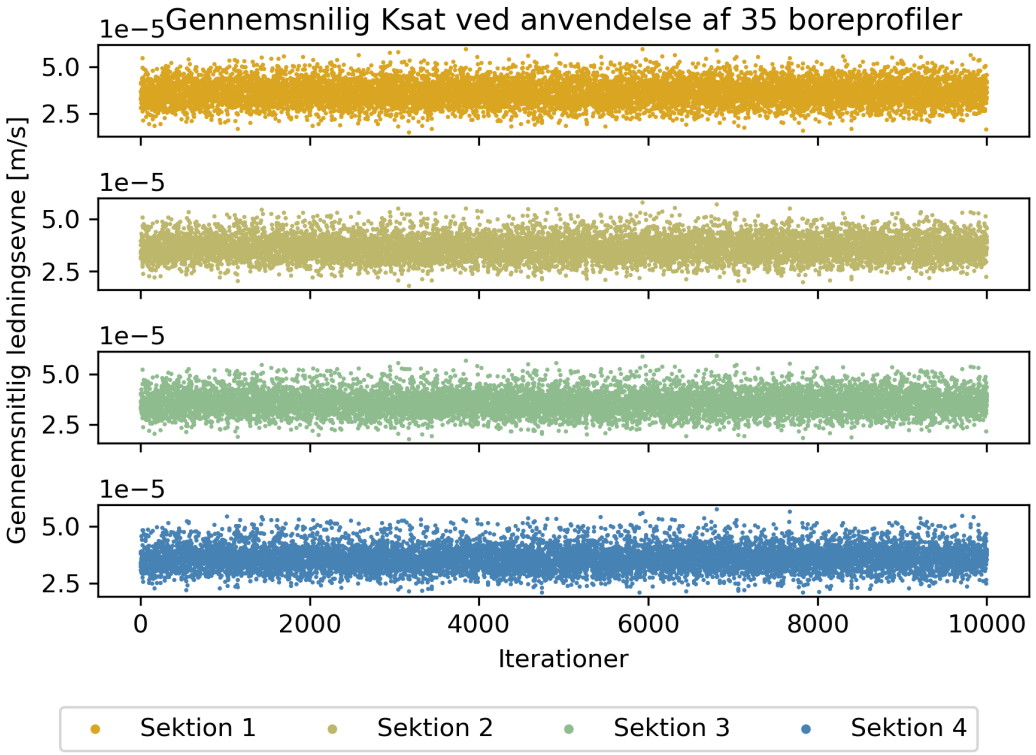
Figur H.3.Den gennemsnitlige jordtype udbredelse for hver jordtype, ved anvendelse af 35 boringer.

Figur H.3, viser den gennemsnitlige jordtype udbredelse for hver af de fem jordtyper. Ler efterfulgt af sand, kan observeres som de jordtyper med størst vertikal udbredelse, hvorefter organiske jorder, fyld og kalk. Af figuren fremgår det, at den samme uniforme variation i de fem jordtype dybder, kan observeres allerede efter 1000 iterationer. Yderligere fremgår det af fordeling af minimum og maksimums dybderne, udviser samme tendens gennem de 10000 gennemførte iterationer.

Minimum, maksimum, gennemsnitlig og standardafvigelse for den vertikale jordtype udbredelse, for hver af de fem jordtyper, kan observeres på nedenstående tabel H.2. Af figuren fremgår, at den vertikale jordtype udbredelse af de 5 jordtyper er meget variernede, ved variation af, hvilke boringer der udvælges til reduktionen. Sand efterfuldt af ler er mest varierende, som også fremgår af ovenstående figur H.2, og det kan observeres, at sand i Kærby mest dominerende. Kalk kan observeres som havende den mindste vertikale udbredelse, hvilket må tilskrives, at tilstedeværelsen af kalk er meget afhængig af bestemte boringer i Kærbyområdet.

Tabel H.2.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse (STD) for midlet jordtype udbredelse, for hver af de 5 jordtyper.

Jordtype	Fyld	Sand	Kalk	Org. Jord	Ler	Enhed
Minimum	0,394	0,539	0,000	0,281	0,708	$[m]$
Gennemsnit	0,975	1,680	0,409	1,200	1,690	$[m]$
Maximum	2,900	3,746	0,957	3,037	3,172	$[m]$
STD	0,393	0,375	0,189	0,359	0,368	$[m]$



Figur H.4.Den gennemsnitlige hydraulisk ledningsevne (Ksat) for hver jordtype, ved anvendelse af 35 boringer.

Figur H.4, viser den midlet hydrauliske ledningsevne for hver af de 4 inddelinger i det reduceret modelområde. Visuelt er det ikke muligt at observere en væsentlig forskel i hydrauliske ledningsevne delområderne imellem. Af figuren fremgår det, at den samme uniforme variation i de 4 delområder, kan observeres allerede efter 1000 iterationer. Yderligere kan det ses, at fordelingen af minimum og maksimums udbredelserne ligeledes udviser samme tendens gennem de 10000 gennemførte iterationer.

Minimum, maksimum, gennemsnitlig og standardafvigelse for den midlet hydrauliske ledningsevne for hver af de 4 inddelinger i det reduceret modelområde, kan observeres på nedenstående tabel H.3. Af tabellen fremgår, at den midlet hydrauliske ledningsevne for hver af de 4 inddelinger er mindre varierende ved variation af, hvilke boringer der udvælges til reduktion. Den midlet hydrauliske ledningsevne for hver af de 4 inddelinger ligger i følgende spænd [3,600 - 3,648 $\cdot 10^{-5}[m/s]$], hvilket anses som minimalt afvigende. Det kan observeres, at inddeling 4 har en væsentlig højere minimums værdi relativt til de restenrende delområder, hvilket indikerer, at dette område er mindre domineret at jordtyper med lav hydraulisk ledningevne, såsom ler.

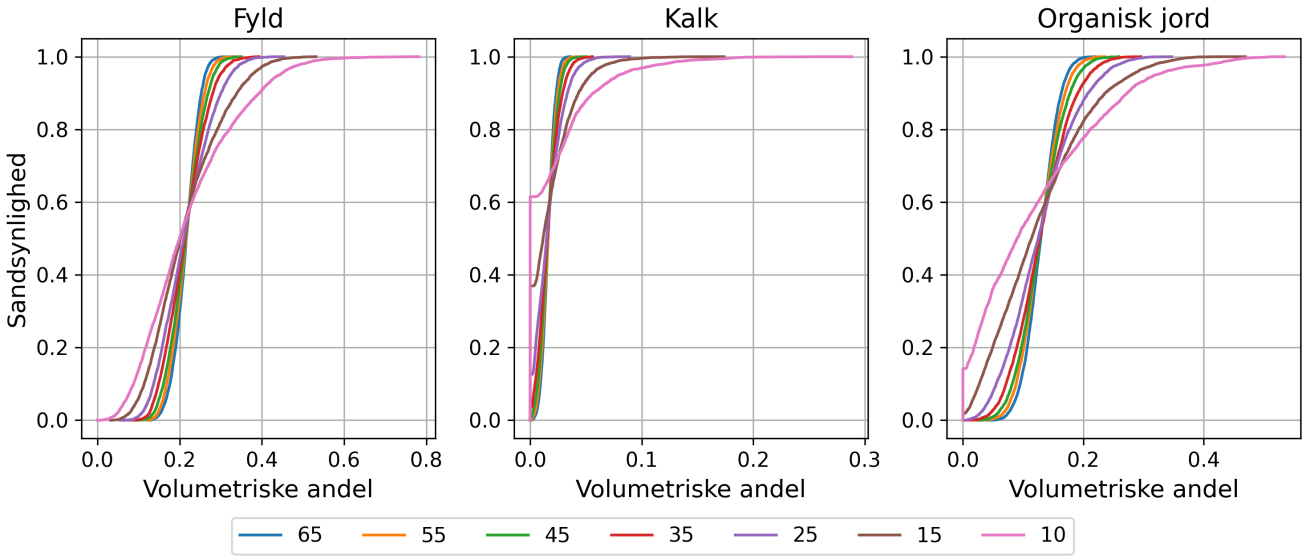
Tabel H.3.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse (STD) for midlet hydrauliske ledningsevne, for hver af de fire inddelinger.

	Inddeling 1	**Inddeling 2**	**Inddeling 3**	**Inddeling 4**	**Enhed**
Minimum	1,510	1,826	1,788	2,095	$1 \cdot 10^{-5}[m/s]$
gennemsnit	3,637	3,648	3,600	3,612	$1 \cdot 10^{-5}[m/s]$
Maksimum	5,963	5,807	5,916	5,751	$1 \cdot 10^{-5}[m/s]$
STD	6.221	5.3166	5.493	5.111	$1 \cdot 10^{-6}[m/s]$

Tabellen viser tilsvarende tendenser som ovenstående analyser.

H.3 Borehuls reduktion

Dette bilag har til formål at illustrere variationerne i de 3 mindre dominerede jordtyper, da de følger samme tendens som observeres i de to mest dominerende Jordtyper. Analysen på borehuls densitetens effekt på realiseringer af geologiske modeller er beregnet med 5000 iterationer anvendelse af [65, 55,45,35,25,15,10] boreprofiler. Yderligere vil borehuls densitetens effekt på den midlet hydrauliske ledningsevne, for hver af de fire inddelinger bliver vist. Samt minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for den hydrauliske ledningsevne af de syv boringsreduktioner og hver af de fire inddelinger. Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelsen for den volumetriske jordtype fordeling og den vertikale udbredelse af af de 5 jordtyper. Afslutningsvis ville en analyse af yderligere reduktion af nødvendige geologiske realiseringer blive estimeret, med henblik på at generere geologiske realiseringer for den primære model fremstillet i dette projekt. Nedenstående figur 11.7, viser den volumetriske fordeling for fyld, kalk og Organisk jord for det reduceret model område.



