DANMARKS OG GRØNLANDS GEOLOGISKE UNDERSØGELSE RAPPORT 2019/31

National Vandressource Model

Modelopstilling og kalibrering af DK-model 2019

Simon Stisen, Maria Ondracek, Lars Troldborg,
Raphael J. M. Schneider & Michael John van Til

DE NATIONALE GEOLOGISKE UNDERSØGELSER
FOR DANMARK OG GRØNLAND,
KLIMA-, ENERGI- OG FORSYNINGSMINISTERIET

GEUS

Indholdsfortegnelse

1. Resumé 5

2. Indledning 9

2.1 Formål 9
2.2 Modelbenyttelse 10
2.3 Beskrivelse af modelområdet 11
2.4 Grundvandsmagasiner 12
2.4.1 Sjælland og øerne 13
2.4.2 Fyn 14
2.4.3 Jylland 17
2.4.4 Bornholm 18

3. Hydrogeologisk tolkningsmodel 19

3.1 Sjælland, Lolland, Falster og Møn 19
3.2 Fyn 23
3.3 Jylland 27
3.4 Bornholm 33
3.5 Hydrologiske afgrænsninger (randbetingelser) 38
3.5.1 Dræn og vandløb (indre randbetingelser) 38
3.5.2 Ydre modelrande 39
3.6 Hydrauliske størrelser 40
3.7 Vandbalanceforhold 42
3.8 Indvindingsforhold 45

4. Modelsystem 48

4.1 Overfladisk afstrømning 48
4.2 Umættet strømning 49
4.3 Grundvandsstrømning 50
4.3.1 Dræn afstrømning 51
4.3.2 Indvinding og markvanding 52
4.4 MIKE HYDRO River 52

5. Modelopstilling 55

5.1 Diskretisering 55
5.1.1 Beregningslag DK1, DK2 og DK3 (Sjælland, Lolland, Falster, Møn, Fyn og Sydhavsøerne) 55
5.1.2 Beregningslag – DK4, DK5 og DK6 (Jylland) 56
5.1.3 Beregningslag – DK7 (Bornholm) 57
5.2 Nettonedbør og fordeling til grundvand/overfladevand 58
5.2.1 Dræn 62
5.3 Vandløb og Søer 67
5.3.1 Vandløbsnetværk 67
5.3.2 Vandløbstværsnit 70

5.3.3 Søer 71
5.3.4 Distribueret lækagekoefficient 72
5.3.5 Punktkilder 74
5.4 Indvindinger 76
5.4.1 Markvanding 80
5.5 Numeriske parametre 81

6. Kalibreringsstrategi og data 82

6.1 Valg og bearbejdning af potentialer og afstrømningsdata 82
6.1.1 Databehandling - potentialer 83
6.1.2 Databehandling - afstrømningsdata 86
6.2 Opstilling af kalibreringsmål og nøjagtighedskriterier 87
6.2.1 Observationsgrupper og nøjagtighedskriterier - potentialer 89
6.2.2 Observationsgrupper og nøjagtighedskriterier - afstrømningsdata 91
6.2.3 Samlet objektivfunktion 93
6.3 Valg af kalibreringsparametre 95

7. Kalibrerings- og valideringsresultat 100

7.1 Kvantitativ vurdering af kalibrerings og validerings resultater 100
7.1.1 Kvantitativ vurdering af trykniveau simuleringer 100
7.1.2 Kvantitativ vurdering af vandførings simuleringer 105
7.2 Kvalitativ vurdering af kalibreringsresultat 112
7.2.1 Kvalitativ vurdering af optimerede model parametre 112
7.2.2 Kvalitativ vurdering af den rumlige fordeling af residualer 115

8. Vurdering af model 122

9. Referencer 124

10. Bilag 127

1. Resumé

DK-modellen

Det overordnede formål med den nationale vandressource model (DK-model) er at udvikle en landsdækkende vandressource model, der kan danne grundlag for en vurdering af Danmarks samlede tilgængelige drikkevandsressource, herunder dennes tidsmæssige variation og regionale fordeling.

Den første version af DK-modellen blev afrapporteret i 2003 med Ferskvandets Kredsløb (Henriksen & Sonnenborg, 2003). I perioden 2005 – 2009 undergik DK-modellen en omfattende opdatering, et samarbejde mellem GEUS og de syv statslige miljøcentre (Højberg et al., 2010). I 2010 blev nedbørsinputtet til DK-modellen ændret til dynamisk korrigeret nedbør, for at forbedre vandbalancen (Refsgaard et al. 2011) og alle delmodeller blev genkalibreret. I 2013 – 2014 blev DK-modellen opdateret som del af den nationale modelstrategi og som en del af arbejdet i forbindelse med de statslige vandplaner. Her er det især vandløbsnetværket der er blevet væsentligt udvidet (Højberg et al., 2015).

DK-model2019 som denne rapport omhandler indeholder en række væsentlige ændringer i forhold til den forrige version, DK-model2014. Disse er beskrevet i detaljer i rapporten og inkluderer som det væsentligste:

- Indbygning af den fælles offentlige hydrostratigrafiske model (FOHM) for Jylland.
- Overgang fra MIKE11 til MIKE Hydro River for vandløbssimuleringer samt mindre udbygning af vandløbsnetværket
- Simultan kalibrering af delområderne DK1 - DK6 med anvendelse af samme parametrisering for en række overflade-relaterede parametre
- Konsistent parameter regionalisering af drændybde, dræn tidskonstant, roddybde samt lækage koefficient
- Inkorporering af nyt kalibrerings-koncept for pejlinger som skal mindske udfordringer med outliers og pejlinger som repræsenterer en skala som ikke kan honoreres af modelstrukturen
- Inklusion af markvanding i modelkalibreringen
- Generel opdatering af klima og indvindingsdata

Modelsystem

Modellen er opstillet i modelsystemet MIKE SHE / MIKE HYDRO River, der udgør et deterministisk fuldt distribueret og fysisk baseret modelkompleks til simulering af ferskvandskredsløbet. Modellen inkluderer en beskrivelse af den overfladiske afstrømning (OL), den umættede zone (UZ), den mættede grundvandszone (SZ), herunder drænafstrømning, samt vandstrømning i vandløbene (MIKE HYDRO River).

Hydrostratigrafisk model

Modellen blev oprindeligt udviklet på basis af en landsdelt hydrogeologisk tolkning foretaget af GEUS. Efterfølgende er der sket en opdatering

af den hydrostratigrafiske model, hvilket dels er sket på ad-hoc basis primært af ved indbygning af kortlægningsmodeller øst for Lillebælt og dels ved indbygning af den fælles offentlige hydrostratigrafiske model (FOHM) for Jylland.

Diskretisering

Den numeriske hydrologiske model er opstillet med diskretisering på 500 x 500 m for hele landet på nær Bornholm der er opstillet med en diskretisering på 250 x 250 m. MIKE SHE giver mulighed for at anvende forskellige opløsninger af den geologiske og den numeriske model. Det er således muligt at anvende en opløsning af de hydrostratigrafiske lag der er finere end opløsningen af beregningslagene. De hydrostratigrafiske lag er interpoleret til et 100 x 100 m grid.

Overfladevands-systemet

Modellen er en integreret grundvands-/overfladevandsmodel med en direkte kobling mellem de to systemer. Under opdateringen af overfladevandssystemet er der taget udgangspunkt i vandløbs opsætningen fra den tidligere DK-model, med vandløbsstrækninger, der muliggør en repræsentation af vandløb i topografiske oplande på ca. 15 km^2. Til beskrivelse af vandstrømningen i overfladevandssystemet, er det valgt at anvende MIKE HYDRO River og en simpel løsning, hvor vandet routes (flyttes) gennem vandløbet. Denne løsning er begrundet i modeltekniske årsager, hvor en detaljeret beskrivelse vil medføre signifikant længere simuleringstider. Den simple løsning medfører bl.a., at der ikke tages hensyn til søernes reservoir virkning, ligesom den regulering, der finder sted ved udløbene fra mange af søerne, ikke beskrives. Beskrivelsen af søerne som brede vandløb betyder samtidigt, at der kun sker en lokal udveksling mellem søerne og grundvandsmagasinet selv i tilfælde, hvor søerne har en stor arealmæssig udbredelse. Modellen vil derfor ikke være egnet til en detaljeret beskrivelse af dynamikken i og tæt ved søerne samt udvekslingen mellem søer og grundvand.

Klimainput

Nettonedbøren beregnes med det umættede zone-modul ”Two-Layer”, der er en integreret del af løsningen i MIKE SHE. Som klimainput er der anvendt døgnværdier for dynamisk korrigeret nedbør, referencefordampning samt temperatur baseret på DMIs klimagrid (10 x 10 km for nedbør, 20 x 20 km for referencefordampning og temperatur). Som anbefalet i Refsgaard et al. (2011) er nedbørsdata dynamisk korrigeret, mens fordampningen er beregnet på basis af Makkink (Mikkelsen & Olesen, 1991).

Indvindinger

Indvindinger indlagt i modellen er trukket ud fra den nationale boringsdatabase Jupiter, hvor de er lagret på anlægsniveau. Samtlige anlæg er medtaget i modellen, og indvindingen er fordelt ud på indtagsniveau. For anlæg med mere end ét indtag er det antaget, at indvindingen er ligelig fordelt mellem anlæggets aktive indtag. Alle indvindinger er indlagt med årlige værdier.

Indvinding til markvanding er ligeledes inkluderet i modellen. Placeringen af markvandingsboringerne er trukket ud fra Jupiter, og vanding tillades i et fastsat areal omkring hver boring. Indvindingsmængden er behovsstyret, hvor den styrende parameter er vandindholdet i rodzonen.

Hydrauliske Parametre

Under modelopstillingen er det tilstræbt at anvende så få parametre som muligt. Det er dels begrundet i et ønske om at holde modellen så gennemskuelig som muligt samt for at undgå en overparameterisering. Det er derfor antaget, at de hydrauliske parametre for sammenlignelige aflejringer er ens. Det betyder, at der kun skelnes mellem følgende hydrauliske enheder: kvartært sand og ler samt prækvartært sand og ler. Dog er det for den øverste zone antaget, at leret har en højere hydraulisk ledningsevne end det øvrige ler pga. tilstedeværelsen af sprækker. Variation i transmissiviteten inden for de enkelte enheder er således alene distribueret jvf. variationen i deres tykkelse.

Kalibrering

Modellen er kalibreret inverst med softwareprogrammet PEST, hvor der er anvendt dynamiske modelkørsler. Som kalibreringsmål er der anvendt observerede grundvandspotentialer for perioden 2000 – 2010. For vandløbsafstrømning er der anvendt daglige afstrømningsdata for udvalgte vandløbsstationer ligeledes for perioden 2000 - 2010. Som kalibreringskriterier er der anvendt RMSE (kvadratafvigelsessummen) for potentialer. For vandløbsafstrømningen er der medtaget tre kriterier;
1) den samlede vandbalancefejl, 2) Kling-Gupta efficientcy KGE for hele kalibreringsperioden og 3) vandbalancefejl for sommerperioden (juni – august). Under kalibreringen er det tilstræbt at give en ligelig vægt til hhv. potentiale- og afstrømningsdata. Desuden er den samlede markvanding inkluderet som kalibreringsmål. Det traditionelle Nash-Sutcliff (NSE) kriterie er ikke længere anvendt til model kalibrering, men erstattet af KGE, som er mere robust over for stationer med ringe performance. Dog er NSE fortsat anvendt i modelevalueringen, da der endnu ikke er tilstrækkeligt erfaringsgrundlag for at opstille generelle kriterier baseret på KGE.

Validering/test

Modellen er valideret ved en split-sampling test, hvor data for perioderne 2011 – 2015 samt 1995 - 1999, der ikke blev anvendt under kalibreringen, er benyttet til at teste modellens prædiktive evne. Der er anvendt to valideringsperioder da antallet af nedbørsstationer i Danmark er stærkt reduceret i perioden 2007-2010, hvilket indebærer et betydeligt fald i modelperformance som ikke kan tilskrives selve den hydrologiske model opbygning og parametrisering.

Vurdering af modellen

Modellen er kalibreret på perioden 2000 - 2010 og valideret for to perioder 1995 - 1999 samt 2011 - 2015.

Generelt lever modellen op til performance kriterier på screeningsniveau for simuleret trykniveau. Desuden opfylder ME og RMS typisk kriteriet for overslagberegninger. Den rumlige fordeling af middelfejl af simuleret trykniveau viser betydelige regionale forskelle, med største afvigelser i Nord- og Øst-Jylland. Den hydrogeologiske opdatering af DK-modellen for Jylland med indbygning af FOHM hydrostratigrafi, har ikke væsentlig ændret model performance eller rumlig fordeling af residualer.

For vandføringssimuleringer lever modellen på nationalt niveau op til kriterierne for screeningsniveau på vandbalance, WBE og $WBE_{sommer,}$ for både kalibreringsperioden og valideringsperioderne. For NSE performance af vandløbsdynamikken er modellen på niveau eller lidt under niveau med den tidligere DK-model2014. Det er dog væsentligt at pointere at DK-model2019 ikke er kalibreret imod NSE, men mod KGE, som foretrækkes til parameter optimering. Samtidigt er der tilføjet en række små vandløbsstationer til kalibrerings og validerings datasættet, hvilket betyder at den gennemsnitlige performance reduceres. Sammenlignes, DK-model2019 med DK-model2014 for vandløbsafstrømning er den nye version bedre på vandbalancer, særligt på små vandløb og på samme niveau for vandløbsdynamik (NSE og KGE). Det vurderes derfor at DK-model2019 performer mindst lige så godt som DK-model2014, som er vurderet til at overholde kriterierne baseret på NSE og WBE.

Det anvendte princip om færrest mulige kalibreringsparametre samt kalibrering samlet på tværs af hele landet og regioner betyder, at modellen ikke vil være tilpasset lokalspecifikke forhold. Ved anvendelse af modellen til lokale problemstillinger bør der derfor altid foretages en indledende vurdering af modellens evne til at reproducere de relevante variable (f.eks. minimum/maksimum afstrømning) for fokusområdet, eventuelt efterfulgt af en re-kalibrering for en bedre tilpasning af de lokale forhold.

Med DK-model2019 er der gjort en betydelig indsats for at harmonisere parametrisering på tværs af landet, ved inkorporering af FOHM hydrostratigrafien og en helt ny regionaliserings- og kalibreringsprocedure til at sikre konsistente parametriseringer og rumlige simuleringer på tværs af landet. Derfor vurderes det at modellen udgør et forbedret bud på beskrivelsen af det samlede hydrologiske kredsløb og dets flukse og tilstandsvariable.

2. Indledning

Den nationale vandressource model (DK-model), blev i sin første version udviklet fra 1996 – 2003, hvor den blev anvendt til estimering af den nationale udnyttelige grundvandsressource (Henriksen og Sonnenborg, 2003). Efterfølgende blev der i perioden 2005 – 2009 foretaget en omfattende opdatering af DK-modellen, hvilket blev udført i et samarbejde mellem GEUS og de tidligere danske amter, senere overtaget af staten (Naturstyrelsen). Denne opdatering havde stor fokus på integration af de hydrogeologiske modeller, udviklet under den nationale grundvandskortlægning, i den nationale model. Der blev således udviklet en metodik for indbygning af detailmodeller i DK-modellen (Nyegaard et al., 2010), som blev benyttet til indbygning af ca. 50 kortlægningsmodeller, der var udviklet frem til 2005. Den samlede opdatering og genkalibrering af DK-modellen resulterede i DK-model2009 versionen, der samlet er rapporteret i Højberg et al. (2010), samt i delrapporter for de enkelte delområder refereret heri. I årene 2013 igangsatte Naturstyrelsen et modelstrategiprojekt ”Implementering af modeller til brug for vandforvaltningen”, der har til formål at implementere modelværktøjer til brug for vandforvaltningen, herunder vandplanlægningen og vandmiljøovervågningen. Under det samlede modelstrategiprojekt blev DK-modellen bl.a. udbygget på vandløbsnetværket, og forbedret beskrivelse af udveksling mellem grundvand og overfladvand. For nærmere beskrivelse se GEUS rapport 2015/8 ”DK-model2014 Model opdatering og kalibrering” (Højberg et al., 2015).

DK-modellen har efterfølgende bl.a. været anvendt til udvikling af den nationale kvælstofmodel (Højberg et al., 2015 og Troldborg et al. 2018) samt til vurdering af effekten af vandvinding på vandføringer, baseret på øko-hydrologiske indikatorer. (Henriksen et al., 2014). Vandløbsnetværket er yderligere udvidet i 2018 i forbindelse med udstilling af simuleret vandføring på VandWeb.dk, dels for at tilpasse vandløbsmodellen til det opdateret ID15 tema (ID15_180209_release) og dels for at inkludere modeldata for flere ODA stationer med økologiske data (Henriksen et al. 2019).

I nærværende rapport beskrives opstilling, kalibrering og validering af den opdaterede DK-model (version 2019) for hele Danmark. Endelig har denne version (DK-model2019) dannet grundlag for den seneste revision af grundvandsforekomster, som beskrevet i Troldborg et al. (2019), og vurdering af grundvandsforekomsternes kvantitative tilstand i Henriksen et al. (2019).

2.1 Formål

Det primære formål for opdateringen af DK-modellen til version 2019 har været at udbygge den hydrogeologiske model med hydrostratigrafi fra FOHM modellen for Jylland. FOHM modellen for Jylland er en hydrostratigrafisk samling af kortlægningsmodeller på tværs af Jylland udført af MST i 2018-2019. Herudover er tilgængelige (pr. 1 januar 2019) hydrostratigrafiske modeller udført i forbindelse med kortlægningsmodeller på Fyn og øerne, samt Sjælland. Lolland, Falster og Møn blevet udviklet til en samlet hydrostratigrafisk beskrivelse af det hydrogeologiske system for disse områder. Endvidere er der sket mindre opdatering af vand-

løbsnetværket, den vertikale diskretisering af modellag, samt en detaljering og regionalisering af parametre for dræn og vegetation. Denne regionalisering er desuden udnyttet til at foretage en samlet kalibrering for alle delområder DK1 - DK6, som sikrer rumlig konsistente model simuleringer for bl.a. fordampning og grundvandsdannelse.

Generelt kræver DK-modellen som numerisk værktøj en kalibring hver gang der foretages en væsentlig ændring i dens struktur. Når kalibreringen er gennemført foreligger der en ny version af DK-modellen, der bl.a. kan anvendes i forbindelse med Miljøstyrelsens udarbejdelse af vandområdeplaner for den 3. planperiode (VP3). Modelbenyttelsen bliver nærmere beskrevet i næste afsnit.

2.2 Modelbenyttelse

Målet for DK-modellen er at opnå en kvantificering af det hydrologiske kredsløb på national/regional skala med særlig vægt på grundvandssystemet. På baggrund af opdaterede data om indvindingsforhold samt klimaforhold skal modellen simulere vandbalancen og grundvandsdannelsen på overordnet oplandsskala, der skal anvendes til vurdering af den kvantitative status af grundvandsressourcen. For en opgørelse af den udnyttelige grundvandsressource er det imidlertid ikke tilstrækkeligt at se på en simpel vandbalance for grundvandssystemet, idet der skal tages hensyn til flere faktorer. Disse faktorer inkluderer bl.a. indvindingernes påvirkning af det hydrologiske system f.eks. påvirkning af vandløbsafstrømningen og grundvandssænkninger samt begrænsninger i den udnyttelige vandressource som følge af områder med dårlig vandkvalitet og/eller dårlige indvindingsforhold.

Modellen skal derfor være i stand til at beskrive de væsentligste elementer af vandkredsløbet på landfasen og kunne kvantificere betydningen af ændringer i de fysiske forhold, såsom indvindingsstrategi og klima. Det er således vigtigt, at der ikke udelukkende fokuseres på grundvandssystemet, men at hele vandkredsløbet på landfasen betragtes samlet. Under konstruktionen af modellen er der derfor lagt vægt på at opnå en så fysisk korrekt beskrivelse af grundvandsmagasinsystemet (3D) og interaktionen mellem grundvand og overfladevand som muligt. Modellen skal på regionalt niveau kunne belyse relationer mellem konkrete grundvandsmagasiner og de arealer som bidrager til grundvandsdannelsen til disse. Det skal være muligt at belyse ændringer i vandføring samt potentialeforhold og overordnede strømningsforhold som følge af ændret op-pumpning ved større kildepladser samt ændrede klimaforhold.

Modellen vil kunne anvendes i forvaltningsøjemed ved vurdering af de overordnede forhold, som screeningsværktøj samt som hydrologisk referenceramme for videre detailstudier. Modellen er en storskala model og er ikke opstillet eller testet med henblik på anvendelse til f.eks. modelstudier i forbindelse med udarbejdelse af indsatsplaner for grundvandsbeskyttelse (typisk detailstudier af indvindingsoplande og infiltrationsområder) eller til studier af forureningsspredning fra lossepladser og depoter. Modellen kan derfor ikke forventes at være velegnet til sådanne detailstudier på mindre skala. Under modelopbygningen er der dog lagt vægt på, at modellen skal kunne anvendes som udgangspunkt for detailstudier.

Som grundlag for opbygning af DK-modellen er MIKE SHE / MIKE HYDRO River systemet valgt (Abbott et al., 1986a, b; Havnø et al., 1995). MIKE SHE / MIKE HYDRO River er et

deterministisk og fysisk baseret og fuldt distribueret modelkompleks, som beskriver de væsentligste strømningsprocesser i landfasen af det hydrologiske kredsløb. MIKE SHE kan beskrive afstrømning på jordoverfladen (2D), den umættede (1D) og mættede del af grundvandszonen (3D) samt drænvandsafstrømning (2D), mens MIKE HYDRO River giver en 1D beskrivelse af vandløbsstrømningen.

