

# Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg

Teknisk rapport fase 3

Lars Troldborg, Maria Ondracek, Jacob Kidmose, Julian Koch  
& Jens Christian Refsgaard

# Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg

Teknisk rapport fase 3

Lars Troldborg, Maria Ondracek, Jacob Kidmose, Julian Koch  
& Jens Christian Refsgaard

# Indhold

<b>1</b>	<b>Formål</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Post audit af den geologisk model</b>	<b>5</b>
2.1	Miocæn lagfølge.....	5
2.2	Den Kvartære lagfølge.....	8
2.3	Terrassesandet.....	9
2.4	Resultat hydrogeologi post audit.....	9
<b>3</b>	<b>Post audit af modelperformance</b>	<b>10</b>
3.1	Grundvandssænkning, monitoring af placeringen og oppumpede vandmængder....	10
3.2	Pejledata .....	12
3.3	Modelopsætning.....	13
3.4	Indlæggelse af grundvandssænkning i 100m og 20m model.....	13
3.5	Post audit resultat.....	15
<b>4</b>	<b>Avanceret model post audit</b>	<b>15</b>
4.1	Model kalibrering.....	16
4.1.1	Objektivfunktion .....	16
4.1.2	kalibreringsresultat .....	17
4.1.3	Optimerede parametre og usikkerhedsintervaller .....	18
4.2	Simulering af afsænkning.....	24
4.3	Simulering af oppumpning.....	24
4.4	Diskussion avanceret post audit resultat.....	25
<b>5</b>	<b>Supplerende usikkerhedsanalyse af post audit modellen</b>	<b>26</b>
5.1.1	Parameter realisationer .....	27
5.1.2	Prækvartære overflade realisationer.....	27

5.1.3	Spuns realisationer .....	29
5.1.4	Realisationer af klimatilpasningstiltag .....	29
5.1.5	Realisationer med klima fremskrivninger .....	30
5.2	Analyse 1 – Usikkerheder relateret til modelperformance samt spuns indflydelse på simulerede trykniveauer .....	30
5.2.1	Metode.....	30
5.2.2	Resultater .....	31
5.3	Analyse 2 – sammenligning af modelusikkerhed med usikkerhed på klimafremskrivning og klimatilpasning .....	34
5.3.1	Resultater .....	35
<b>6</b>	<b>Konklusion</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>Referencer</b>	<b>38</b>

# 1 Formål

Grundvandsmodeller bliver typisk kalibreret mod data, der afspejler den nuværende situation med hensyn til nuværende klimaforhold og oppumpninger. Men modellerne benyttes som regel til at forudsige andre forhold, som fx et ændret klimaforhold eller ændret oppumpning. Vi har af gode grunde ikke klimadata for 2100 og som regel heller ikke grundvandsdata for situationer med andre oppumpninger. Det betyder, at en grundvandsmodels evne til at forudsige, det den skal bruges til, sjældent kan testes direkte – og vi må derfor forvente betydelige usikkerheder på modelforudsigelserne.

Eftersom de eksisterende data kun omfatter en kort periode og kun indeholder data fra en "uforstyrret" situation, hvor de årlige variationer i grundvandstrykniveau er ca. 15 cm, vil modelforudsigelser af grundvandet i andre situationer (et andet klima), være behæftet med betydelig usikkerhed. Som en del af samarbejdsprojektet mellem GEUS og VD, fik vi en unik mulighed for at post audit teste modellen mod data fra anlægningsperioden, både geologiske data under gravearbejdet og hydrologiske data fra de omfattende sænkninger af grundvandsspejlet for at tørlægge vejtracéet under konstruktionsarbejdet.

Formålet med post audit er at teste modellens robusthed, særligt med henblik på at vurdere tidligere defineret modelgenereret forudsigelser af fremtidig ekstrem grundvandsstand. Post audit validering som terminologi blev introduceret af Anderson og Voessner (1992), som en særlig læringsmulighed, hvor data indsamlet år efter modellen er opstillet bliver anvendt til at evaluere modellens evne til at forudsige/simulere nye data. Typiske erfaringer med post audit viser, at modellerne ofte udviser større afvigelser end den forventede usikkerhed, men at disse usikkerheder ofte er relateret til den geologisk/konceptuel model og/eller forkert eller ringe model påvirkninger (f.eks. forkert indvinding eller klima).

De fleste post audit, der er rapporteret i litteraturen, er af "split-sample (SS)" typen, typisk via opdeling af måledata i to grupper, hvor der ikke antages ændringer i klima, arealanvendelse eller grundvandsindvinding, og hvor der ofte er lange tidsserier til rådighed til kalibrering (Konikow og Bredehoeft 1974; Alley og Emery 1986; Andersen og Lu 2003; Lemke og Cypher 2010; Karlsen et al. 2012; Brkic et al. 2013). To post audit artikler (Konikow 1985; Stewart og Langevin 1999) kan karakteriseres som "differentiel split-sample (DSS)", dvs. undersøgelser af model performance hvor der samtidigt er ændrede påvirkningerne, i disse tilfælde var det mindre ændringer (<50%) i grundvandsindvinding. Ingen af post audit artiklerne indeholder situationer, hvor en model performance er vurderet under større ændrede påvirkninger (i fx grundvandsindvinding), eller med andre ord, ingen stærke DSS type post audit.

Datamaterialet indsamlet under anlægsfasen har åbnet mulighederne for model post audit relateret til såvel den geologiske model som simuleringsrobusthed under kraftigt ændre påvirkninger (stærk DSS test). Der er gennemført tre post audit test:

1. Post audit af hydrogeologi, hvor modellens geologiske strukturer bliver sammenholdt og opdateret med nye geologiske data fra anlægsfasen.

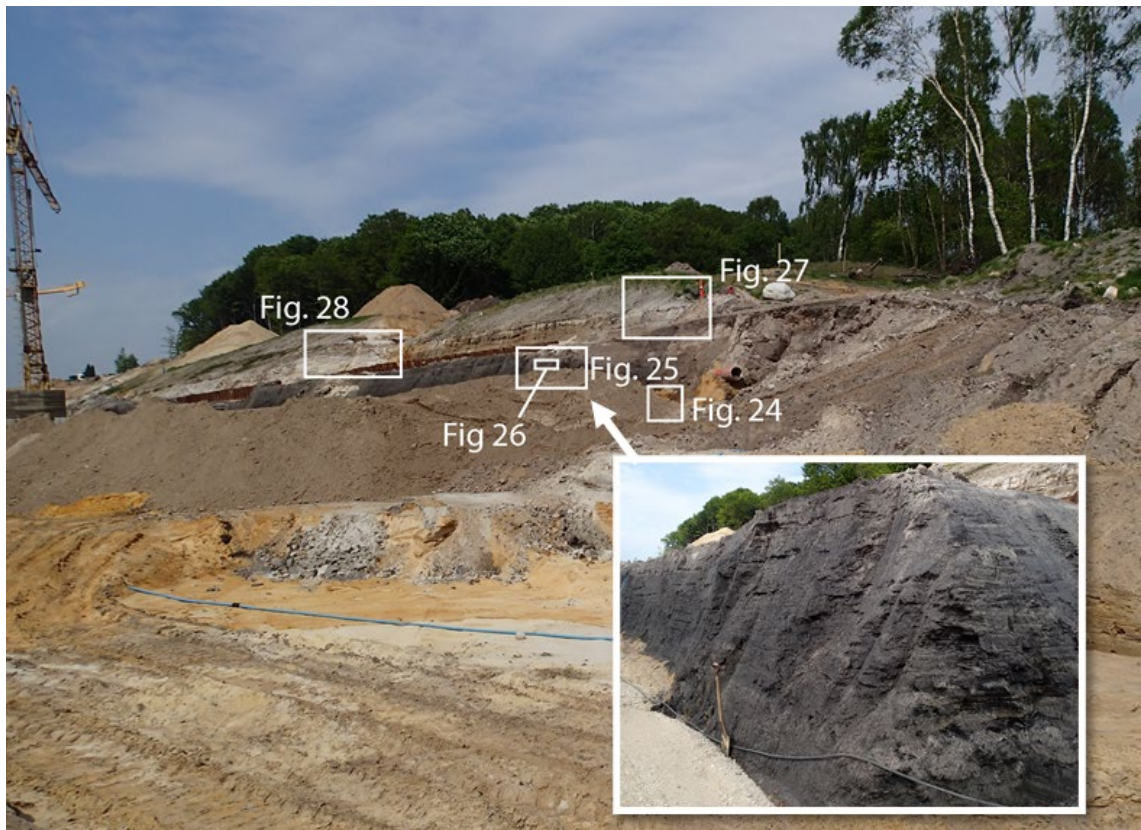
2. Post audit af model performance, hvor modellens evne til at simulere anlægsrelaterede oppumpede vandmængder bliver testet.
3. "Avanceret" post audit, hvor modellens prædiktions usikkerhed bliver genvurderet ud fra opdateret- og genkalibreret model.

## **2 Post audit af den geologisk model**

Som en del af den hydrogeologiske post audit er den geologiske model testet ved at sammenligne den anvendte modelgeologi (Troldborg et al. 2013) med beskrivelsen af de geologiske enheder som midlertidigt var blottede under anlægningsarbejdet. Beskrivelsen af den midlertidigt blottede geologi blev foretaget ved feltobservationer hhv. oktober 2013 og Maj 2014 af Jacob Kidmose og Peter Roll Jakobsen. I mellemtiden blev det blottede Miocæn krono -og biostratigrafisk undersøgt af Karan Dybkjær og Erik Skovbjerg Rasmussen. Resultaterne er indeholdt i Jakobsen et. al (2014).

### **2.1 Miocæn lagfølge**

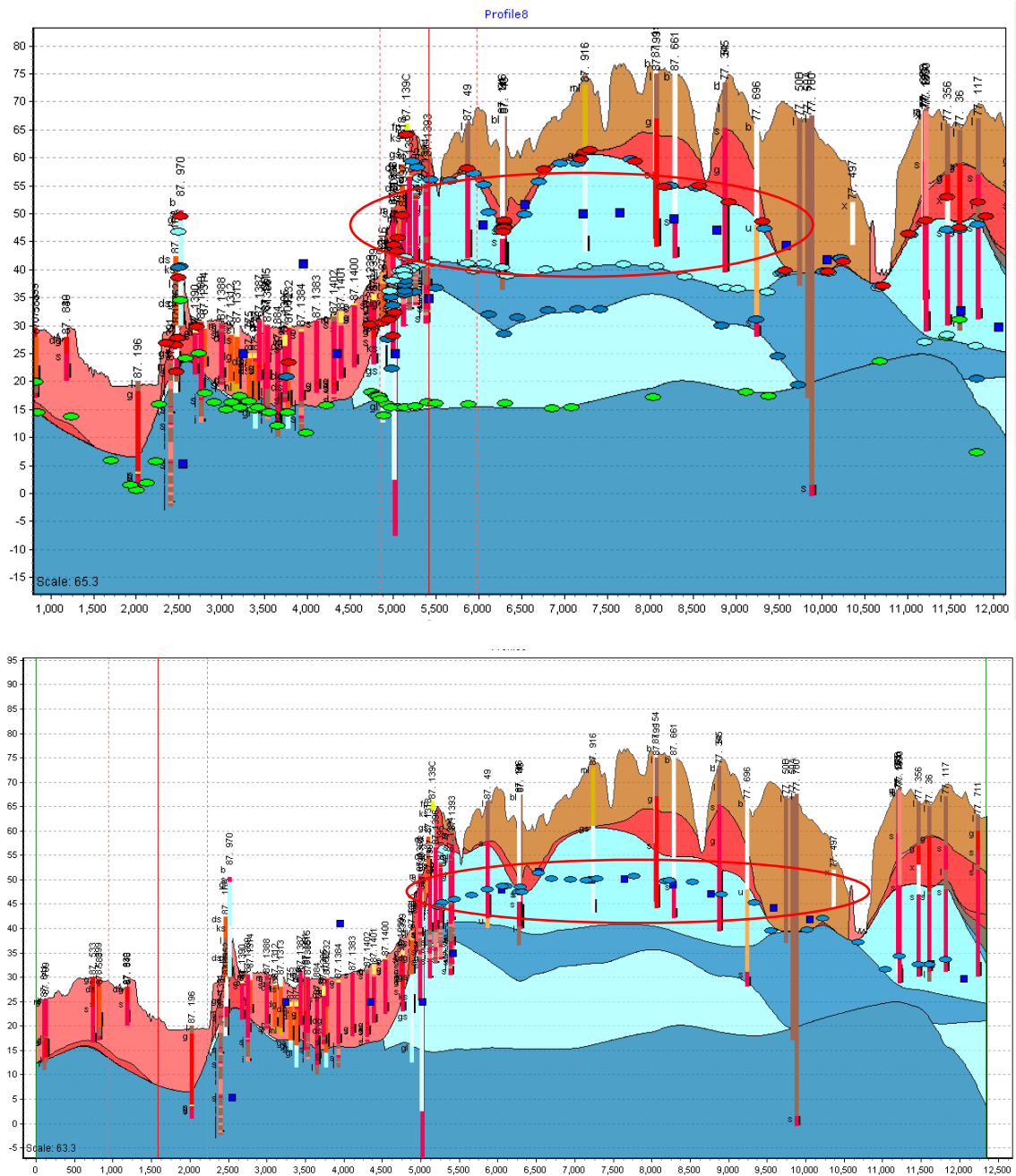
Undersøgelsen og beskrivelsen de geologiske enheder, der midlertidigt var blottet under anlægsarbejdet på motorvejen gennem Silkeborg (Jakobsen et al., 2014 & Jakobsen et al., 2016), viste overordnet set, at observationerne for den miocæne geologi ikke adskiller sig fra den tidligere opsatte hydrogeologiske model beskrevet i Troldborg et al. (2013).



Figur 1 Oversigts billede med tydelig afbildning af det tykke sorte, siltede lerlag (inlejret figur) (let revideret fra Jakobsen et al. 2014)

Placeringen af Kvartær-Miocæn grænsen, der ses blottet kun få meter over den op til fire meter tykke miocæne siltede lerbænk, Figur 1, var i Troldborg et al. (2013) bestemt til at ligge i en højere kote.

Jakobsen et al (2014) forventer, at såvel den miocæne, siltede lerbænk som Kvartær-Miocæn grænsen, kan tolkes med en uniform kote for hele modelområdet.

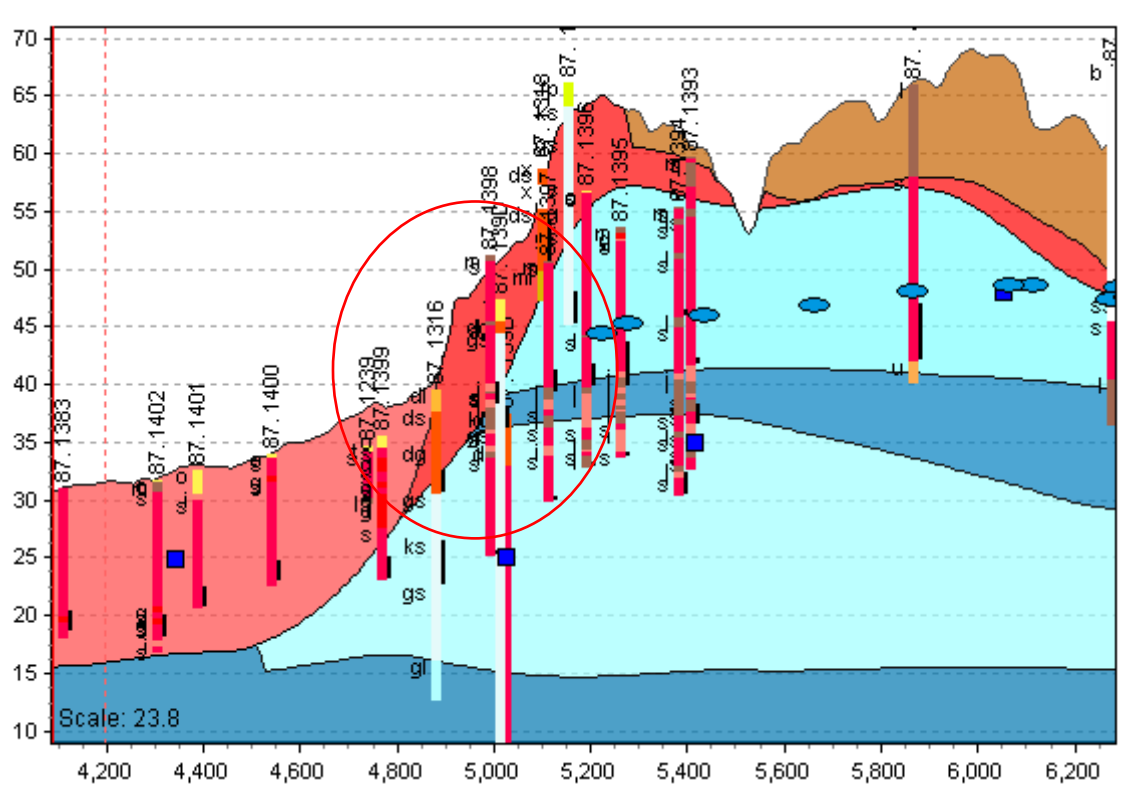


Figur 2 Geologisk model fra Troldborg et al. (2011). Indenfor rød markering ses tolkninger af gs1t. Øverst Troldborg et al. (2011) tolkninger, nederst post audit modellens nye tolkninger