Figur H.5.Volumetrisk jordtype fordeling for hver af de 5 jordtyper og 7 borehuls reduktioner

kl

Figur H.5 viser de 3 mindst dominerende jordtyper i Kærby, hvor organisk jord kan observeres som værene den tredje mest dominerede af de 5 jordtyper, efterfulgt af fyld og kalk. Det kan yderligere observeres, at reduktionen af boringer i modellen har en observerede effekt på fyld, kalk og organisk jords volumetriske fordeling. Den kumulative sandsynlighedsfordeling er i cirka samme interval ved anvendelse af $[35 - 65]$ boreprofiler.Derfor kan det konkluderes, at den tilfældige udvælgelse af boringer har mindre betydning end selve reduktionsantallet, relativt til den volumetriske fordeling for fyld, kalk og organisk jord.

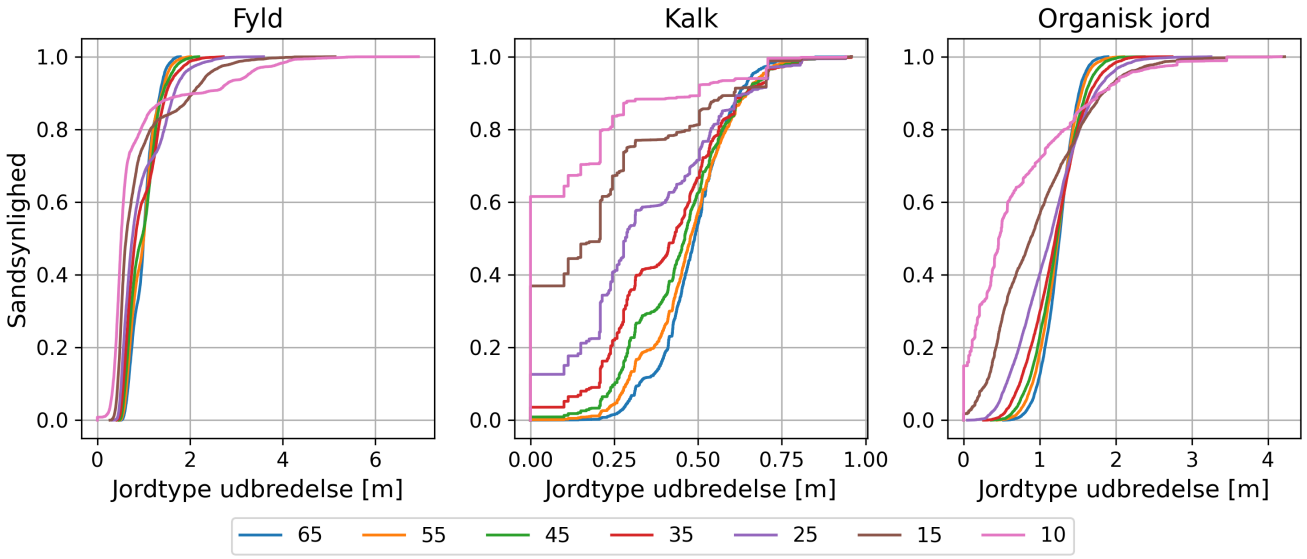
Øges boringsreduktionen og der anvendes $[10-25]$ boreprofiler, observeres der en tydelig ændring i den volumetriske fordeling af fyld, kalk og organisk jord. Ud fra ovenstående figur H.5, er kalk meget lokalt observeret, og stort set ikke observeret ved en væsentlig reduktion af boreprofiler. Det må derfor konkluderes, at kalk er meget lokalt observeret, og derfor er kalks tilstedeværelse meget afhængig af boreprofilernes placeringen. Fyld og organisk jord følger samme tendens som Ler og sand ved borehuls reduktion.

Minimum, maksimum, gennemsnitlig og standardafvigelse for volumetrisk fordeling, for hver af de 5 jordtyper, kan observeres på nedenstående tabel H.4. Af figuren fremgår, at fordelingen af de 5 jordtyper er meget variernede, ved variation af hvilke boreprofiler der udvælges til reduktion. Ler og sand varierer mest, hvilket også fremgår af ovenstående figur 11.7, efterfulgt af organisk jord, fyld og kalk, som vist på figur H.5. Organisk jord, kalk, sand og ler kan i tabel H.4 observeres til en minimums værdier på 0. Dette bekræfter yderligere hypotesen om geologisk heterogenitet i Kærby, og tilstedeværelsen af organiske jorde, kalk, sand og ler er meget afhængig af bestemte boringer i Kærbyområdet, ved kraftig borehuls reduktion. Ved generering af geologiske realiseringer for det reduceret modelområde i Kærby, ved anvendelse af $[10-25]$, er en reduktion af jordtyper observeret til 2 jordtyper.

Tabel H.4.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse (STD) for den volumetrisk jordtype fordeling for hver af de fem jordtyper af de syv boringsreduktioner.

Jordtype	**65**	**55**	**45**	**35**	**25**	**15**	**10**
			Fyld				
Minimum	0,128	0,120	0,095	0,062	0,055	0,032	0,000
Gennemsnit	0,215	0,215	0,215	0,214	0,215	0,215	0,221
Maksimum	0,334	0,338	0,350	0,393	0,453	0,532	0,783
STD	0,029	0,035	0,041	0,050	0,062	0,086	0,117
			Sand				
Minimum	0,169	0,147	0,113	0,100	0,039	0,000	0,000
Gennemsnit	0,272	0,273	0,272	0,273	0,273	0,272	0,272
Maksimum	0,427	0,408	0,465	0,486	0,533	0,628	0,820
STD	0,032	0,037	0,045	0,056	0,071	0,104	0,149
			Kalk				
Minimum	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Gennemsnit	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,017	0,018
Maksimum	0,036	0,042	0,050	0,056	0,089	0,174	0,288
STD	0,005	0,007	0,008	0,010	0,013	0,020	0,031
			Org. jord				
Minimum	0,041	0,028	0,023	0,005	0,004	0,000	0,000
Gennemsnit	0,129	0,129	0,129	0,130	0,129	0,125	0,118
Maksimum	0,220	0,236	0,259	0,295	0,347	0,469	0,534
STD	0,026	0,032	0,037	0,046	0,058	0,081	0,109
			Ler				
Minimum	0,265	0,234	0,213	0,168	0,107	0,059	0,000
Gennemsnit	0,367	0,367	0,368	0,366	0,367	0,371	0,371
Maksimum	0,474	0,491	0,530	0,567	0,601	0,680	0,829
STD	0,031	0,036	0,044	0,054	0,069	0,102	0,148

Nedenstående figur H.6, viser den midlet jordtype udbredelse ved de syv boringsreduktioner for fyld, kalk og Organisk jord.



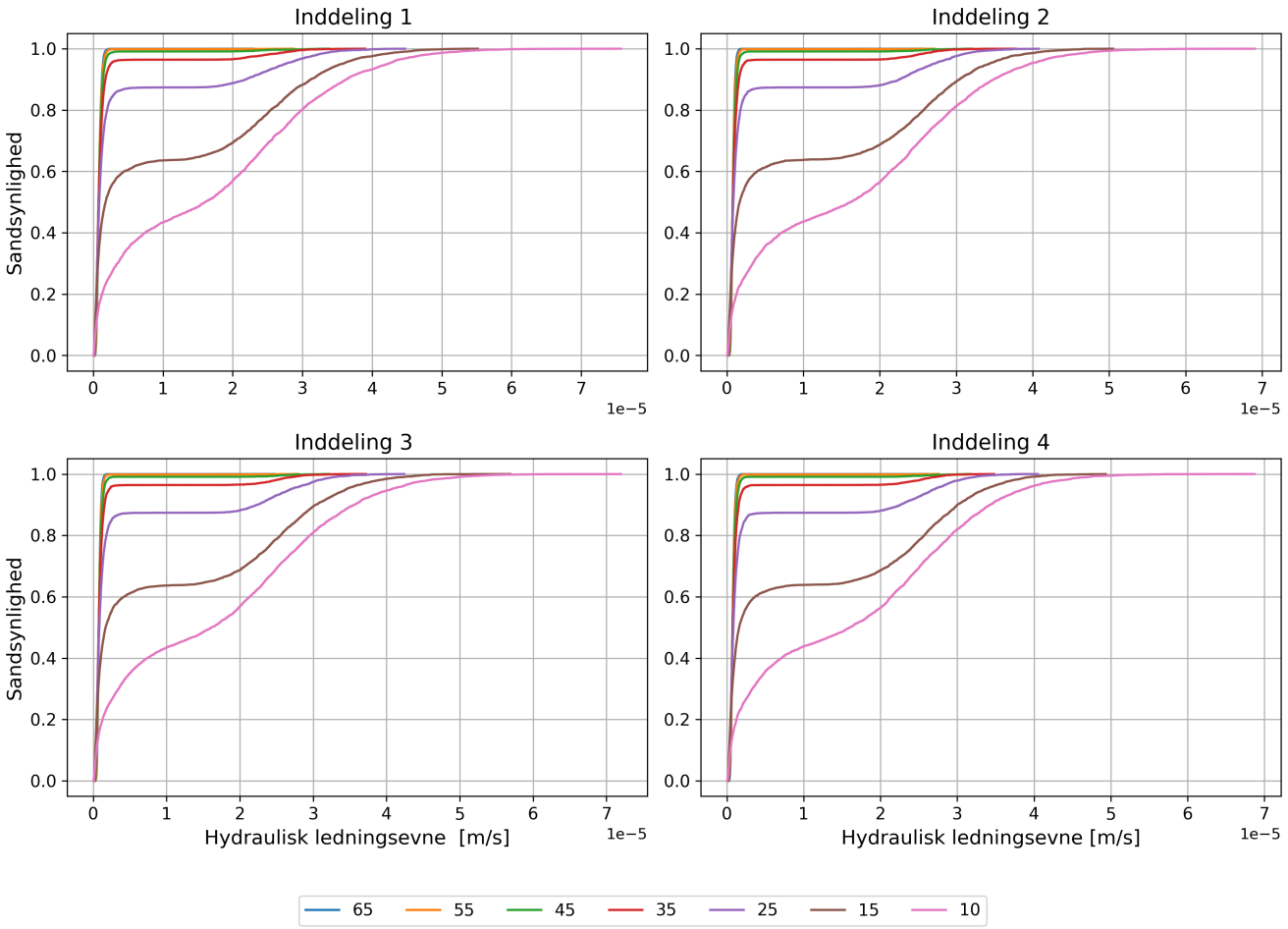
Figur H.6.Midlet jordtype udbredelse ved de syv boringsreduktioner for de fem jordtyper.