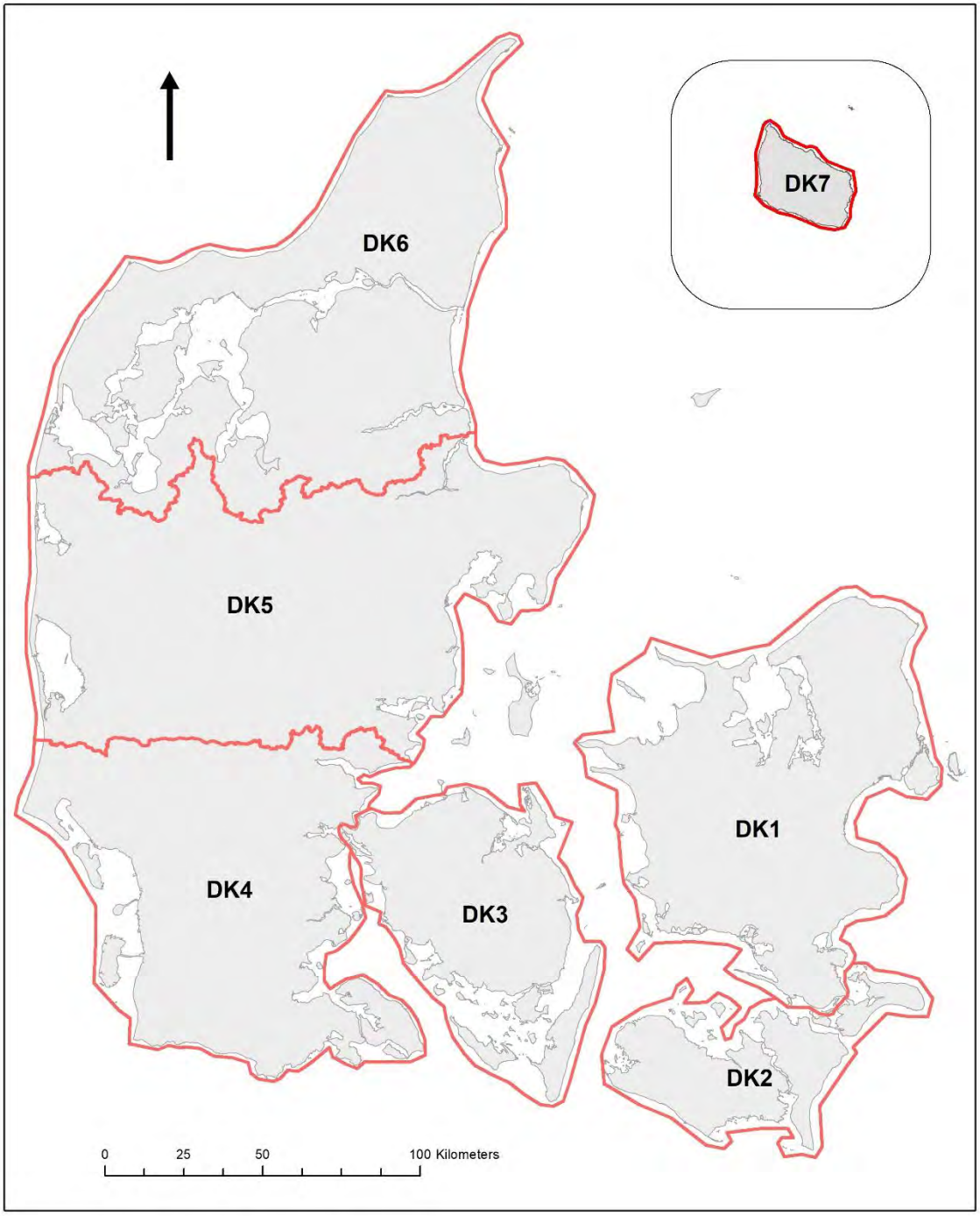
2.3 Beskrivelse af modelområdet

DK-model2019 er opdelt i 7 delmodeller som illustreret på Figur 1. Delmodel 1, 2, 3 og 7 er afgrænset mod hav langs hele periferien, hvor modelranden generelt er placeret 1,5 – 2,5 km med et minimum af 0,5 km fra kysten. Delmodel 4, 5 og 6 har landbaserede modelrande, der er defineret sammenfaldende med topografiske oplande. Delmodelafgrænsning følger primært vandplanernes hovedvandoplande, Figur 1. Afgrænsningen mellem delmodel 5 og 6 følger ikke afgræsningen af hovedvandoplandene, da oplandet til Karup Å indgår i delmodel 5 i stedet for 6. En udvidelse af DK-modellens område 6 så den indeholder Karup Å oplandet er problematisk pga. de hydrauliske forhold. Tidligere studier med DK-model og andre hydrologiske studier, indikerer en vandstrømning over de øst- og vestvendte rande for Karup Å oplandet, som indikeret på Figur 1. Indbygges Karup Å i delområde 6, skal der derfor defineres randbetingelser mellem delmodel 5 og 6, som beskriver hvor stor vandstrømningen over randen er.

Da en grundvandsstrømning over oplande ikke kan måles eller på anden måde direkte verificeres, vil en strømningsrand i en numerisk model være associeret med en betydelig usikkerhed, der vil reducere modellens sikkerhed i forbindelse med simulering af vandbalancen. Den fordel der opnås ved at inkludere Karup Å i DK-modellens område 6 vurderes ikke at kunne retfærdiggøre den ekstra usikkerhed der introduceres herved.

Tabel 1. De syv delmodeller i DK-model2019, landareal for hver delmodel og hovedvandoplande som delmodeller dækker.

Delmodel	Areal (km^2)	Hovedvandopland
1 (Sjælland)	7195	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6
2 (Lolland, Falster, Møn)	2036	2.5, 2.6
3 (Fyn)	3484	1.12, 1.13, 1.14, 1.15
4 (Sønderjylland)	7902	1.10, 1.11, 4.1
5 (Midtjylland)	11551	1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9
6 (Nordjylland)	9943	1.1, 1.2, 1.3
7 (Bornholm)	589	3.1



Figur 1. Afgrænsning af de syv delmodeller i DK-model2019.

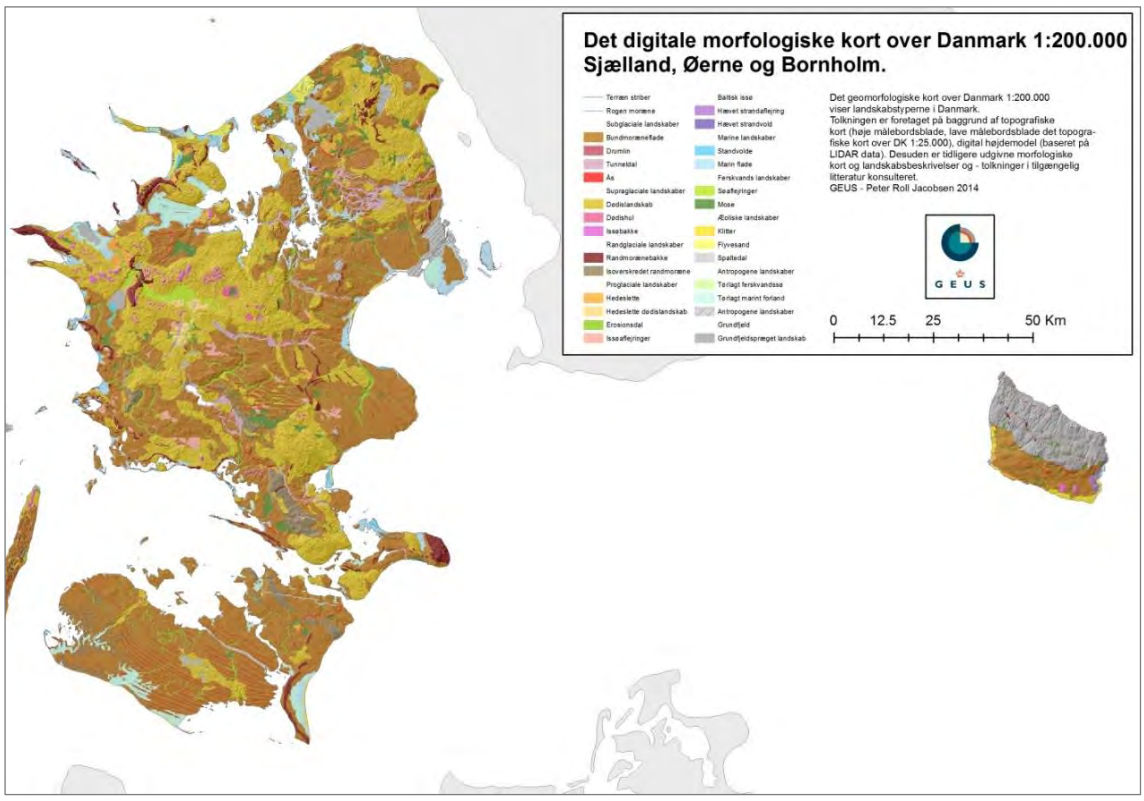
2.4 Grundvandsmagasiner

I Danmark er næsten alt drikkevand baseret på grundvand. I stort set hele landet er det muligt at finde grundvand i dybder fra få meter under jordoverfladen til få hundrede meters dybde, afhængig af hvor man befinder sig. Der er dog store regionale forskelle geologisk set, hvilket er bestemmende for udstrækning og sammenhænge mellem grundvandsmagasiner både lateralt og vertikalt. Geologien er samtidigt styrende for størrelsen af grundvandsdannelse og –strømning og dermed for beskyttelse af og ydelsen fra grundvandsmagasinerne.

Nedenfor er den geologiske opbygning af de forskellige dele af landet gennemgået, med fokus på grundvandsmagasinerne.

2.4.1 Sjælland og øerne

Sjælland, Lolland, Falster og Møn er dækket af kvartære aflejringer fra mindst fire istider med en total tykkelse varierende fra nogle få til godt 100 meters tykkelse. Landskabet er ofte kuperet, dog lokalt med indslag af mindre smeltevandssletter, se Figur 2 og Figur 4.



Figur 2. Morfologisk kort over Sjælland, Øerne og Bornholm.

Størstedelen af den kvartære lagserie udgøres af moræneler med linser og lag af smeltevandssand og -grus i forskellige stratigrafiske niveauer, og ofte er der et dæklag af moræneler af ikke ubetydelig tykkelse, der dels begrænser grundvandsdannelsen, dels beskytter grundvandsmagasiner.

De kvartære grundvandsmagasiner i sand- og gruslag er undertiden i hydraulisk kontakt med de underliggende prækvartære, marine kalkaflejringer fra Kridt, Danien og Paleocæn, der i mange områder udgør de primære magasiner for vandindvindingen.

I Vestsjælland findes marine grønsandsler/mergel-aflejringer oven på kalkaflejringerne, der her indeholder salt grundvand, hvorfor grundvandsindvindinger sker fra overliggende kvartære grus- og sandlag. På Kalundborgegnen og den sydlige del af Lolland findes fede eocæne leraflejringer, hvorfor grundvandet ligeledes kun findes i de kvartære sandlag. I den øvrige del af Sjælland, på Lolland, Falster og Møn har de kvartære sand- og grusaflejringer

en mere underordnet betydning, men udgør lokalt (Søndersødalen og Alnarp dalen) betydningsfulde grundvandsmagasiner.

På Sjælland er kalken gennemsat af brudlinier og dalsystemer med tilhørende knusningszoner, hvoraf den mest kendte er Carlsberg forkastningen. Derudover har isens fremrykning i kvartærtiden hen over kalklagene haft den virkning, at de øverste meter kan være stærkt opsprækkede, hvilket medfører, at magasinerne mange steder er højtydende. De fleste prækvartære magasiner er dækket af moræneler og er oftest spændte

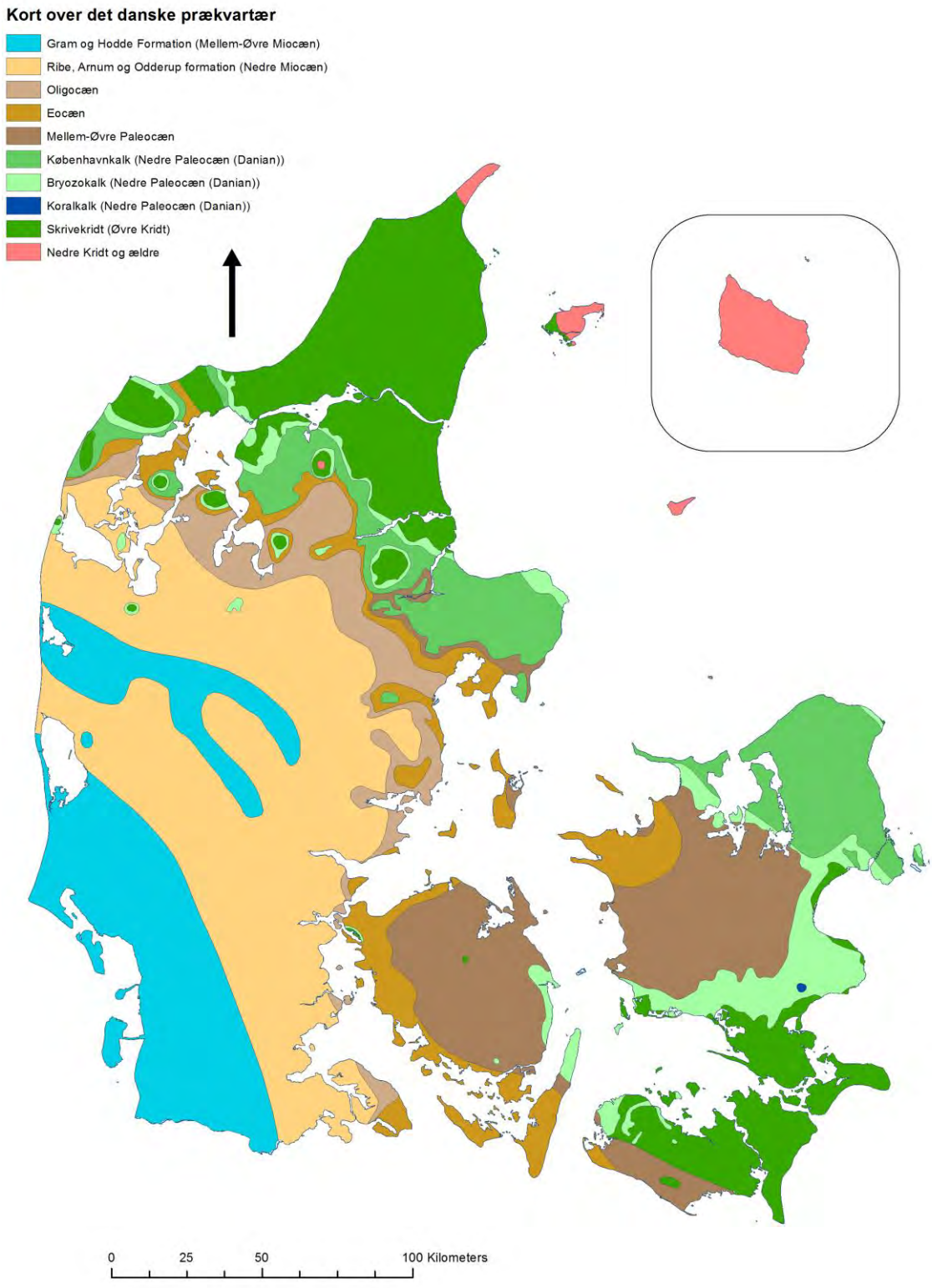
2.4.2 Fyn

Landskabsmæssigt består Fyn hovedsagligt af et svagt bølgende morænelandskab fra sidste istid – Weichel, med randmoræne strøg på det sydlige Fyn (De fynske alper) og på langs af Langeland. Ofte er grundvandsmagasinerne dækket at tykke morænelerslag, se Figur 4.

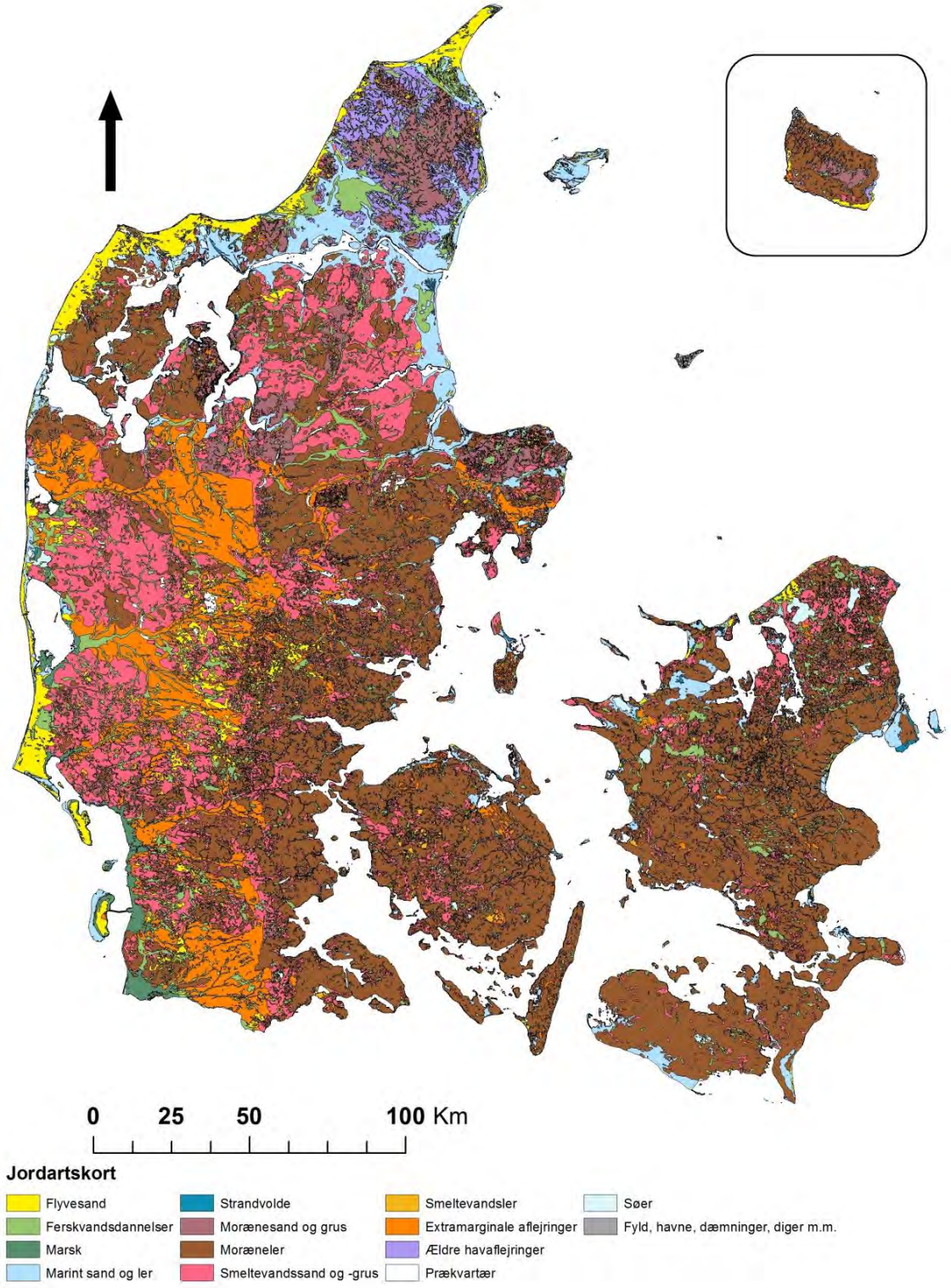
De vigtigste prækvartære grundvandsmagasiner findes i Danienkalken på det østlige Fyn (fra Nyborg mod Svendborg) samt på den nordlige del af Langeland, se Figur 3, og tykkelsen af kalken skønnes til mellem 30 og 80 meter. Danienkalken overlejrer skrivekridtet, der desuden findes i et mindre område syd for Middelfart.

De prækvartære aflejringer er overalt på Fyn dækket af kvartærtidens glaciale sedimenter. Disse består fortrinsvis af moræneler med mindre indslag af morænesand samt af smeltevandssand og –grus. Tykkelsen af de kvartære lag er typisk omkring 40 meter, men kan stedvist overstige 100 meter.

Grundvandsmagasiner af glacialt smeltevandssand og -grus findes de fleste steder på Fyn og tilgrænsende øer. Størstedelen af magasinerne er spændte, dog er sandmagasinerne ved Middelfart overvejende frie, mens der ved Assens og Svendborg findes både spændte og frie magasiner. Den hårde, men opsprækkede Kertemindemergel af paleocæn alder udnyttes i mindre grad til indvinding på Østfyn (mellem Odense og Nyborg), hvor den findes i lagtykkelser op mod 50 m.



Figur 3. Prækvartære formationer i Danmark. Copyright: GEUS



Figur 4. Jordartskort i 1:200.000 for Danmark, copyright: GEUS.

2.4.3 Jylland

Jylland er dækket af kvartære og sen- og postglaciale aflejringer fra alle is- og mellemistider, der kendes fra Danmark. Under de fire kendte istider er der afsat aflejringer med en total tykkelse varierende fra nogle få meter til over 200 meters tykkelse i de dybeste dalstrukturer langs den jyske Vestkyst samt i Nordjylland.

I den vestlige del af Jylland, vest og syd for isens Hovedopholdslinie under sidste istid (Weichsel), er landskabet præget af bakkeøer fra næstsidste istid (Saale). Disse bakkeøer er gennemskåret og omsluttet af hedesletter fra sidste istid – Weichsel, se Figur 4. Bakkeøerne er ældre end landskaberne i de øvrige dele af Jylland og fremtræder med et ringe relief, der er fattig på søer og småbakker. Hedesletterne udgør større sammenhængende grundvandsmagasiner, ofte ubeskyttede og med frit grundvandsspejl, undertiden i kontakt med underliggende tertiære magasiner.

Øst og nord for Hovedopholdslinjen er landskabet domineret af et mere varieret relief bestående af moræneler og -sand med lag af smeltevandssand og –grus i flere niveauer; glaciale grundvandsmagasiner med bedre beskyttelse, men typisk med begrænset udstrækning. De øverste magasiner er ofte dårligt beskyttet, men i denne del af Jylland er der fundet mange begravede dybe dale, Figur 5. Dalene skærer sig ned i de prækvartære aflejringer, og sand- og grusaflejringerne har i disse dale har fået stor betydning for indvindingen af rent drikkevand.

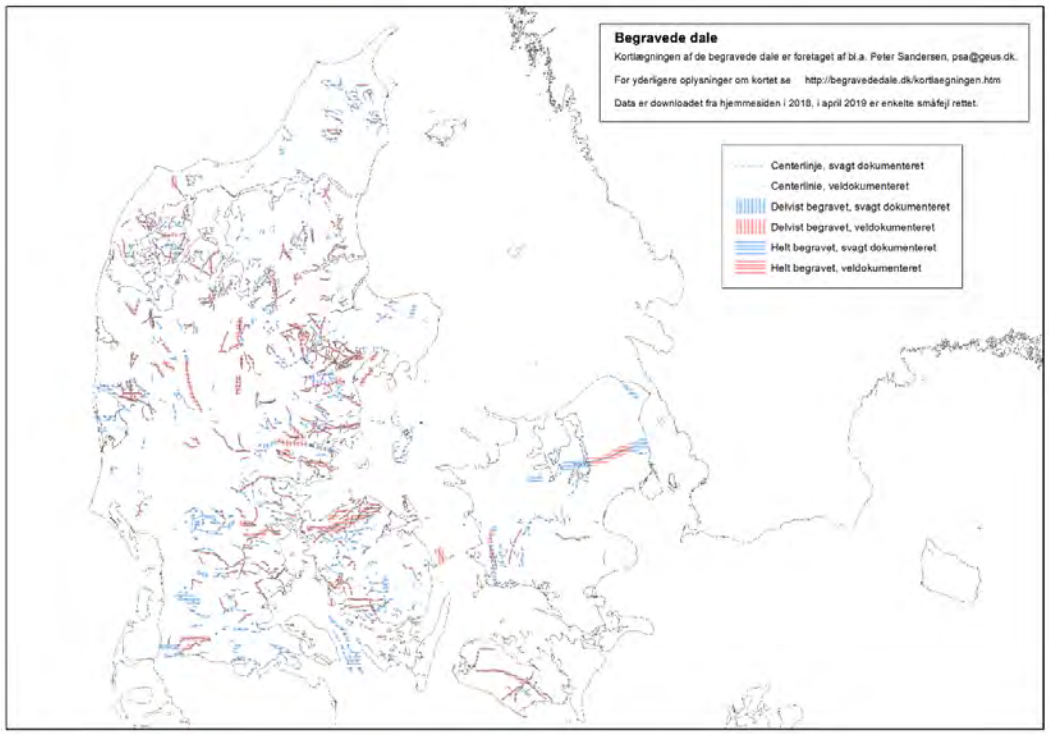
I det nordlige Jylland findes enkelte steder postglaciale sandaflejringer, men de har ofte for dårlig vandkvalitet til at være interessante i indvindingssammenhæng

De vigtigste prækvartære grundvandsmagasiner i kalk udgøres af skrivekridt fra Øvre Kridt og Danienkalken, Figur 3. Disse magasiner findes især omkring Limfjorden, i Himmerland og på Djursland. Aflejringerne er relativt højtliggende mod sydvest og er blotlagt flere steder, mens tykkelse af de overliggende lag stiger mod nordøst mod Skagen, hvor kalken ikke har nogen anvendelse i vandforsyningen. Mod sydvest er kalken overlejret af yngre sedimenter af ler og sand, og kalken udnyttes kun til vandindvinding få steder, hvor salthorste har presset kalklag op som f.eks. i Mønsted. Danienkalken og skrivekridtet har en tykkelse fra under 500 meter til over 2 km. Efter aflejring af kalklagene i Kridt og Paleocæn domineres resten af Tertiærperioden af aflejring af klastiske sedimenter i marine deltamiljøer. Sedimenterne stammer fra nedbrydningen af det Fennoskandiske skjold og er transporteret med store floder mod SSV, hvor de blev aflejret dels på flodsletterne og i deltaer, og dels som brakvands- og havaflejringer. Sedimenterne findes stort set kun i Jylland, da de under istiden blev eroderet bort af gletschere i det østdanske område, Figur 3. De interessante tertiære grundvandsmagasiner er knyttet til aflejringer af mellem- til grovkornet kvartssand, ofte beskyttet af glimmersilt og –ler lag.