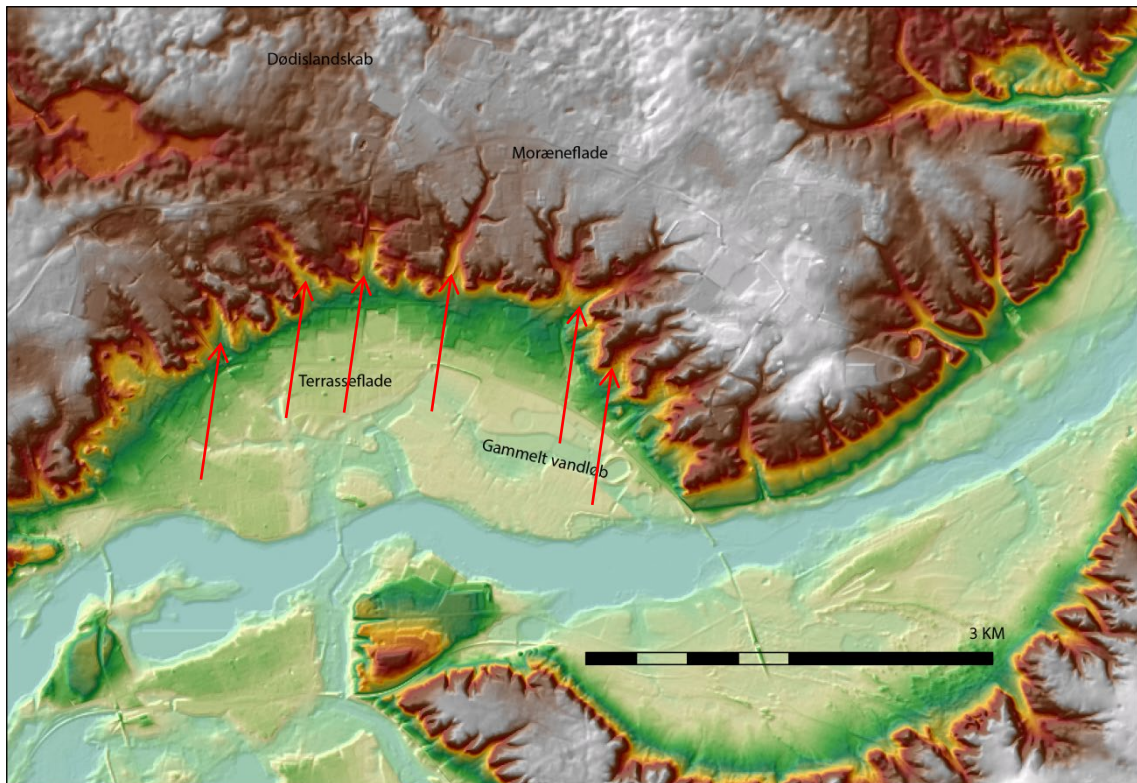
Ud fra observationer ved motorvejstraceet bemærkes det, at der kun findes omkring 2 meter Miocæn aflejringer over den mellemliggende miocæne siltede lerbænk i kote 30-45m. I Post audit modellen er tolkningspunkter for toppen af Miocæn (gs1t) justeret for hele Silkeborg modelområdet, så de overalt ligger under kote 50m, Figur 2. Det medfører generelt, at modelområder, som tidligere havde stor mægtighed af den øvre miocæne sandenhed, har fået reduceret denne, mens den kvartære sandenhed (ds) i disse områder er blevet større.

## 2.2 Den Kvartære lagfølge

Jakobsen et al (2014) har ikke observeret direkte kontakt mellem det glaciale sand (også benævnt smeltevandssandet) og terrassesand magasinet ved motorvejstraceet. Derimod ses typisk en såkaldt nedskyldsdiamikt i skræntzonen, som dog hydraulisk set vil have samme effekt som en evt. direkte kontakt mellem smeltevandssandet og terrassesand magasinet, Figur 3. Diamikten vil primært ses, hvor nedskårne ådale skærer sig ned i skræntzonen, se Figur 4 . På figuren ses, at nedskyldsdiamikten formodentligt er udbredt via de mange nedskårne dale. Da nedskyldsdiamikten primært vil bestå af materiale fra smeltevandsenheden, vurderes det derfor ikke nødvendigt at foretage en justering af den geologiske model fra Troldborg et al. (2011) for disse områder.



Figur 3 Det markerede område viser kontakten mellem Terrassesand magasinet, lys røde magasin til venstre på figuren og det glaciale sand udbredt i oplandet, til højre mellem Moræneler (brun) og Miocæn sand (lys blå)



Figur 4 Topografiske kort over Silkeborg. Nedskårne ådale, hvor nedskyldsdiamikt forekommer, er markeret med rød pil.

### 2.3 Terrassesandet

Jakobsen et al (2014) vurderede, at udbredelsen af terrassesand fladen ved motorvejstracéet er relativt godt beskrevet ved de geotekniske borer. Denne information er allerede indarbejdet i den geologiske model fra Troldborg et al. (2011), hvorfor det ikke vurderes nødvendigt at revidere denne enhed i Post Audit modellen. De optegnede sedimentologiske logs af det blottede terrassesand i Jakobsen et al. (2014) illustrerede, at terrassesandets heterogenitet er fin til mellemkornede sandlag, grov sandede og grusede lag, samt horisonter med ler og siltsliger. Generelt bekræftedes det, at terrassesandet potentielt er meget vandførende og udgør et frit øvre grundvandsmagasin.

### 2.4 Resultat hydrogeologi post audit

Adgangen til blotlægningerne i forbindelse med konstruktionen af motorvejstracéet gennem Silkeborg har givet mulighed for at gennemføre post audit af hydrogeologien. Tilstedeværelsen af nedskyldsdiamikt i skræntzonen og ændringen af koten for overgangen mellem det Kvartærte og Miocæne bekræfter den tidligere antagelse om, at modellen er særlig usikker i disse områder (Troldborg et al. 2011).

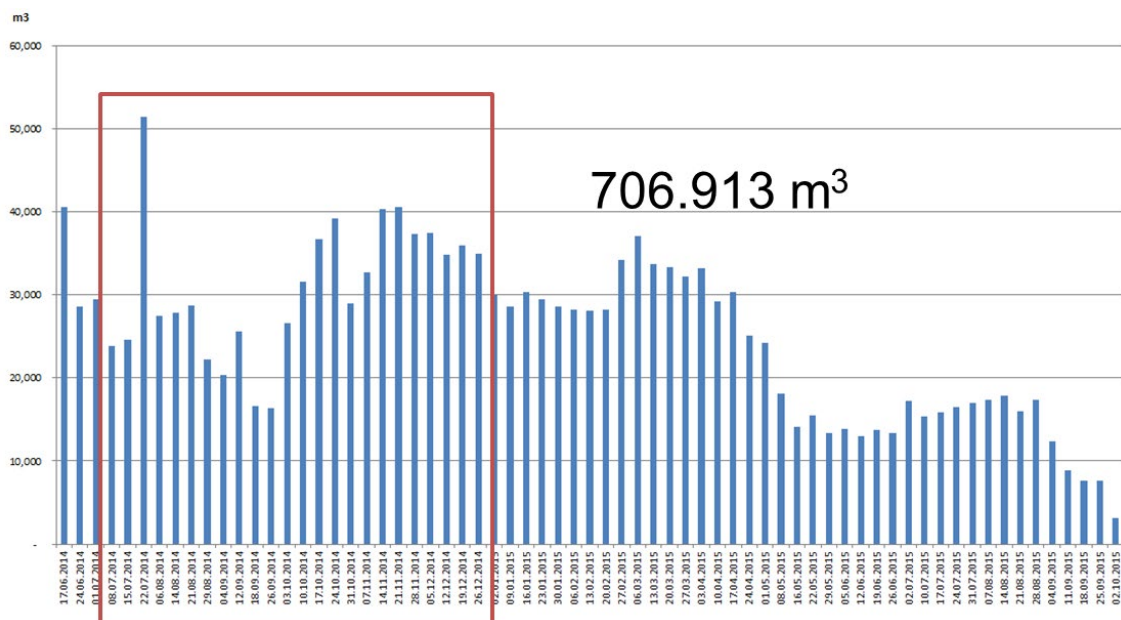
Samlet set vurderes det, at den hydrogeologiske model anvendt til vurdering af fremtidige klimatiske påvirkninger af vandstanden langs motorvejstracéet, er robust og pålidelig. Særligt vigtigt er bekræftelsen på, at terrassesand magasinet hydrologiske egenskaber, men også observationer af det stort set vandstandsede miocæne, siltede lerbænk (Figur 1) i øvre del af Miocænet, er konsistente med de oprindelige modelberegninger af, at der ikke strømmer vand i væsentlige mængder fra den dybere liggende del af den Miocæne lagfølge ud i terrassesand magasinet, således at fremtidige klimapåvirkninger er begrænset til arealmæssigt at stamme fra området indenfor og tæt ved terrassesandsmagasinets udbredelse.

### 3 Post audit af modelperformance

Post audit af modelperformance er udført ved at sammenligne modellens evne til at simulere den oppumpede mængde vand fra en periode i anlægningsfasen, hvor det var nødvendigt at lave en bestemt grundvandssænkning i forbindelse med konstruktionen af den nedgravede del af anlægget.

#### 3.1 Grundvandssænkning, monitoring af placeringen og oppumpede vandmængder

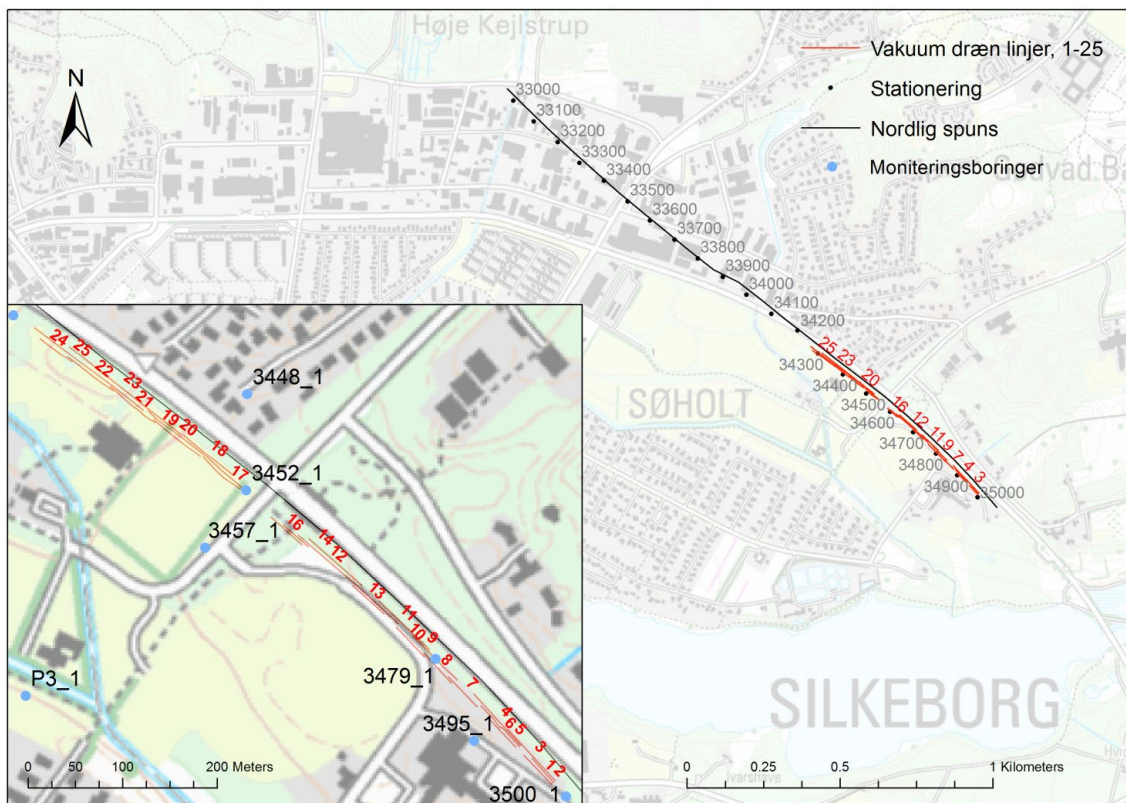
De oppumpede vandmængder fra grundvandssænkningen nord for, og med udledning til Silkeborg Langsø, Entreprise 6620.104 Spuns Syd, er opgjort af Arkil og videresendt til GEUS for perioden august 2013 til oktober 2015, hvor den sidste grundvandssænkning ophørte. Den samlede oppumpede mængde var 2 mio. m<sup>3</sup> (1.972.678 m<sup>3</sup>) for denne periode.



Figur 5 Oppumpede vandmængder ved grundvandssænkningen Spuns Syd. Værdierne er opgjort ugevis

Monitering med vandure er ikke foretaget mellem august 2013 og april 2014, og vandmængderne er herunder estimeret på baggrund af pumpekapaciteter og antal igangværende pumper. Mellem april 2014 og oktober 2015 er vandmængder opgjort ved vandure med ugentlige aflæsninger. Da vandurene er flyttet rundt mellem forskellige sænkingsområder, hersker der usikkerhed om placeringen af vandurene for hele sænkingsperioden.

Sænkningen af grundvandsstanden indenfor motorvejstraceet er primært foretaget ved linjedræn med sugespidsler tilsluttet vakuumpumper. Fra juli 2014 og frem er alt rapporteret grundvandssænkning foretaget ved disse linjedræn. Vandurene er flyttet mellem de aktive linjedræn, afhængigt af behovet for grundvandssænkning, ved forskellige sektioner af motorvejstraceet. Figur 6 viser en oversigt over de 25 benyttede linjer.



Figur 6 Linjedræn benyttet til grundvandssænkning i motorvejstrace samt moniteringsboringer

På figuren ses, at flere drænlínjer overlapper hinanden og dermed sænker grundvandsstanden i samme segment af motorvejen. Linjedræne er inddelt i 6 grupper efter placering med grupperne: linjedræn 1-7, linjedræn 8-11, linjedræn 12-16, linjedræn 17-18, linjedræn 19-20, og linjedræn 21-25. Linjedræne er indlagt i grundvandsmodellen i disse grupper.

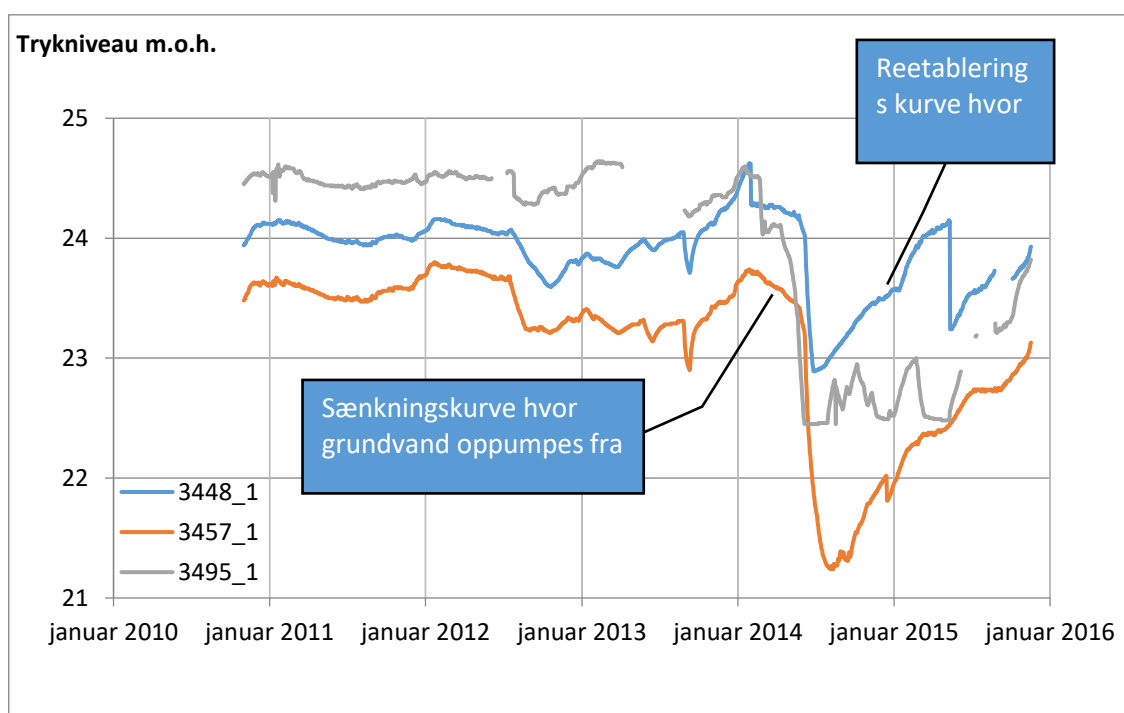
I post audit er perioden for linjedræn 17-20 anvendt, og for denne periode er der opgjort en oppumpning via linje dræn på 706.913 m<sup>3</sup>, Figur 5.