Figur H.6, viser den vertikale udbredelse af fyld, kalk og organisk jord for det reducerede modelområde. Af figuren kan det observeres, at fyld og organisk jorder har cirka samme vertikale jordtype udbredelse, efterfuldt af Kalk med primære udbredelse på under en halv meter. Det kan yderligere observeres, at reduktion af boringer i modellen, har en observerbar effekt på den vertikale udbredelse. Det antages derfor, at når den kumulative sandsynlighedsfordeling er i cirka samme interval, som kan observeres ved anvendelse af $[35-65]$ boreprofiler. Dermed har den tilfældige udvælgelse af boringer mindre betydning end selve reduktions antallet. Den observeret tendens ændres ved yderligere reduktion af boringer. Øges boringsreduktionen, og der anvendes $[10-25]$ boreprofiler, observeres der en tydelig ændring i den vertikale udbredelse af fyld, kalk og organisk jord. Ud fra ovenstående figur H.6, kan hypotesen om lokalt dominerende jordtyper yderligere bekræftes, hvilket også er gældende om dybden af det lokale fyld, kalk og organisk jord. Den vertikale udbredelse af fyld og organisk jord er stort set identisk, hvor fyld har enkelte værdier der overstiger organisk jorders vertikale udbredelse.

Minimum, maksimum, gennemsnitlig og standardafvigelse for den vertikale jordtype udbredeles, for hver af de 5 jordtyper, kan observeres på nedenstående tabel H.5. Af figuren fremgår, at den vertikale jordtype udbredelse af de 5 jordtyper er meget varierende, ved variation af, hvilke boreprofiler der udvælges til reduktion. Ler efterfulgt af sand er mest varierende, og som det fremgår af figur 11.8, er det observerede ler i Kærby er det mest vertikale dominerende. Kalk kan observeres som havende den mindste vertikale udbredelse, ved anvendelse af $[10-25]$ boreprofiler, og kan ses værende ikke forekommende, hvilket må tilskrives tilstedeværelsen af kalk i den geologiske model er meget afhængig af bestemte boringer i Kærbyområdet.

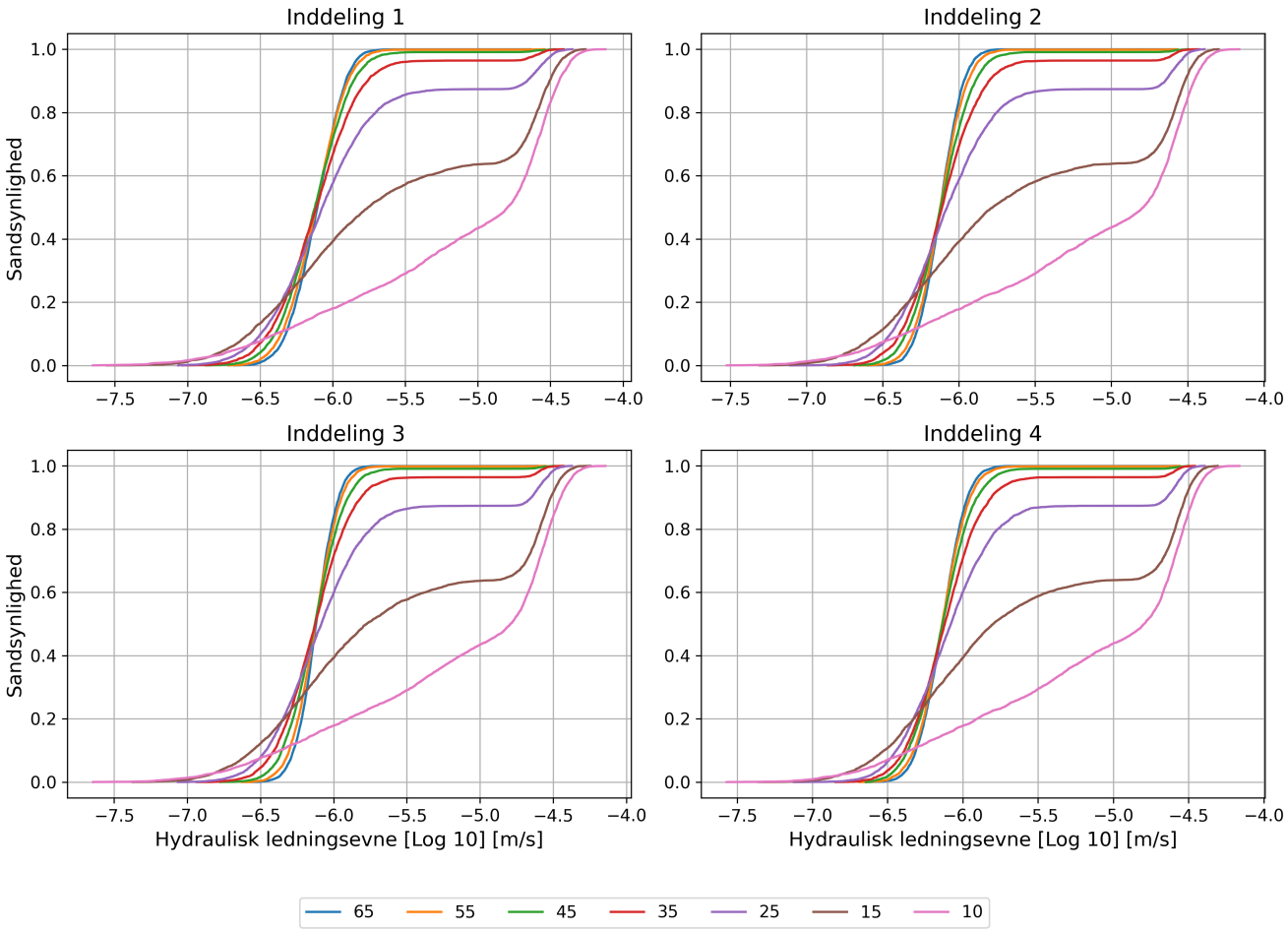
Tabel H.5.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for midlet jordtype udbredelse ved de syv boringsreduktioner for de fem jordtyper.

Anvendte boringer	**65**	**55**	**45**	**35**	**25**	**15**	**10**	**Enhed**
				Fyld				
Minimum	0,506	0,476	0,459	0,402	0,326	0,272	0,000	$[m]$
Gennemsnit	0,996	0,987	0,982	0,962	0,953	0,912	0,848	$[m]$
Maksimum	1,79	2,018	2,187	2,719	3,586	5,13	6,928	$[m]$
STD	1,79	2,018	2,187	2,719	3,586	5,13	6,928	$[m]$
				Sand				
Minimum	0,955	0,949	0,695	0,573	0,291	0,000	0,000	$[m]$
Gennemsnit	1,726	1,718	1,705	1,679	1,631	1,531	1,321	$[m]$
Maksimum	2,490	2,826	2,927	3,124	4,009	5,735	5,735	$[m]$
STD	0,224	0,264	0,310	0,374	0,474	0,684	0,878	$[m]$
				Kalk				
Minimum	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	$[m]$
Gennemsnit	0,488	0,475	0,448	0,407	0,337	0,219	0,125	$[m]$
Maksimum	0,941	0,958	0,958	0,958	0,958	0,958	0,941	$[m]$
STD	0,110	0,135	0,157	0,186	0,220	0,233	0,205	$[m]$
				Org jord				
Minimum	0,525	0,438	0,365	0,262	0,050	0,000	0,000	$[m]$
Gennemsnit	1,250	1,230	1,225	1,204	1,144	0,984	0,721	$[m]$
Maksimum	1,896	2,103	2,373	2,739	3,250	4,217	4,174	$[m]$
STD	0,210	0,250	0,294	0,357	0,454	0,633	0,738	$[m]$
				Ler				
Minimum	1,093	0,986	0,727	0,740	0,470	0,250	0,000	$[m]$
Gennemsnit	1,730	1,721	1,707	1,677	1,651	1,559	1,365	$[m]$
Maksimum	2,498	2,591	2,838	3,044	3,697	5,126	5,854	$[m]$
STD	0,219	0,253	0,303	0,369	0,464	0,650	0,844	$[m]$