De ældste betydende tertiære grundvandsmagasiner findes i Midtjylland i form af Billundsandet, der ofte ligger dybt og endnu ikke er gennemboret ret mange steder. Billundsandet kan lokalt være op til 100 meter tykt, men tykkelsen kan variere kraftigt inden for kort afstand. Et lidt yngre betydeligt grundvandmagasin knytter sig til Ribe Formationen i det sydlige Jylland. Magasinet er dybtliggende, op til 100 m tykt og velbeskyttet og udnyttes mange steder til vandindvinding. Senere følger Bastrupsandet, der nogle steder er aflejret i dybe dale, som

er kraftigt nederoderet i de underliggende sedimenter. Bastrupsandet kan være op til 50 meter tykt og findes i det meste af Syd- og Midtjylland.

Yngste betydende tertiære grundvandsmagasiner findes i Odderup Formationen med bl.a. dannelse af brunkulsaflejringer; denne formationen findes i størstedelen af Jylland og kan være op til 50 meter tyk. Hvor Odderup Formation er højtliggende i det centrale Jylland, kan magasinerne være dårligt beskyttede, men er stadigt vigtige i indvindingssammenhæng.



Figur 5. Kortlagte begravede dale i Danmark.

2.4.4 Bornholm

Bornholm blev som resten af Danmark dækket af gletschere gennem kvartærtiden, men der er kun stedvist afsat glaciale sedimenter af betydning. Geologisk set er øen meget forskellig fra resten af Danmark, da der under de tynde glaciale sedimenter findes meget gamle bjergarter, mens de, der tidsmæssigt passer med f.eks. skrivekridtet, har en helt anden karakter og er domineret af klastiske bjergarter, se også Figur 2.

Grundvandsmagasinerne på Bornholm kan overordnet opdeles i tre typer. Dels de sedimentære uhærdede bjergarter på den vestlige del af øen (f.eks. Robbedale Formationen, Arnager Grønsand og Bavnodde Grønsand, alle af kretasisk alder), dels de hærdede, men opsprækkede sedimentære bjergarter på den sydøstlige del af øen (Nexø Sandsten, Balkan Sandsten og Grønne skifre, alle af kambrisk alder, og enkelte steder sorte alunskifre fra Silur). På den nordøstlige del af øen forefindes grundvandet typisk i mindre, lavtydende magasiner i opsprækkede krystaline bjergarter, prækambriske granitter og gnejser, i tæt samspil med overliggende kvartære sandaflejringer.

3. Hydrogeologisk tolkningsmodel

Opstilling af en hydrogeologisk tolkningsmodel er i princippet en vurdering af de væsentligste strømningskarakteristika for grundvandssystemet på den skala for hvilken modellen er opsat og skal anvendes på. En numerisk grundvandsmodel forudsætter en opdeling på beregningslag og -kasser, uanset at forholdene i visse områder er meget komplekse f.eks. i randmoræneområder. En hydrogeologisk tolkningsmodel skal belyse de antagelser og den viden, der ligger til grund for fastlæggelsen af de strømningsmæssige forhold. Vigtige elementer i den hydrogeologiske tolkningsmodel er:

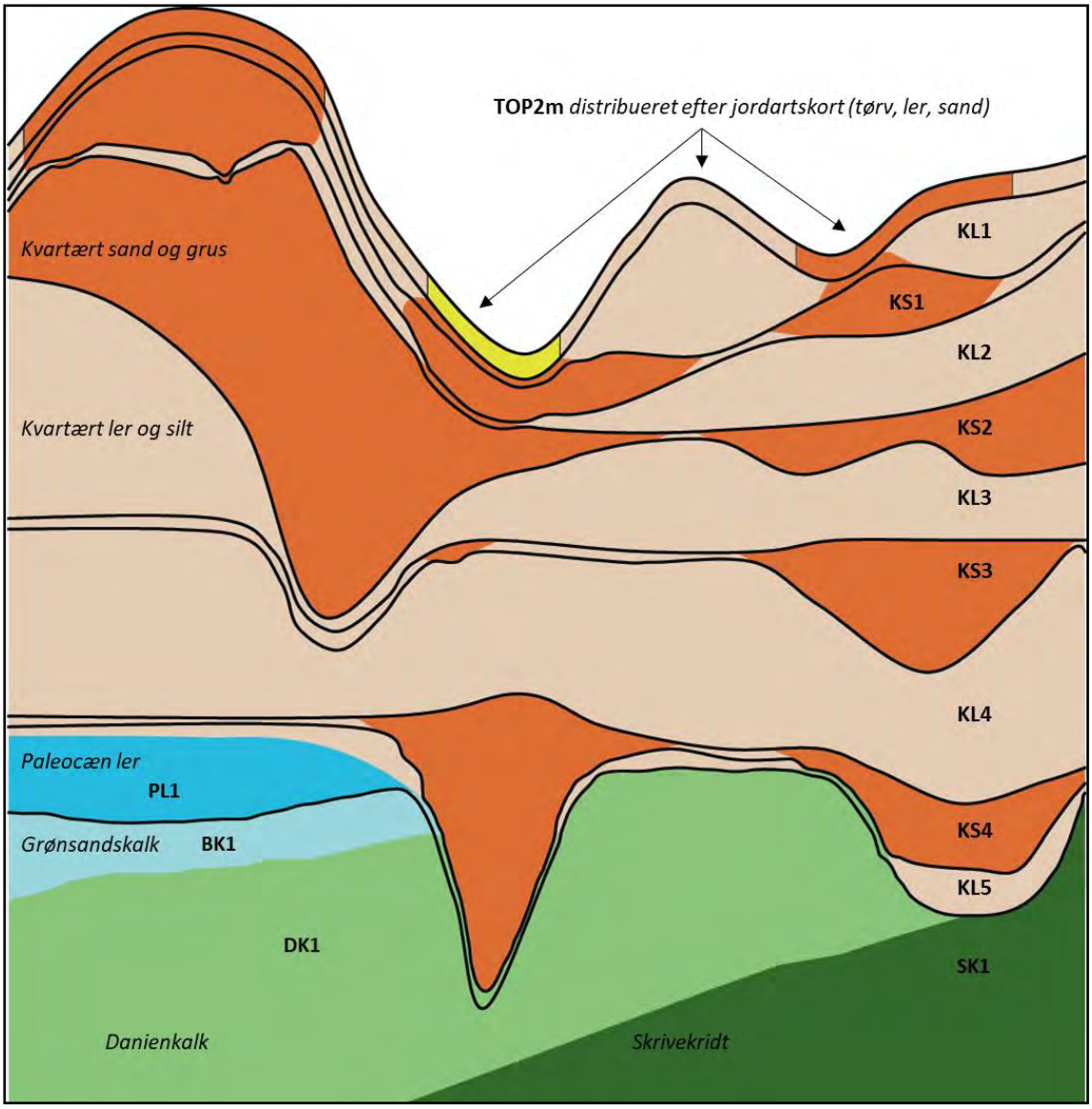
1. Den hydrostratigrafiske model, der beskriver den rumlige fordeling af hydrostratigrafiske enheder karakteriseret ved deres hydrauliske egenskaber. Hydrostratigrafiske enheder repræsenter således en eller flere geologiske enheder med samme hydrauliske karakteristika, der er slået sammen til en enhed med samme hydrauliske egenskaber.
2. Udveksling med omgivelserne, der indbygges som randbetingelser i modellen, og kan være enten ydre randbetingelser, hvor udvekslingen over randen beskrives, eller indre randbetingelser, såsom udveksling med vandløb samt indvindingsforhold.

Opstillingen af den hydrogeologiske tolkningsmodel tager udgangspunkt i FOHM sammenlægningerne for så vidt angår Jylland (MST 2020). For Fyn og øerne samt Sjælland, Lolland, Falster og Møn er der taget udgangspunkt i DK-model2014, med efterfølgende indarbejdelser af alle kortlægningsmodeller frem til og med 2018. Der er ikke sket en opdatering af den hydrogeologiske model for Bornholm siden DK-model2009 (Troldborg et al. 2009 og Nyegaard et al. 2010).

3.1 Sjælland, Lolland, Falster og Møn

Den geologiske forståelsesmodel for magasinforholdene på Sjælland, Lolland, Falster og Møn består af sandlinser i fire niveauer for kvartæret og prækvartære kalkaflejringer fra Senkridt og Danien. Datagrundlaget samt fremgangsmetoden for konstruktion af de hydrostratigrafiske lag er nærmere beskrevet i Bilag 1.

Den hydrostratigrafiske model for Sjælland, Lolland, Falster og Møn er opbygget med samme antal lag som den geologiske forståelsesmodel. Den hydrostratigrafiske model indeholder således i alt 12 flader. Figur 6 viser en principskitse for den hydrostratigrafiske model, mens Tabel 2 giver en beskrivelse af de enkelte lag. De lavpermeable kvartære ler enheder består overvejende af moræneler. I visse områder indgår desuden interglacialt, senglacialt og postglacialt ferskvandsler, samt interglacialt marint ler i disse enheder. De paleocæne og eocæne lavpermeable enheder, Lillebæltsler, Røsnæsler og Kerteminde Mergel og de prækvartære vandførende enheder er zoneret ind i det prækvartære lag.



Figur 6. Principskitse af de hydrostratigrafiske enheder og beregningslag for modellen for Sjælland, Lolland, Falster og Møn.

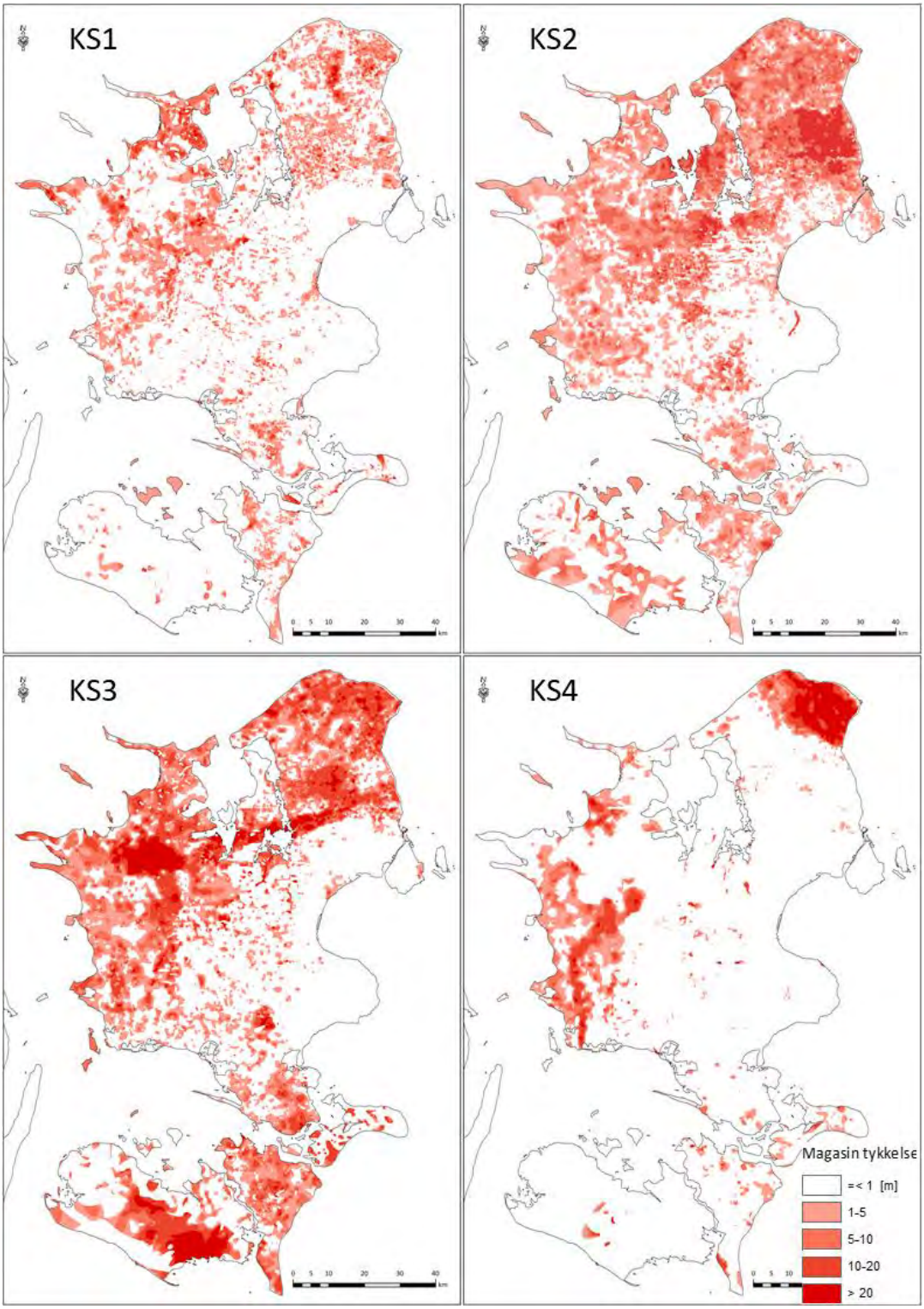
Tabel 2. Oversigt over de hydrostratigrafiske – og beregningslag for Sjælland, Lolland, Falster og Møn.

Beregningslag	Navn	Topflade	Bundflade	Beskrivelse
1	Top2m	dkms_topo	dkms_top2m	Det øvre toplag. Strækker sig fra terræn 2 meter ned. Laget er opdelt i sand, ler og tørv, defineret på basis af jordartskortet.
2	KL1	dkms_top2m	dkms_ks1t	Øvre kvartære ler enhed, strækker sig fra bund af Top2m og ned til top af sand 1 (ks1t).
3	KS1	dkms_ks1t	dkms_ks1b	Det øverste sandlag/linser, udgør mindre højtliggende magasiner, der ofte ikke er sammenhængende.
4	KL2	dkms_ks1b	dkms_ks2t	Kvartært ler, ofte af regional udbredelse, adskiller KS1 og KS2.
5	KS2	dkms_ks2t	dkms_ks2b	Dybereliggende magasin, ofte regional udbredelse.
6	KL3	dkms_ks2b	dkms_ks3t	Kvartært ler, ofte af regional udbredelse, adskiller KS2 og KS3.
7	KS3	dkms_ks3t	dkms_ks3b	Dybereliggende magasin, ofte regional udbredelse. Generelt det nederste kvartære magasin, med undtagelse af områder med dybe formationer, ofte dale.
8	KL4	dkms_ks3b	dkms_ks4t	Kvartært ler, ofte af regional udbredelse, adskiller KS3 og KS4.
9	KS4	dkms_ks4t	dkms_ks4b	Dybe sandforekomster, ofte i dybe dale. Kan være i hydraulisk kontakt med prækvartæret.
10	KL5 (*)	dkms_ks4b	dkms_preq	Kvartært ler, adskiller KS4 og prækvartæret.
10	PL1 (*)	dkms_preq	dkms_pl1b	Prækvartært ler. Laget genfindes primært fra Midtsjælland og mod vest.
11	BK1	dkms_pl1b (dkms_kalk)	dkms_bk1b	Grønsandskalk aflejringer. Laget er ikke tolket overalt i området. (**)
11	DK1	dkms_bk1b	dkms_dk1b	Danien kalk aflejringer. Laget er ikke tolket overalt i området. (**)
11	SK1	dkms_dk1b	dkms_bund	Skrivekridt aflejringer. Laget er ikke tolket overalt i området. (**)

(*) Laget er i beregningsmodellen slået sammen.

(**) Laget i beregningsmodellen indeholder alle kalkaflejringer (BK1+DK1+SK1). De hydrauliske egenskaber for det samlede kalklag i DK-modellen er initialt distribueret ud fra estimater af transmissivitet baseret på Jupiterdata. Bunden af kalklaget i DK-modellen (dkms_bund) er sat til 50m under toppen af kalken (dkms_pl1b).

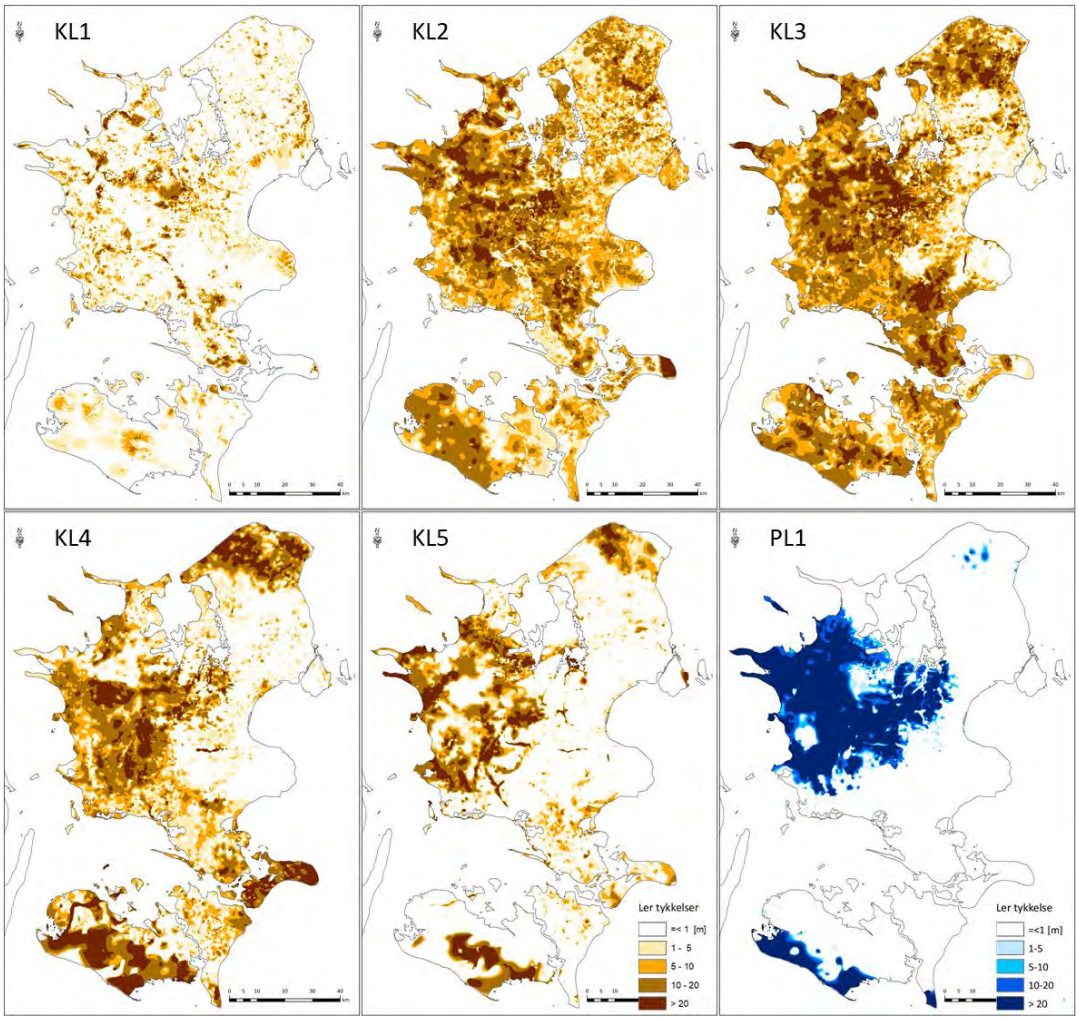
Modellernes sandenheder består overvejende af smeltevandssand og -grus. For sandenhederne findes der relativt få pumpetest data samt specifik ydelse. Datagrundlaget er ikke vurderet tilstrækkeligt til at foretage en interpolation af de hydrauliske ledningsevner inden for de enkelte sandlegemer. I stedet antages den hydrauliske ledningsevne for enhederne at være konstant. Denne kraftige simplificering medfører, at variationen i transmissiviteten udelukkende afhænger af tykkelsen af den vandførende enhed. Udbredelsen af de vandførende enheder i de fire niveauer er vist i Figur 7. Kalk laget har en fast mægtighed på 50 m i hele modelområdet.



Figur 7. Udbredelse og tykkelse af kvartære sandmagasiner for delmodel 1 (Sjælland) og delmodel 2 (Lolland, Falster, Møn).

For lavpermeable enheder er den vertikale hydrauliske ledningsevne den vigtigste parameter, hvorimod den horisontale ledningsevne har mindre betydning. Den vertikale hydrauliske ledningsevne afhænger bl.a. af forekomsten af sprækker og sandvinduer. Da udbredelsen af sprækker og sandvinduer imidlertid ikke kendes i detaljer, er det i modellen antaget at leret

har en ensartet horisontal og vertikal hydrauliske ledningsevne i hele området. Der er ikke taget hensyn til, at smeltevandsler har en lavere hydraulisk ledningsevne end f.eks. moræneler eller at visse sekvenser af moræneler kan være mere lavpermeable end andre. Udbredelse og tykkelse af Kvartært ler over, mellem og under de tre niveauer af sandlegemerne og Prækvartært ler over kalken fremgår af Figur 8.