## 3.2 Pejledata

Ved post audit kalibreringen er observerede pejledata for pumpeperioden benyttet som kalibreringsmål. Her er fokuseret på henholdsvis perioderne, hvor grundvandssænkningen igangsættes og afsluttes. Figur 7 viser de tre pejletidsserier, hvor de anvendte perioder er markeret.

Den del af pejletidsserien, hvor effekten af grundvandsoppumpningen påvirker trykniveauet negativt, kaldes sænkingskurven, og den del af kurven, hvor oppumpningen er stoppet og viser hvordan grundvandsspejlet reetableres, kaldes reetableringskurven. Det ses på de tre sænkings- og reetableringskurver, at sænkningen varierer fra boring til boring, afhængigt af placering i forhold til de forskellige linjedræn.

Perioden fra slutningen af 2010 til sommeren 2012 viser den naturlige variation i terrassesand magasinet uden tegn på påvirkninger fra oppumpning. Mellem sommeren 2012 og august 2013, hvor der ikke er registreret oppumpning, har der ifølge pejlingerne tydeligvis været mindre oppumpninger, eller andre påvirkninger af trykniveauet.

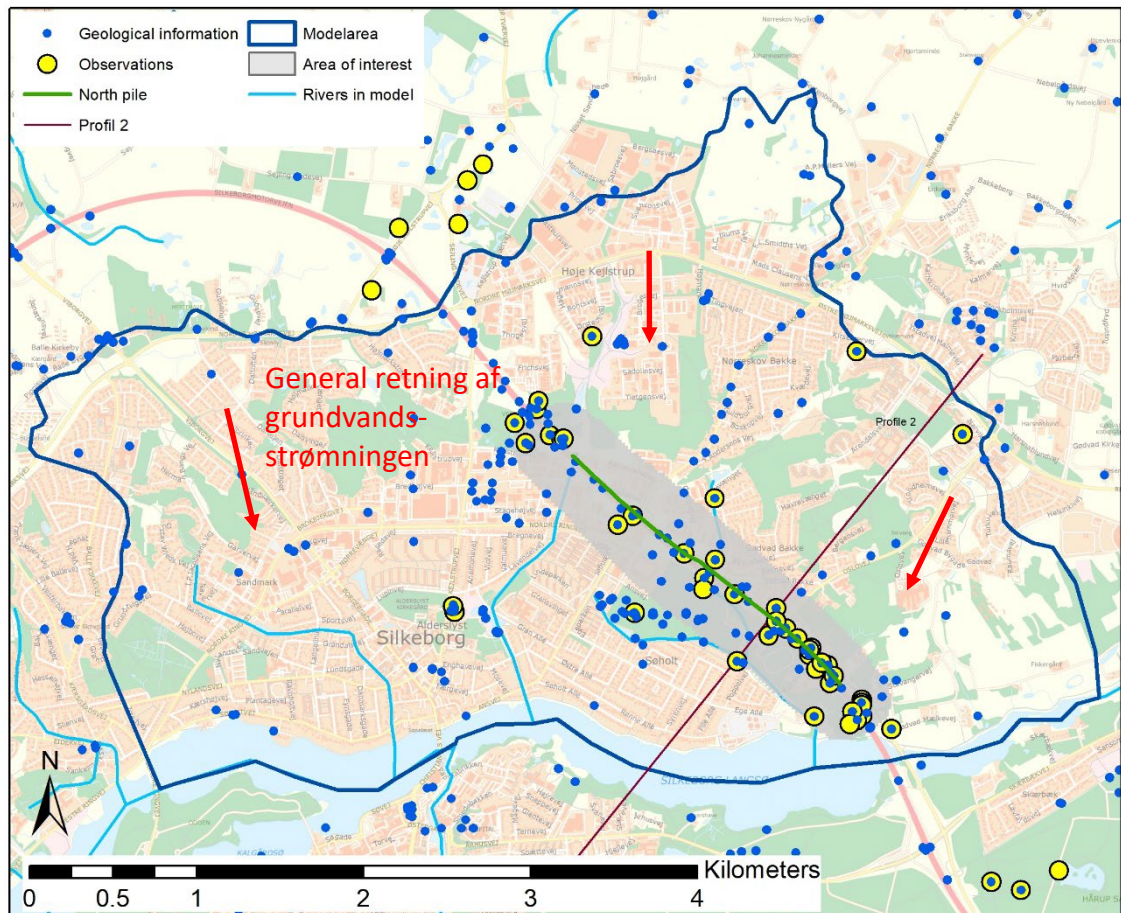


Figur 7 Observeret trykniveau i 3 borer tæt ved motorvejstrace og grundvandssænkningen, se Figur 6 for placering

Eksempelvis ses i sensommeren 2012 en sænkning i trykniveauet i alle tre borer. Disse sænkninger før 2014 er forholdsvis små, og det observeres, at grundvandsspejlet ser ud til at være reetableret før de større grundvandssænkninger i 2014.

### 3.3 Modelopsætning

Modelopsætning og kalibrering er nærmere beskrevet i Trolborg et al. (2013). Modellen består, som tidligere, af en 100 m model der producerer dynamisk randbetingelse til en 20m model. I 100m modellen er indvindinger inkluderet men ikke spunsen, som kun er inkluderet i 20m modellen. Modelområde for 20m modellen fremgår i Figur 8. Selve simuleringsperioden er udvidet til at dække hele perioden med grundvandssænkningerne.



Figur 8 Oversigt af 20m model område hvor placeringen af observationer og boreringer fremgår.

### 3.4 Indlæggelse af grundvandssænkning i 100m og 20m model

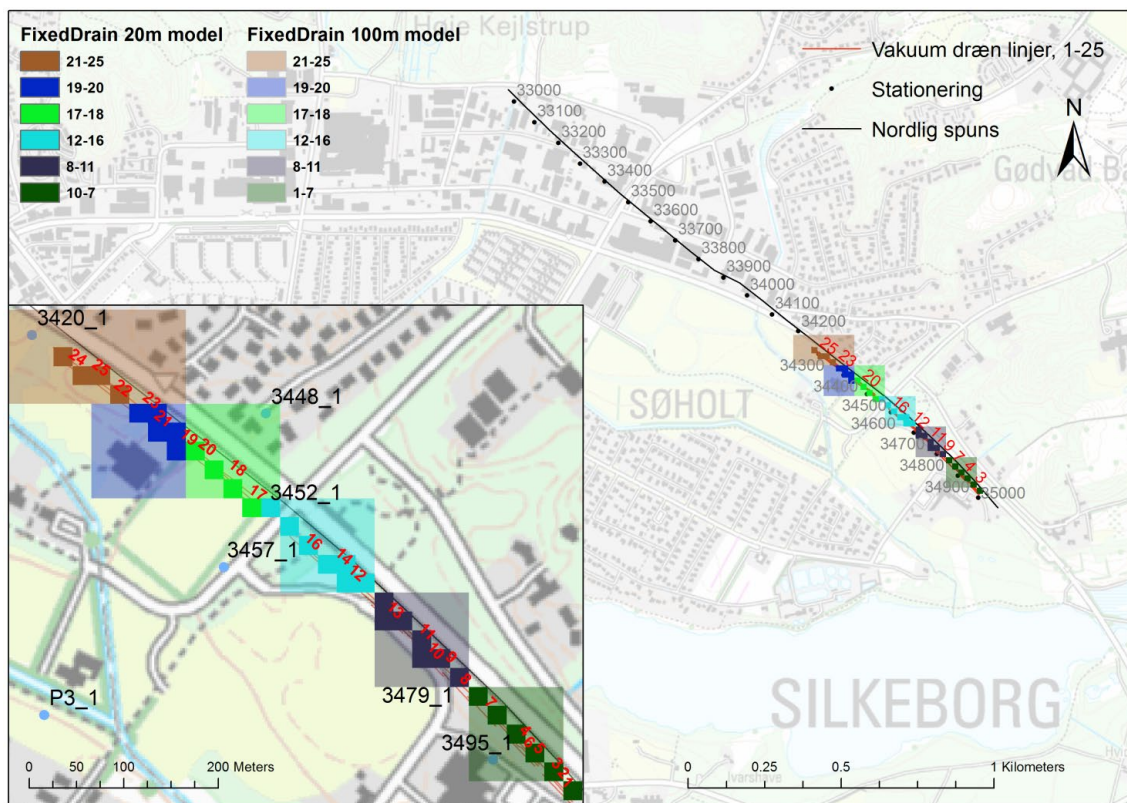
Grundvandssænkningen er indlagt i Silkeborg modellerne via en intern randbetingelse kaldet fixed drain i det mellemste af de tre modelleringslag, for dele af traceet mellem station 34200 og 35000, Figur 9, en strækning på 800m, svarende til placeringen af linjedræne.

Både 100m og 20m Silkeborg modellerne er blevet anvendt til at simulere oppumpede mængder ved den påtrykte grundvandssænkning (via fixed drain randbetingelsen). Mens 20m modellen er passende til simulering af grundvandsspejlsændringer imellem spunsvæggene, hvor afstanden er lidt større en 20 m, vil simuleringen ved 100m modellen kunne bekræfte resultaterne. Da 100m modellen leverer trykrande til 20m modellen, er det ligeledes nødvendigt at

implementere sænkningen i 100m modellen. Desuden er det interessant, hvordan en forskellig numerisk diskreditering vil påvirke det simulerede oppumpningsvolumen.

For at minimere effekten af den modellerede trykniveau-fejl ( $h_{obs.} - h_{sim.}$ ) på det afdrænedede vandvolumen, er den absolutte grundvandssænkning ( $h_{obs.}$ -kote for afsdræningsniveau) beregnet. Den absolutte grundvandssænkning er herefter fratrukket det simulerede grundvandsspejl for at finde den kote, som afdræningen skal bygges ind i modellen med. Disse beregninger er foretaget for at sikre, at den reelle grundvandssænkning efterlignes af modelopsætningen.

Baseret på drænlokaliteterne og det forhold, at det modellerede afsækningsareal er afhængigt af model gridstørrelsen på hhv. 100x100m og 20x20m, er 6 sækningsområder defineret. For hver af de 6 områder, er det gennemsnitlige sækningsniveau defineret som 20 cm under niveauet på motorvejens dræningsrør. Den relative sænkning af grundvandsspejlet i hver af de 6 områder er således beregnet, som den vertikale afstand mellem observeret grundvandsstand (år 2014 uden pumpning) og 20 cm under motorvejens dræningsrør for det givne område. Tidsserier af afsænkninger for hver af de 6 områder er indlagt med baggrund i information om pumpningsperioder fra Arkil. Figur 9 viser udbredelsen af drænzoner i henholdsvis 100m og 20m modellerne, relateret til linjedræn. Figuren viser også, hvor stor en forskel, der er i arealet, hvor grundvandsstanden sænkes i 100m modellen frem for i 20m modellen.



Figur 9 Implementering af grundvandssækningsarealer i 100m og 20m modellerne. Navngivningen af de 6 zoner svarer til linjedræne, eksempelvis grøn 20 svarer til linjedræn 17-20.

Det er tydeligt, ud fra Figur 9, at indlæggelsen af drænlignerne i 20m modellen er bedre fysisk baseret end i 100m modellen, da arealet hvor grundvandsstanden sænkes er langt mere troværdig i forhold til en praktisk gennemførelse af grundvandssænkningen. Oppumpning fra Linjedrænene 17-20, som anvendes til post audit, er 706.913 m<sup>3</sup> for perioden 8 juli 2014 – 26 december 2015. Modelteknisk udtrækkes en vandbalance for et område noget større end selve cellerne med linjedrænene, Figur 9. Vandbalancen bruges til at udregne hvor meget vand modellen mener, at der skal fjernes for områderne med linjedræn for at fastholde den i modellen påtrykte vandstand i konstruktionsfasen. Vandbalancen danner beregning i enheden mm/periode. De 706.913 m<sup>3</sup> giver med vandbalancearealet i 20m modellen ca. 1237 mm (korrigeret for den numeriske models tidsskridt).

### 3.5 Post audit resultat

For at sammenligne linjedræn vandmængder fra de to anvendte modeller, er en lokal vandbalance for området omkring sænkningerne foretaget for hver model. Således er det testet, hvordan den tidligere kalibrerede model (Trolborg et al. 2013, GEUS rapport 2013/43) simulerer de aktuelle oppumpede vandmængder. Den simulerede oppumpede (drænede) vandmængde er i 20m modellen opgjort til 1293 mm svarende til 738.844 m<sup>3</sup>, og 100m modellen simulerer 635.700 m<sup>3</sup>. Det bemærkes, at der er forskelle i simulering af oppumpede vandmængder mellem 100m og 20m modellen, men forskellen mellem simuleret og faktisk oppumpet vandmængder er generelt tilfredsstillende for begge modeller. De simulerede oppumpninger svarer til henholdsvis 90% (100m modellen) og 105% (20m modellen) af det indberettede volumen. Med sænkninger på henholdsvis 2 og 2½ m i testsituationen, sammenlignet med typiske sæsonvariationer på 15 cm i kalibreringssituationen, er post-audit valideringstesten en meget stærk test af modellen.

## 4 Avanceret model post audit

Effekten af parameterusikkerhed på simulering af afsænkingskurver og oppumpede mængder ved linjedræning er gennemført ved hjælp Monte Carlo analyse. Vi har i dette tilfælde anvendt PEST-værktøjerne, RANDPAR og PNULPAR (Doherty 2010), til at generere 100 lige sandsynlige modelparametersæt baseret på 95% konfidensgrænserne af de optimerede modelparametre, hvor vi dels har antaget en lognormal fordeling af parameterusikkerheden, og dels har fravalgt Monte Carlo genererede parametersæt hvor parametrenes indbyrdes størrelsesforhold ikke var logiske (fx hvor sand var mindre hydraulisk ledende end ler). Der er gennemført Monte Carlo simuleringerne af den model, som er post audit testede ovenfor (oprindelig model: A), men også for den model, som indeholder en revideret geologiske model (geologisk post audit model: B), hvor der er indbygget de hydrogeologiske justeringer som post audit'en afdækkede, og hvor modellen efterfølgende er genkalibreret mod samme objektifunktion som model A. Desuden er der gennemført en genkalibrering af model B, hvor der er inddraget data fra konstruktionsfasen af oppumpet vandmængde fra linjedrænene og trykniveau ændringer fra observationer tæt ved linjedrænene (hydrologisk post audit model: C).

## 4.1 Model kalibrering

Kalibreringen udføres synkront for 100m og 20m modellen og resultatet præsenteres ved sammenligning mellem post audit modellen og den tidligere model for simulerede trykniveauer, parameterværdier og performance kriterier. De to modeller, med forskellige diskretisering er synkronkalibreret, hvilket betyder, at begge modeller er kørt med samme parametersæt under hver kørsel. For de to nye grupper i objektivfunktionen, er modeldata udtrukket fra 20m modellen, mens hts, mfbal, og hobs fra den tidligere kalibrering, anvender simulerede data fra 100m.

Synkronkalibreringen begrundes i flere forhold. 20m modellen vurderes som den mest repræsentative model for simulering af henholdsvis pumpmængde, sænkings- og reetableringskurver, og anvendelse af 20m modellen forudsætter kørsel af 100m modellen grundet de arvede grænsebetingelser. 100m modellen er bedst egnet til simulering af hts og hobs grupperne, da flere observationer ligger udenfor 20m modelområdet. Det er også en rimelig antagelse, at vandbalancen for vandløbene, mfbal grupperne, bliver påvirket af hydrologiske forhold udenfor 20m modelområdet.

### 4.1.1 Objektivfunktion

Kalibreringen er gennemført med samme objektivfunktion for alle modeller, men for kalibreringen af post audit modellen (C) inkluderes to ekstra grupper til objektivfunktionen. Henholdsvis en gruppe hvor den oppumpede vandmængde (AbsTotal) beregnes og holdes op imod den indberettede mængde, og en gruppe hvor ændringen over tid i grundvandsstanden (PumpGrad) efter pumpestart og pumpestop evalueres (Tabel 1).

Den oppumpede vandmængde beregnes for sidste halvdel af 2014 og simulerede værdier sammenlignes med observerede/indberettede værdier. Denne periode er valgt, da placeringen af vandurene, tilhørende forskellige dræn, er vurderet mest sikkert fra juli 2014 og frem, hvor sænkningen kun er gennemført med linjedræn. Den anvendte indvindingsvolumen dækker over den samlede oppumpning i terrassesand magasinet fra juli 2014 til og med december 2014.

Data fra 3 pejleboringer med filtersætning i terrassesand magasinet er benyttet med henholdsvis data for sænkingskurven og data for reetableringskurven for hver boring. Dvs. pumpgrad gruppen, Tabel 1, indeholder 6 observationer.