Figur H.7.Den hydrauliske ledningsevne for de fire inddelinger ved forskellig antal af boringer benyttet

Figur H.7, viser den hydrauliske ledningsevne for det reducerede modelområde og de 4 inddelinger. Det fremgår af figuren, at reduktion af boringer i har en tydelig effekt på den kumulative fordeling af den hydrauliske ledningsevne. Fordelingen af den hydrauliske ledningsevne for de 4 inddelinger udviser lignende tendenser, og grafisk er det svært at observere afvigelser imellem inddelingerne. Af figuren fremgår det, at den kumulative sandsynlighedsfordeling er i cirka samme interval ved anvendelse af $[35 - 65]$ boreprofiler. Dette indikerer, at den tilfældige udvælgelse af boreprofiler stadig har mindre betydning end selve reduktions antallet. Dette må primært skyldes, at den hydrauliske ledningsevne er en parametertisering af de jordtyper, og derfor følger samme tendens, som den volumetriske jordtype fordeling vist på figur H.5 og H.7. Den observerede tendens ændres, som vist på figur H.7 ved yderligere reduktion af borehuller. Øges boringsreduktionen ved anvendelse af $[10 - 25]$ boreprofiler, observeres der en tydelig ændring i den midlet hydrauliske ledningsevne, og tendensen er den samme for de 4 inddelinger. Ud fra ovenstående figur H.7, antyder fordelingen af den midlet hydrauliske ledningsevne, som væsentlig påvirket af mængden af boreprofiler benyttet til geologiske realiseringer. Hvor den samme konklusion kan drages, uafhængig af inddelings område. Som det fremgår af figuren, stiger den hydrauliske ledningsevne ved fjernelse af boringer, hvilket indikerer, at de geologiske elementer med størst hydraulisk ledningsevne bliver mere dominerende, for det reducerede modelområde ved reduktion af boreprofiler. Figur H.8, viser den hydrauliske ledningsevne 10-tals logaritmisk for det reducerede modelområde for de fire inddelinger.



Figur H.8.Den 10-tals logaritmiske gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne for de fire inddelinger ved forskellig antal af boringer benyttet.

Figur H.8, viser den hydrauliske ledningsevne logaritmisk for de 4 inddelinger, hvor de små variationer i hydraulisk ledningsevne er mere signifikante. Det fremgår af figuren, at en reduktion af boringer har en tydelig effekt på den hydrauliske ledningsevne, som ligeledes kunne konkluderes af figur H.7. Fordelingen af den hydrauliske ledningsevne for de 4 inddelinger udviser lignende tendenser, og er det vanskeligt at observere afvigelser imellem inddelingerne.

Af figuren fremgår det, at den kumulative sandsynlighedsfordeling er i cirka samme interval ved anvendelse af $[35 - 65]$ boreprofiler. Hvilket indikerer, at den tilfældige udvælgelse af boreprofiler stadig har mindre betydning end selve reduktions antallet. Hvilket er samme konklusion, som ved den kumulative sandsynlighedsfordeling for den ikke logaritmiske hydrauliske ledningsevne. Øges borings reduktionen ved anvendelse af $[25 - 10]$ boreprofiler, observeres der en tydelig ændring i den midlet hydrauliske ledningsevne. Ud fra ovenstående figur H.8, antyder fordelingen af den midlet hydrauliske ledningsevne for de fire inddelinger, at være væsentligt påvirket af mængden af boreprofilerne benyttet til geologiske realiseringer. Det kan observeres, at den hydrauliske ledningsevne stiger ved fjernelse af boringer ved kraftig reduktion af borehuller. Samme konklusion drages, uanset inddeling område, og hvorvidt den hydrauliske ledningsevne analyseres normalt eller logaritmisk.

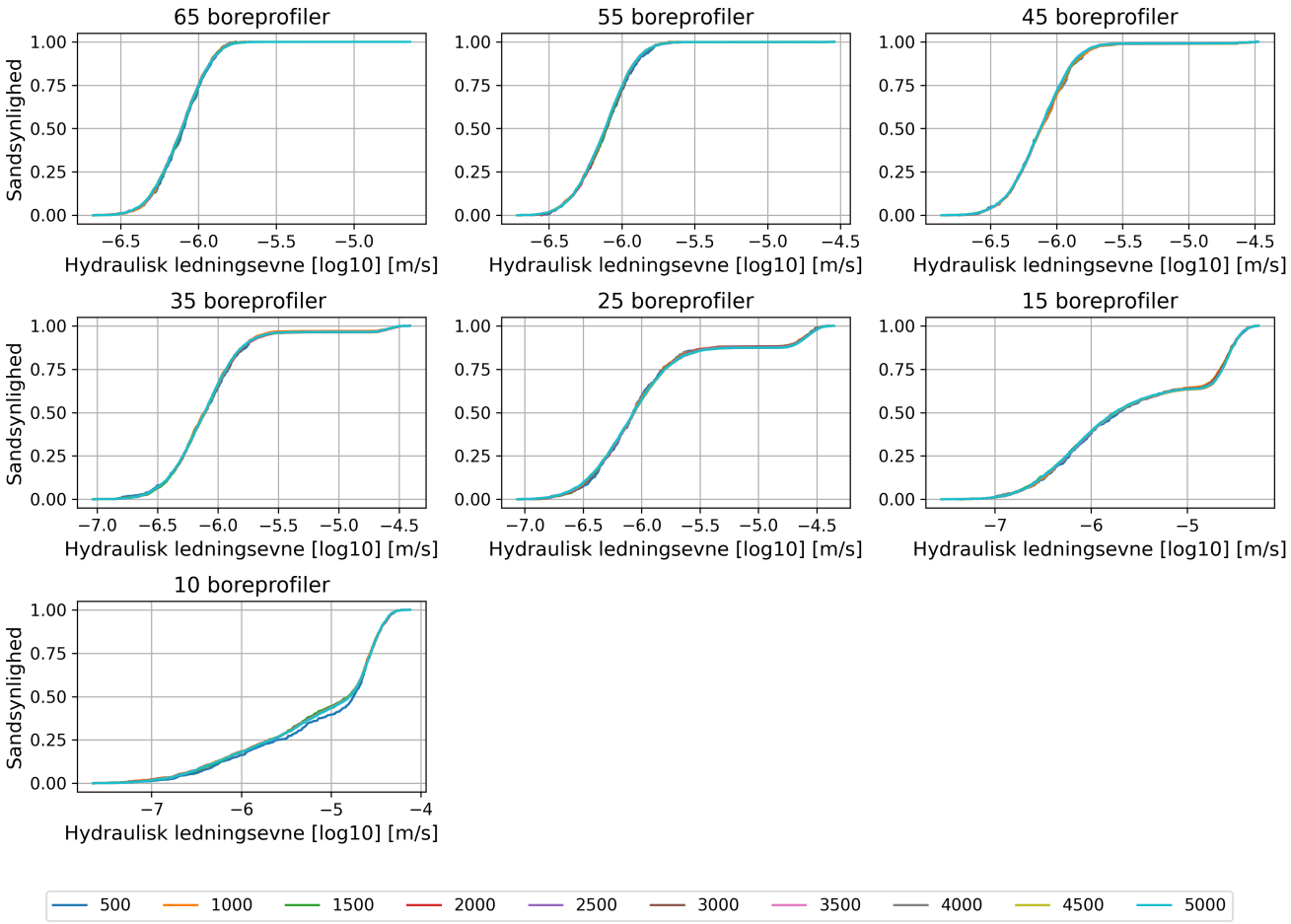
Minimum, maksimum, gennemsnitlig og standardafvigelse for den midlet hydrauliske ledningsevne for hver af de 4 inddelinger i det reducerede modelområde, kan observeres på nedenstående tabel H.6. Af tabellen fremgår, at den midlet hydrauliske ledningsevne for hver af de fire inddelinger er varierende, med reduktionsintervallet. Den mindlet hydrauliske ledningsevne for hver af de 4 inddelinger ligger i følgende spænd $[3{,}8 \cdot 10^{-7}$ - $1{,}6 \cdot 10^{-5} [m/s]]$, hvilket anses som en signifikant afvigelse. Af tabellen fremgår det, at de 4 inddelinger viser samme tendenser for minimum, maksimum, gennemsnitlig og standardafvigelse

for den midlet hydrauliske ledningsevne for hver af de 4 inddelinger. Den hydrauliske ledningsevne stiger ved kraftig reduktion af boringer, og samme konklusion drages, uanset inddeling område. Det må derfor antages, at samme statiske konklusioner kan nåes, uafhængig af, hvilket delområde der analyseres.

Tabel H.6.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse (STD) for den hydrauliske ledningsevne af de syd boringsreduktioner og hver af de fire inddelinger.