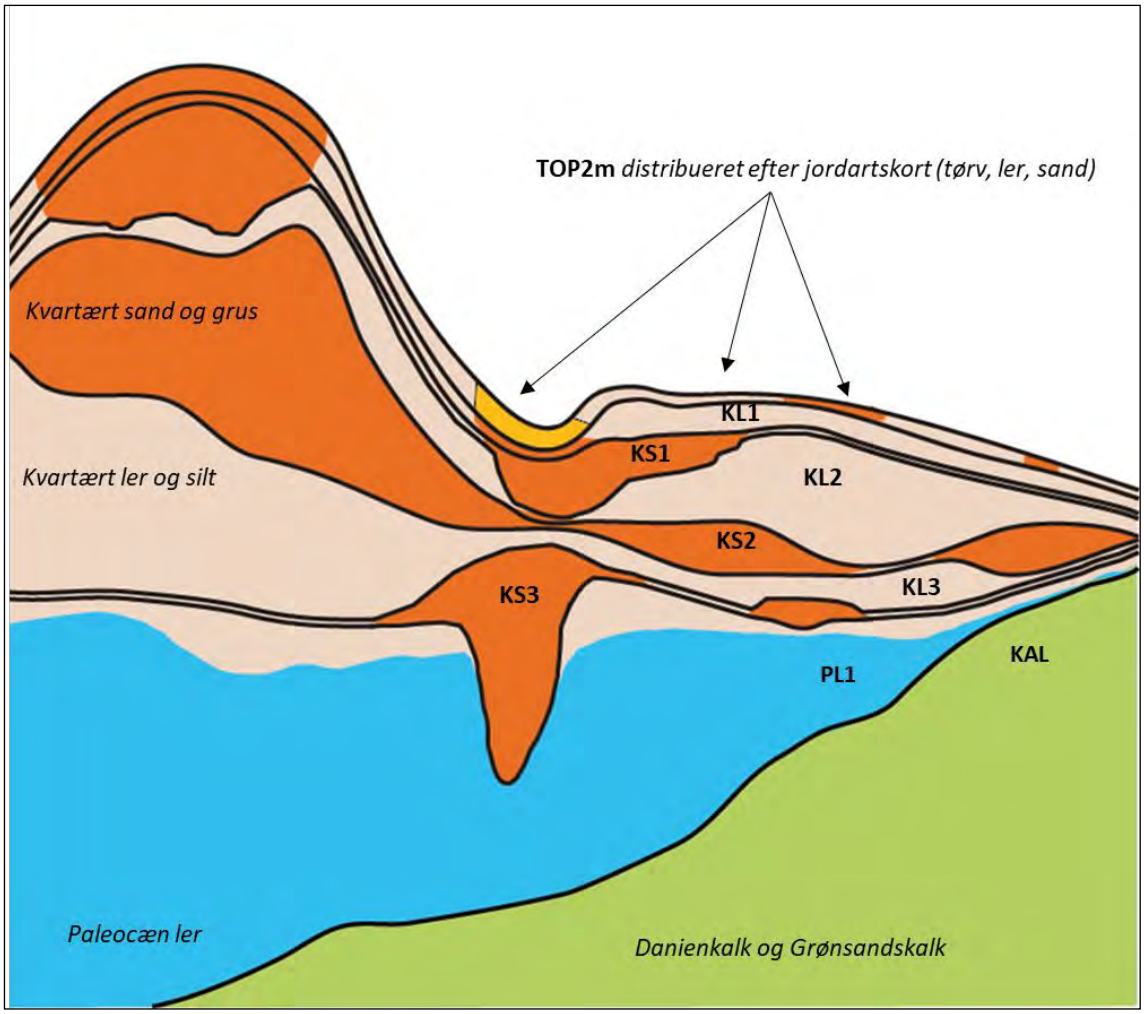
Figur 8. Udbredelse og tykkelse af ler for delmodel 1 (Sjælland) og delmodel 2 (Lolland, Falster, Møn).

3.2 Fyn

Den geologiske forståelsesmodel for magasinforholdene på Fyn består af sandlinser i fire niveauer for kvartæret og prækvartære kalkaflejringer fra Senkridt og Danien. Datagrundlaget samt fremgangsmetoden for konstruktion af de hydrostratigrafiske lag er nærmere beskrevet i Bilag 1.

Den hydrostratigrafiske model for Fyn er opbygget med samme antal lag som den geologiske forståelsesmodel. Den hydrostratigrafiske model indeholder således i alt 10 enheder og 12 flader (inkl. topografi og bund). Figur 9 viser en principskitse for den hydrostratigrafiske mo-

del, mens Tabel 3 giver en beskrivelse af de enkelte lag. De lavpermeable kvartære ler enheder består overvejende af moræneler. I visse områder indgår desuden interglacialt, senglacialt og postglacialt ferskvandsler, samt interglacialt marint ler i disse enheder. De paleocæne og eocæne lavpermeable enheder, Lillebæltsler, Røsnæsler og Kerteminde Mergel og de prækvartære vandførende enheder er zoneret ind i det prækvartære lag.



Figur 9. Principskitse af de hydrostratigrafiske enheder og beregningslag for modellen for Fyn og øerne.

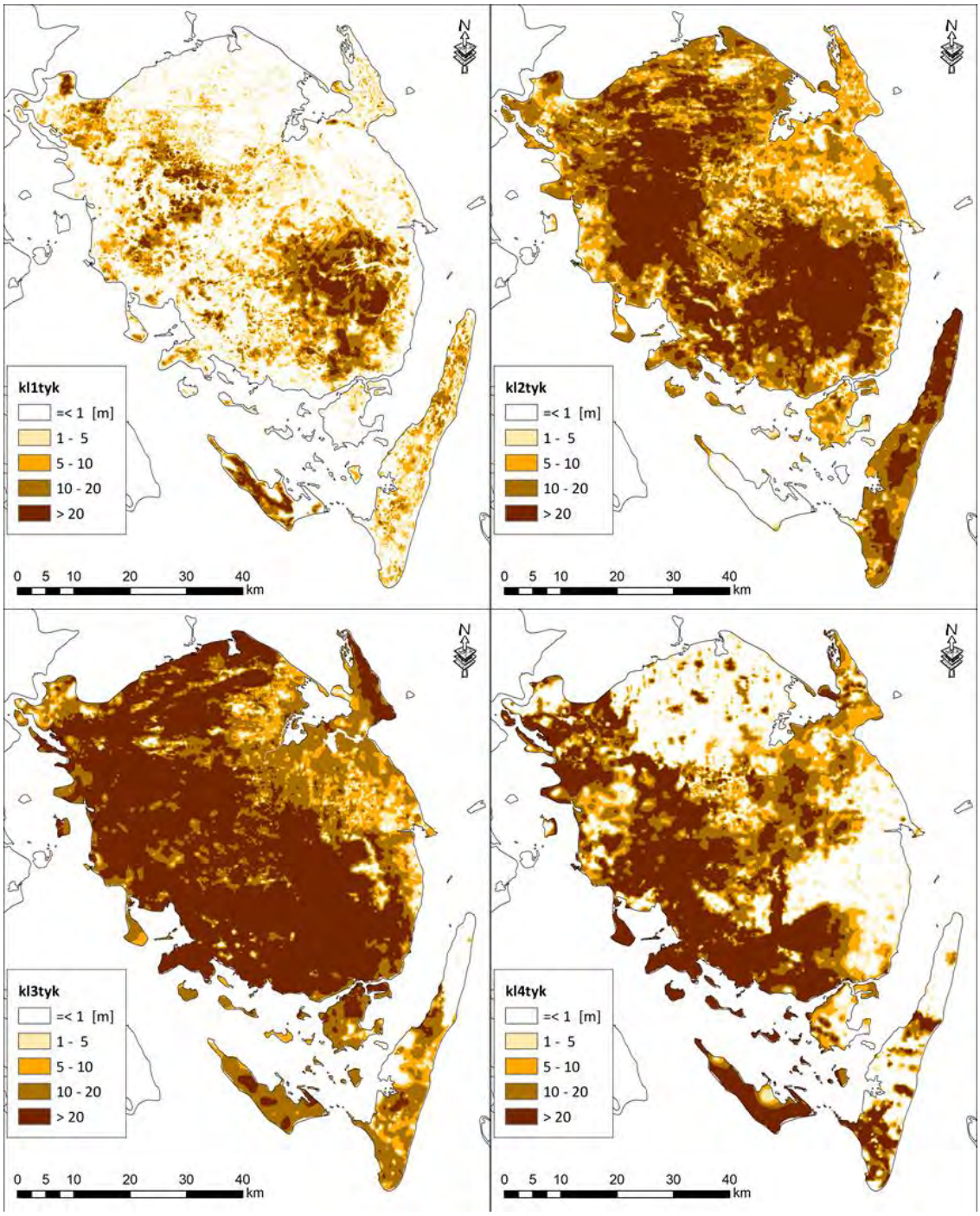
Tabel 3. Oversigt over de hydrostratigrafiske – og beregningslag for Fyn og sydhavsøerne

Beregningslag	Navn	Topflade	Bundflade	Beskrivelse
1	Top2m	dkmf_topo	dkmf_top2m	Det øvre toplag. Ler, sand og tørv defineret på basis af jordartskortet. Leret regnes for opsprækket og har således en højere hydraulisk ledningsevne end det øvrige ler i modellen.
2	KL1	dkmf_top2m	dkmf_ks1t	Øvre kvartære ler enhed, strækker sig fra bund af top2m og ned til top af sand 1 (ks1t).
3	KS1	dkmf_ks1t	dkmf_ks1b	Det øverste sandlag/linser, udgør mindre højtliggende magasiner, der ofte ikke er sammenhængende.
4	KL2	dkmf_ks1b	dkmf_ks2t	Kvartært ler, ofte af regional udbredelse, adskiller KS1 og KS2.
5	KS2	dkmf_ks2t	dkmf_ks2b	Dybereliggende magasin, ofte regional udbredelse.
6	KL3	dkmf_ks2b	dkmf_ks3t	Kvartært ler, ofte af regional udbredelse, adskiller KS1 og KS2.
7	KS3	dkmf_ks3t	dkmf_ks3b	Dybereliggende magasin, ofte regional udbredelse. Generelt det nederste kvartære magasin, med undtagelse af områder med dybe formation, ofte dale. Kan være i hydraulisk kontakt med prækvartæret.
8	KL4 (*)	dkmf_ks3b	dkmf_preq	Kvartært ler, adskiller KS3 og prækvartæret.
8	PL1 (*)	dkmf_preq	dkmf_pl1b	Prækvartært ler.
9	KAL	dkmf_pl1b (dkmf_kalk)	dkmf_bund	Prækvartære kalkaflejringer, primært bestående af Grøndsandskalk og Danien kalk. (**)

(*) Lagene er i beregningsmodellen slået samme.

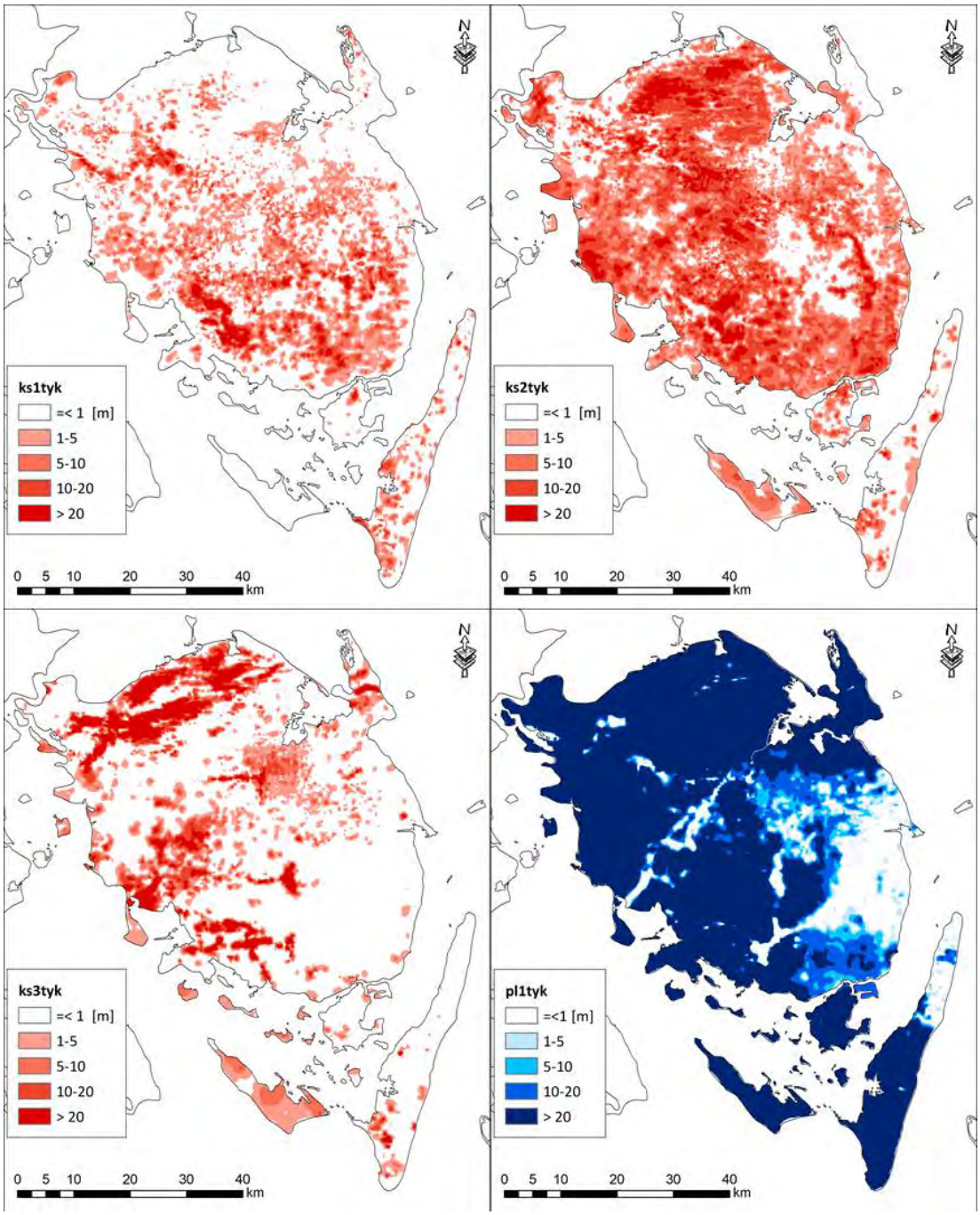
(**) De hydrauliske egenskaber for laget er initialt distribueret ud fra estimater af transmissivitet baseret på Jupiterdata. Bunden af kalklaget i DK-modellen (dkmf_bund) er sat til 50m under toppen af kalken (dkmf_pl1b). Den vandførende del af kalken optræder primært på de østlige dele af Fyn.

For lavpermeable enheder er den vertikale hydrauliske ledningsevne den vigtigste parameter, hvorimod den horisontale ledningsevne har mindre betydning. Den vertikale hydrauliske ledningsevne afhænger bl.a. af forekomsten af sprækker og sandvinduer. Da udbredelsen af sprækker og sandvinduer imidlertid ikke kendes i detaljer, er det i modellen antaget at leret har en ensartet horisontal og vertikal hydrauliske ledningsevne i hele området. Der er ikke taget hensyn til, at smeltevandsler har en lavere hydraulisk ledningsevne end f.eks. moræneler eller at visse sekvenser af moræneler kan være mere lavpermeable end andre. Udbredelse og tykkelse af Kvartært ler over, mellem og under de tre niveauer af sandlegemerne og Prækvartært ler over kalken fremgår af Figur 10.



Figur 10. Udbredelse og tykkelse af ler for delmodel 3 (Fyn).

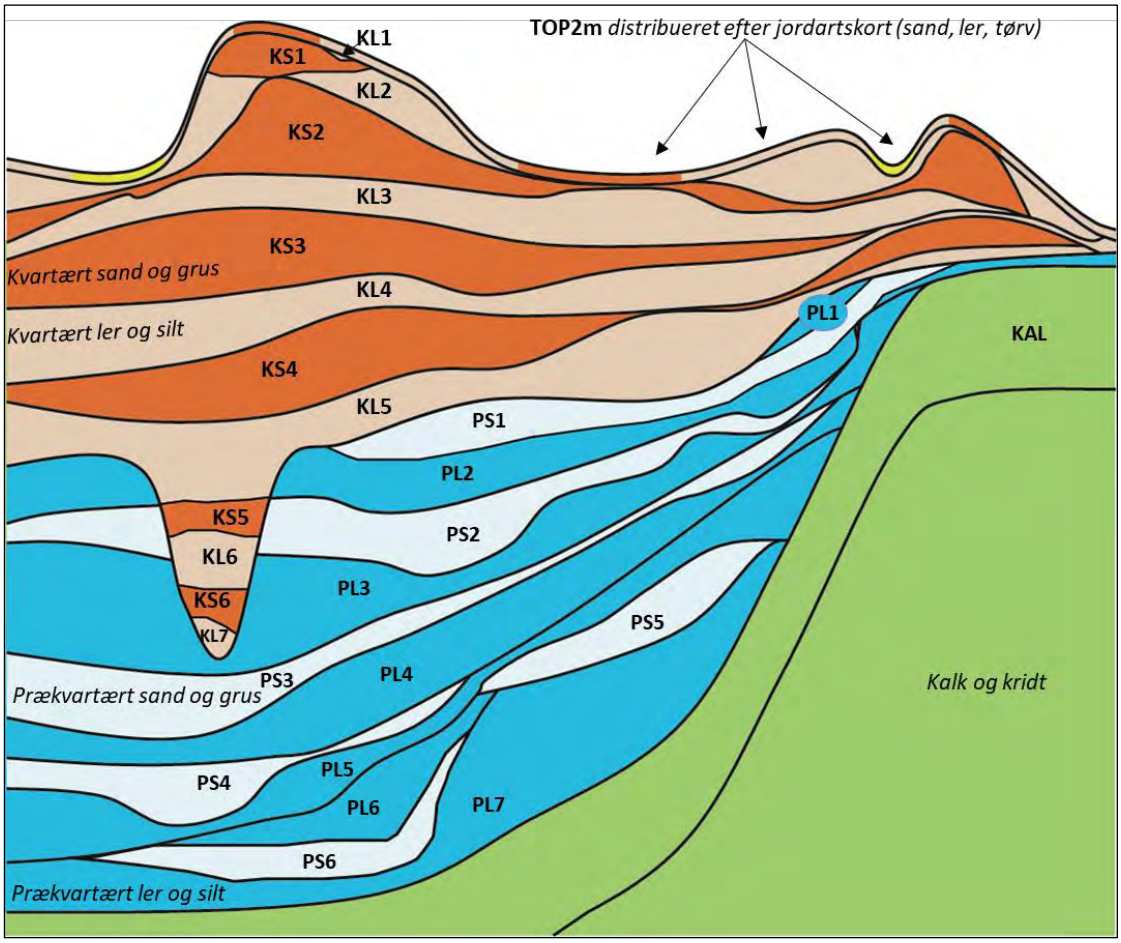
Modellernes sandenheder består overvejende af smeltevandssand og -grus. For sandenhederne findes der relativt få pumpetest data samt specifik ydelse. Datagrundlaget er ikke vurderet tilstrækkeligt til at foretage en interpolation af de hydrauliske ledningsevner inden for de enkelte sandlegemer. I stedet antages den hydrauliske ledningsevne for enhederne at være konstant. Denne kraftige simplificering medfører, at variationen i transmissiviteten udelukkende afhænger af tykkelsen af den vandførende enhed. Udbredelsen af de vandførende enheder i de tre niveauer er vist i Figur 11. Kalk laget har en fast mægtighed på 50 m i hele modelområdet.



Figur 11. Udbredelse og tykkelse af kvartære sandmagasiner (ks1-ks3) og prækvartært ler (nederst højre) for delmodel 3 (Fyn).

3.3 Jylland

Den geologiske forståelsesmodel for magasinforholdene i Jylland består af sandlinser i seks niveauer for kvartæret og seks niveauer for prækvartæret, samt vandførende prækvartære kalkaflejringer fra Senkridt og Danien. Figur 12 viser en principskitse for den hydrostratigrafiske model.



Figur 12. Principskitse for de hydrostratigrafiske enheder for Jylland.

Datagrundlaget samt fremgangsmetoden for konstruktion af de hydrostratigrafiske lag for Jylland er nærmere beskrevet i FOHM projektet (MST, 2020). FOHM modellen indeholder dagens dato en maksimal stratigrafi på 45 enheder, men i arbejdet med at indarbejde FOHM stratigrafien i DK-modellen blev antallet af prækvartære enheder reduceret, således at magasin enheder som var afgrænset inden for samme kote niveau, men ikke havde overlap, blev samlet til en enhed i DK-model stratigrafien. For eksempel indeholder FOHM maksimal stratigrafien seks Billund magasin enheder, som i DK-model stratigrafien er samlet til to magasin enheder. Den samlede DK-model hydrostratigrafi indeholder 28 enheder, fremgangsmetoden for konstruktion af de hydrostratigrafiske lag for DK-model Jylland er nærmere beskrevet i Bilag 1. Tabel 4 indeholder en oversigt over DK-modellens hydrostratigrafiske lag for Jylland og lagenes relation til FOHM maksimal stratigrafi navngivning.