Modellens evne til at simulere de forskellige observationer samles i en objektivfunktion med bidrag fra tidligere og nye observationer. De enkelte bidrag i objektivfunktionen kan herefter vægtes alt efter formålet med kalibreringen og model performance. Det samlede aftryk på grupperne i objektivfunktionen med samme vægtning på de enkelte observationer i model A, B og C er ikke helt ens, hvilket skal tilskrives forandringerne i den geologiske model. Model A, B og C indeholder samme vægtning af grupper af observationer, som indgår i alle tre model-

ler, mens vægtningen med andet end nul af oppumpede vandmængder (AbsTotal) og simulering af afsænkings- og reetableringskurver (PumpGrad) kun indgår i objektivfunktionen for model C.

**Tabel 1** Objektivfunktionen og initialt aftryk for oprindelig (A) og post audit modeller (B + C)

$$\text{Objektivfunktion} = \sum_i (w_i \times HTS\_ME)^2 + \sum_j (w_j \times Hobs\_mean)^2 + \sum_k (w_k \times HTS\_ErrAmpl)^2 + \sum_l (w_l \times Qbal_{Winter})^2 + \sum_m (w_m \times Qbal_{Spring})^2 + \sum_n (w_n \times Qbal_{Summer})^2 + \sum_s (w_s \times Qbal_{Autumn})^2 + (w_p \times AbsTotal)^2 + \sum_g (w_g \times PumpGrad)^2$$

Obs gruppe	Definition	Periode	Initialt aftryk			# Obs.
			(A)	(B)	(C)	
HTS_ME	Middelfejl tidsserier af trykniveau (H)	2010-2012*	1534	984	984	35
Hobs_mean	Middelfejl i H af borerer uden tidsserier	1990-2011	525	498	498	97
HTS_ErrAmpl	Årlig fejl i H fluktuation/amplitude	2010-2012	50	50	50	30
Qbal_Winter	Vinter vandbalance i afstrømning (Q)	2010-2012**	20	20	20	4
Qbal_Spring	Forår vandbalance i afstrømning (Q)	2010-2012**	5	5	5	4
Qbal_Summer	Sommer vandbalance i afstrømning (Q)	2010-2012**	20	20	20	4
Qbal_Autumn	Efterår vandbalance i afstrømning (Q)	2010-2012**	154	101	101	4
AbsTotal	Middelfejl i linjedræn oppumpning	2014	0	0	752	1
PumpGrad	Fejl på gradient af sænkning og reetablering	2014	0	0	751	6

#### 4.1.2 kalibreringsresultat

Kalibreringsresultatet vurderes ved at sammenligne med udregning af den del af objektivfunktionen, som er fælles for de tre modeller (markeret med rødt i Tabel 2), dvs. uden indregning af middelfejl i linjedræn oppumpning og fejl på gradient af sænkning og reetablering. Det første som bemærkes er, at aftrykket i objektivfunktionen falder fra 2308 til 1678 alene ved indarbejdelse af post audit geologien, dvs. forskellen mellem initialt aftryk i Model A i forhold til Model B. Samtidigt ses, at modellen med post audit geologien (model B) har det bedste fit (mindste aftryk fra objektivfunktion) af alle modellerne. Ved inddragelse af ekstra observationer i objektivfunktionen (model C) falder model performance sammenlignet med model B, hvilket kan forklares ved at optimeringen ofrer noget af model performance mod de oprindelige observationer for at kunne simulere de ekstra tilføjede observationer bedre end ud fra initial parametriseringen. Modeloptimeringen har sænket aftrykket fra fejl på linjedræn oppumpningen fra 752 til nul på bekostning af stort set alle andre delkomponenter i objektivfunktionen (Model C sammenlignet med model B). Til trods for dette performer modellen (C) bedre end den oprindelige model (A) på næste alle delkomponenter på nær vinter og efterårs afstrømning. Interessant er det, at modellen tilsyneladende ikke formår at forbedre fejlen på gradienten af sænkningen og reetableringen samtidigt med forbedring af fejl på linjedræn oppumpningen. Dette kan hænge sammen med, at observationerne med afsænkninger er mere støjfyldte, dvs. simplificeringen i modelopsætningen med konstant afsænkning fra tre sektioner i hele perioden hænger ikke helt sammen med, hvordan afsænkningen har foregået i praksis, hvorfor modellen har svært ved at genskabe observationernes afsækningsforløb.

Tabel 2 Objektivfunktion og observationsgruppe bidrag for kalibreret model A, B og C

$$\text{Objektivfunktion} = \sum_i (w_i \times \text{HTS\_ME})^2 + \sum_j (w_j \times \text{Hobs\_mean})^2 + \sum_k (w_k \times \text{HTS\_ErrAmpl})^2 \\ + \sum_l (w_l \times \text{Qbal\_Winter})^2 + \sum_m (w_m \times \text{Qbal\_Spring})^2 + \sum_n (w_n \times \text{Qbal\_Summer})^2 \\ + \sum_s (w_s \times \text{Qbal\_Autumn})^2 + (w_p \times \text{AbsTotal})^2 + \sum_g (w_g \times \text{PumpGrad})^2$$

Obs gruppe	Definition	Model A	Model B	Model C
Samlet top	De øverste syv dele af objektivfunktionen (rød)	2170	1345	1738
Initialt top	Initialt aftryk i øverste dele af objektivfunktionen (rød)	2308	1678	1678
HTS_ME	Middelfejl tidsserier af trykniveau (H)	1426	664	987
Hobs_mean	Middelfejl i H af boringer uden tidsserier	562	492	513
HTS_ErrAmpl	Årlig fejl i H fluktuation/amplitude	50	50	50
Qbal_Winter	Vinter vandbalance i afstrømning (Q)	20	19	35
Qbal_Spring	Forår vandbalance i afstrømning (Q)	5	6	4
Qbal_Summer	Sommer vandbalance i afstrømning (Q)	20	21	17
Qbal_Autumn	Efterår vandbalance i afstrømning (Q)	86	93	132
AbsTotal	Middelfejl i linjedræn oppumpning	0	0	0
PumpGrad	Fejl på gradient af sænkning og reetablering	0	0	936

#### 4.1.3 Optimerede parametre og usikkerhedsintervaller

Tabel 3 viser parameterværdier før og efter kalibrering. Af de 47 parametre er de 12 mest følsomme parametre tidligere udvalgt til direkte kalibrering (Troldborg et al. 2013). De dårligt bestemte parametre *drain\_const*, *ol\_manning*, og *cond\_ghb521* blev fastholdt med parameterværdier fra tidligere kalibrering. Den endelige kalibrering bestod således af 9 justerbare kalibreringsparametre. Yderligere 19 parametre blev bundet til kalibreringsparametrene, ud fra forholdet mellem deres initialværdier. De resterende parameterværdier blev fastholdt med initialværdierne under kalibreringen (se Tabel 3). Desuden blev bestemmelsen af det frie magasinental (*specific yield - SY*) for sand begrænset til en værdi på 0,5 eller lavere.

**Tabel 3** Initiale – og Model A, B og C optimerede parameterværdier (KS/KL står for kvartærtsand/ler, mens PS/PL står for prækvartært/miocænsand/ler, TS for terrassesand, J25 ST og L for jordartskort sand, tørv og ler, PRVP for sand i område med prøvepumpninger, DRAIN, COND, DET\_STOR og OL er drænkonsstant, hydraulisk ledningsevne for randområder, overflade magasinering og overflade ruhed. \_HC/\_VC er horisontal/vertikal hydraulisk ledningsevne, \_SY/\_SS er frit og spændt magasinital)

Nr	Parameter	Enhed	Transformation	Initial	Model A	Model B	Model C
1	KL1_HC	ms <sup>-1</sup>	Log	5.60E-06	1.80E-04	9.00E-05	3.26E-06
2	KL1_VC	ms <sup>-1</sup>	tied *1	5.60E-08	1.80E-06	9.00E-07	3.26E-08
3	KS2_HC	ms <sup>-1</sup>	Log	8.59E-05	2.21E-04	1.77E-04	3.49E-05
4	KS2_VC	ms <sup>-1</sup>	tied *3	8.59E-06	2.21E-05	1.77E-05	3.49E-06
5	PL1_HC	ms <sup>-1</sup>	Log	4.57E-06	5.02E-06	6.10E-07	3.89E-06
6	PL1_VC	ms <sup>-1</sup>	tied *5	4.57E-07	5.02E-07	6.10E-08	3.89E-07
7	PS11_HC	ms <sup>-1</sup>	Log	1.51E-03	7.02E-04	1.64E-04	1.78E-03
8	PS11_VC	ms <sup>-1</sup>	tied *7	1.51E-04	7.02E-05	1.64E-05	1.78E-04
9	PS12_HC	ms <sup>-1</sup>	Log	7.48E-05	4.75E-05	6.85E-05	9.25E-05
10	PS12_VC	ms <sup>-1</sup>	tied *9	7.48E-06	4.75E-06	6.85E-06	9.25E-06
11	TS1_HC	ms <sup>-1</sup>	Log	1.50E-03	1.06E-03	9.90E-04	1.64E-03
12	TS1_VC	ms <sup>-1</sup>	Log	1.50E-04	1.76E-04	2.98E-04	5.08E-05
13	PRVP_HC	ms <sup>-1</sup>	fixed	1.50E-03	1.50E-03	1.50E-03	1.50E-03
14	PRVP_VC	ms <sup>-1</sup>	fixed	1.50E-04	1.50E-04	1.50E-04	1.50E-04
15	J25S_HC	ms <sup>-1</sup>	tied *3	1.25E-03	8.85E-04	8.25E-04	1.37E-03
16	J25S_VC	ms <sup>-1</sup>	tied *3	1.25E-04	8.85E-05	8.25E-05	1.37E-04
17	J25T_HC	ms <sup>-1</sup>	tied *3	7.07E-05	2.27E-03	1.14E-03	4.11E-05
18	J25T_VC	ms <sup>-1</sup>	tied *3	7.07E-06	2.27E-04	1.14E-04	4.11E-06
19	J25L_HC	ms <sup>-1</sup>	tied *1	5.60E-06	1.80E-04	9.00E-05	3.26E-06
20	J25L_VC	ms <sup>-1</sup>	tied *1	5.60E-08	1.80E-06	9.00E-07	3.26E-08
21	KL1_SY	*	Log	0.2	0.19	0.12	0.24
22	KS2_SY	*	tied *21	0.2	0.19	0.12	0.24
23	PL1_SY	*	tied *21	0.2	0.19	0.12	0.24
24	PS11_SY	*	tied *21	0.2	0.19	0.12	0.24
25	PS12_SY	*	tied *21	0.2	0.19	0.12	0.24
26	TS1_SY	*	Log	0.5	0.50	0.50	0.50
27	PRVP_SY	*	tied *26	0.5	0.50	0.50	0.50
28	J25S_SY	*	tied *26	0.5	0.50	0.50	0.50
29	J25T_SY	*	tied *21	0.2	0.19	0.12	0.24
30	J25L_SY	*	tied *21	0.2	0.19	0.12	0.24
31	KL1_SS	m <sup>-1</sup>	fixed	1.23E-05	1.23E-05	1.23E-05	1.23E-05
32	KS2_SS	m <sup>-1</sup>	fixed	2.74E-05	2.74E-05	2.74E-05	2.74E-05
33	PL1_SS	m <sup>-1</sup>	fixed	1.23E-05	1.23E-05	1.23E-05	1.23E-05
34	PS11_SS	m <sup>-1</sup>	fixed	2.74E-05	2.74E-05	2.74E-05	2.74E-05
35	PS12_SS	m <sup>-1</sup>	fixed	2.74E-05	2.74E-05	2.74E-05	2.74E-05
36	TS1_SS	m <sup>-1</sup>	fixed	2.74E-05	2.74E-05	2.74E-05	2.74E-05
37	PRVP_SS	m <sup>-1</sup>	fixed	2.74E-05	2.74E-05	2.74E-05	2.74E-05
38	J25S_SS	m <sup>-1</sup>	fixed	2.74E-05	2.74E-05	2.74E-05	2.74E-05
39	J25T_SS	m <sup>-1</sup>	fixed	1.23E-05	1.23E-05	1.23E-05	1.23E-05
40	J25L_SS	m <sup>-1</sup>	fixed	1.23E-05	1.23E-05	1.23E-05	1.23E-05
41	DRAIN_CONST	s <sup>-1</sup>	Log	2.00E-07	1.09E-07	9.51E-07	1.18E-07
42	DET_STOR	mm	Log	4.74	4.63	4.22	7.62
43	OL_MANNING	m <sup>-1/3</sup> s <sup>-1</sup>	Log	4	12.08	2.60	2.10
44	COND_GHB1	m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	fixed	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08
45	COND_GHB5	m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	fixed	5.00E-07	5.00E-07	5.00E-07	5.00E-07
46	COND_GHB10	m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>	fixed	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08	1.00E-08
47	COND_GHB521	m <sup>-2</sup> s <sup>-2</sup>	fixed	5.00E-08	5.00E-08	5.00E-08	5.00E-08

Til Monte Carlo simuleringerne genereres 100 lige sandsynlige parametersæt, dels ud fra en antagelse om, at parameterusikkerheden kan beskrives med en (log)normal fordeling, og dels under betingelse af, at parametrene logiske orden i hydrauliske ledningsevne overholdes. Rent praktisk foregår det ved, at de enkelte parametersæt tjekkes, og modellen fortsætter med at generere parametersæt indtil alle 100 sæt overholder den fastsatte parameter logik (Tabel 4).

**Tabel 4 Betingelse for parameter forhold**

<b>Parameter logik betingelse</b>	<b>Forklaring</b>
TS1_HC > TS1_VC	Horisontal hydraulisk ledningsevne (HC) skal være større end vertikal hydraulisk ledningsevne (VC) for terrassesandet
TS1_HC > KL1_HC	Hydraulisk ledningsevne for terrassesandet skal være større end hydraulisk ledningsevne for kvartært ler
KS2_HC > PL1_HC	Hydraulisk ledningsevne for kvartært sand skal være større end hydraulisk ledningsevne for prækvartært ler
PS11_HC > PL1_HC	Hydraulisk ledningsevne for øvre prækvartært sand skal være større end hydraulisk ledningsevne for prækvartært ler
PS12_HC > PL1_HC	Hydraulisk ledningsevne for nedre prækvartært sand skal være større end hydraulisk ledningsevne for prækvartært ler
KL1_HC > PL1_HC	Hydraulisk ledningsevne for kvartært ler skal være større end hydraulisk ledningsevne for prækvartært ler

PEST producerer lineære parameter usikkerhedsintervaller i forbindelse med parameter optimeringen. Kun for de parametre, som indgår direkte i kalibreringen, estimeres der usikkerhedsintervaller. Det er modellens samlede respons på objektivfunktionen ved ændring af en given parameter (og evt. "tied" parametre), som bruges til at udregne usikkerhedsintervallet. Ved udregning af det lineære usikkerhedsinterval antages det, at usikkerheden på modellen er uafhængig af ændringsretningen af en given parameter (fx fra  $4.00e-7$  til  $3.99e-7$ ). Desuden antages det, at usikkerheden kan beskrives med en normalfordeling. Alle de optimerede parametre antages at følge en lognormal fordeling, hvorfor usikkerheden beskrives for log10 transformerede parametre.

Parameterværdierne (Tabel 5, Tabel 6 og Tabel 7) er ifølge konfidensintervallerne bestemt med rimelig nøjagtighed, bortset fra Model A og B, hvor hydraulisk ledningsevne for den øvre moræneler (parameter nummer 1 og 2) og den vertikale ledningsevne for terrassesandet (parameter nummer 12) er usikre. Det kan hænge sammen med, at ændring af lerets hydrauliske ledningsevne formodentligt ikke påvirker trykniveau observationerne i terrassesandlagene særligt meget, og at der kun er lille vand- og trykudveksling mellem det kvartært sandmagasin og terrassesand magasinet.