Anvendte boringer	**65**	**55**	**45**	**35**	**25**	**15**	**10**	**Enhed**
				Inddeling 1				
Minimum	$2{,}1{\cdot}10^{-7}$	$1{,}9{\cdot}10^{-7}$	$1{,}3{\cdot}10^{-7}$	$9{,}2{\cdot}10^{-8}$	$8{,}6{\cdot}10^{-8}$	$2{,}7{\cdot}10^{-8}$	$2{,}2{\cdot}10^{-8}$	$[m/s]$
Gennemsnit	$8{,}3{\cdot}10^{-7}$	$8{,}5{\cdot}10^{-7}$	$1{,}0{\cdot}10^{-6}$	$1{,}7{\cdot}10^{-6}$	$4{,}1{\cdot}10^{-6}$	$1{,}0{\cdot}10^{-5}$	$1{,}6{\cdot}10^{-5}$	$[m/s]$
Maksimum	$2{,}2{\cdot}10^{-5}$	$2{,}8{\cdot}10^{-5}$	$3{,}3{\cdot}10^{-5}$	$3{,}9{\cdot}10^{-5}$	$4{,}4{\cdot}10^{-5}$	$5{,}5{\cdot}10^{-5}$	$7{,}5{\cdot}10^{-5}$	$[m/s]$
STD	$5{,}1{\cdot}10^{-7}$	$9{,}7{\cdot}10^{-7}$	$2{,}4{\cdot}10^{-6}$	$4{,}6{\cdot}10^{-6}$	$8{,}7{\cdot}10^{-6}$	$1{,}3{\cdot}10^{-5}$	$1{,}4{\cdot}10^{-5}$	$[m/s]$
				Inddeling 2				
Minimum	$2{,}5{\cdot}10^{-7}$	$2{,}2{\cdot}10^{-7}$	$2{,}0{\cdot}10^{-7}$	$1{,}3{\cdot}10^{-7}$	$7{,}8{\cdot}10^{-8}$	$4{,}9{\cdot}10^{-8}$	$3{,}0{\cdot}10^{-8}$	$[m/s]$
Gennemsnit	$7{,}9{\cdot}10^{-7}$	$8{,}2{\cdot}10^{-7}$	$1{,}0{\cdot}10^{-6}$	$1{,}7{\cdot}10^{-6}$	$4{,}0{\cdot}10^{-6}$	$1{,}0{\cdot}10^{-5}$	$1{,}6{\cdot}10^{-5}$	$[m/s]$
Maksimum	$2{,}5{\cdot}10^{-5}$	$2{,}7{\cdot}10^{-5}$	$3{,}2{\cdot}10^{-5}$	$3{,}7{\cdot}10^{-5}$	$4{,}0{\cdot}10^{-5}$	$5{,}0{\cdot}10^{-5}$	$6{,}9{\cdot}10^{-5}$	$[m/s]$
STD	$5{,}1{\cdot}10^{-7}$	$9{,}4{\cdot}10^{-7}$	$2{,}4{\cdot}10^{-6}$	$4{,}6{\cdot}10^{-6}$	$8{,}5{\cdot}10^{-6}$	$1{,}3{\cdot}10^{-5}$	$1{,}3{\cdot}10^{-5}$	$[m/s]$
				Inddeling 3				
Minimum	$2{,}7{\cdot}10^{-7}$	$2{,}3{\cdot}10^{-7}$	$1{,}6{\cdot}10^{-7}$	$1{,}1{\cdot}10^{-7}$	$8{,}6{\cdot}10^{-8}$	$4{,}2{\cdot}10^{-8}$	$2{,}2{\cdot}10^{-8}$	$[m/s]$
Gennemsnit	$7{,}9{\cdot}10^{-7}$	$8{,}2{\cdot}10^{-7}$	$1{,}0{\cdot}10^{-6}$	$1{,}7{\cdot}10^{-6}$	$4{,}0{\cdot}10^{-6}$	$1{,}0{\cdot}10^{-5}$	$1{,}6{\cdot}10^{-5}$	$m/s]$
Maksimum	$2{,}4{\cdot}10^{-5}$	$2{,}7{\cdot}10^{-5}$	$3{,}2{\cdot}10^{-5}$	$3{,}7{\cdot}10^{-5}$	$4{,}2{\cdot}10^{-5}$	$5{,}6{\cdot}10^{-5}$	$7{,}1{\cdot}10^{-5}$	$[m/s]$
STD	$4{,}8{\cdot}10^{-7}$	$9{,}4{\cdot}10^{-7}$	$2{,}4{\cdot}10^{-6}$	$4{,}6{\cdot}10^{-6}$	$8{,}5{\cdot}10^{-6}$	$1{,}3{\cdot}10^{-5}$	$1{,}4{\cdot}10^{-5}$	$[m/s]$
				Inddeling 4				
Minimum	$2{,}3{\cdot}10^{-7}$	$2{,}0{\cdot}10^{-7}$	$2{,}2{\cdot}10^{-7}$	$1{,}4{\cdot}10^{-7}$	$7{,}5{\cdot}10^{-8}$	$4{,}3{\cdot}10^{-8}$	$2{,}6{\cdot}10^{-8}$	$[m/s]$
Gennemsnit	$7{,}7{\cdot}10^{-7}$	$8{,}0{\cdot}10^{-7}$	$1{,}0{\cdot}10^{-6}$	$1{,}7{\cdot}10^{-6}$	$4{,}0{\cdot}10^{-6}$	$1{,}0{\cdot}10^{-5}$	$1{,}6{\cdot}10^{-5}$	$[m/s]$
Maksimum	$2{,}6{\cdot}10^{-5}$	$2{,}7{\cdot}10^{-5}$	$3{,}1{\cdot}10^{-5}$	$3{,}4{\cdot}10^{-5}$	$4{,}0{\cdot}10^{-5}$	$4{,}9{\cdot}10^{-5}$	$6{,}8{\cdot}10^{-5}$	$[m/s]$
STD	$5{,}3{\cdot}10^{-7}$	$9{,}4{\cdot}10^{-7}$	$2{,}4{\cdot}10^{-6}$	$4{,}6{\cdot}10^{-6}$	$8{,}5{\cdot}10^{-6}$	$1{,}2{\cdot}10^{-5}$	$1{,}3{\cdot}10^{-5}$	$[m/s]$

På nedenstående figur H.9, kan den kumulative sandsynlighedsfordeling af den midlet hydrauliske ledningsevne logaritmisk ved inddeling af 500 iterationsintervaller.

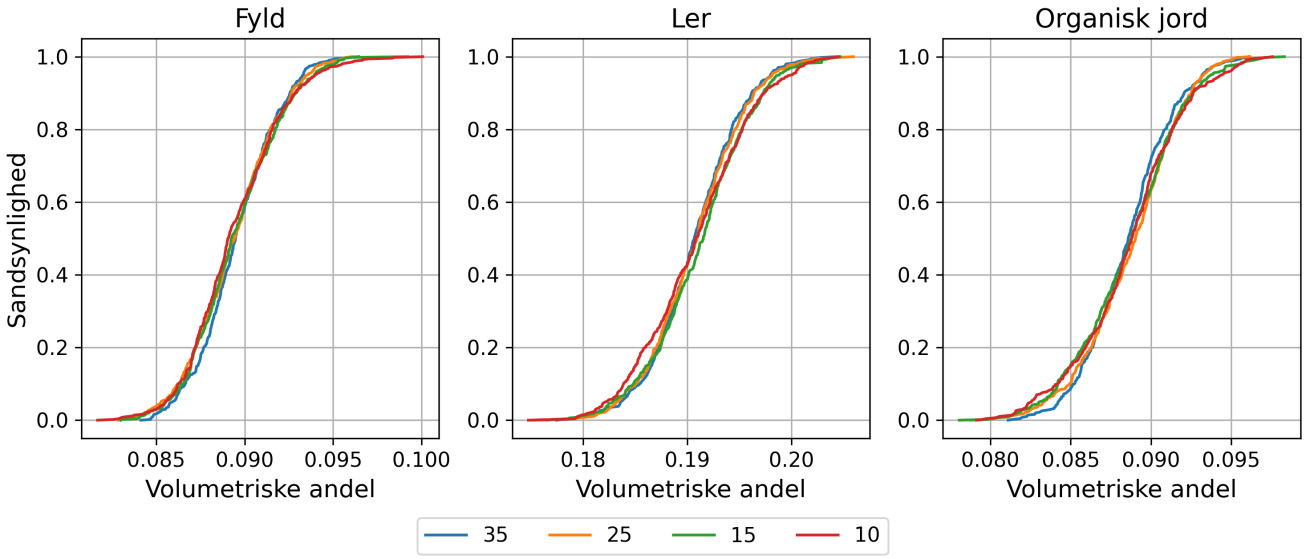


Figur H.9.Sandsynlighedsfordelingen for de syv boringsreduktioner opdelt i intervaller af 500.

Figur H.9 viser den kumulative sandsynlighedsfordeling af den midlet hydrauliske ledningsevne logaritmisk ved inddeling i 500 iterationsintervaller. Analysen fortaget i forbindelse med denne figur, har til formål at vurdere, antallet af nødvendige iterationer. Den midlet hydrauliske ledningsevne er inddelt i 500 iterations intervaller, for at undersøge iterationsintervallernes betydning på fordelingen af den hydrauliske ledningsevne. Grundet de observerede uniforme variationer, som generelt fremgår af de ovenstående figurer 11.7 og H.5. Som det fremgår af figur H.9, observeres der ikke nogen signifikant forskel mellem 500 og 5000 iterationer på den kumulative sandsynlighedsfordeling af den midlet hydrauliske ledningsevne. Ved anvendelse af 10 boreprofiler, observeres der en lille afvigelse mellem 500 og 5000 iterationer, men det er antaget som havende minimal betydning. Det er derfor antaget, at 500 iterationer til generering af geologiske realiseringer og beregning af tærrænnært grundvand på disse, er tilstrækkelig.