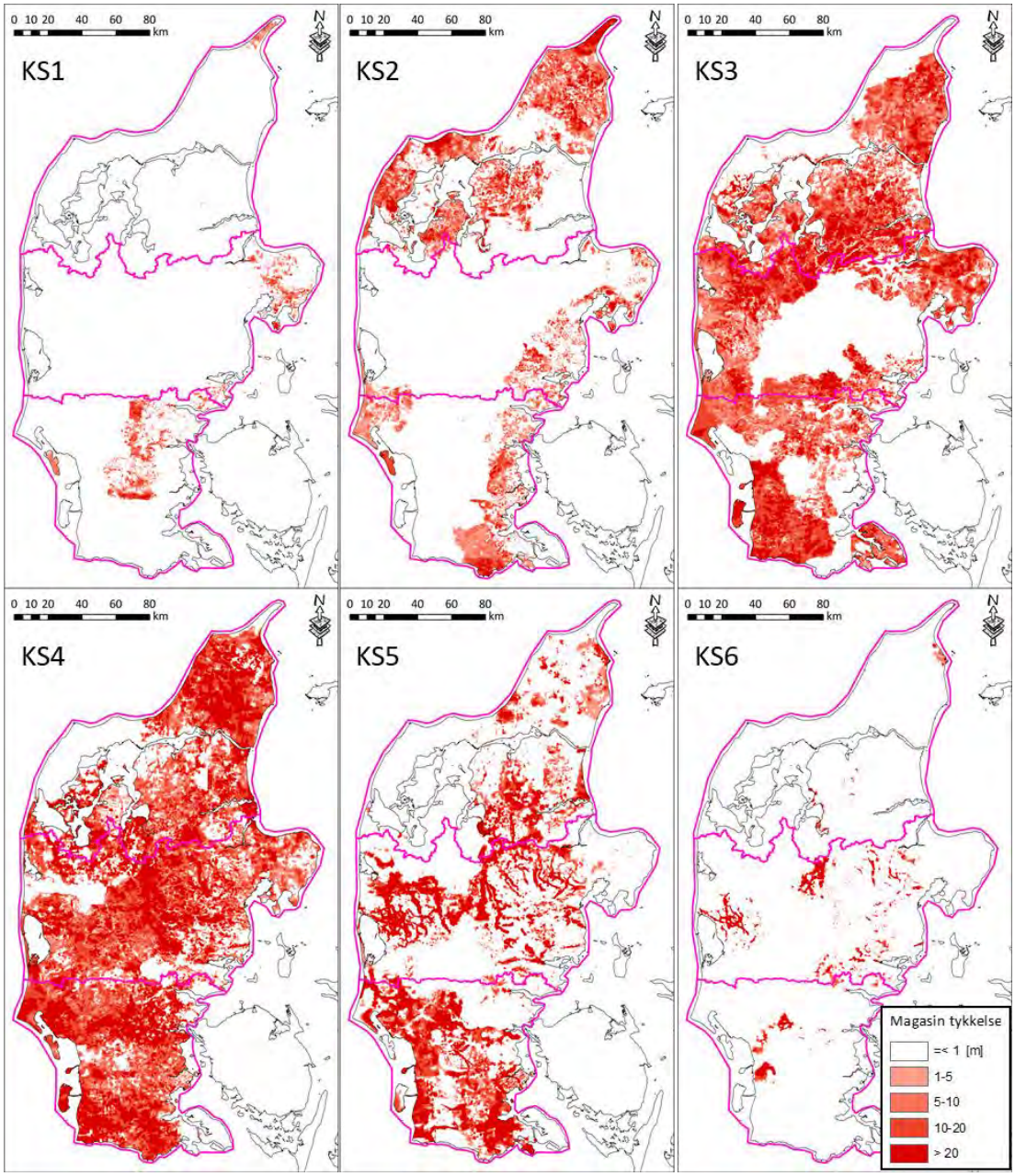
Tabel 4. Oversigt over hydrostratigrafiske- og beregningslag samt FOHM flader for Jylland

Beregningslag DK4+5/DK6	Navn	Topflade	Bundflade	Bemærkninger (FOHM enheds beskrivelse)	FOHM bundflade
1	TOP2m	dkmj_Topo	dkmj_top2m	Det øvre toplag. Ler, sand og tørv defineret på basis af jordartskortet. Leret regnes for opsprækket og har således en højere hydraulisk ledningsevne end det øvrige ler i modellen.	
2	KL1	dkmj_top2m	dkmj_ks1t	Top_toerv (terrænnært)	100_Postglacial_toerv_Bund
3	KS1 (*)	dkmj_ks1t	dkmj_ks1b	S1_Sand (terrænnært)	200_Kvartaer_sand_Bund
3	KL2 (*)	dkmj_ks1b	dkmj_ks2t	L1_Ler (terrænnært)	300_Kvartaer_ler_Bund
3	KS2 (*)	dkmj_ks2t	dkmj_ks2b	S2_Sand (terrænnært)	400_Kvartaer_sand_Bund
4	KL3	dkmj_ks2b	dkmj_ks3t	L2_Ler (Plateau_terrænnært)	1100_Kvartaer_ler_Bund
5	KS3	dkmj_ks3t	dkmj_ks3b	S3_Sand (Plateau)	1200_Kvartaer_sand_Bund
6	KL4	dkmj_ks3b	dkmj_ks4t	L3_Ler (Plateau)	1300_Kvartaer_ler_Bund
7	KS4	dkmj_ks4t	dkmj_ks4b	S4_Sand (Plateau)	1400_Kvartaer_sand_Bund
8	KL5	dkmj_ks4b	dkmj_ks5t	L4_Ler (Plateau/Dale)	1500_Kvartaer_ler_Bund
9	KS5 (*)	dkmj_ks5t	dkmj_ks5b	S5_Sand (Dale)	2100_Kvartaer_sand_Bund
9	KL6 (*)	dkmj_ks5b	dkmj_ks6t	L5_Ler (Dale)	2200_Kvartaer_ler_Bund
9	KS6 (*)	dkmj_ks6t	dkmj_ks6b	S6_Sand (Dale)	2300_Kvartaer_sand_Bund
10	KL7 (*)	dkmj_ks6b	dkmj_preq	L6_Ler (Dale)	2400_Kvartaer_ler_Bund
10	PL1 (*)	dkmj_preq	dkmj_ps1t	Måde gruppen	5100_Maadegruppen_Gram_og_Hodde_Bund
11	PS1	dkmj_ps1t	dkmj_ps1b	Odderup (ODS3/ODS2)	5400_Nedre_Odderup_ODS2_Bund
12 / 12	PL2 (+)	dkmj_ps1b	dkmj_ps2t	Arnum (ARL2)	5500_Nedre_Arnum_ARL2_Bund
13 / 12	PS2 (+)	dkmj_ps2t	dkmj_ps2b	Bastrup (BADS6/BADS5)	5800_Bastrup_BADS5_Bund
14 / 12	PL3 (+)	dkmj_ps2b	dkmj_ps3t	Klintinghoved (KRL5)	5900_Klintinghoved_KRL5_Bund
15 / 13	PS3	dkmj_ps3t	dkmj_ps3b	Bastrup (BADS4)	6000_Bastrup_BADS4_Bund
16 / 14	PL4	dkmj_ps3b	dkmj_ps4t	Klintinghoved (KRL4)	6100_Klintinghoved_KRL4_Bund
17 / 15	PS4	dkmj_ps4t	dkmj_ps4b	Bastrup (BADS3/BADS2/BADS1)	6600_Bastrup_BADS1_Bund
18 / 16	PL5	dkmj_ps4b	dkmj_ps5t	Klintinghoved (KRL1) /Vejle Fjord (VFL9/VFL8/VFL7/VFL5)	6700_Klintinghoved_KRL1_Vejle_Fjord_Bund
19 / 16	PS5	dkmj_ps5t	dkmj_ps5b	Billund (BDS6/BDS9)	6800_Billund_BDS6_BDS9_Bund
20 / 16	PL6	dkmj_ps5b	dkmj_ps6t	Vejle Fjord (VFL6)	6900_Vejle_Fjord_VFL6_Bund
21 / 17	PS6	dkmj_ps6t	dkmj_ps6b	Billund (BDS4/BDS5/BDS3/BDS2 /BDS1/BDS0)	7800_Billund_BDS0_Bund
22 / 18	PL7 (*)	dkmj_ps6b	dkmj_pa1b	Vejle Fjord Fm (VFL0) / Brejning ler/Palæogen	8000_Palaeogen_ler_Bund
22 / 18	KAL (*)	dkmj_pa1b	dkmj_dk1b	kalk	8500_Danien_Kalk_Bund
22 / 18	KAL (*)	dkmj_dk1b	dkmj_sk1b	Skrivekridt	9000_Skrivekridt_Bund

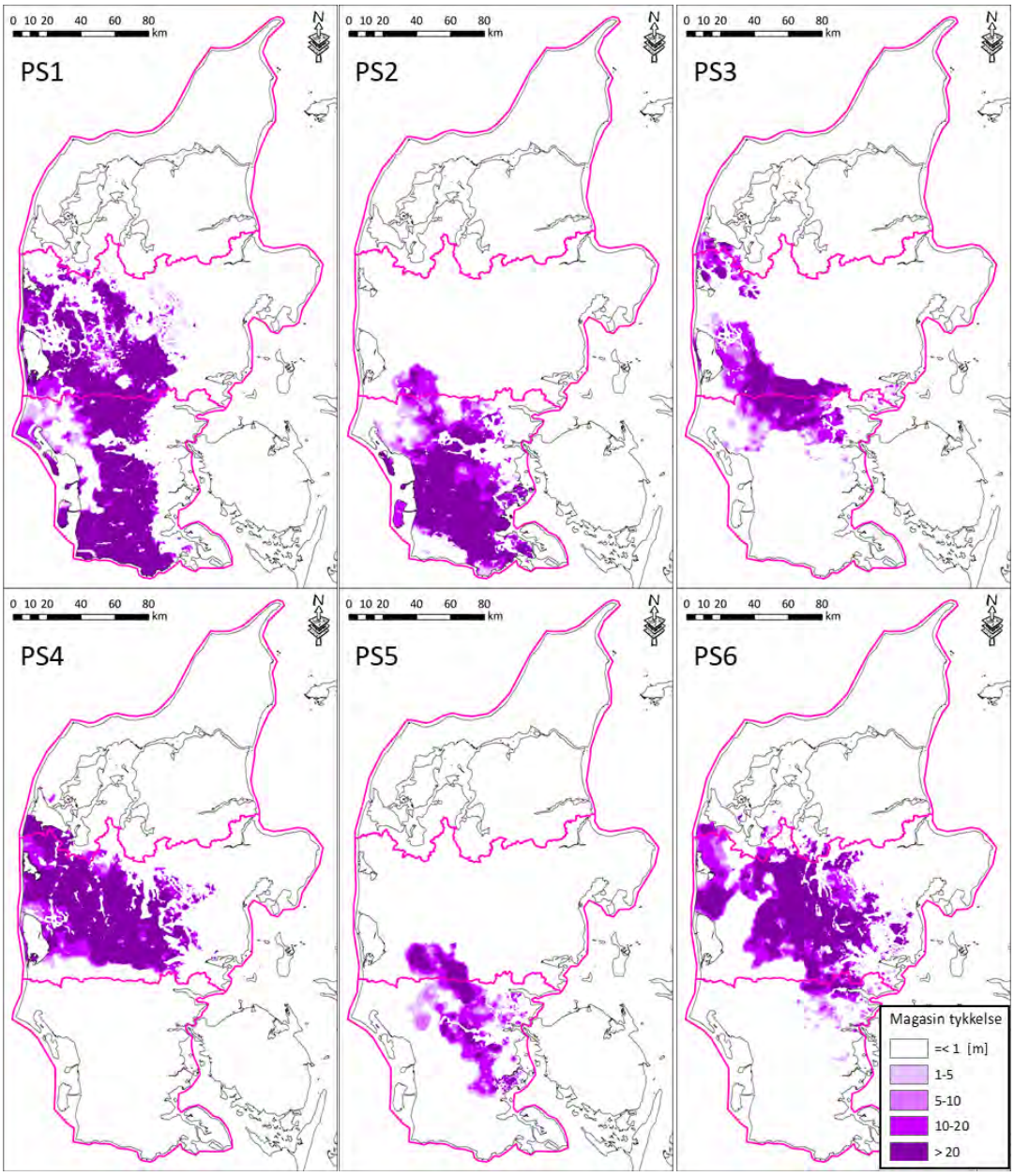
(*) Lagene er i beregningsmodellen slået sammen i DK4, DK5 og DK6. (+) Kun slået sammen i DK6

I lighed med de øvrige delmodeller er der kun anvendt en værdi for den hydrauliske ledningsevne for alt kvartært ler, dog er det antaget, at leret i de øverste 2 m, hvor det geologiske lag er defineret på baggrund af jordartskortet, Figur 4, er opsprækket og har en højere hydraulisk ledningsevne end det øvrige ler.

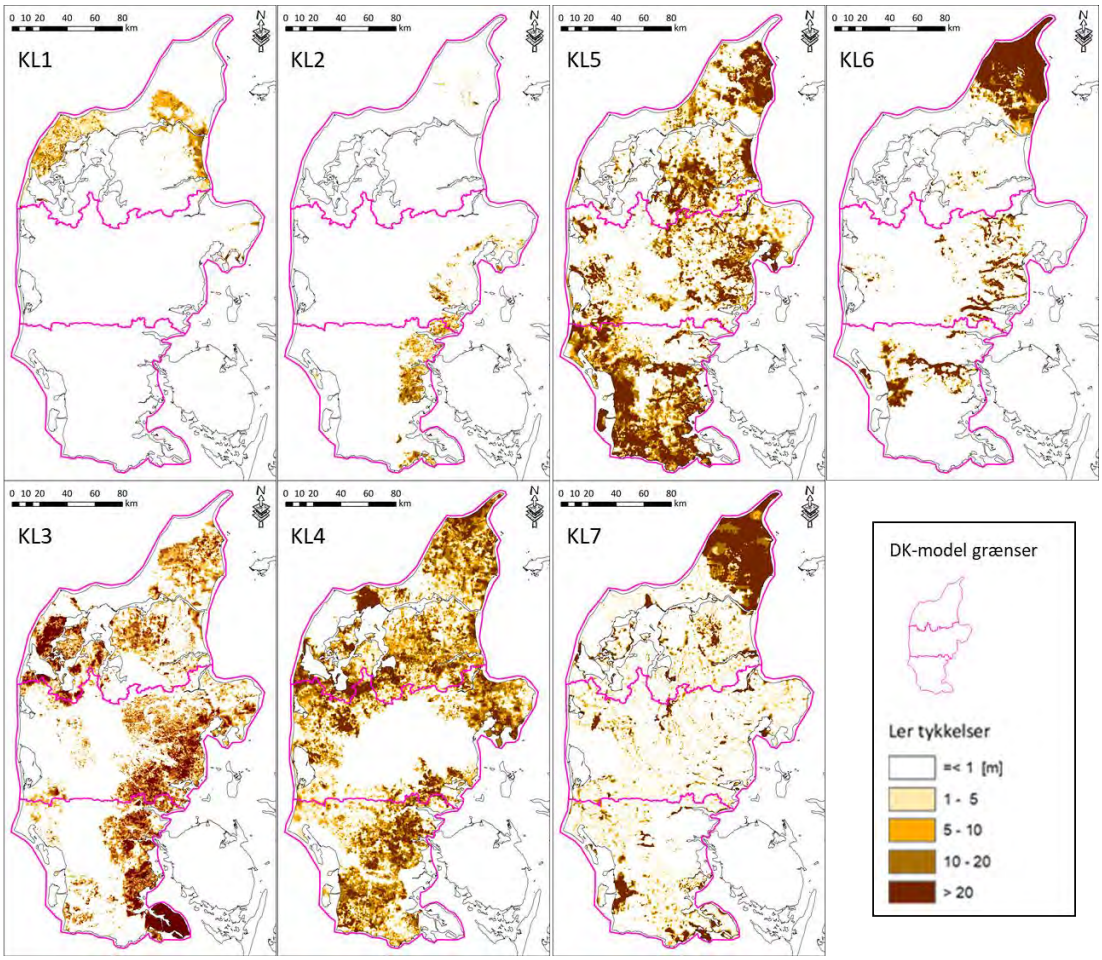
Ligeledes er den hydrauliske ledningsevne for sandenhederne antaget at være konstant, og variationen i transmissiviteten er således udelukkende afhængig af tykkelsen af den vandførende enhed. Ikke alle hydrostratigrafiske lag er til stede over det hele. Hvor et lag ikke er eksisterende er top og bundflade for laget sammenfaldende, så laget har ingen tykkelse. Udbredelse og tykkelse af de hydrostratigrafiske magasinlag er vist på Figur 13 og Figur 14 for henholdsvis den kvartære (KS) og prækvartære (PS) lagpakke, mens udbredelse af leret mellem sandlegemerne fra de to perioder er vist på Figur 15 og Figur 16.



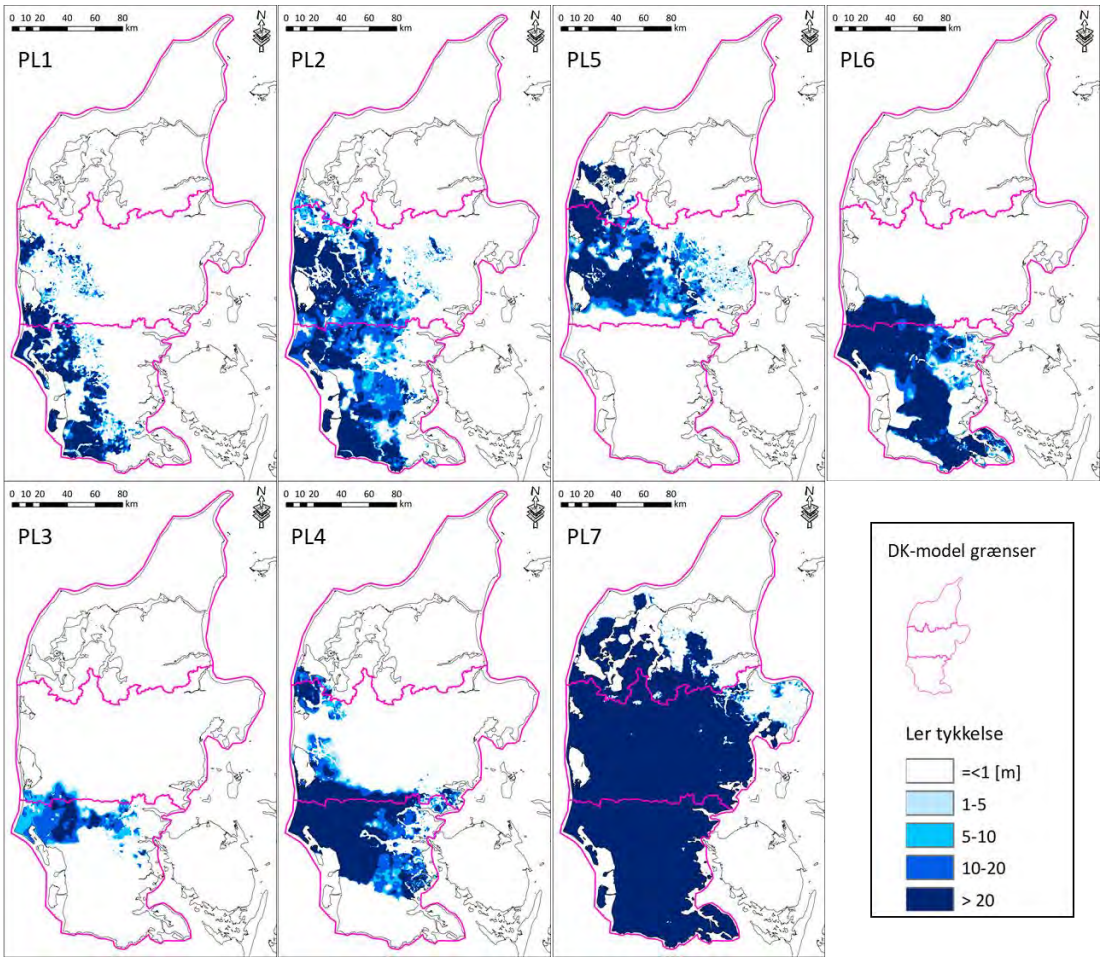
Figur 13. Udbredelse og tykkelse af kvartære sandmagasiner. De lilla polygoner angiver udbredelsen af modelrand for de tre delmodeller.



Figur 14. Udbredelse og tykkelse af prækvartære Miocæne sandmagasiner. De lilla polygoner angiver udbredelsen af modelrand for de tre delmodeller.



Figur 15. Udbredelse og tykkelse af kvartært ler. De lilla polygoner angiver udbredelsen af modelrand for de tre delmodeller.

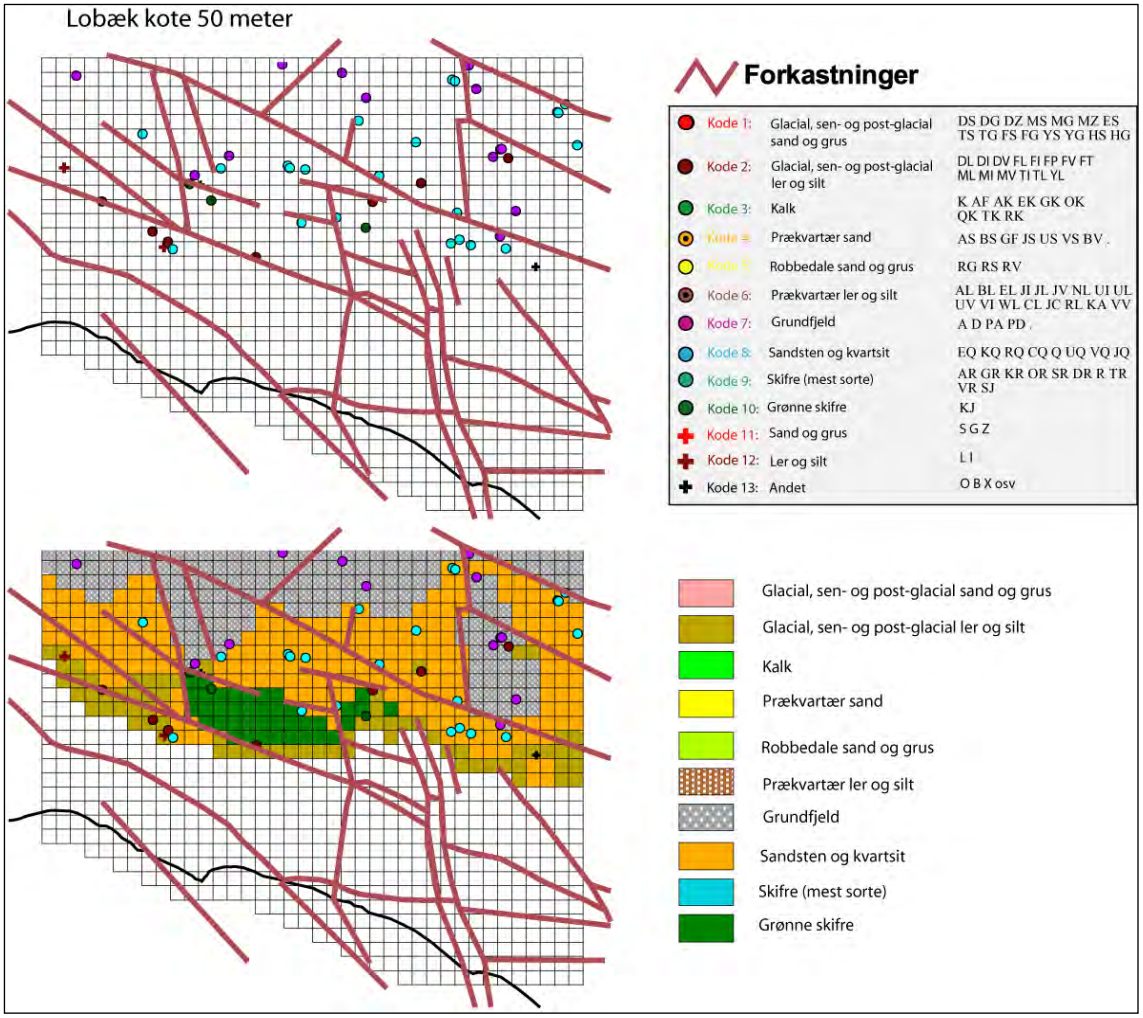


Figur 16. Udbredelse og tykkelse af prækvartært ler. De lilla polygoner angiver udbredelsen af modelrand for de tre delmodeller.

3.4 Bornholm

For Bornholm er der anvendt en pixeltolkning af hydrogeologien. Gridstørrelsen er på 250 x 250 meter og lagtykkelsen på 5 meter. Begrundelsen for den valgte tolkning har været et ønske om en fleksibel tolkning, da de mange forkastningsblokke gør det særdeles vanskeligt at gennemføre en fladetolkning med sammenhængende lag for hele Bornholm. Til trods for tolkningen i faste 5 meter intervaller er det forsøgt så vidt muligt at forbinde sandlag mellem forskellige boringer med udgangspunkt i geologiske profiler og evt. filterplaceringer, der indikerer vandførende lags beliggenhed, Figur 17.

Pixelgeologien er tolket i horisontale snit, hvor boringsoplysningerne er apriori hydrogeologisk tolket til 13 enheder med hver sin geokode,Tabel 5.



Figur 17. Tolkningsmetodik for Bornholm (Troldborg et al., 2009).

Tabel 5. Hydrologiske enheder anvendt i tolkning af DK-model Bornholm.