Tabel 5 Model A - estimerede og anvendte usikkerhedsintervaller

Parameter	Estimeret værdi	Estimeret Nedre 95%	Estimeret Øvre 95%	std [log10]	Anvendt std[log10]	Anvendt n95%	Anvendt ø95%
kl1_hc	1,80E-04	4,68E-17	6,91E+08	6,35600	1,38653	3,23E-07	1,00E-01
ks2_hc	2,21E-04	6,53E-05	7,50E-04	0,26770	0,26770	6,53E-05	7,50E-04
pl1_hc	5,02E-06	7,65E-07	3,30E-05	0,41279	0,41279	7,65E-07	3,30E-05
ps11_hc	7,02E-04	2,43E-04	2,03E-03	0,23318	0,23318	2,43E-04	2,03E-03
ps12_hc	4,75E-05	2,85E-05	7,91E-05	0,11183	0,11183	2,85E-05	7,91E-05
ts1_hc	1,06E-03	6,25E-04	1,81E-03	0,11654	0,11654	6,25E-04	1,81E-03
ts1_vc	1,76E-04	9,69E-48	3,19E+39	21,84789	1,39144	3,09E-07	1,00E-01
kl1_sy	0,19	0,10	0,39	0,15427	0,15427	0,10	0,39
ts1_sy	0,50	0,29	0,85	0,11659	0,07380	0,36	0,70
drain_const	1,09E-07	7,34E-20	161219	6,14684	2,50673	1,18E-12	1,00E-02
det_stor	4,63	1,83	11,72	0,20364	0,20364	1,83	11,72
ol_manning	12,08	1,63	89,65	0,43971	0,19960	4,86	30,00

Tabel 6 Model B - estimerede og anvendte usikkerhedsintervaller

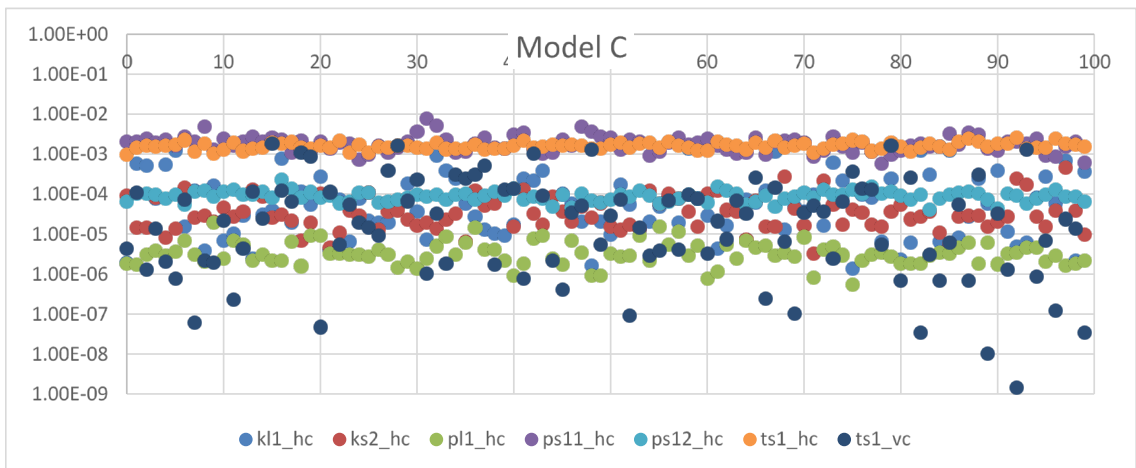
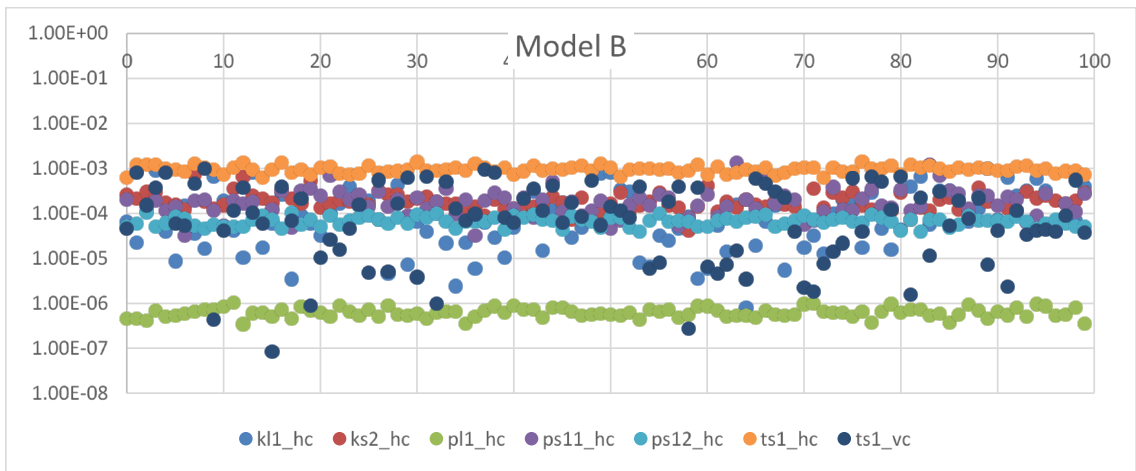
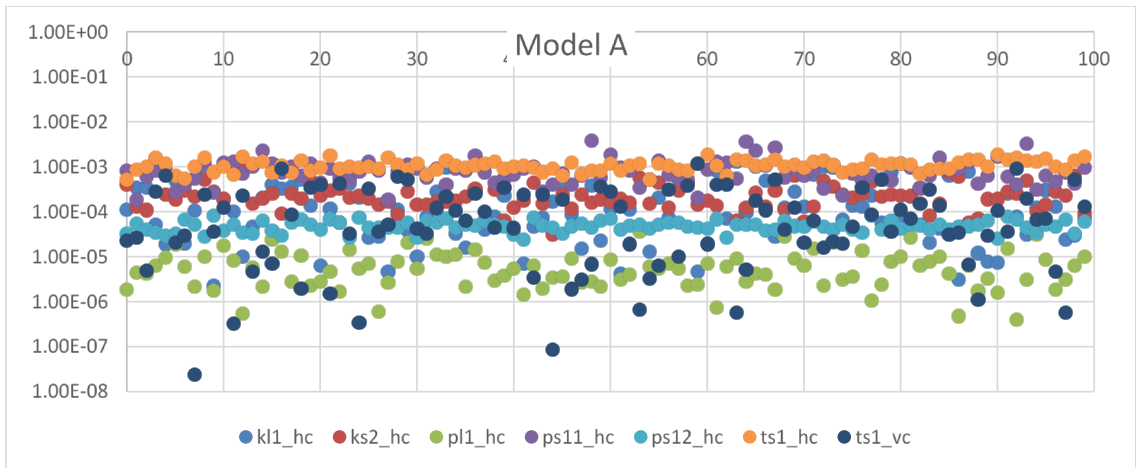
Parameter	Estimeret værdi	Estimeret Nedre 95%	Estimeret Øvre 95%	std [log10]	Anvendt std[log10]	Anvendt n95%	Anvendt ø95%
kl1_hc	9,00E-05	4,02E-22	2,02E+13	8,76291	1,03313	8,11E-07	1,00E-02
ks2_hc	1,77E-04	7,19E-05	4,33E-04	0,19694	0,19694	7,19E-05	4,33E-04
pl1_hc	6,10E-07	3,78E-07	9,84E-07	0,10501	0,10501	3,78E-07	9,84E-07
ps11_hc	1,64E-04	4,41E-05	6,12E-04	0,28861	0,28861	4,41E-05	6,12E-04
ps12_hc	6,85E-05	4,52E-05	1,04E-04	0,09132	0,09132	4,52E-05	1,04E-04
ts1_hc	9,90E-04	6,95E-04	1,41E-03	0,07765	0,07765	6,95E-04	1,41E-03
ts1_vc	2,98E-04	2,49E-27	3,57E+19	11,65568	1,27584	8,87E-07	1,00E-01
kl1_sy	0,12	0,08	0,17	0,07667	0,07667	0,08	0,17
ts1_sy	0,50	0,32	0,78	0,09669	0,07380	0,36	0,70
drain_const	9,51E-07	2,97E-08	3,04E-05	0,76030	0,76030	2,97E-08	3,04E-05
det_stor	4,22	1,68	10,59	0,20175	0,20175	1,68	10,59
ol_manning	2,60	0,25	27,46	0,51731	0,51731	0,25	27,46

Tabel 7 Model C - estimerede og anvendte usikkerhedsintervaller

Parameter	Estimeret værdi	Estimeret Nedre 95%	Estimeret Øvre 95%	std [log10]	Anvendt std[log10]	Anvendt n95%	Anvendt ø95%
kl1_hc	3,26E-06	3,70E-09	2,87E-03	1,4875	1,4875	3,70E-09	2,87E-03
ks2_hc	3,49E-05	4,66E-06	2,61E-04	0,4417	0,4417	4,66E-06	2,61E-04
pl1_hc	3,89E-06	9,25E-07	1,64E-05	0,3150	0,3150	9,25E-07	1,64E-05
ps11_hc	1,78E-03	7,12E-04	4,43E-03	0,2004	0,2004	7,12E-04	4,43E-03
ps12_hc	9,25E-05	5,56E-05	1,54E-04	0,1116	0,1116	5,56E-05	1,54E-04
ts1_hc	1,64E-03	1,12E-03	2,39E-03	0,0828	0,0828	1,12E-03	2,39E-03
ts1_vc	5,08E-05	1,16E-11	2,22E+02	3,3541	1,6638	2,58E-08	1,00E-01
kl1_sy	0,24	0,11	0,52	0,1692	0,1692	0,11	0,52
ts1_sy	0,50	0,39	0,64	0,0544	0,0544	0,39	0,64
drain_const	1,18E-07	2,84E-09	4,89E-06	0,8171	0,8171	2,84E-09	4,89E-06
det_stor	7,62	2,80	20,71	0,2194	0,2194	2,80	20,71
ol_manning	2,10	0,04	122,07	0,8909	0,5831	0,15	30,00

Til Monte Carlo simuleringerne er drain\_const, det\_stor og ol\_manning medtaget med fastholdte værdier svarende til de estimerede (optimerede) værdier. Usikkerhedsintervallerne for de resterende parametre overskrider i nogle tilfælde de realistiske grænser for hvor høje eller lave værdier de enkelte parametre kan antage. I disse tilfælde er der anvendt en justeret standard afvigelse (Anvendt std [log10]) til Monte Carlo simuleringerne, hvor 95% grænserne (optimalværdi +/- 1,96\*standardafvigelsen) skal ligge indenfor realistiske værdier. I praksis vil det enten være den øvre eller den nedre grænse, som bestemmer hvilken standard afvigelse der skal anvendes i Monte Carlo simuleringerne.

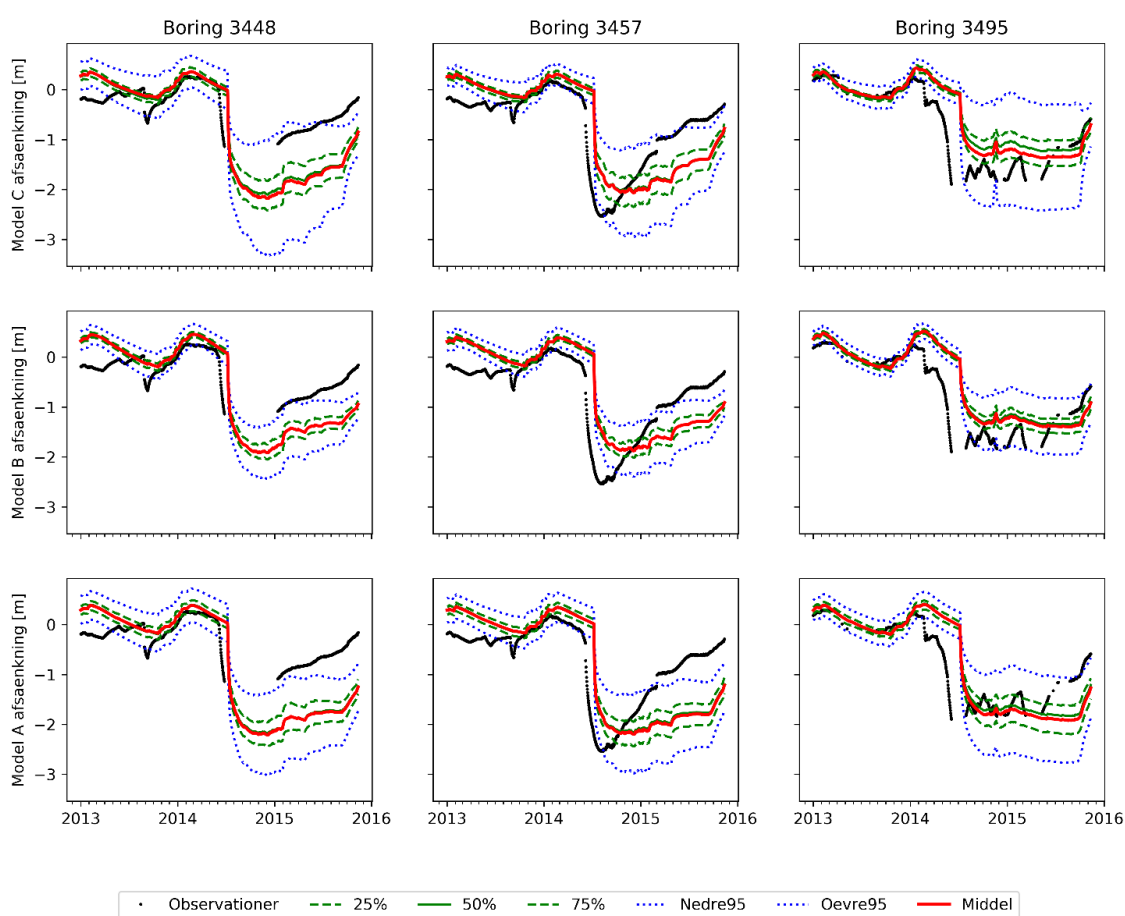
Tabellerne (Tabel 5, Tabel 6 og Tabel 7) viser estimerede og anvendte usikkerhedsintervaller for hhv. Model A, B og C. I samme tabeller er urealistiske usikkerhedsinterval grænser og justerede (anvendte) standard afvigelser angivet med rød. Figur 10 viser Monte Carlo simuleringer af de 100 anvendte parametersæt af hydraulisk ledningsevne for model A, B og C.



Figur 10 Monte Carlo simulering af 100 parametersæt af hydraulisk ledningsevne for model A, B og C

## 4.2 Simulering af afsækning

Fælles for de tre modeller er, at de simulerer afsækningsforløbet relativt godt (Figur 11). Som tidligere beskrevet er observationerne med afsækningsforløbet relativt støjfyldte, og simplificeringen i modelopsætningen med konstant afsækning fra tre sektioner i hele perioden hænger ikke helt sammen med, hvordan afsækningen har foregået i praksis, hvorfor der tidsmæssigt ikke simuleres høj nøjagtighed, fx ved boring 3495. Ved boring 3448 og 3457 ses også en vis forskydning af afsæknings- og reetableringskurvene. Baseret på gennemsnittet af Monte Carlo-løbet, den røde kurve, er det vanskeligt at vælge den model, der har det bedste fit. Ikke overraskende passer 95% usikkerhedsintervallet bedre (omslutter) afsækningsforløbet i det model setup (Model C), hvor afsækningen indgår som en del af objektivfunktionen, men lidt overraskende er det, at inddragelse af post audit geologien (Model B) tilsyneladende fører til en undervurdering af usikkerhedsintervallet.

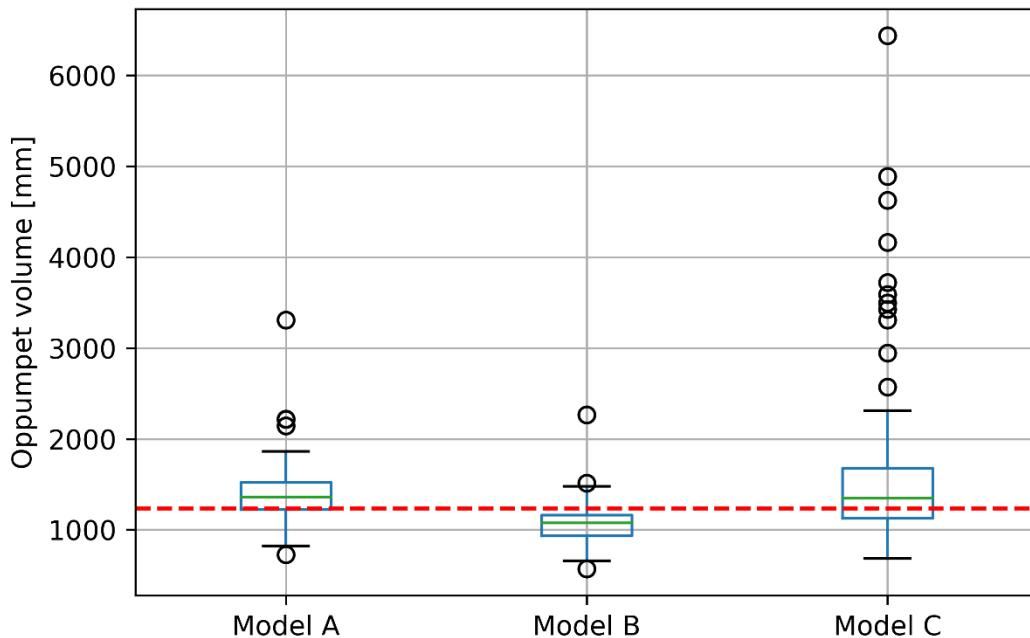


Figur 11 Monte Carlo simuleret afsækning for model A, B og C af de tre borer som udviser respons fra den del af linjedræningen som medtages i post audit. Figur reproduceret fra Kidmose et al. (2019)

## 4.3 Simulering af oppumpning

Alle tre modeller rammer de oppumpede vandmængder indenfor 95% konfidensintervallet. Model B har det smalleste konfidensinterval og undervurderer de oppumpede vandmængder i

mere end 75% af simuleringerne. Tilsvarende overvurderer Model A de oppumpede vandmængder i mere end 75% af simuleringerne, dog med et noget større konfidensinterval. Model C, som er den model, hvor oppumpede mængder er medtaget i objektivfunktionen, har det største konfidensinterval, men samtidigt rammer den som den eneste af modellerne de oppumpede vandmængder mellem 25%-75% fraktilerne.