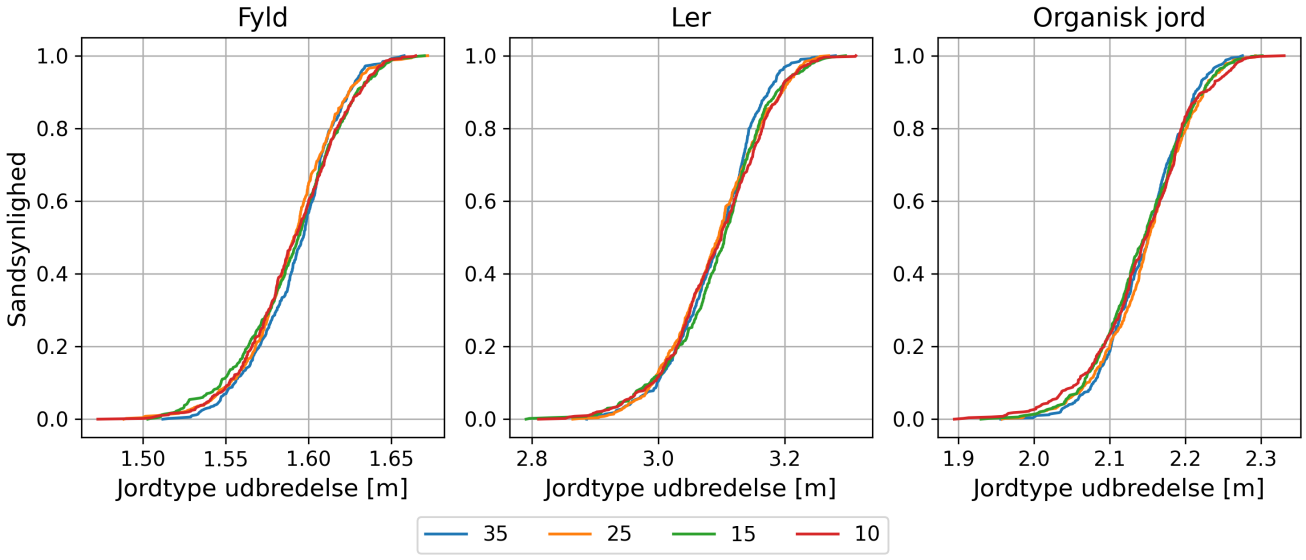
H.3.1 Effekten af boringsreduktion på den fulde model

De geostatistiske parametre for fyld, kalk og organisk jord fremgår af dette afsnit, hvor de volumetrisk andele for jordtyperne fremgår af figur H.10. Jordtype udbredelserne fremgår af figur H.11 og gennemsnitlige hydraulisk ledningsevne fremgår af figur H.12.



Figur H.10. Volumetriske fordeling af sand og ler, ved anvendelse af 10 - 35 boreprofiler i Kærby.

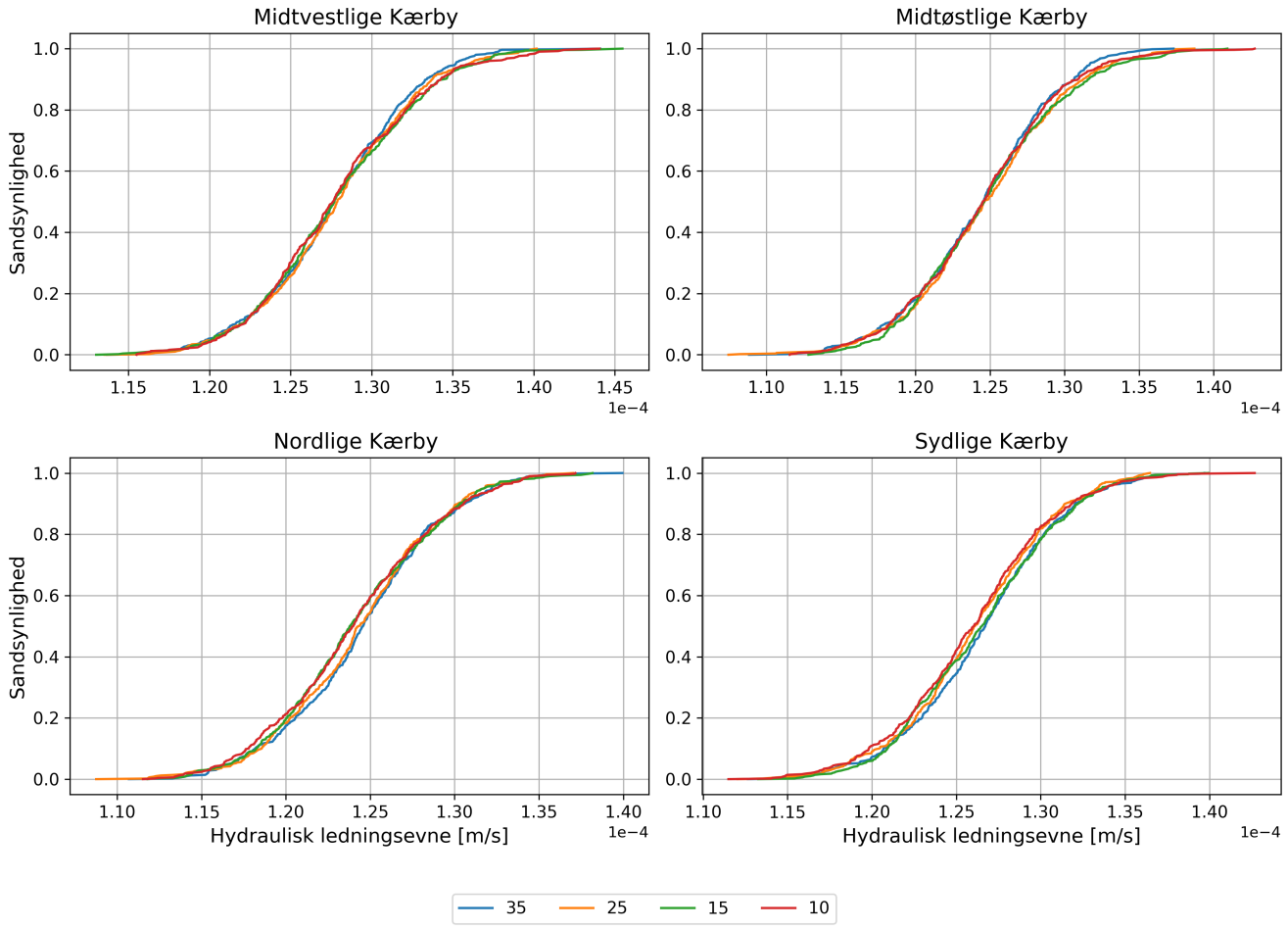
Figur H.10 illustrerer den volumetriske fordeling for fyld, ler og organisk jord, hvor ler kan observeres som den mest dominerede. Det kan observeres, at en reduktion af boringer i modellen ikke har en væsentlig effekt på den volumetriske fordeling af jordtyperne. Derfor kan en hypotese være, at effekten af at fjerne boringerne i Kærbyområdet, er uvæsenlig, da sandsynlighedsfordelingerne for disse er sammenlignlige. Yderligere indikerer det, at antallet af boringer fjernet og hvilke boringer der fjernes begge er uvæsentlige. Ud fra ovenstående figur H.10, kunne en hypotese være, at andelen af fyld, ler og organisk jord, som er tilstede i Kærbyområdet, er meget små, set i forhold til det fulde model område. Den volumetriske fordeling af de 5 jordtyper udviser mindre variation, ved generering af geologiske realiseringer end ved den reduceret model for Kærbyområdet. Nedenstående figur H.11, viser den vertikale udbredelse af fyld, ler og organisk jord i den fulde geologiske model.



Figur H.11. Den vertikale udbredelse af fyld, ved anvendelse af 10 - 35 boreprofiler i Kærby.

Figur H.11 viser de 3 mindst dominerende jordtyper i den fulde model, hvor størst vertikal udbredelse kan observeres for ler efterfulgt af organisk jord. Der fremgår ikke væsentlig forskel i den kumulative sandsynlighedsfordeling for jordtype udbredelse for fyld,ler og organisk jord, ved anvendelse af $[10 - 35]$ i Kærbyområdet. Ud fra ovenstående figur 11.12, kunne en hypotese være, at som førnævnt fyld, ler og

organisk jord udbredelser er dominerende uden for Kærby, hvilket også kan siges om jordtype udbredelsen. Den vertikale jordtype udbredelse af fyld, ler og organisk jord, varierer henholdsvis cirka 0,15 meter for fyld og cirka 0,4 meter for Ler og 0,4 meter for organisk jord. Figur H.12 viser fordelingen af den hydrauliske ledningsevne i de 4 område af Kærby.