Kode	Betegnelse	DGU-symboler
1	Q-sand ('Kvartær sand og grus')	DS DG DZ MS MG MZ ES TS TG FS FG YS YG HS HG
2	Q-ler ('Kvartært ler og silt')	DL DI DV FL FI FP FV FT ML MI MV TI TL YL
3	Kalk	K AF AK EK GK OK QK TK RK
4	Præ-sand	AS BS GF JS US VS BV
5	Robbedale sand og grus	RG RS RV
6	Præ-ler	AL BL EL JI JL JV NL UI UL UV VI WL CL JC RL KA VV
7	Grundfjeld	A D PA PD
8	Sandsten og kvartsit	EQ KQ RQ CQ Q UQ VQ JQ
9	Skifre	AR GR KR OR SR DR R TR VR SJ
10	Grønne skifre	KJ
11	Sand	S G
12	Ler	L I
13	Andet	Symboler som ikke indgår i øvrige grupper.

Den pixelgeologiske tolkning udgjorde den rumlige geologiske model (den geologiske struktur) for den oprindelige model, på nær hvad angår den opsprækkede del af granit, sandsten

og skifre. Denne del blev indlagt som lagstrukturer, dækkende de øverste 25 meter af Prækvartæret i de områder som var dækket af forkastningszoner. Dybden til prækvartæret var bestemt ud fra temakort udviklet af Bornholms Regionskommune over tykkelsen af de kvartære aflejringer.

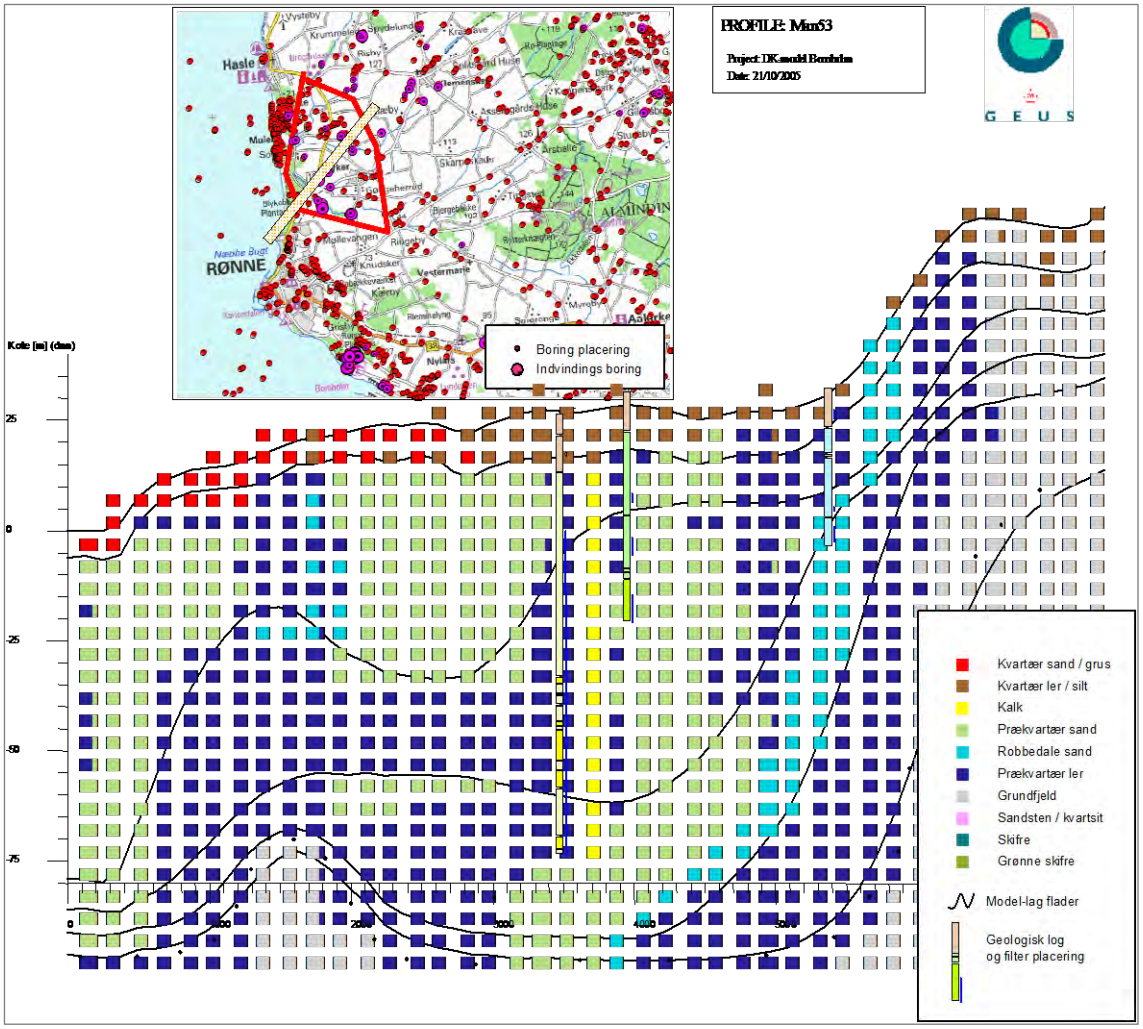
Områderne med forkastningszoner var interpoleret fra temakort hentet i GEUS' gis database. Den opsprækkede del af Prækvartæret var indarbejdet i den geologiske model uafhængigt af den pixelgeologiske tolkning, og der var ikke i den oprindelige model udviklet en pixeluafhængig konceptuel model for magasin materialet i sprækkedalene. Sprækkedalene på den nordlige del af øen er konceptualiseret ved at indeholde magasinmateriale bestående af smeltevandssand og -grus samt en opsprækket del af grundfjeldet. I den kvartære del af sprækkedalene findes linser af ler typisk i et til to niveauer. Sprækkedalene er typisk 50-150 meter brede og kan være op til 80 meter dybe (typisk 20-40 meter), mens den opsprækkede del af grundfjeldet er 20-30 meter dyb. For en nærmere beskrivelse af sprækkedale tolkningselementer henvises til (Troldborg et al., 2009).

Tabel 6. Enheder fra jordartskortets geologi implementeret for Bornholm.

Geologisk model	Geokode i modellen	TSYM fra jordartskortet
Sand	21	DG, DS, ES, HG, HS, TG, TS, YG, YS
Ler	22	ML, MS, TL
Tørv	23	FP, FT
Prækvartær	24	PKV
Andet	25	BY, FJ, HAV, O, SØ, X

Som for den resterende del af landet er der for de øverste tre meter anvendt jordartskortets geologiske enheder (TSYM). For Bornholm er enhederne en smule anderledes end den resterende del af landet idet prækvartæret optræder selvstændigt, Tabel 6.

Ud over sprækkedalene og laget med jordsartskortet, så har modellen for Bornholm ikke direkte sammenhæng mellem beregningslag og den geologiske model. Modellen er inddelt i syv beregningslag fastsat således at de approksimativt følger de administrativt vigtigt magasiner, Figur 18.

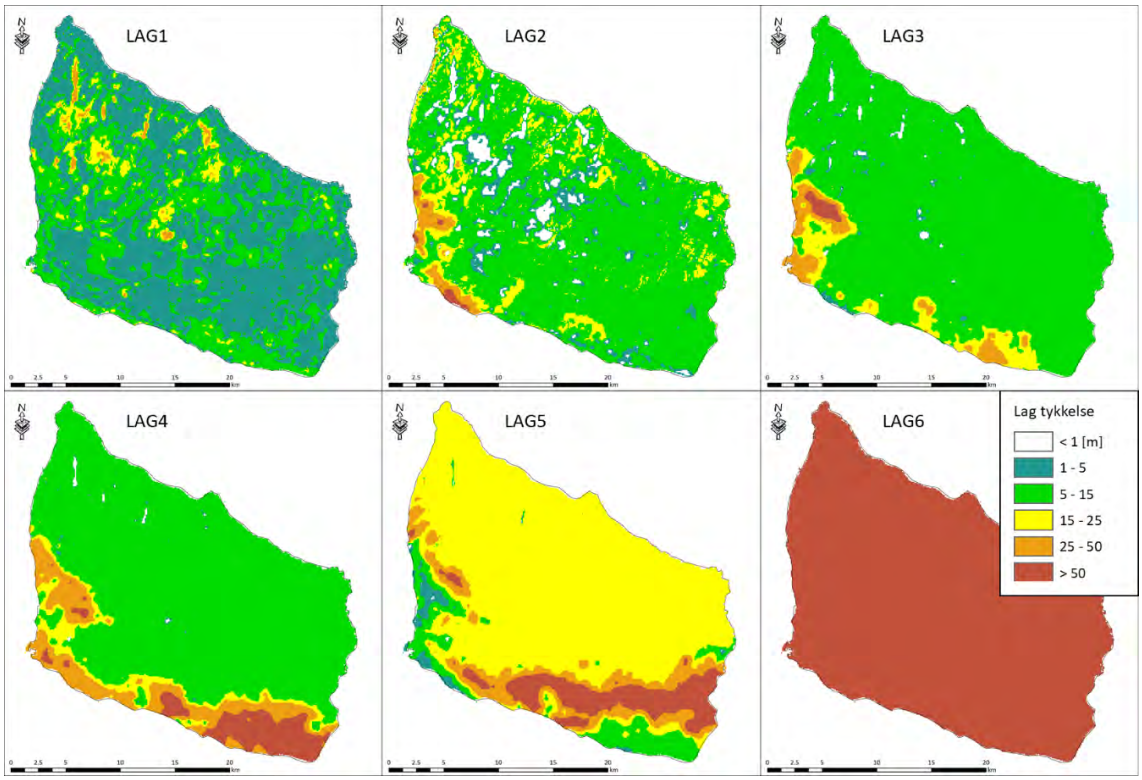


Figur 18. Eksempel på sammenhæng mellem beregningslag og pixelgeologiske tolkninger (Troldborg et al., 2009).

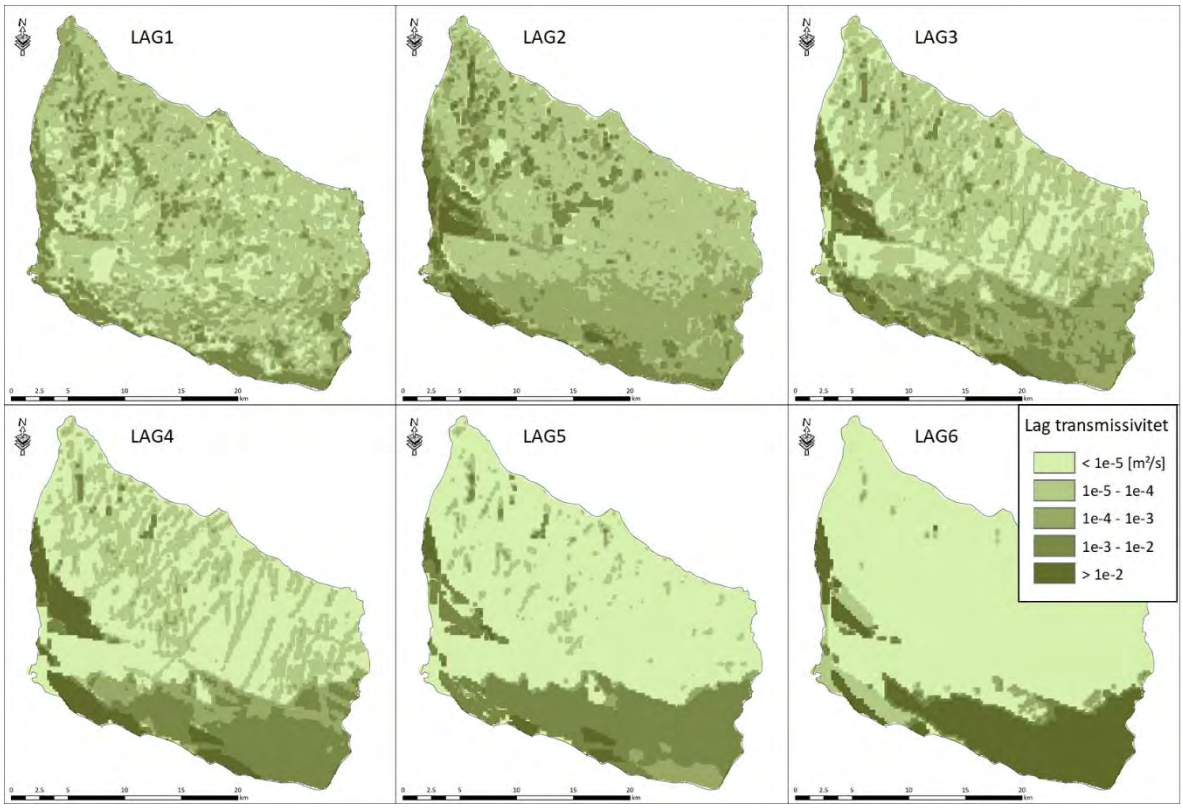
Beregningslagenes nummerering og navngivning findes i Tabel 7, mens lagtykkelser og initial transmissivitet baseret på de hydrauliske egenskaber for den pixelgeologiske tolkning inden for de enkelte beregningslag se af hhv. Figur 19 og Figur 20.

Tabel 7. Oversigt over beregningslag samt de afgrænsende flader for Bornholm.

Beregningslag	Navn	Topflade	Bundflade	Bemærkning
1	Top2m	dkmb_topo_0	dkmb_top3m	Øverste 3 m er distribueret som angivet i Tabel 6.
2	LAG1	dkmb_top3m	dkmb_kvtb	Indeholder de kvartære materialer med undtagelse af de dybere dalstrukturer.
3	LAG2	dkmb_kvtb	dkmb_blag2	Grundfjeldet opsprækket, Kystnært prækvartært sand, Sandsten opsprækket, Skifre og Grønne Skifre opsprækket.
4	LAG3	dkmb_blag2	dkmb_blag3	Grundfjeldet opsprækket, kystnært prækvartært sand og ler, Sandsten opsprækket, Skifre og Grønne Skifre opsprækket.
5	LAG4	dkmb_blag3	dkmb_blag4	Grundfjeldet opsprækket, robbedale magasinerne, Sandsten og skifre opsprækket, Grønne skifre ikke opsprækket.
6	LAG5	dkmb_blag4	dkmb_blag5	Grundfjeldet opsprækket i dalstrukture, prækvartær ler, Sandsten ikke opsprækket, Grønne skifre.
7	LAG6	dkmb_blag5	dkmb_blag6	Bundlag primært grundfjeld og ikke opsprækkede Sandsten, Skifre og Grønne skifre.



Figur 19 Lagtykkelser for Bornholm



Figur 20 Lag transmissiviteter for Bornholm

3.5 Hydrologiske afgrænsninger (randbetingelser)

Et centralt element i opstillingen af en numerisk grundvandsmodel er definitionen af randbetingelserne. De ydre randbetingelser beskriver, hvordan det betragtede hydrologiske system interagerer med det omkringliggende miljø, der ikke beskrives i modellen, dvs. atmosfæren, havet og tilstødende landområder. Herudover skal der specificeres indre randbetingelser, der beskriver interaktionen mellem de simulerede komponenter af vandkredsløbet, f.eks. udveksling mellem grundvandsmagasinet og vandløbene.

3.5.1 Dræn og vandløb (indre randbetingelser)

Afhængigt af nedsivningens størrelse, potentialet i det øverste lag og de hydrauliske parametre for grundvandsmodellerne, kan der ske en infiltration til grundvandet eller genereres overfladisk afstrømning (afstrømning på terræn) eller drænvandsafstrømning. Overfladeafstrømningen vil følge den topografiske variation mod lavere beliggende områder. Hvor disse lavtliggende områder gennemskæres af vandløb vil den overfladiske afstrømning strømme til vandløb. Såfremt de lavtliggende områder ikke er gennemskåret af et vandløb, vil der, afhængigt af den hydrauliske ledningsevne i jordlagene og grundvandstand, ske en nedsivning til grundvandet eller evt. en temporær eller permanent opstuvning af vand på terræn ('afløbsløse dræn').

Den anvendte topografi er baseret på DHM/raster 1.6 m. For vandløbene er det søgt at medtage en relativ detaljeret beskrivelse, men pga. modellens opløselighed samt af hensyn til

beregningstiden, er det ikke muligt at medtage samtlige vandløb. Vandudvekslingen mellem grundvand og vandløb kontrolleres af trykforskellen samt den hydrauliske modstand (lækage) mellem de to medier. Afhængig af de faktiske aflejringer i vandløbsbundene vil vandløbslækage variere såvel mellem vandløb som inden for ét vandløb. I DK-model2019 er det valgt at distribuere vandløbsbundens lækagekoefficient baseret på den dominerende jordartstype omkring modelvandløbene. Den samlede modstand mellem vandløbet og magasinet kan gøres afhængig af såvel lækagen i vandløbsbunden som den omkringliggende geologi, se afsnit 4.4. Denne metode er anvendt i modelopstillingen og der opnås herved en distribuering af modstanden mellem grundvandet og vandløbet, baseret på dels den vandløbsnære geologi og dels den vandløbsnære jodartstype. For nærmere beskrivelse af vandløbsopsætningen henvises til afsnit. 0.

Et detaljeret kendskab til drænsystemer for større dele af Danmark findes ikke på let tilgængelig elektronisk form. Det er derfor nødvendigt at indføre betydelige simplificeringer i beskrivelsen af drænafstrømningen. Det er vurderet, at de afløbsløse dræn, som ifølge modeltopografien og det benyttede vandløbssystem er introduceret i modelopsætningen, enten i praksis afdrænes til vandløb (på grund af intensivt jordbrug) eller skal tilskrives usikkerheder på interpolationen af topografien fra 1,6 m grid til modelgrid (250 m eller 500 m). Der er derfor principielt indlagt dræn i hele modellen, der beskriver såvel kunstig dræning samt naturlig afledning via grøfter og små vandløb, der ikke kan indplaceres i modellen pga. den anvendte skala. I DK-model2019 er der også arbejdet med en differentiering af drændybde samt drænтidskonstant baseret på arealanvendelse, topografisk variabilitet samt jordtyper. Drænafstrømningen er beskrevet, så der sker en afstrømning til nærmeste vandløb eller havet alt efter et forudbestemt drænkodekort, Figur 31. Drænafstrømning beskrives i modellerne ved et niveau for drændybden og en tidskonstant for routningen af vand ud af elementet, nærmere beskrevet i afsnit 3.5.1.

3.5.2 Ydre modelrande

Randbetingelsen for modellernes øverste lag er defineret af grundvandsdannelsens størrelse, der beregnes med MIKE SHE's "Two-Layer" modul på daglig basis ud fra nedbør og aktuel fordampning samt regnskab med vandindholdet i rodzonen. Den primære nedsivning til grundvandet sker, når vandindholdet i den umættede zone overstiger markkapaciteten. Der ses bort fra evt. forsinkelse og opmagasinering i den umættede zone.

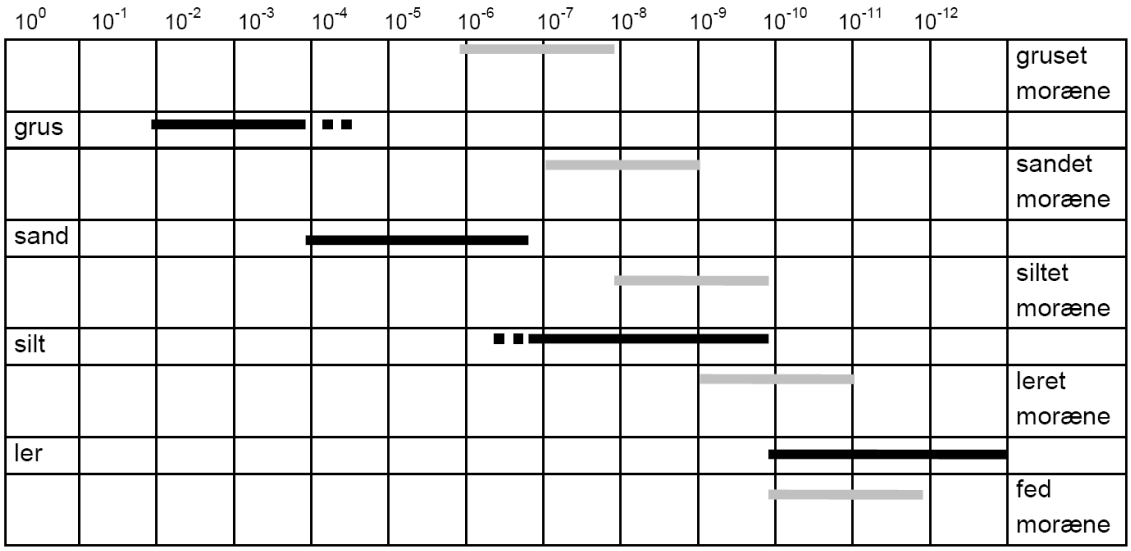
Hvor en delmodel grænser op til hav er der anvendt fastholdt tryk som randbetingelse for det øverste beregningslag, hvor celler beliggende i havet har et fastholdt tryk på 0 m. For de øvrige beregningslag er der anvendt no-flow som ydre randbetingelse. No-flow betingelsen betyder, at der ikke kan ske en ind-/udstrømning over den ydre rand for disse beregningslag, svarende til, at der 0,5-2,5 km ude fra kysten, hvor modelranden er placeret, ikke forekommer horisontale strømninger under havbunden. Alternativt kunne der anvendes et fastholdt tryk for samtlige beregningslag, hvorved en ind-/udstrømning over randen ville være muligt. Vandløbsafstrømningen er den variabel den samlede vandbalance kan vurderes ud fra, og for denne viste en følsomhedsanalyse, at den samlede vandløbsafstrømning var meget lidt følsom over for den valgte randbetingelse.

Delmodellernes afgrænsning på landdelen er defineret på baggrund af topografiske oplande og indlagt som no-flow rand. Dette repræsenterer en hydrologisk randbetingelse for den overfladiske afstrømning samt de øverste modellag, hvor grundvandsstrømningen primært er styret af den topografiske variation. For de dybereliggende modellag kan der imidlertid ikke garanteres sammenfald mellem grundvandsskel og topografiske oplande. Erfaringer fra tidligere versioner af DK-modellen viste for eksempel, at der for de dybereliggende lag i Jylland ikke er sammenfald mellem den Jyske højderyg og grundvandsskel. I DK-model2019 er det, ligesom i DK-model2009 og DK-model2014, derfor valgt, at definere de landbaserede modelrande i Jylland som øst - vestgående rande, der strækker sig hele vejen på tværs af Jylland. Som udgangspunkt antages disse rande at være no-flow rande.

Med undtagelse af Bornholm, er den hydrostratigrafiske model tolket ned til kalken, og modellens bund er placeret 50 meter under toppen af kalken og antaget impermeable, dvs. ingen vandudveksling over den nedre rand. For Bornholm er bunden placeret 100 m under dybden af dalstrukturerne på Bornholm og er ligeledes antages impermeabel.

3.6 Hydrauliske størrelser

Størrelsen af den hydrauliske ledningsevne (K) er et udtryk for mediets evne til at transportere vand. Størrelsen af den hydrauliske ledningsevne varierer meget for forskellige jordlag, som det fremgår af Figur 21, der viser typiske intervaller for jordarters hydrauliske ledningsevne. Sand- og grusaflejringer har høje K-værdier, hvorimod ler har lave K-værdier. Den hydrauliske ledningsevne varierer normalt en del inden for samme geologiske formation. Der kan tillige være tale om retningsbestemte variationer (anisotropi), som knytter sig til den orientering, hvori lagene i sin tid blev aflejret.