Figur 12 Monte Carlo simuleret oppumpning for model A, B og C fra den del af linjedræningen som medtages i post audit. Figur reproduceret fra Kidmose et al. (2019)

#### 4.4 Diskussion avanceret post audit resultat

Der er ikke den store forskel i modellernes evne til at simulere post audit data for oppumpning og afsenkning. Umiddelbart tyder dette på, at den oprindelige model (A), udviklet til at danne klimasimuleringer for projekteringsgrundlaget, er relativt robust. Dette skyldes formentlig flere elementer:

- at model (A) indeholder en grundig gennemarbejdet geologisk model, som flere gange undervejs i processen blev revideret,
- at der er gennemført flere prøvepumpninger, som indgår i modelopsætningen fra det vigtige terrassesandsmagasin,
- at der er inddraget mange indtag med tidsserier af grundvandsfluktuationer og afstrømningsmålinger fra flere stationer i området,
- at der har været flere feed-back løkker i arbejdet med opstilling og kalibrering af den hydrologiske model.

Den avancerede post audit øger tilliden til modelrepræsentation af magasinens egenskaber og -parameter, men genkalibrering af modellen og indarbejdelse af post audit geologi forbedrer

tilsyneladende ikke for alvor modellens evne til at simulere afdræning fra linjedræn og afsænkninger. Monte Carlo simuleringerne viser, at vores forståelse af parameterusikkerhed er stærkt bestemt af kalibreringsparadigmerne, f.eks. simplificeringer af objektivfunktionen. Post audit analysen afslørede, at usikkerhedsintervallet fejlagtigt blev indsnævret efter den geologiske model revision (Model B ift. Model A), som følge af en forbedret kalibreringsstatistik. Det hænger sammen med at vores usikkerhedsforudsigelser er baseret på parameterusikkerhed alene, dvs. betinget af at den konceptuelle model er korrekt, hvilket aldrig vil være en korrekt antagelse. Kalibrering mod data for afsænkning og afdræning (Model C) afslørede en vis inkonsistens i antagelsen om en perfekt konceptuel model, og den efterfølgende Monte Carlo simulering resulterede i et øget usikkerhedsinterval. Dette antyder, at vurdering af model usikkerhed, alene baseret på parameterusikkerhed, kan undervurdere usikkerheder om forudsigelser af situationer, der er ekstrapoleret ud over kalibreringsgrundlaget.

## 5 Supplerende usikkerhedsanalyse af post audit modellen

Der udført to usikkerhedsanalyser, *Analyse 1* og *Analyse 2* med den kalibrerede 20m post audit model (C), hvor fem kilder til usikkerheder, som formodes have effekt på de simulerede trykniveauer i området omkring spunsen, er analyseret nærmere. De tre af kilderne er relateret til modelperformance. Det drejer sig om parameter usikkerhed (fra post audit undersøgelsen ovenfor), usikkerhed på den geologiske model (den prækvartære overflade og spunsens placering i dybden over den prækvartære overflade. De sidste to kilder er relateret til usikkerhed vedrørende fremtidige LAR-tiltag og usikkerheden på klimafremskrivninger. For alle tre kilder er usikkerheden præsenteret som standardafvigelse på simuleret middeltrykniveau.

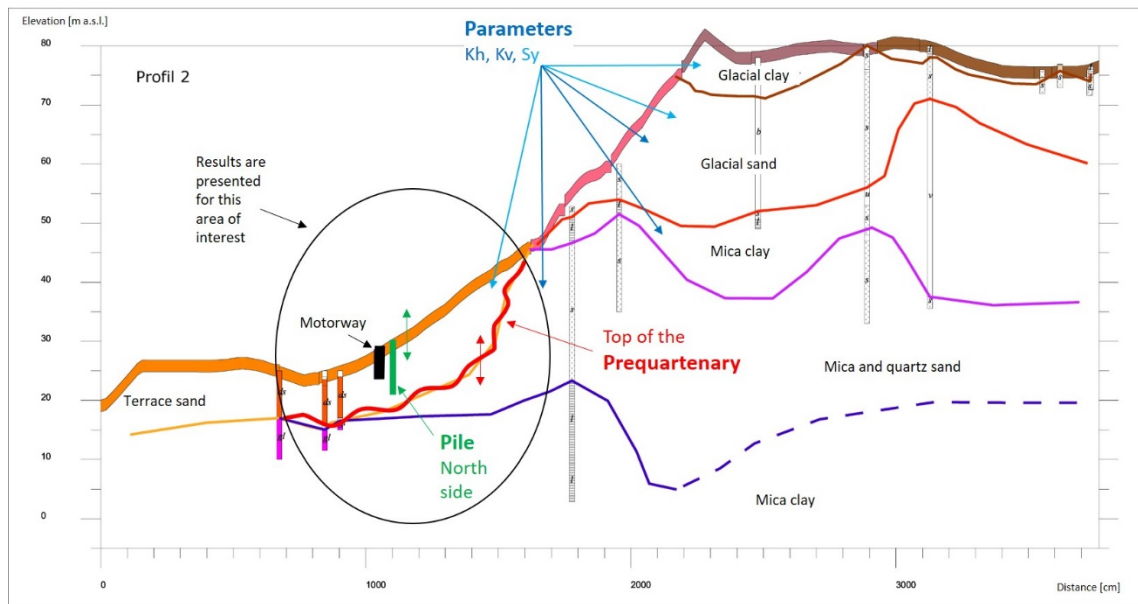
### Analyse 1

I analyse 1 vurderes effekten af de enkelte model relaterede usikkerheder (parameterværdier, den prækvartære flade og spuns) dels direkte på modelsimuleringer, og dels i forhold til hvor stor usikkerhed der er på modelsimuleringer af effekten af motorvejen (spunsvæggen). En principskitse af model tværsnit med hver af de undersøgte kilder til usikkerhed fremgår af Figur 13.

### Analyse 2

I analyse 2 sammenholdes yderligere to kilder til usikkerhed, klimafremskrivninger og fremtidige klimatilpasnings tiltag med resultatet af analyse 1.

De fem kilder til usikkerheder som formodes have effekt på de simulerede trykniveauer i området omkring spunsen beskrives hver for sig nærmere i dette kapitel.



Figur 13 Princip tværnsnitsskitse med tre kilder til modelusikkerhed.

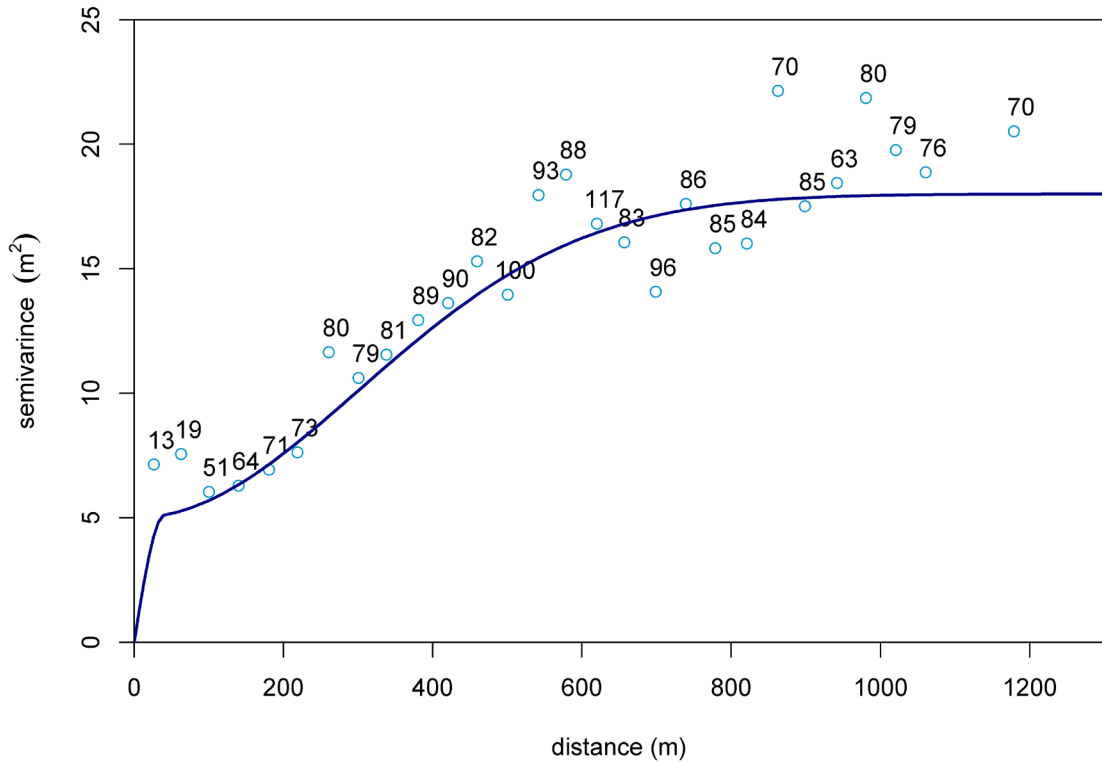
### 5.1.1 Parameter realisationer

Monte Carlo simuleringerne af parameterusikkerhed fra den avancerede post audit analyse af model C, genbruges her til vurdering af usikkerhed på simuleret grundvandsstand for terrassesand magasinet. De udvalgte parametre indgik i post audit kalibreringen af modellen, afsnit 4, med parameterusikkerhed som angivet i Tabel 7. Monte Carlo simuleringerne, med model C, gentages med og uden spuns indlagt i modellen, for at kunne vurdere effekten af spuns.

### 5.1.2 Prækvartære overflade realisationer

Der tages udgangspunkt i den Prækvartære flade fra model C, som var tolket på baggrund af geologisk information fra borer i området (Trolborg et al., 2014). Boringernes placering fremgår i Figur 8. Det vurderes, at tolkningspunkterne "snappet" til borerne har en nøjagtighed på +/- 1 m som stammer fra den vertikale præcision af boreringsoplysningerne. Mellem borerne er der sat såkaldte "støtte" tolkningspunkter, som vurderes at have en nøjagtighed på +/- 3m, da disse er sat uden direkte borerstilknytning. Alle de prækvartære overflade tolkningspunkter (fx top Miocæn/gs1t), som er sat indenfor terrassesandet, indgår i den geostatistiske model for Prækvartær overfladen. Den geostatistiske model fremgår af semivariogrammet, Figur 14, beregnet på basis af 90 tolkningspunkter. Som det kan ses af semivariogrammet, flader det ud efter ca. 600 m, dvs. i større afstande fra et tolkningspunkt end 600 m ses der ikke bedre sammenhæng, end der kan forklares med middelværdien og spredningen på alle punkter. I mindre afstande stiger relationen mellem punkterne (fald i semivariogrammet) indtil vi når en afstand på under 50 m, hvor relationen flader ud igen så det bedste bud på en værdi ville være en konstant variation (nugget) plus gennemsnittet af de målte værdier indenfor 50m radius. Normalt ville man anvende et semivariogram med nugget (ca. 5m<sup>2</sup> for dette semivario-

gram), men i vores tilfælde har vi valgt at tvinge semivariogrammet mod nul indenfor de nærmeste 50 m. Valget har betydning for den efterfølgende produktion af lige sandsynlige realisationer af prækvartært overfladen, således at en 20x20m celle, hvori der er ligger et tolkningspunkt får en værdi som svarer til tolkningspunktet (+/- tolkningspunkt usikkerhed), uanset at punktet ikke ligger lige præcis i midten af cellen

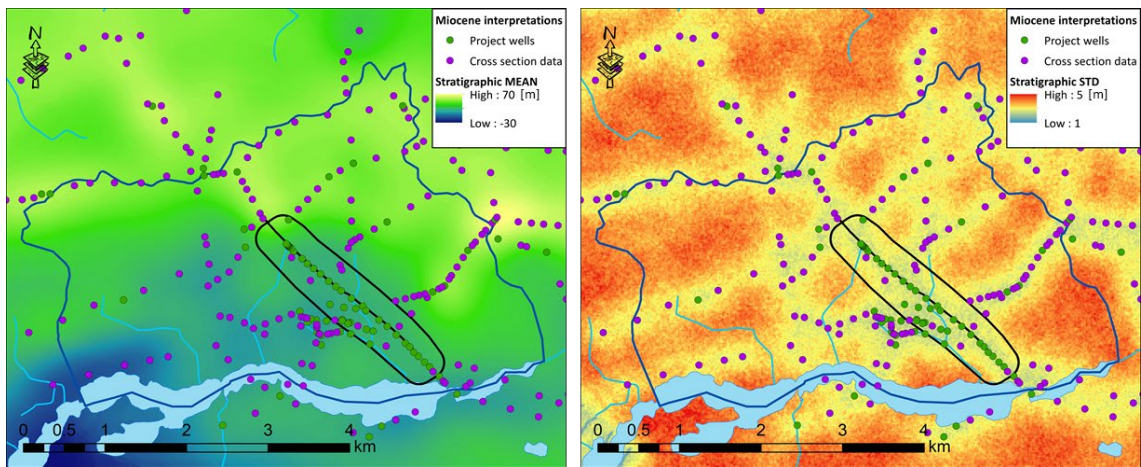


Figur 14 Semivariogram med dybden til den prækvartære overflade. (Figur fra Troldborg et al. 2019)

De 100 lige sandsynlige realisationer af den prækvartære overflade er dannet med Sequential Gaussian simuleringer (sGs) med udgangspunkt i semivariogrammet og tolkningspunkterne med usikkerhedsvurdering. Først er dannes 100 realisationer af tolkningspunktkoter for den prækvartære overflade, hvor usikkerheden på de enkelte tolkningspunkter antages at være normalt fordelt med en varians på 1 m eller 3 m afhængig af om punktet er et "snappe" eller "støtte" punkt. Herefter dannes den prækvartære overflade vha. Sequential Gaussian simulation baseret på variogrammet og konditioneret af en realisation af tolkningspunkter. I modellen er det kun for et mindre område omkring spunsen, hvor de genererede modelflader skiftes ud i 100 simuleringer, én ad gangen. I Figur 15 fremgår middelværdi og standardafvigelsen for de 100 flader sGs genererede flader.

De 100 realisationer af den prækvartære overflade indlægges i og simuleres med model C, og simuleringen gentages med og uden spuns for at kunne vurdere effekten af spuns. I simuleringerne med spuns, er denne placeret 1 m over medianen af de 100 genererede prækvartære

overflader for at sikre, at spunsen er placeret lige så mange gange over som under den prækvartære overflade i de 100 simuleringer.



Figur 15 Middelværdi for den prækvartære overflade (venstre) og standardafvigelsen (højre) i meter over havet fra de 100 sGs realiseringer. Interesseområdet omkring spunsen inden for den sorte polygon. (Figur fra Troldborg et al. 2019)

### 5.1.3 Spuns realisationer

Spunsen er stoppet en 1 m over den prækvartære overflade (post audit version) og nøjagtigheden for placering af spunsens bund i hver sektion er vurderet til  $\pm 12$  cm (NASSPA, 2005). I usikkerhedsanalysen varieres spuns afstanden stokastisk til den Prækvartære overflade, se skematisk gennemskæring af modellen i Figur 13. Bunden af spunsen varieres normalfordelt i sektioner af 20 m med middel afstand på 1 m og en standard afvigelse på 6 cm, svarende til at 95% af spunsrealisationerne ligger indenfor  $\pm 12$  cm. Dybden af de enkelte spunssektioner antages at være uafhængige af nabodybderne. Der simuleres med model C, en gang uden indlagt spuns og 100 gange med realisationer af spuns indlagt for at vurdere effekten af spunsen.

### 5.1.4 Realisationer af klimatilpasningstiltag

Usikkerheden relateret til et mulige klimatilpasningstiltag er analyseret ved at simulere forskellige grader af LAR-intensitet. LAR-tiltagene, som i denne er analyse antaget at blive implementeret som Lokal Afledning af Regnvand til infiltrationsbassiner (end-of-pipe), er en gentagelse af tidligere simuleringer (Kidmose et. al. 2014), se Figur 16, men hvor modellen den gang var baseret på model B, så er simuleringerne her baseret på model C. Ud over de i Kidmose (2014) simulerede LAR-intensiteter er der her også analyseret et scenarie med 20% LAR-intensitet. For at kunne omregne simuleringer med forskellige LAR-intensiteter til usikkerhed antages det, at 100% intensitet er 10% sandsynligt, 50 + 35% samt 20% intensitet antages at være 20% sandsynligt og 50% intensitet antages at være 50% sandsynligt. Alle LAR-intensiteterne simuleres i model C med spuns.