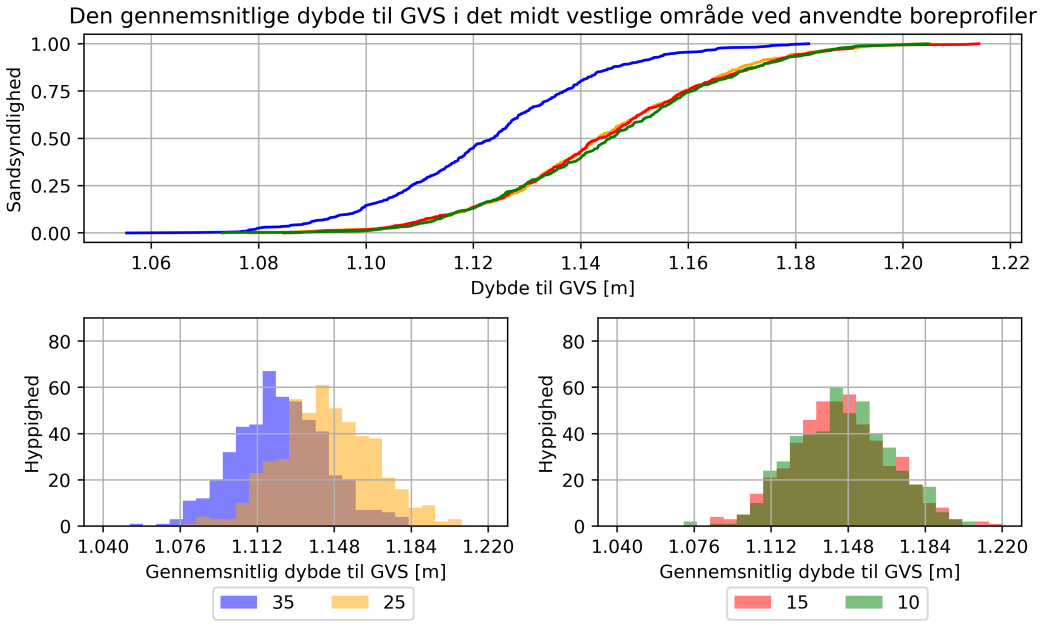
Figur H.12.Den hydrauliske ledningsevne for de fire inddelinger, ved anvendelse af 10 - 35 boreprofiler i Kærby.

Det kan observeres på ovenstående figur, at reduktion af boringer på de 4 inddelinger ikke påvirker den hydrauliske ledningsevne i særligt omgang . Da de kumulative sandsynlighedsfordelinger er sammenlignelige for anvendelse af [10-35] boreprofiler, antages det at den tilfældige udvælgelse af boringer er af uden betydning. Dette skyldes, at den hydrauliske ledningsevne er en parametrisering af de volumetriske jordtype andele, og derfor følger den samme tendens. De volumetriske andele er vist på figur H.10. Ud fra ovenstående figur H.12, antyder fordelingen af den gennemsnitlige hydrauliske ledningsevne for de 4 områder område, ikke at være påvirket af mængden af boringer benyttet til geologiske realiseringer fra Kærby.

H.4 Resultater

I forbindelse med den geostatiske analyse af boringsreduktion simuleres grundvandstanden i modelområdet for nutidens klima og kloakeringsforhold. Dybden til grundvandsspejlet for de forskellige områder er illustreret i form af middel værdier og 25% fraktiler for hver af de fire delområder i Kærby. Inddelingerne er tilsvarene dem vist på figur 8.8. For resultaterne vises den kumulative sandsynlighedsfordeling, samt histogram over værdierne. Grundet lignende resulter for delområderne, er den midt vestlige og

midt østlige del af Kærby vist i dette bilag. På nedenstående figur H.13, observeres de kumulative sandsynlighedsfordelinger, samt histogrammer over værdierne for det midt vestlige område i Kærby.



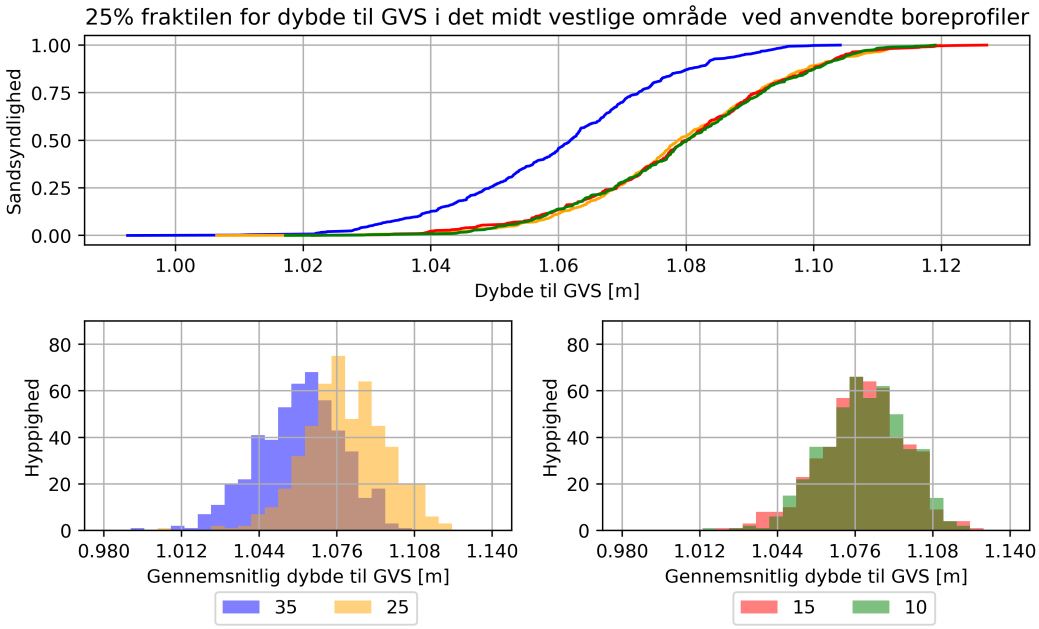
Figur H.13.På figuren illustreres den kumulative sandsynlighedsfordelinger, samt histogrammer over værdierne for det midt vestlige område i Kærby.

Af figuren H.13 kan det observeres at ved anvendelse af 35 boreprofiler er afvigende i forhold til yderligere reduktion ved anvendelse af $[10-25]$ boreprofiler. Afvigelsen er stabil med cirka 2 cm kortere afstand til terræn med 35 anvendte boringer. Simuleringerne for de øvrige reduktioner er minimal og oversiger kun 1 cm ved ekstremerne i top og bund ved 10 anvendte boringer. Resultaterne ved anvendelse af $[10-25]$ boreprofiler, viser lignende tendens i dybden til grundvandsspejlet uden væsentlig observeret forskel i kumulative sandsynligheds fordeling. Histogrammerne for dybden til grundvandsspejlet er for det midt vestlige område af Kærby. Disse viser spredningen ved anvendelse af 10 og 15 boreprofiler, hvilket ikke fremgår tydeligt af den kumulative sandsynlighedsfordelingen. Der ses yderligere en forskydning af histogrammet ved anvendelse af 35 boreprofiler. I tabel H.7 nedenfor, vises minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet, for hver reduktionsinterval i det midtvestlige område.

Tabel H.7.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse (STD) for dybden til grundvandsspejlet for 25% fraktilen, af hver reduktionsinterval i midtvestlige område.

Antal boringer	**35**	**25**	**15**	**10**	**Enhed**
Minimum	1,055	1,078	1,085	1,073	$[m]$
Gennemsnit	1,123	1,144	1,145	1,146	$[m]$
Maksimum	1,182	1,205	1,214	1,205	$[m]$
STD	0,021	0,022	0,023	0,022	$[m]$

Af ovenstående tabel H.7 fremgår den minimale afvigelse mellem minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet. Dette fremgår ligeledes af ovenstående kumulative sandsynlighedsfordelinger på figur H.13. Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i det midt vestlige område er varierende med 2,3 cm, hvilket anses som uden betydning. Ved standardafvigelsen kan samme tendens observeres, hvor ændringen er 0,2 cm, hvilket ligeledes anses som ubetydeligt. På nedenstående figur H.14 illustreres 25% fraktilen for det midt vestlige område i Kærby.



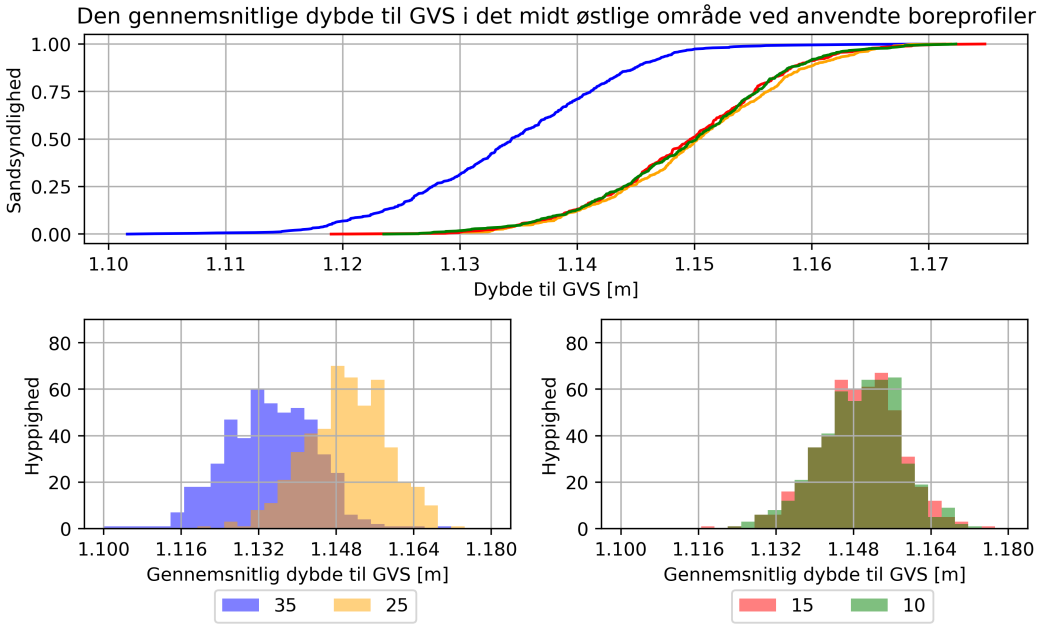
Figur H.14.25% fraktilen for dybde til grundvandsspejlet i det midt vestlige område, for 500 forskellige scenarier med ved anvendelse af $[10-35]$ boreprofiler

På ovenstående figur H.14 illustreres 25% fraktilen for det midt vestlige område. Generelt forekommer samme tendens ved 25% fraktilen og den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet af figur H.13. Af figuren H.14 anvendes 35 boreprofiler og det observeres som afvigende i forhold til reduktion ved anvendelse af $[10-25]$ boreprofiler. Afvigelsen er stabil med cirka 2 cm kortere afstand til terræn ved anvendelse af 35 boringer. Simuleringerne for de øvrige reduktioner er minimal og oversiger kun 1 cm ved ekstremerne i top og bund ved anvendelse af 10 boreprofiler. Tilsvarende til tendensen ved den gennemsnitlige dybde til grundvandspejlet. Histogrammerne af værdierne for 25% frakilen af det midtvestlige område område i Kærby, viser spredningen mellem værdier ved anvendelse af 10 og 15 boreprofiler, som ikke fremgår tydeligt af den kumulative sandsynlighedsfordeling. I tabel H.8 nedenfor, fremgår minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet, for hver reduktionsinterval i det midtvestlige område.