Figur 21. Den hydrauliske ledningsevnes størrelse og variation i m/s (efter Carlsson og Gustafson, 1984).

Den hydrostratigrafiske model er opbygget i et 500 x 500 m grid. Geologiske heterogeniteter på en mindre skala, f.eks. sprækker, mindre sandlommer samt smalle begravede dale kan ikke indbygges direkte i modellen. Den hydrauliske ledningsevne der anvendes i modellen

for de enkelte hydrostratigrafiske enheder vil således være effektive værdier (”bulk-værdier”). Da tynde sandlag, vinduer, sprækker og lignende ikke er repræsenteret i lerlagene vil de effektive beregningsmæssige ledningsevner skulle være større end de angivne ledningsevner, Figur 21. Tilsvarende vil de effektive værdier for de vandførende lag typisk blive en gennemsnitsværdi for grus/sand.

På baggrund af feltundersøgelser ved Ringe (Nilsson et al., 2001) er det vurderet, at den hydrauliske ledningsevne i moræneleren i den opsprækkede zone (2-3 meter under terræn) typisk varierer mellem 10^{-5} til 10^{-4} m/s. For den dybereliggende sekvens af den terrænnære moræneler, i dybder større end 5-6 m, blev den hydrauliske ledningsevne for moræneleren vurderet til mellem 10^{-8} - 10^{-7} m/s. Feltundersøgelser ved Flakkebjerg på Vestsjælland gav en horisontal hydraulisk ledningsevne for de opsprækkede øverste 2,5 meter på 10^{-5} m/s, mens moræneleren i dybden 2,5 – 4,5 meter havde en ledningsevne på 10^{-8} m/s (Harrar og Nilsson, 1998). I større dybde må ledningsevnen for moræneler antages endnu lavere.

I det øverste toplag (øverste 2-3 meter under topografien) antages den hydrauliske ledningsevne for leret at være væsentligt større end de øvrige ler enheder pga. tilstedeværelsen af sprækker og grovsandet moræneles aflejringer. En forventet variationsramme for den horisontale effektive ledningsevne er 10^{-6} til 10^{-4} m/s. Det vurderes, at der godt kan være en betydelig anisotropi på en faktor 10-100, således at den vertikale ledningsevne for moræneleren er i størrelsesordenen 10^{-7} til 10^{-5} m/s.

Sandenhederne antages at have den samme hydrauliske ledningsevne i henholdsvis de kvartære og prækvartære lag. Inden for hver af disse typer lag er variationerne i transmissiviteten således alene bestemt ved sandenhedernes varierende tykkelse. Den horisontale ledningsevne for sandet antages at skulle ligge i intervallet 10^{-5} til 10^{-3} m/s. Anisotropien mellem horisontal og vertikal ledningsevne for sand antages til en faktor 10.

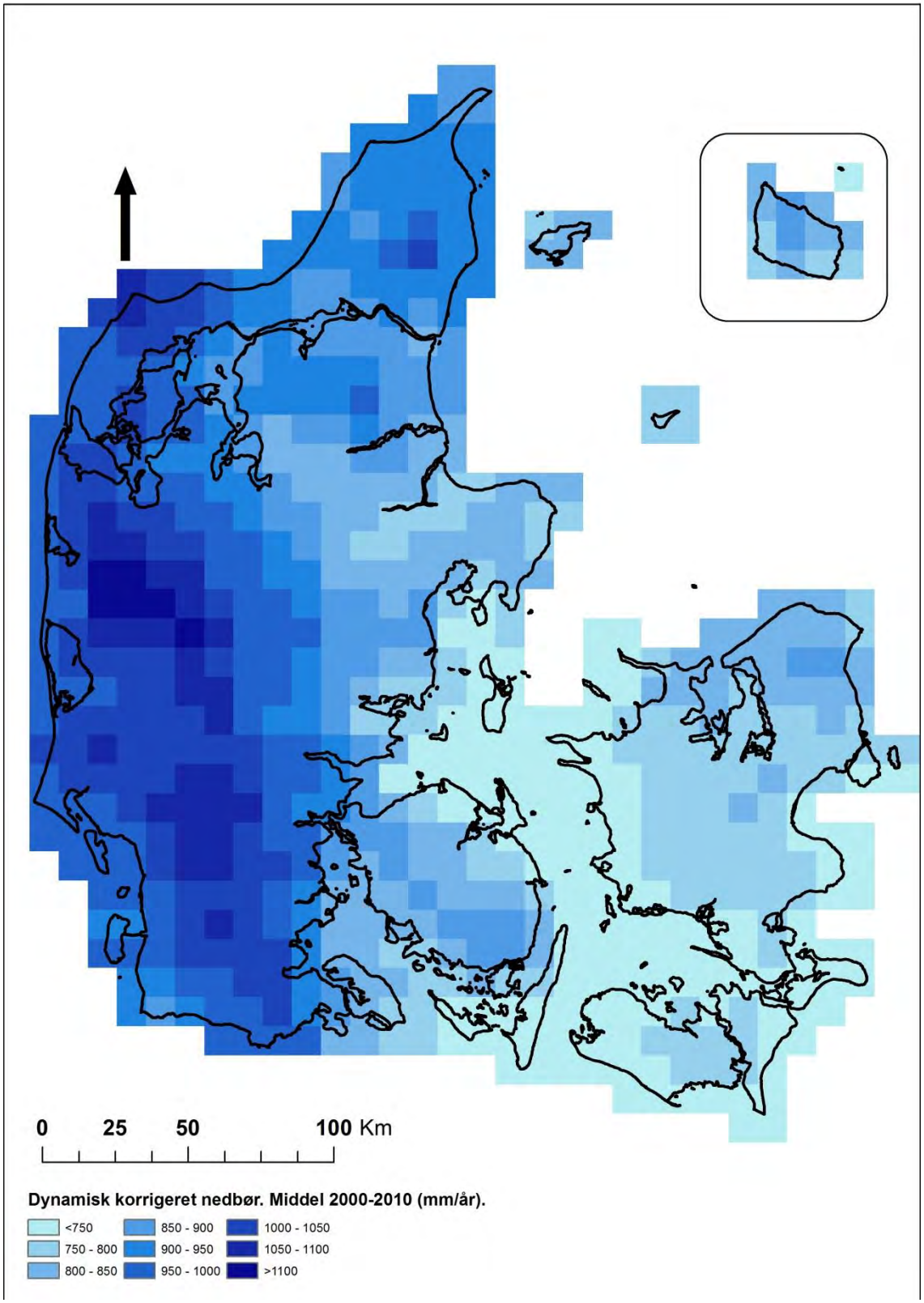
Ler enheder under toplaget antages (som for sandet) at kunne repræsenteres ved én hydrauliske ledningsevne i henholdsvis kvartære og prækvartære lag samt en anisotropi faktor på 10. Det vurderes, at den effektive horisontale ledningsevne for disse ler enheder varierer inden for intervallet: 10^{-8} - 10^{-6} m/s.

Den effektive hydrauliske ledningsevne for kalken vil være meget styret af sprækkeintensiteten i kalken. Ledningsevnen forventes derfor, at kunne variere betydeligt med horisontale værdier mellem 10^{-9} – 10^{-3} m/s, hvor de højeste værdier vil være forbundet med meget opsprækkede zoner, mens de laveste værdier vil findes i tætte ikke opsprækkede matricer. Da indvindingerne samt pejleboringer primært vil være relateret til den mest porøse del af kalken, forventes den optimale hydrauliske ledningsevne for kalken at ligge i den øvre ende.

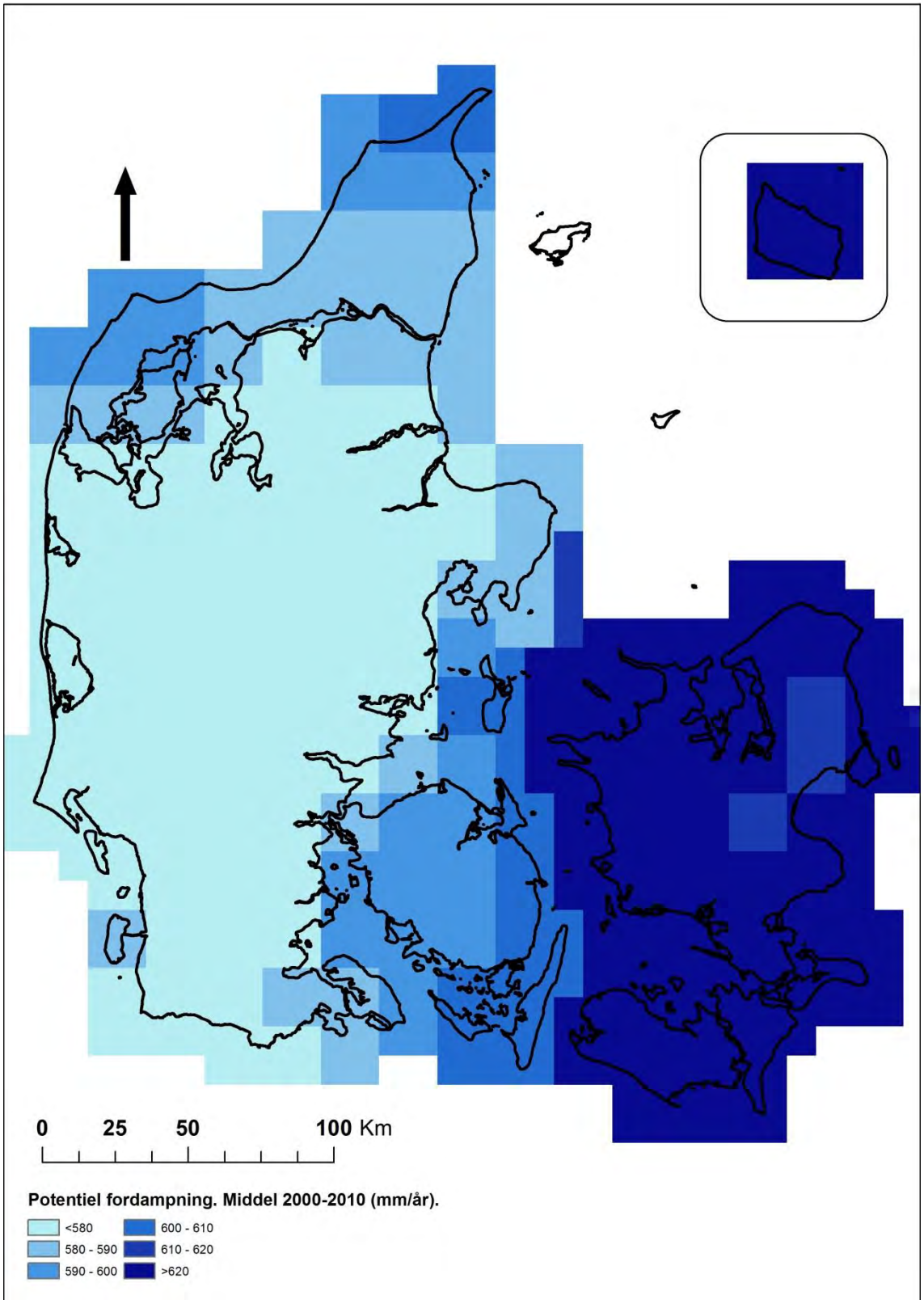
Den specifikke ydelse (frie magasiner) antages at variere inden for intervallet 0,15-0,25. For artesiske forhold antages det specifikke magasintal (pr. meter) at være i størrelsesordenen 0,0001.

3.7 Vandbalanceforhold

DMI data for nedbør i 10 x 10 km² klimagrid, dynamisk korrigeret – DMI er anvendt for perioden 1989-2010, og for perioden 2011-2018 er der anvendt en mere simpel dynamisk korrektion (GEUS' dynamisk korrektion på baggrund af læfaktor B) af DMI's ukorrigerede 10 x 10 km² nedbørsdata. DMI 20 x 20 km² klimagrid data for temperatur og potentiel fordampning er anvendt for hele perioden 1989-2018. Den rumlige fordeling af DMI's 10 x 10 km klimagrid for dynamisk korrigeret nedbør og 20 x 20 km klimagrid for fordampning er angivet i Figur 22 og Figur 23.



Figur 22. Middel dynamisk korrigeret nedbør for perioden 2000 – 2010.



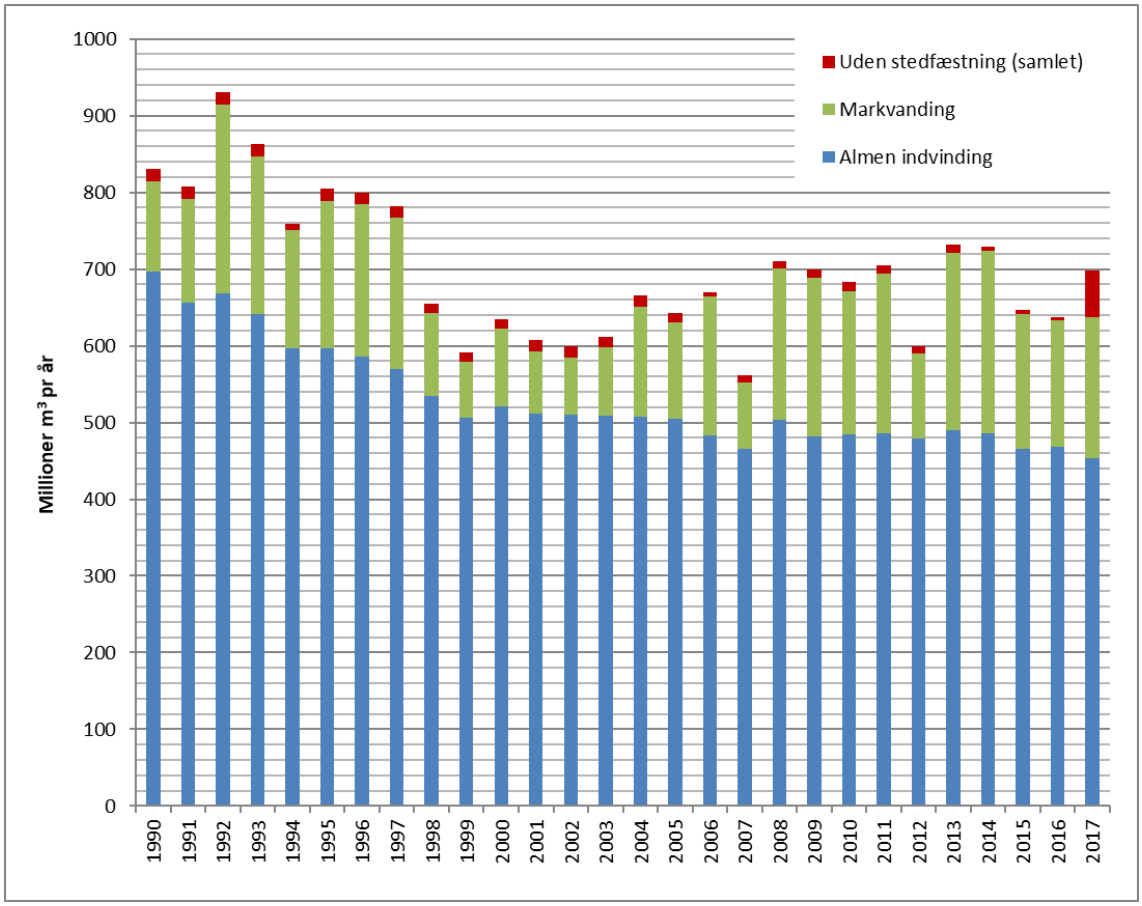
Figur 23. Middel potentiel fordampning for perioden 2000 – 2010.

3.8 Indvindingsforhold

Udviklingen i den samlede indvinding i Danmark, er vist i Figur 24 for perioden 1990 til og med 2017. Det fremgår, at der er sket et fald på omkring 35 % i indvindingen primært gennem 90'erne, fra ca. 700 til ca. 450 mio. m^3/år. Indvindingen har ligget rimeligt stabil omkring de 500 mio. m^3/år de første 13 årene siden årtusindeskiftet og fra 2013 ses et fald i den almene indvinding igen. Udviklingen i de syv modelområder kan ses i Bilag 2, og her er det et mere broget billede der ses med store udsving fra år til år. Det nationale fald afspejles i højere eller mindre grad. I DK7 (Bornholm) er der registreret næsten en halvering af indvindingen i perioden 2007-2018. Bornholm undtaget, ses den største reduktion, relativt set, i DK2 (Lolland-Falster og øer) på ca. 50 % fra omkring 15 mio. til ca. 8 mio. m^3/år, mens reduktionen i den almene indvinding har været mindst i Syd- og Midtjylland.

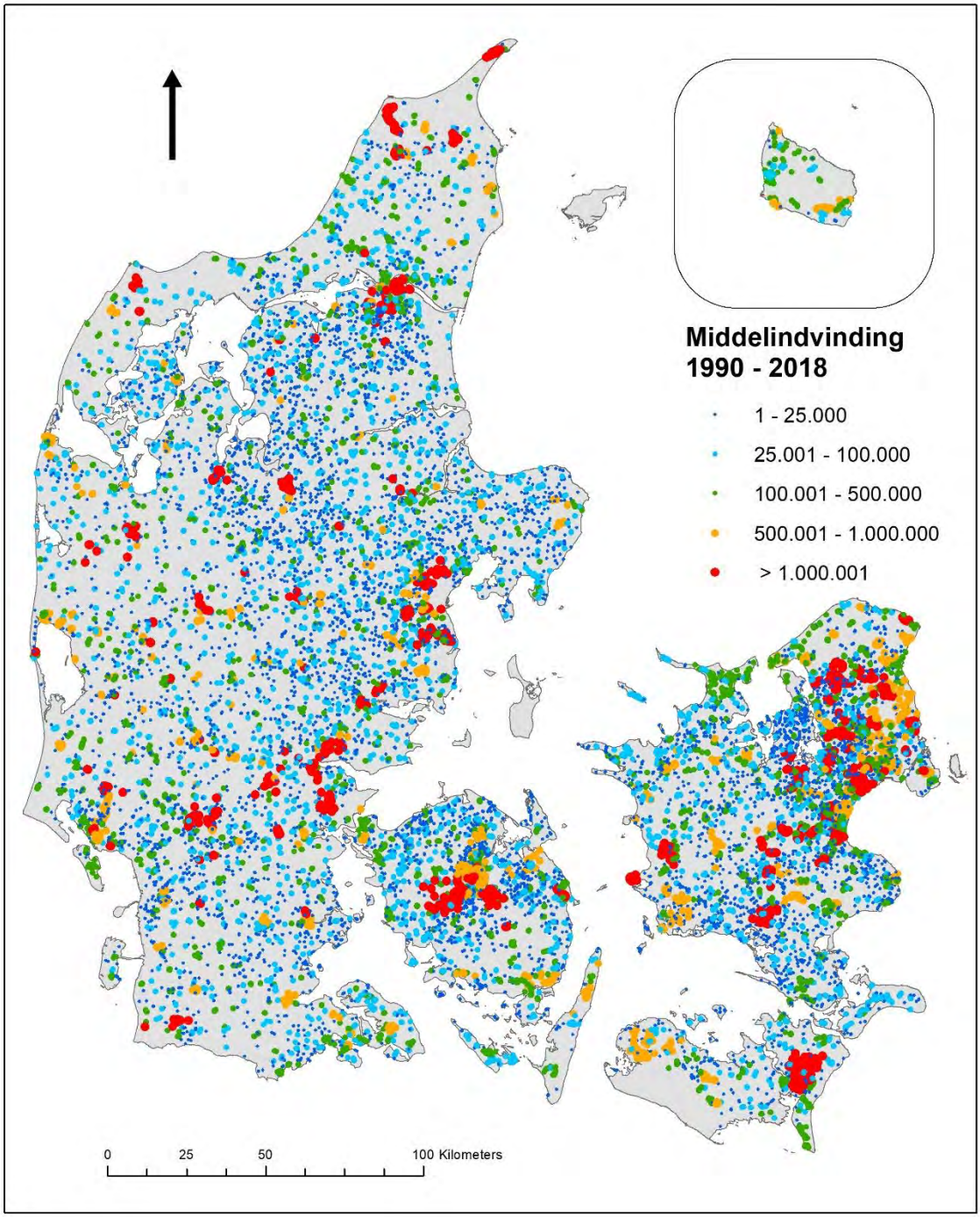
Markvandingen svinger ikke uventet fra år til år og udgør mellem 12 og 33 % af den årlige indvinding.

Endelig fremgår det i Figur 24, at en mindre del af den indberettede vandmængde ikke kan tilknyttes en boring, men blot er indberettet på anlægsniveau (se også Tabel 15). I 2017 bemærkes det at den indberettede mængde som ikke er knyttet til en boring er markant større end tidligere år.



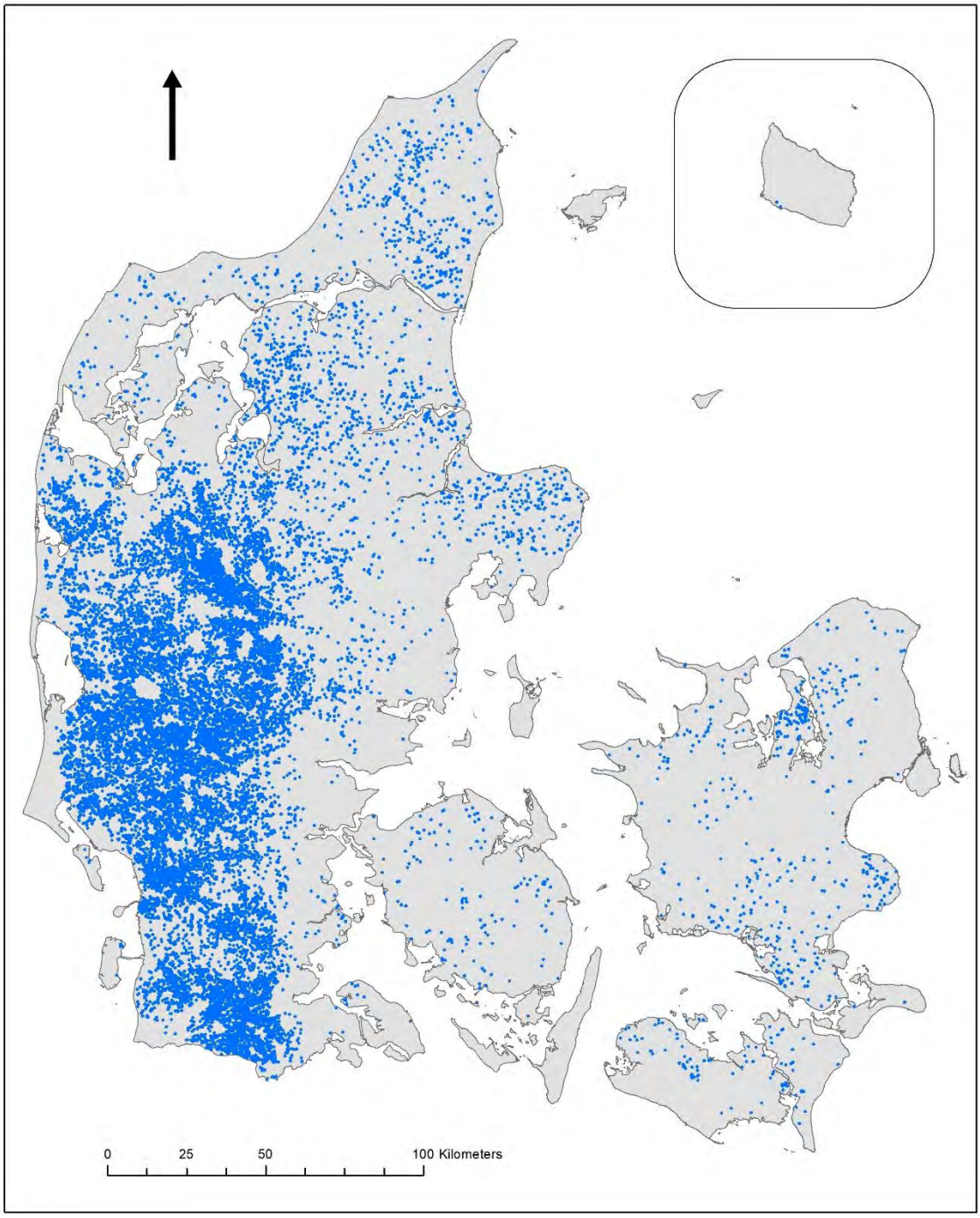
Figur 24. Udvikling i den samlede indvinding i Danmark i perioden 1990 - 2018.