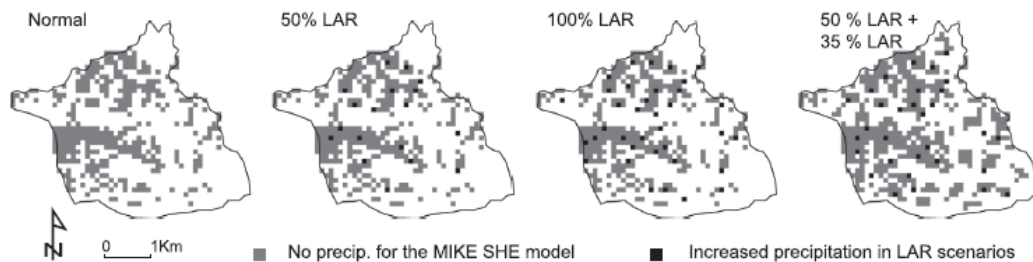


Fig. 5. Precipitation area for the coupled hydrological model. The maps show the hydrological model grid, with cells of no precipitation to the MIKE SHE model (where precipitation is handled in the MOUSE model). Normal is today's situation without LAR implementation.

Figur 16 LAR scenarier fra figur 5 i Kidmose et al. (2014)

### 5.1.5 Realisationer med klima fremskrivninger

Realisationerne med klimafremskrivning baseres på de 9 kombinationer udviklet i ENSEMBLES projektet, som benytter det moderate A1B emissionsscenario, for 2071 – 2100, som tidligere er anvendt i analysen af 100 års hændelser langs motorvejstracéet fra Troldborg et al. (2013). Hver af de 9 kombinationer af fremtidigt klima er antaget lige sandsynlige. Der er her, i modsætning til i Troldborg et al. (2013), kun analyseret på gennemsnits trykniveauer for hver af de 9 forskellige klima input, hvorimod usikkerhederne relateret til ekstremværdianalyse således ikke er medtaget. Usikkerhederne på de enkelte delelementer af klimafremskrivningerne og ekstremværdianalysen er nærmere beskrevet i Kidmose et al. (2013) og afrapporteret i Troldborg et al. (2013). Realisationerne med klimafremskrivningerne er simuleret i model C med indlagt spuns.

## 5.2 Analyse 1 – Usikkerheder relateret til modelperformance samt spuns indflydelse på simulerede trykniveauer

Denne analyse vurderer usikkerheder koblet til modelperformance samt belyser spunsens indflydelse på de simulerede trykniveauer. Med 20 m modellen eksekveres for hver situation 100 simuleringer og middelværdier og standardafvigelse beregnes for perioden 2011 – 2015.

### 5.2.1 Metode

I analyse 1 er der udført simuleringer for følgende situationer:

- Reference realisationer: situation uden spuns
- Spuns realisationer: situation med spuns
- Spuns-effekt realisationer: forskellen mellem spuns og reference realisationer

Det eksekveredes 3 x 100 modelkørsler for Reference og Spuns situationerne med 100 simuleringer for hvert set af de tre usikkerhedskilder; parameterværdier, Prækvartær flade samt spunsdybde, undtaget reference situationen for usikkerheden relateret til spunsdybde som kun kræver en enkelt kørsel (uden spuns). Alle modelkørsler er eksekveret ensartet for situati-

onerne med og uden spuns, og effekten af spunsen kan derefter beregnes ved at trække de simulerede trykniveauer fra Reference- og Spuns realisationer fra hinanden parvis. Dette genererer 3 x 100 simuleringer af trykniveau, hvor spunsens effekten er isoleret og beskriver situationen Spuns-effekt realisationer.

For hver af simuleringerne beregnes en middelværdi for perioden 2011-2015. Herefter beregnes for hver Spuns- og Spuns-effekt realisationerne på gridcelle niveau middelværdi og standardafvigelse af de 100 middel trykniveauer i realisationen. Herefter kan usikkerhederne relateret til hver af de tre kilder sammenlignes ved at sammenligne standardafvigelserne fra hvert scenarie ( $H_{std\_parameter}$ ,  $H_{std\_prekvartær}$  og  $H_{std\_spuns}$ ).

Antages det, at usikkerhedskilderne er uafhængige kan vi estimere den samlede standardafvigelse som:

$$H_{std} = \sqrt{\frac{(H_{std\_parameter}^2 + H_{std\_prekvartær}^2 + H_{std\_spuns}^2)/3 + ((H_{middel\_parameter} - H_{middel\_middel})^2 + (H_{middel\_prekvartær} - H_{middel\_middel})^2 + (H_{middel\_spuns} - H_{middel\_middel})^2)/3}{3}}$$

hvor

$$H_{middel\_middel} = (H_{middel\_parameter} + H_{middel\_prekvartær} + H_{middel\_spuns})/3$$

$H_{middel\_parameter}$  = Middel trykniveau fra parameter simuleringer

$H_{middel\_prekvartær}$  = Middel trykniveau fra Prækvartære flade simuleringer

$H_{middel\_spuns}$  = Middel trykniveau fra Prækvartære flade simuleringer

$H_{std}$  = Samlet standardafvigelse af simuleret trykniveau for alle tre usikkerhedskilder

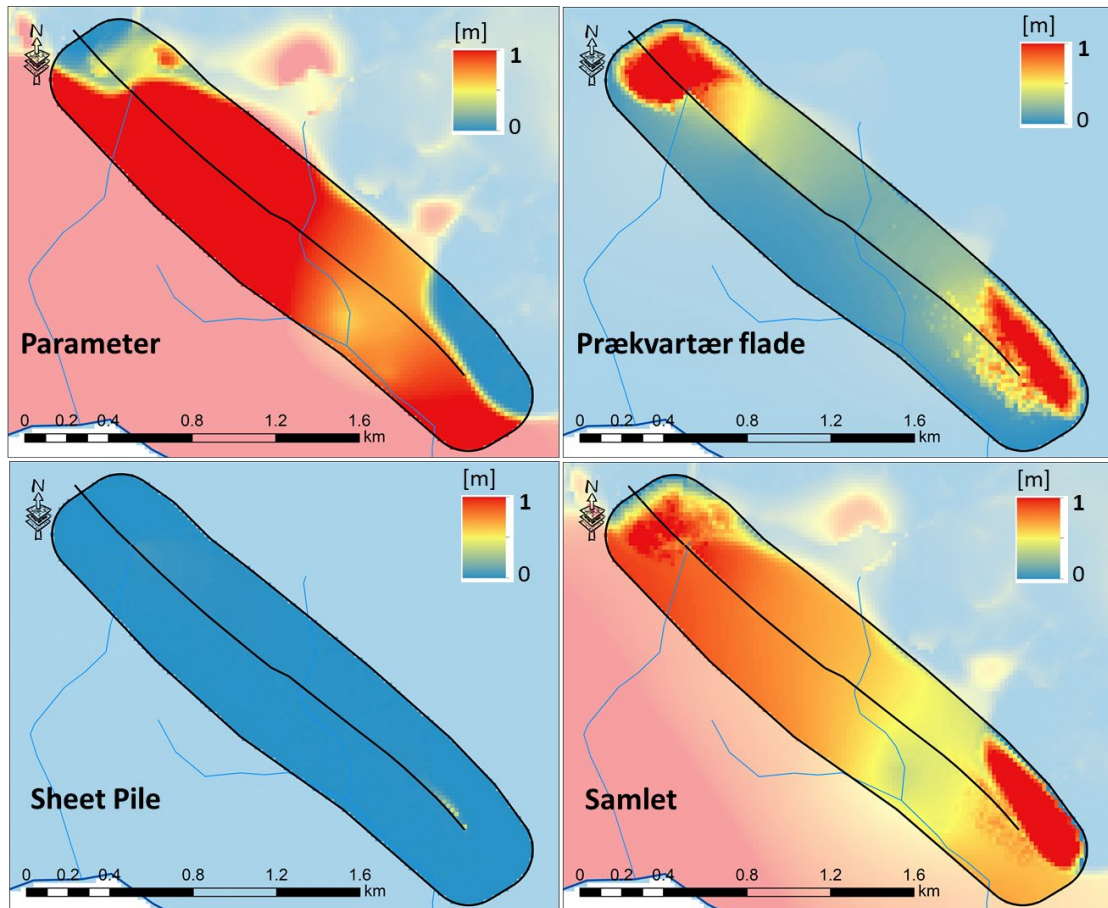
$H_{std\_parameter}$  = Standardafvigelse på middel trykniveau fra parameter simuleringer

$H_{std\_prekvartær}$  = Standardafvigelse på middel trykniveau fra Prækvartære flade simuleringer

$H_{std\_spuns}$  = Standardafvigelse på middel trykniveau fra spuns simuleringer

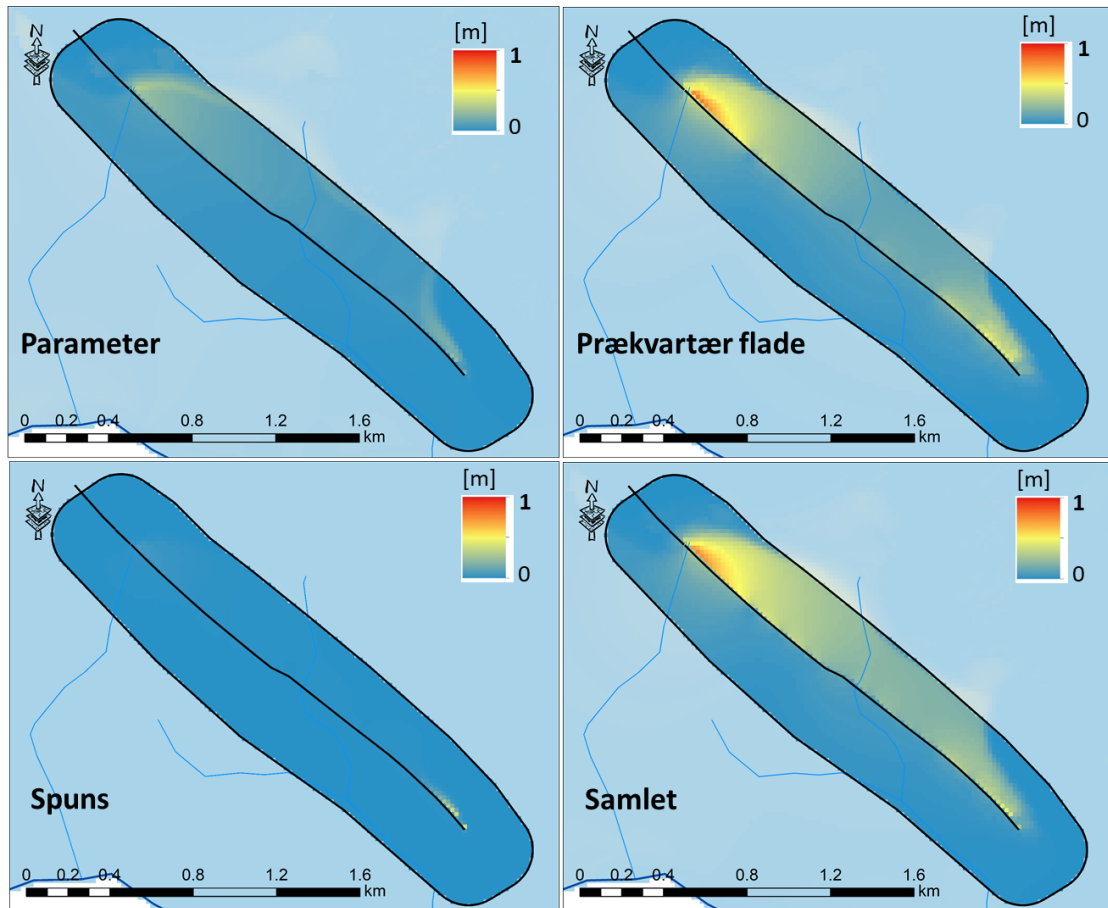
### 5.2.2 Resultater

Af Figur 17 og Figur 18 fremgår standardafvigelserne for de simulerede middel trykniveauer fra hhv Spuns og Spuns-effekt realisationerne. Området inden for den sorte polygon er interesseområdet, hvor den Prækvartære overflade varierer. Bemærk at maksimum værdier for parameter, Prækvartære flade og samlet usikkerhed er større end den øverste grænse i figuren, se Tabel 8 hvor tallene fremgår.



Figur 17 Spuns realisationer. Usikkerheder (std) i simulerede trykniveauer som gennemsnit I perioden 2011 – 2015. De to øverste og nederst til venstre viser usikkerhederne hørende til modelparameter  $H_{std\_parameter}$ , Prækvaltær flade  $H_{std\_prækvaltær}$  og spunsens dybde  $H_{std\_spuns}$ . Nederst til højre vises den samlede usikkerhed  $H_{std}$ . Figur reproduceret fra Troldborg et al. (2019)

Generelt fremgår det i Spuns realisationerne, Figur 17 øverste to figurer, at standardafvigelsen for de simulerede trykniveauer er større fra parameter usikkerhederne end fra usikkerheder relateret til den Prækvaltære overflade. Dette er forventet eftersom parameter usikkerheden påvirker de simulerede trykniveauer i hele modelområdet, hvor kun det lille område indenfor, eller tæt på grænsen til hvor usikkerheden på Prækvaltære overfladen er simuleret. Den største standardafvigelse for Prækvaltære simuleringerne ses i randzonen mellem det højtliggende kvartære aflejringer og det meget lavere liggende terrassesand. Randzonen er karakteriseret af stejl topografi og lille hydraulisk kontakt. Tæt på randzonen består magasinmaterialet af en blanding mellem terrassesand med høj hydraulisk ledningsevne og nedskyldsdiamikt (erosionsmateriale) som til en vis grad har en lavere hydraulisk ledningsevne, og når den prækvaltære overflade varieres, påvirkes primært kun tykkelsen af terrassesandet, mens nedskyldsdiamikten tykkelsen er uforandret. Dette betyder, at den samlede transmissivitet af magasinmaterialet i randzonen påvirkes af de prækvaltære overflade variationer og forklarer således de områder med store standardafvigelser i de simulerede trykniveauer tæt på overgangsområdet. Generelt ses meget lille påvirkning af spunsdybde usikkerheden, Figur 17 nedre hjørne til venstre.



Figur 18 Spuns-effekt realisationer. Usikkerheder (std) i simulerede trykniveauer som gennemsnit i perioden 2011 – 2015. De to øverste og nederst til venstre viser usikkerhederne hørende til modelparameter  $H_{std\_parameter}$ , prækvartær flade  $H_{std\_prækvaltær}$  og spunsens dybde  $H_{std\_spuns}$ . Nederst til højre vises den samlede usikkerhed  $H_{std}$ . Figur reproduceret fra Troldborg et al. (2019)

Figur 18 viser Parameter-, Prækvaltær flade-, Spunsdybde- og Samlet modelusikkerhed på simuleringer af effekten af spuns, altså differensen mellem simulerede trykniveauer med og uden spuns. Generelt fremgår det, at standardafvigelse er mindre og lokaliseret tættere på spunsen sammenlignet med standardafvigelse for situationerne med spuns, Figur 17. I projekteringsfasen blev spunsdybden designet således at effekten af denne på trykniveauerne ville være negligerbare, og derfor er den "ikke-påvirkning" uden for fokusområdet forventet.

Det fremgår, at variationerne af den prækvartære overflade genererer større usikkerheder end både parameter usikkerhed og usikkerhed på spunsens placering over den prækvartære overflade, hvilket antyder, at usikkerheden koblet til den prækvartære overflade dominerer, når man undersøger spunsens effekt på de simulerede trykniveauer. Den samlede usikkerhed på effekten af spuns er meget lille, så snart vi er nogle få hundrede meter væk fra spunsen, hvilket basalt set er det samme som, at simuleringerne uden spuns og med spuns stort set giver samme resultat. Det er med andre ord vanskeligt at finde en ordentlig placering for en moniteringsboring, hvor det med rimelig sandsynlighed vil være muligt at observere en ændring i grundvandsspejlet som følge af spuns konstruktionen, på nær området helt tæt på spunsen.

Hertil kommer at den primære årsag, ifølge modellen, til at der måske vil kunne iagttages en grundvandsspejlsændring kan tilskrives usikkerhed omkring højdeforholdene af den prækvartære overflade.