Tabel H.8.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse (STD) for dybden til grundvandsspejlet for 25% fraktilen, af hver reduktionsinterval i midtvestlige område.

Antal boringer	**35**	**25**	**15**	**10**	**Enhed**
Minimum	0,992	1,006	1,021	1,017	$[m]$
Gennemsnit	1,061	1,080	1,079	1,080	$[m]$
Maksimum	1,104	1,120	1,127	1,119	$[m]$
STD	0,017	0,017	0,017	0,017	$[m]$

Af ovenstående tabel H.8 fremgår den minimale afvigelse mellem minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet. Dette fremgår ligeledes af ovenstående kumulative sandsynlighedsfordeling på figur H.14. Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i det midtvestlige område er varierende med 1,9 cm, hvilket anses som uden betydning. Standardafvigelsen kan observeres som konstant. På nedenstående figur H.15, observeres de kumulative sandsynlighedsfordelinger for den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet, samt histogrammer over dybden til grundvandsspejlet for det midt østlige område i Kærby.



Figur H.15.På figuren illustreres den kumulative sandsynlighedsfordelinger, samt histogrammer over gennemsnitlig dybde til grundvandsspejlet for det midt østlige område i Kærby.

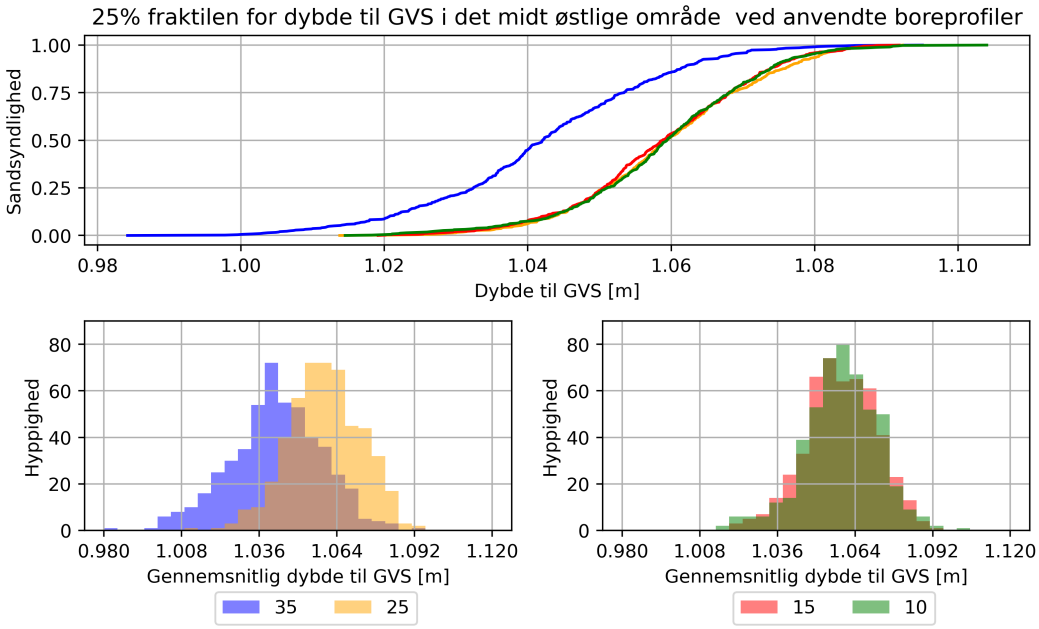
Af figuren H.13 kan det observeres, at ved anvendelse af 35 boreprofiler, er disse afvigende i forhold til anvendelse af $[10-25]$ boreprofiler. Afvigelsen er stabil med cirka 2 cm kortere afstand til terræn ved anvendelse af 35 boreprofiler. Simuleringerne for de øvrige reduktioner er minimal og oversiger kun 1 cm ved ekstremerne i top og bund ved anvendelse af 10 boreprofiler. Det er samme tendens, som er observeret på figur H.13 og figur 11.14, hvor det udelukkende er den sydlige del af Kærby udviser afvigende tendenser i dybden til grundvandsspejlet. Den sydlige del af Kærby kan observeres på figur 11.16. Resultaterne ved anvendelse af $[10-25]$ boreprofiler, viser lignende tendens i dybde til grundvandsspejlet, uden væsentlig forskel i kumulative sandsynligheds fordeling.

Histogrammerne for dybden til grundvandsspejlet for det midt østlige område i Kærby, viser spredningen mellem værdier ved anvendelse af 15 og 10 boreprofiler, som ikke fremgår så tydeligt af den kumulative sandsynlighedsfordeling. Der ses yderligere en forskydning af histogrammerne ved anvendelse af 35 boreprofiler, som er mere væsentligt end det observerede af figur H.13. Der observeres altså en forskydning af værdierne for dybden til grundvandsspejlet. I tabel H.9 vises minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet, for hver reduktions interval i det midt østlige område.

Tabel H.9.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse (STD) for dybden til grundvandsspejlet for 25% fraktilen, af hver reduktions interval i midt østlige område.

Type	**35**	**25**	**15**	**10**	**Enhed**
Minimum	1,102	1,120	1,119	1,123	$[m]$
Gennemsnit	1,134	1,150	1,149	1,149	$[m]$
Maksimum	1,171	1,172	1,175	1,172	$[m]$
STD	0,009	0,008	0,008	0,008	$[m]$

Af ovenstående tabel H.9 fremgår den minimale afvigelse mellem minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet. Dette fremgår ligeledes af ovenstående kumulative sandsynlighedsfordeling på figur H.15. Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i det midt østlige område er varierende med 1,6 cm, hvilket anses som værende uden betydning. Ved standardafvigelsen kan samme tendens observeres, hvor ændringen er 0,1 cm, hvilket ligeledes anses som værende ubetydeligt. På nedenstående figur H.14 illustreres 25% fraktilen for det midt østlige område i Kærby.



Figur H.16.25 % fraktilen for dybde til grundvandsspejlet i det midt østlige område, for 500 forskellige scenarier ved anvendelse af $[10-35]$ boreprofiler.

På ovenstående figur H.14 illustreres 25% fraktilen for det midt østlige område. Generelt kan samme tendens ved 25% fraktilen og den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet af figur H.13 og figur H.13. Af figur H.16 kan anvendelse af 35 boreprofiler observeres som værende afvigende i forhold til større reduktion ved anvendelse af $[10-25]$ boreprofiler. Afvigelsen er stabil med cirka 2 cm kortere afstand til terræn ved anvendelse af 35 boreprofiler. Simuleringerne for de øvrige reduktioner er minimale og oversiger kun 1 cm ved ekstremerne i top og bund ved anvendelse af 10 boringer. Dette er som vist ved den gennemsnitlige dybde til grundvandspejlet. Histogrammerne af værdierne for 25% frakilen af det midt østlige område område i Kærby, viser spredningen mellem værdier ved anvendelse af 15 og 10 boreprofiler, som ikke fremgår tydeligt af den kumulative sandsynlighedsfordeling. Der observeres yderligere en forskydning af histogrammet ved anvendelse af 35 boreprofiler, som er mere væsentlig end observeret af figur H.15. Der observeres en forskydning af værdierne for dybden til grundvands spejlet på få centimeter. Dette er samme tendens, som er observeret på figur H.13, figur 11.14 og figur H.15, hvor det udelukkende er den sydlige del af Kærby der udviser afvigende tendenser i dybden til grundvandsspejlet. I tabel H.10 nedenfor, vises minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet, for hver reduktions interval i det midt østlige område.

Tabel H.10.Minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet for 25% fraktilen, af hver reduktionsinterval i midt østlige område.

Type	**35**	**25**	**15**	**10**	**Enhed**
Minimum	0,984	1,014	1,019	1,015	$[m]$
Gennemsnit	1,042	1,060	1,059	1,059	$[m]$
Maksimum	1,095	1,092	1,092	1,104	$[m]$
STD	0,017	0,013	0,013	0,013	$[m]$

Af ovenstående tabel H.10 fremgår den minimale afvigelse mellem minimum, maksimum, gennemsnit og standardafvigelse for dybden til grundvandsspejlet. Dette fremgår ligeledes af ovenstående kumulative sandsynlighedsfordelinge på figur H.16. Den gennemsnitlige dybde til grundvandsspejlet i det midt østlige område er varierende med 1,8 cm, hvilket anses som uden betydning. Ved standardafvigelsen kan samme tendens observeres, hvor ændringen er 0,4 cm, hvilket ligeledes anses som ubetydeligt.