**Tabel 8 Statistik over usikkerheder [m] beregnet for området indenfor den sorte polygon, vist i Fejl! Hensningskilde ikke fundet. og 16.**

Situation	Usikkerhed	Min	Max	Middel	Std
Reference	samlet ( $H_{std}$ )	6.4E-04	3.81	0.74	0.44
Reference	parameter ( $H_{std\_parameter}$ )	0.00	1.53	0.88	0.42
Reference	prækvartær ( $H_{std\_prækvartær}$ )	0.00	2.09	0.27	0.38
Reference	spuns ( $H_{std\_spuns}$ )	0.00	0.00	0.00	0.00
Spuns (Figur 17)	samlet ( $H_{std}$ )	0.00	3.62	0.74	0.42
Spuns	parameter ( $H_{std\_parameter}$ )	0.00	1.53	0.89	0.42
Spuns	prækvartær ( $H_{std\_prækvartær}$ )	0.00	2.09	0.32	0.37
Spuns	spuns ( $H_{std\_spuns}$ )	0.00	0.38	0.00	0.01
Spuns effekt (Figur 18)	samlet ( $H_{std}$ )	1.0E-05	0.76	0.10	0.12
Spuns effect	parameter ( $H_{std\_parameter}$ )	0.00	0.30	0.04	0.04
Spuns effect	prækvartær ( $H_{std\_prækvartær}$ )	0.00	0.80	0.09	0.11
Spuns effect	spuns ( $H_{std\_spuns}$ )	0.00	0.38	0.00	0.01

Af Tabel 8 fremgår usikkerheds statistik fra Analyse 1, og ses blandt andet, at usikkerheden koblet til effekten af at have en spuns (standard afvigelsen for de 100 Monte Carlo simuleringer) varierer mellem 0 og 76 cm indenfor fokus området, Figur 18, med en middelværdi på 10 cm og standardafvigelse mellem beregningscellerne på 12 cm.

Statistikken i Tabel 8 bekræfter det, som visuelt fremgår i Figur 17 og Figur 18, at når vi kigger på de enkelte usikkerheder koblet til de simulerede trykniveauer i området, så dominerer parameterusikkerhederne, men når vi kigger på en situation, hvor effekten af at have en spuns i forhold til ikke at have spuns, så dominerer usikkerhederne koblet til tolkningen af den prækvartære overflade over parameterusikkerheden. Usikkerheden på simulering af spunsdybde har sammenlignelig statistik i tabellen som usikkerheden på simulering af parameter usikkerhed, forskellen er dog, at usikkerheden på spunsdybden er lokaliseret til et meget lille område helt tæt på spunsen.

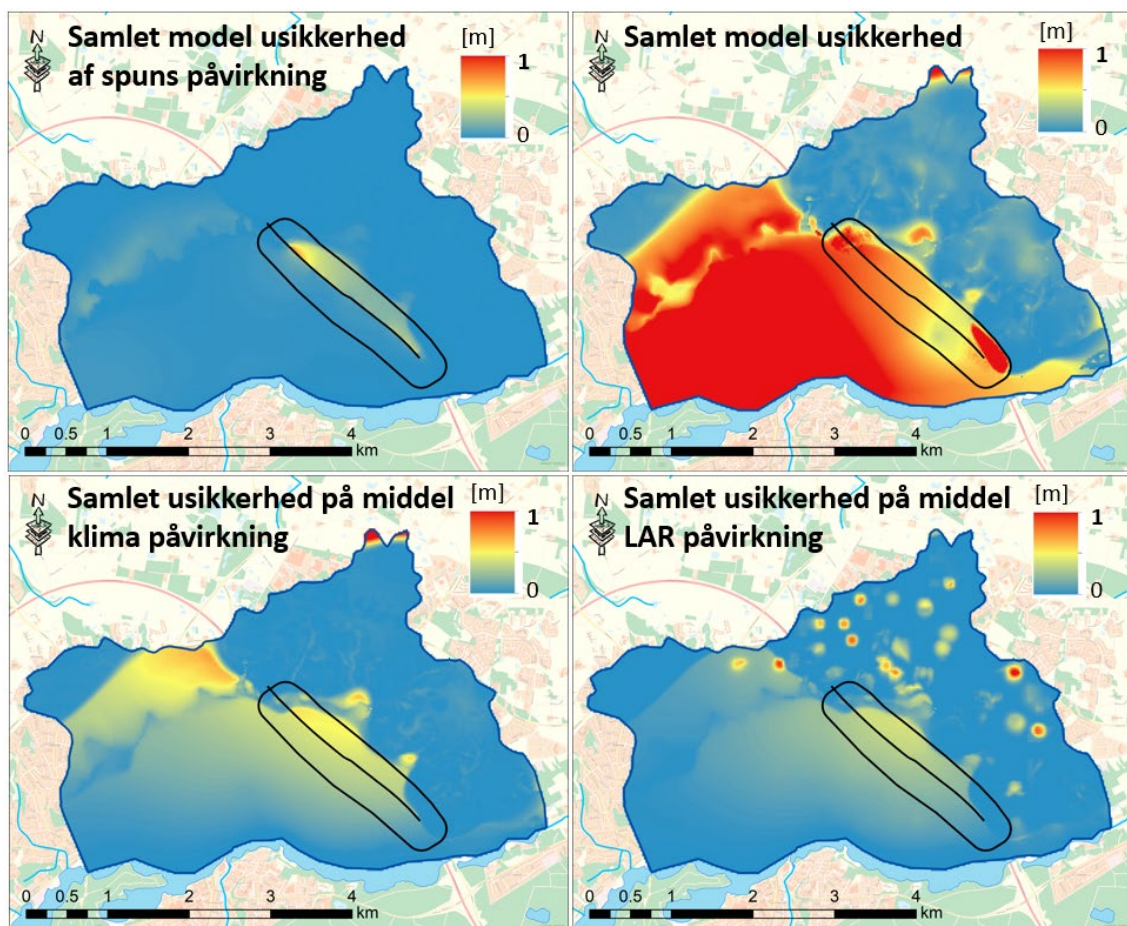
### 5.3 Analyse 2 – sammenligning af modelusikkerhed med usikkerhed på klimafremskrivning og klimatilpasning

I denne sidste del af analysen er der gennemført en visuel sammenligning af usikkerhed relateret til modellen, repræsenteret ved den samlede standardafvigelse fra analyse 1, og usikkerheden relateret til klimafremskrivningen og klimatilpasningen, nærmere beskrevet i afsnit 5.1.4 og 5.1.5.

### 5.3.1 Resultater

I Figur 19 vises de rumlige fordelinger af standardafvigelserne for hele modelområdet. Dels fremgår den samlede modelusikkerhed fra spuns-effekten (top venstre i Figur 19), også vist i Figur 18, den samlede modelusikkerhed fra spuns realisationerne (top højre i Figur 19), som også er vist i Figur 17, samt den samlede usikkerhed relateret til klima fremskrivningerne og klimatilpasnings (LAR) tiltag, de to nederste i Figur 19. Usikkerheden relateret til effekten af spuns (top venstre, Figur 19) er lokaliseret helt tæt på motorvejstracéet sammenholdt med usikkerheden på klimafremskrivningerne og klimatilpasningstiltag (nederst, Figur 19). Alle tre usikkerhedsestimater er underordnede den samlede usikkerhed på modellen (top højre, Figur 19).

Det skal bemærkes at den samlede model usikkerhed (top højre, Figur 19) ikke bør sammenlignes direkte med de tre andre figurer, fordi de tre andre angiver usikkerheden på effekten af ændringer forårsaget af henholdsvis spuns, klimaændringer og LAR. Det interessante her er den indbyrdes størrelsesorden af de tre figurer, hvoraf det fremgår at usikkerheden på prædiktionerne af ændringerne er af samme størrelsesorden lige i nærheden af spunsen, mens usikkerhederne på prædiktioner af effekter af klimaændringerne og LAR breder sig til områder længere væk fra motorvejstracéet.



Figur 19 Samlet usikkerhed som standardafvigelser [m].

## 6 Konklusion

Formålet med opstilling af grundvandsmodellen har været at komme med forudsigelser om grundvandsstand 80-100 år ude i fremtiden under ændrede klimatiske forhold, fordi dele af motorvejskonstruktionen gennem Silkeborg på en central vejstrækning ville være placeret i nær kontrakt med grundvandsspejlet. Af indlysende grunde er en grundig usikkerhedsvurdering af modelresultaterne af stor betydning. Post audit af modellen er gennemført efter produktion af de primære modelresultater: simulering af fremtidige ekstremværdi analyse af grundvandsstanden langs motorvejstracéet. Det betyder, at usikkerhedsvurderingerne fra post audit ikke har kunnet anvendes i forbindelse med projekteringen af motorvejen, da data til post audit kommer fra et tidspunkt hvor motorvejen bliver bygget. Til gengæld kan vi bruge post audit resultaterne til at teste modellens robusthed, fordi modellen i post audit simulerer betingelser, som ligger langt ud over det spænd, modellen er kalibreret under.

Geologiske data og geologisk forståelse er tidligere dokumenteret at have afgørende betydning for kvaliteten af en grundvandsmodel og nøjagtigheden af dens prædiktioner. I forbindelse med projekteringen af motorvejen er der indsamlet en omfattende mængde geologiske data svarende til, eller måske lidt mere end, almindelig praksis for tilsvarende infrastrukturprojekter. I de efterfølgende to projektfaser (anlægsfasen og den permanente fase) er der indsamlet og analyseret yderligere data. Det har gjort det muligt at analysere, hvor stor værdien af de yderligere geologiske data er. Udgravningerne til motorvejen gjorde det muligt at se de geologiske lag i dybe skrænter med flere hundrede meters bredde. Før udgravningerne kunne geologien kun vurderes ud fra punktmålinger i borer. Den geologiske model, som indgår i grundvandsmodellen, er derfor blevet opdateret med den nye geologiske viden. Hovedparten af den tidligere geologiske model blev bekræftet af de nye data fra udgravningerne, men den geologiske model blev justeret med nogle detaljer omkring sammenhængen mellem geologiske lag ved skræntfoden. Disse forbedringer viste sig at have en markant betydning i form af en mere nøjagtig modelsimulering (uden genkalibrering af modellen).

Generelt tyder simuleringen af grundvand fra linjedrænene på, at modellen er meget robust i forhold til simulering af ændringer, i dette tilfælde en kraftig grundvandssænkning, som ligger væsentligt ud over hvad modellen er kalibreret til. Vi forventede, at modellen ville kunne bruges til at simulere klimatiske ændringer når bare disse ikke lå væsentligt udenfor de variationer i klima vi udsatte modellen for under kalibreringen. På baggrund af post audit kan vi konkludere, at modellen er robust overfor kraftige ændringer, hvilket indikerer, at grundvandsmodellen også kan anvendes med gode prædiktive evner til forudsigelse af dynamiske forhold påvirket af ændringer i fx nedbør, oppumpninger eller dræningssystemer, dvs. at dimensioneringsgrundlaget er robust for så vidt angår klimapåvirkninger af grundvandsspejlet.

Avanceret post audit med sammenligning af usikkerhedsintervaller fra oprindelig model (A), geologisk revideret model (B) og en genkalibrering mod post audit data (C) og efterfølgende Monte Carlo simuleringer af usikkerhedsintervaller viser, at til trods for at revision af geologien i model B bevirkede markant forbedret nøjagtighed i forhold til de oprindelige kalibreringsmål

(simulering af vandspejlsvariationer og vandløbsafstrømninger), så medførte det ikke en forbedring af modellens præcision i forhold til afdræningen fra linjedrænene. Samtidigt viste model C, hvor der blev genkalibreringen mod bl.a. afdræning fra linjedræn, at den anvendte Monte Carlo metodik med model B underestimerede modelusikkerheden på simulering af afdræning. Underestimeringen af usikkerhed med model B skyldes formodentligt, at den Monte Carlo bestemte usikkerhed vil være betinget af en antagelse om at den konceptuelle model er korrekt, hvilket selvfølgelig aldrig er helt rigtigt.

Undersøgelsen af usikkerheder relateret til model parametre, tolkningen af den prækvartære overflade og dybde af spuns og deres respektive indflydelse på simulerede trykniveauer viser, at parameter usikkerheder er den dominerende kilde når man kigger på simulerede trykniveauer i en naturlig situation. Men når vi analyserer effekten af spunsens tilstedeværelse, dvs. den relative ændring i forhold til den faktiske konstruktion, så dominerer usikkerhederne hørende til tolkningen af den prækvartære flade i området omkring spunsen, over parameterusikkerheden og usikkerheden på spunsdybden. Når vi sammenligner usikkerheden på simulering af klimafremskrivninger og klimatilpasning, så er denne sammenlignelig med modelusikkerheden på effekten af spunsen.

Den samlede usikkerhed på model simuleringerne af grundvandsspejlet er markant større end den relative usikkerhed i forhold til spuns placering eller usikkerhed i forhold til påvirkning af klimafremskrivninger eller klimatilpasningstiltag. Den samlede model usikkerhed fortæller os noget om den absolutte sikkerhed på simuleringer af middel grundvandsspejlet med modellen. Langt de fleste modelresultater fx af klimafremskrivninger eller klimatilpasningsløsninger vil blive anvendt relativt, dvs. til at svare på spørgsmål af karakteren "hvor stor en ændring i grundvandsstand vil vi se i forhold til nuværende situation" eller "hvor meget værre bliver ekstremhændelserne". Dette understreger vigtigheden af at have konkrete målinger frem for kun at have modelsimuleringer af grundvandsspejlets udgangsniveau, så det er tilstrækkeligt at producere de (relative) ændringer af grundvandsspejlet.

I afrapportering af klimaeffekterne (Troldborg et al. 2013) er alle resultater da også omregnet til relative ændringer ift nuværende middel grundvandsspejl, hvorfor den usikkerhed på resultaterne primært skal findes i usikkerheden på klima fremskrivningerne og sekundært på usikkerheden af klimatilpasningstiltagene. Dog er modelusikkerheden dominerende i et område helt tæt på enderne af spunsvæggene, hvilket som tidligere skrevet primært skyldes usikkerhed omkring højdeforholdene af den prækvartære overflade.

## 7 Referencer

- Alley, W.M., P.A. Emery. 1986. Groundwater model of the Blue River Basin, Nebraska – twenty years later. *J. Hydrol.* 85, 225-250.
- Andersen, P.F., S. Lu. 2003. A post audit of a model-designed ground water extraction system. *Groundwater* 41, 212-218.
- Anderson M.P., W.W. Woessner. 1992. The role of the postaudit in model validation. *Advances in Water Resources* 15, 167-173.
- Brkic Z., K. Uromovic, M. Briski. 2013. Post Audit Analysis of a Groundwater Level Prediction Model in Developed Semiconfined Aquifer System. *Water Resources Management* 27, 3349-3363.
- Doherty J (2010) PEST, Model-independent parameter estimation, User manual: 5th Edn., Watermark Numerical Computing.
- Jakobsen PR, Kidmose J & Rasmussen ES (2014). Geologien i motorvejsstrækningen ved Silkeborg - Profilbeskrivelser og opdatering af geologisk model fase 2. GEUS Rapport 2014/77
- Jakobsen PR, Rasmussen ES, Dybkjær K & Kidmose J (2016). *Miocene deposits at Silkeborg, Jylland, and their influence on hydrology*. Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin 35, p9-12.
- Karlsen, R.H., F.J.C. Smits, P.J. Stuyfzand, T.N. Olsthoorn, B.M. van Breukelen. 2012. A post audit and inverse modelling in reactive transport: 50 years of artificial recharge in the Amsterdam Water Supply Dunes. *Journal of Hydrology* 454, 7-25.
- Kidmose J, Refsgaard JC, Troldborg L, Seaby LP & Escrivà MM (2013). Climate change impact on groundwater levels: ensemble modelling of extreme values. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, p1619-1634.
- Kidmose J, Troldborg L & Refsgaard JC (2019) *Ground water model predictions under changing conditions - a post audit*. submitted to *Groundwater*
- Kidmose J, Troldborg L, Refsgaard JC & Bischoff N (2015). Coupling of a distributed hydrological model with an urban storm water model for impact analysis of forced infiltration. *Journal of Hydrology* 525, p506-520.
- Konikow, L.F., J.D. Bredehoeft. 1974. Modelling flow and chemical quality changes in an irrigated stream-aquifer system. *Water Resources Research* 10, 546-562.
- Konikow, L.F., M. Person. 1985. Assessment of long-term salinity changes in an irrigated stream-aquifer system. *Water Resources Research* 21, 1611-1624.
- Lemke, L.D., J.A. Cypher. 2010. Postaudit evaluation of conceptual model uncertainty for a glacial aquifer flow and contaminant transport model. *Hydrogeology Journal* 18, 945-958.
- NASSPA (2005) Best Practices Sheet Piling Installation Guide. North American Steel Sheet Piling Association. <http://www.nasspa.com>
- Stewart, M., C. Langevin. 1999. Post audit of a numerical prediction of wellfield drawdown in a semiconfined aquifer system. *Groundwater* 37, 245-252.
- Troldborg L, JC Refsgaard, JB Kidmose, MM Escrivà & P Nyegaard. (2011). Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg. Statusrapport fase 1.1 og 1.2. GEUS rapport 2011/136.
- Troldborg L, Ondracek M, Koch J, Kidmose J & Refsgaard JC (2019) Quantifying stratigraphic uncertainty in groundwater modelling for infrastructure design. submitted to *Geological Engineering*
- Troldborg L, Refsgaard JC, Kidmose J & Randall M (2013). Grundvandsmodel for motorvejsstrækning gennem Silkeborg - Statusrapport fase 1.3. GEUS Rapport 2013/43