Den rumlige fordeling af total indvindingsmængde på anlægsniveau er angivet på Figur 25, hvor det fremgår, at der er store lokale variationer i indvindingsforholdene med mange indvindinger placeret nær de store byområder. I figuren er indvindingsmængderne knyttet til markvanding (v40) i Jylland ekskluderet.



Figur 25. Middel indvinding i m^3/år for perioden 1990 – 2018 angivet på anlægsniveau. Markvanding i Jylland undtaget.

I Figur 26 er placeringen af indvindinger til markvanding vist. Det ses, at den vestlige del af landet (vest og syd for Hovedopholdslinien) med de sandede topjorde har en meget høj koncentration af markvandingsboringer.



Figur 26. Placering af markvandingsboringer.

4. Modelsystem

Som modelkoder er anvendt MIKE SHE og MIKE HYDRO River, version 2017, sp2, der udgør et deterministisk fuldt distribueret og fysisk baseret modelkompleks til simulering af de væsentligste strømningsprocesser af det hydrologiske kredsløb på landfasen.

I modelopsætningerne er følgende moduler anvendt:

- Overfladisk afstrømning (OL)
- Evapotranspiration (ET)
- Umættet grundvandsstrømning (UZ)
- Mættet grundvandsstrømning (SZ)
- Vandløbsbeskrivelse (MIKE HYDRO River)

Herunder gives en kort beskrivelse af de anvendte moduler. For detaljerede tekniske beskrivelser af MIKE ZERO modulerne henvises der til de relevante manualer (DHI, 2017 MIKE SHE User Manual Volume 1 og 2).

4.1 Overfladisk afstrømning

Overfladisk afstrømning kan generes ved to mekanismer: 1) når nettonedbøren overstiger infiltrationskapaciteten af jorden og overskydende vand opmagasineres på jordoverfladen, eller 2) når grundvandspotentialet i de øvre frie magasiner stiger over terrænoverfladen. Denne vandmængde er tilgængelig som input til overfladisk afstrømning. Den præcise strømningsretning og afstrømningsvolumen bestemmes af topografi og strømningsmodstand såvel som af tab som følge af infiltration langs strømningsvejen. Det vand, der når vandløbssystemet som overfladisk afstrømning, tilgår vandløbene og håndteres efterfølgende af MIKE HYDRO River.

Overland flow er inkluderet for hele modelområdet, hvor der er anvendt fuld kontakt mellem den overfladiske afstrømning og grundvandskomponenten. Den overfladiske afstrømning er styret af den topografiske hældning samt følgende parametre:

- *Manning tallet* der er et udtryk for den overfladiske strømningsmodstand, hvis størrelse afhænger af overfladens ruhed. En overflade med stor ruhed giver således en større modstand end områder med lille ruhed.
- *Detention storage* beskriver hvor meget vand der skal opmagasineres på overfladen før der sker en overfladisk afstrømning. Parameteren tager hensyn til, at der sker en opfyldning af små lavninger i overfladen, før vandet kan strømme af på overfladen.
- *Initial water depth* der angiver en vanddybde på overfladen ved starttidspunktet for simuleringen og er således en startbetingelse for den overfladiske afstrømning. Normalt sættes denne størrelse til 0 mm, dvs. ingen vand på overfladen ved simuleringens start.

4.2 Umættet strømning

MIKE SHE indeholder flere løsningsmetoder til beregning af fordampning og strømning i den øvre umættede del af grundvandszonen (UZ). Metoderne varierer fra komplekse beskrivelser ved eksempelvis Richards ligning kombineret med fordampningsberegninger ved Kristensen og Jensen metoden til mere simple approksimationer baseret på massebalance betragtninger. De mest detaljerede formuleringer må forventes at give den mest korrekte beskrivelse af vandstrømningen. En forudsætning for at opnå en detaljeret beskrivelse af strømningen er imidlertid, at der kan opnås en tilstrækkelig fin distribuering af de jordfysiske parametre samt beskrivelse af det øvre grundvand. Anvendelse af de fysisk baserede løsninger er endvidere problematiske at løse numerisk pga. ikke-linearitet, og dermed forbundet med væsentlig længere beregningstider. Med den anvendte skala på 500 x 500 m gridceller er det vurderet, at den mere korrekte beskrivelse af strømningen i den umættede zone, der vil kunne opnås ved anvendelse af Richards ligning, ikke står mål med den ekstra beregningstid.

Det er valgt, at anvende ”Two-Layer” metoden til beskrivelsen af den umættede zone. Metoden beskriver ikke selve strømningen i den umættede zone, men fokuserer på vandbalancen og beregner den aktuelle fordampning og volumen af vand, der infiltrerer den mættede zone. Da der ikke opnås en beskrivelse af vandstrømningen i den umættede zone, vil der ikke opnås en korrekt strømningsdynamik, specielt i områder hvor grundvandsspejlet ligger dybt under terræn. Metoden er derimod velegnet til beskrivelse af en øget fordampning som følge af et grundvandsspejl tæt på terræn, f.eks. i ådale og vådområder. Metoden giver således en forsimplet kobling mellem UZ og SZ, der tager højde for den varierende fordampning, der vil forekomme i tid og sted som resultat af varierende dybde til grundvandsspejlet.

Two-Layer metoden indbygget i MIKE SHE er baseret på formuleringen præsenteret af Yan & Smith (1994). Metoden inkluderer processerne interception, fordampning fra frie vandoverflader og evapotranspiration, mens vegetationen beskrives ved et bladarealindeks (LAI) og en rodzonedybde, der begge kan variere såvel rumligt som tidsligt.

Den umættede zone opdeles i to lag. Fordampning og evaporation sker fra det øverste lag, der strækker sig fra terræn og ned til den dybde, hvorfra vandet er tilgængeligt for planterne, dvs. den samlede dybde af rodzonen og den kapillære zone (benævnt extinction depth). De fysiske egenskaber for laget antages at være homogene dvs. der regnes med en midlet vandmætning og ikke en varierende vandmætning Det andet lag strækker sig fra bunden af det øverste lag og ned til grundvandsspejlet. Står grundvandsspejlet højere end extinction depth, vil kun det øverste lag eksistere. Står grundvandspejlet i terræn, er der ingen umættet zone, og tykkelsen af det øverste lag er nul. Afhængig af grundvandsspejlets placering vil vandindholdet i den umættede zone variere. Det maksimale vandindhold i rodzonen aftager lineært med grundvandsspejlets placering fra fuldt mættede forhold (grundvandsspejlet står i terræn) til en vandmætning svarende til markkapaciteten, dvs. grundvandspejlet står under extinction depth, og der sker en fri dræning. Det minimale vandindhold varierer ligeledes lineært ned til et vandindhold svarende til visnegrænsen, der optræder, når grundvandsspejlet ligger under extinction depth.

Vandmængden til rådig for fordampning er forskellen mellem det maksimale og minimale vandindhold. Med en midlet betragtning over dybden beskrives de hydrauliske egenskaber

alene ved vandmætningen ved hhv. fuld mætning, markkapacitet og visnegrænsen. Disse parametre kan distribueres horisontalt for beskrivelse af en horisontal variation i jordbundsforholdene.

4.3 Grundvandsstrømning

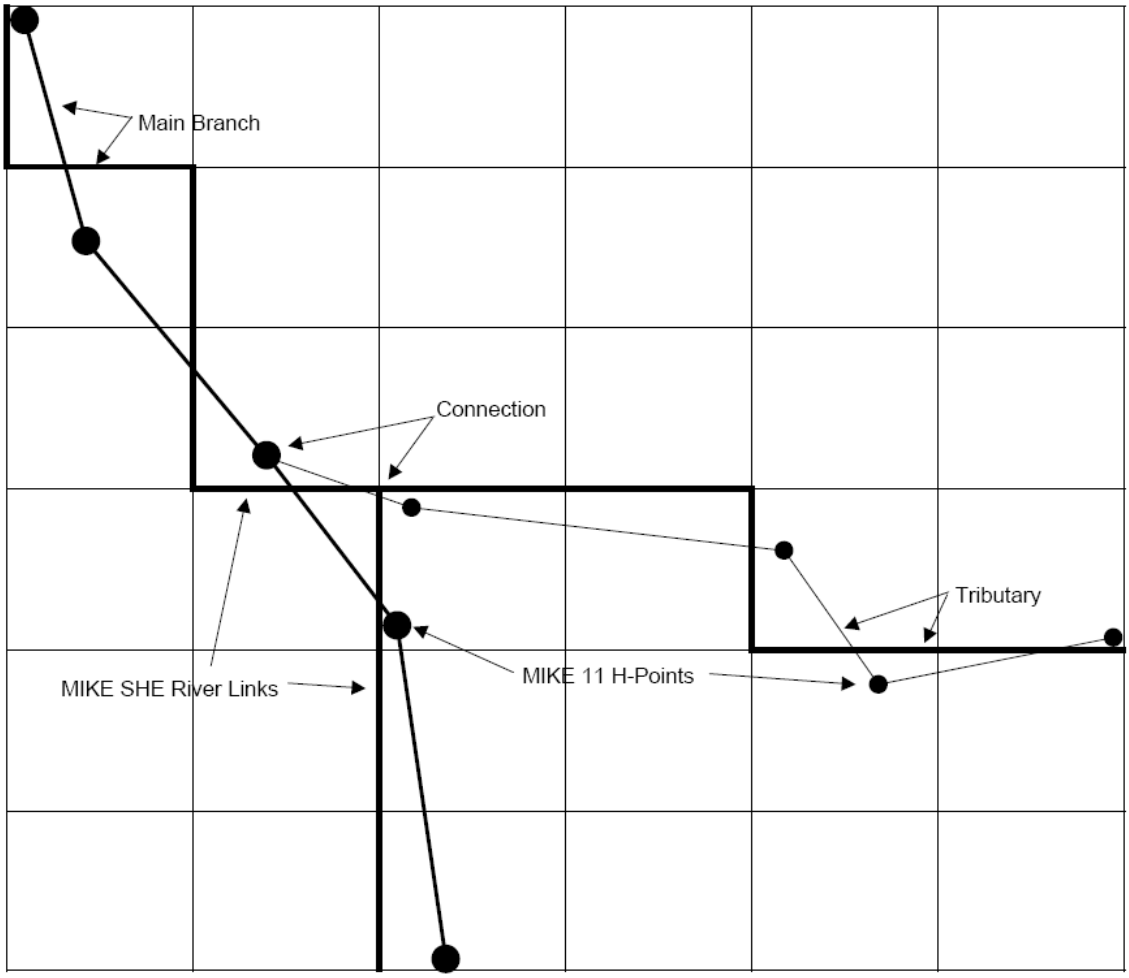
MIKE SHE giver mulighed for løsning af grundvandsstrømningen enten ved en fuld 3D strømningsbeskrivelse eller ved en simpel lineær reservoir løsning. I modelopsætningen beskrevet i nærværende rapport, er den fulde 3D løsning anvendt, der giver en tredimensional beskrivelse af et heterogent magasinsystem med varierende frie og artesiske forhold.

Grundvandsstrømningen løses ved at kombinere Darcy's ligning, der beskriver vandfluxen i et porøst vandmættet medium, og kontinuitetsligningen. For den samlede ligningsbeskrivelse henvises til DHI (2017a). Ligningssystemet inkluderer ikke en beskrivelse af grundvandsstrømning i diskrete sprækker. Dette betyder, at evt. sprækker ikke kan repræsenteres direkte, men det antages, at et opsprækket medium kan beskrives som et porøst medium med justerede hydrauliske egenskaber. Ligningssystemet approksimeres ved en finite difference diskretisering, dvs. grundvandssystemet opdeles i rektangulære kasser eller grids, hvor det i MIKE SHE kun er mulig at anvende grids, der er kvadratiske i det horisontale plan. Løsningen af ligningssystemet foregår iterativt, og der er mulighed for valg mellem forskellige løsningsalgoritmer. I dette tilfælde er der valgt en PCG2 løser (Preconditioned Conjugate Gradient solver).

De styrende størrelser for grundvandsstrømningen er de hydrauliske egenskaber for de forskellige geologiske enheder, dvs. deres hydrauliske ledningsevne, tykkelsen af enhederne samt magasintallene for hhv. frie og spændte magasinforhold.

Ved løsning af grundvandsstrømningen inkluderes udvekslingen mellem grundvand og de øvrige komponenter i kredsløbet: overfladisk afstrømning, rodzonen, vandløb og søer, drænafstrømningen samt grundvandsindvinding.

Vandstrømning i vandløb samt udveksling med grundvandet er beskrevet under afsnittet om MIKE HYDRO River. Koblingen mellem vandløbene og grundvandssystemet sker ved indplacering af vandløbene på randen mellem to grids i MIKE SHE, Figur 27, og der kan ske en udveksling mellem vandløbet og de to tilstødende grids. Detaljeringen i vandløbenes geografiske placering bestemmes således af det anvendte MIKE SHE grid. Det er kun muligt at indlægge ét vandløb på en grænse mellem to grids. For vandløb med en indbyrdes afstand mindre end en grid størrelsen, vil det derfor være nødvendigt enten at justere den geografiske placering af et af vandløbene, fravælge kobling mellem vandløbet og MIKE SHE eller helt fravælge vandløbet i opsætningen.



Figur 27. Kobling mellem MIKE SHE og MIKE HYDRO River (DHI 2017b)

4.3.1 Dræn afstrømning

Afstrømningen via dræn er baseret på en empirisk beskrivelse, hvor vandet bliver routet (flyttet) fra en drængenererende celle til en recipient via en lineær reservoir løsning. Drænafstrømning forekommer alene i de tilfælde, hvor niveauet for grundvandsspejlet i et givent grid overstiger drænniveauet. Der initieres således kun en drænstrømning, når grundvandsspejlet ligger højere end drænene. De styrende størrelser for drænafstrømningen er den anvendte drændybde samt dræntidskonstanten, hvor sidstnævnte kontrollerer, hvor hurtigt et område afdrænes. Matematisk er dræntidskonstanten ækvivalent til en lækage koefficient og kan distribueres for at opnå en beskrivelse af varierende intensitet og effektivitet af drænsystemer. Recipienten for drænafstrømningen kan beskrives på flere måder i MIKE SHE. I denne opsætning er valgt: *Dræning baseret på grid koder*. Her defineres områder inden for hvilke dræningen forekommer efter en prioriteret rækkefølge:

1. Dræning til nærmeste vandløb, hvis et sådant eksisterer i området.
2. Dræning til en ydre rand, hvis oplandet er forbundet til en sådan.
3. Dræning efter topografien.

4.3.2 Indvinding og markvanding

Indvinding håndteres som et ”kilde/dræn” led i grundvandsligningen og kan indlægges i en vilkårlig gridcelle i modellen. Placeringen af indvindinger angives ved geografiske koordinater, dvs. en x og y koordinat samt en kote for top og bund af indvindingsfilteret. I tilfælde hvor et indvindingsfilter strækker sig over flere beregningslag, fordeler MIKE SHE indvindingen mellem de to lag proportionalt med de hydrauliske ledningsevner for beregningslagene. Strækker et filter sig således over to beregningslag karakteriseret ved hhv. sand og ler, vil der primært forekomme en indvinding fra sandlaget. Indvindingerne kan gøres tidsvarierende ved angivelse af tidsserier for indvindingen. I tilfælde af at en gridcelle indeholdende en indvinding ”løber tør”, dvs. grundvandspotentialet ligger under gridcellen, lukkes den pågældende indvinding. Stiger grundvandsstanden i senere tidsskridt så den igen ligger over gridcellens bund reaktiveres indvindingen.

For indtag anvendt til markvanding er det muligt at lade indvindingen være behovsstyret. I dette tilfælde angives den indvundne mængde ikke men beregnes af MIKE SHE, på basis af vandunderskuddet i rodzonen. For at kunne anvende MIKE SHE’s markvandingsrutine skal UZ og ET modulerne være medtaget i modelopsætningen. I markvandingsopsætningen skal der angives ’Irrigation Command Areas’ og et ’Irrigation demand’. Førstnævnte beskriver hvorfra vandet skal indvindes (f.eks. vandløb eller grundvand) og hvordan det påføres modellen, mens sidstnævnte angiver betingelserne for hvornår og hvor meget der skal vandes samt de områder der skal vandes.

Der er mulighed for at vælge mellem forskellige kildetyper herunder vandløb eller enkelt boring. Med kildetypen ”single wells” er det muligt at angive de enkelte indtag anvendt til markvanding og indplacere disse i modellen ved deres geografiske placering (x, y og z-koordinater). Vandet kan påføres marken på tre forskellige måder: Sprinkler (sprinkler), dryp (drip) eller flade (sheet) vanding. Ved sprinkler metoden påføres vandet som ekstra nedbør, mens det ved dryp vanding tilføres direkte til jordoverfladen som opstuvet vand. Ved flade vanding skal der specificeres et areal inden for Command arealet, hvor vandet tilføres på overfladen som opstuvet vand og derfra via overfladisk afstrømning kan blive distribueret til tilstødende modelceller. Hvornår og hvor meget der skal vandes kan specificeres ved forskellige behovstyper, fx vandindholdet i rodzonen eller en ”afgrøde-stress-faktor”, der er et mål mellem den faktiske evapotranspiration og en afgrøde specifik evapotranspiration.

4.4 MIKE HYDRO River

Overfladevandssystemet (vandløb og søer) håndteres af MIKE HYDRO River, der er fuldt integreret med MIKE SHE. MIKE HYDRO River løser en endimensional vandstrømning og transport i vandløb med mulighed for en detaljeret beskrivelse af vandløbsnetværket og vandløbstværsnittene, inklusiv beskrivelse af eventuelle bygværker i vandløbssystemet samt oversvømmelsesområder i tilfælde af en høj vandstand.

Den fysiske udformning af vandløbssystemet beskrives i MIKE HYDRO River ved en digitalisering af vandløbenes geografiske placering, hvilket kan opnås ved import af et GIS vandløbstema i shape format, samt geometrisk beskrivelse ved vandløbstværsnit (kote beskri-

velse af tværsnit). Ved beregningerne i MIKE HYDRO River er det kun den samlede vandløbslængde og tværsnitsgeometri der er betydende, mens den geografiske placering af vandløbene kun har betydning, når MIKE HYDRO River og MIKE SHE kobles. Vandløbslængden beregnes automatisk ud fra digitaliseringen af vandløbene, og der tildeles et ”chainage” nummer for hvert beregningspunkt, der angiver den fortløbende længde af vandløbet. Den geometriske udformning af vandløbene (tværsnitsbeskrivelsen) kobles til vandløbene via et chainage nummer, så det kan specificeres, hvor i vandløbet de enkelte tværsnit er placeret. Der kan imidlertid være nogen usikkerhed ved den automatiske beregning af vandløbslængden baseret på digitaliseringen, og der er derfor mulighed for at specificere nogle brugerdefinerede punkter, hvor chainage angives. Ved at angive chainage ved start og slut af vandløb sikres det, at vandløbet får den korrekte længde, endvidere giver brugerdefinerede punkter mulighed for at styre præcist hvor et tværsnit skal placeres i et vandløb, hvilket kan være nyttigt i forbindelse med placering af eksempelvis bygningsværker eller til at placere et beregningspunkt, hvor der eksisterer observerede data.

MIKE HYDRO River tilbyder forskellige løsningsmetoder til beregning af vandstrømningen varierende fra detaljerede metoder, der kan tage hensyn til eksempelvis tidevand og ”backwater” effekter, til mere simple approksimationer, hvor vandet routes (flyttes) nedstrøms i systemet. Til beskrivelse af vandløbsstrømningen i DK-modellen er det valgt at anvende en forholdsvis simpel løsningsmetode ”kinematic routing”. Denne metode er vurderet at være tilstrækkelig i forbindelse med opgørelsen af den overordnede vandbalance og har den fordel, at løsningen er betydelig hurtigere end de øvrige metoder. Endvidere er løsningsmetoden (numerisk) stabil, hvilket betyder, at der kan anvendes meget store tidsskridt på op til 12 - 24 timer, hvor de mest detaljerede løsningsmetoder kræver tidsskridt på minut basis.

I kinematic routing beregnes vandstrømningen i vandløbet successivt startende fra opstrøms ende af et vandløb. Vandmængden i et beregningspunkt beregnes ved en simpel addition af vandstrømningen i punktet umiddelbart opstrøms og den laterale indstrømning (fra grundvandsmagasinet) mellem de to punkter. Vandstanden i vandløbene beregnes efterfølgende baseret på vandstrømningen samt en Q-h relation, hvor Q-h relationen enten kan specificeres direkte eller beregnes i MIKE HYDRO River på basis af indlagte vandløbstværsnit. Ved metoden kræves der kun en angivelse af vandløbsbundens ruhed, som kan distribueres såvel mellem vandløbene som inden for et vandløb. MIKE HYDRO River tilbyder flere metoder til beregning af vandløbsbundens modstand, hvoraf det er valgt at benytte Mannings modstandsformel med et Manningtal (M) som input.

For hvert vandløbs endepunkt skal der specificeres randbetingelser, hvor de to mest almindelige er angivelse af fluks eller vandstand, der begge kan være konstante eller tidsvarierende. For alle beregningspunkter kan der ligeledes specificeres en ekstern randbetingelse, der eksempelvis kan benyttes til at indlægge spildevandsudledninger, så vandmængden herfra inkluderes i strømningsberegningerne for vandløbet.

Udvekslingen mellem grundvandsdelen (MIKE SHE) og vandløbene (MIKE HYDRO River) styres af gradienten mellem vandstand (i vandløbet) og grundvandspotentialet samt en konduktans, der beskriver strømningsmodstanden mellem de to medier. Konduktansen kan beregnes på tre forskellige måder:

1. *Kun akvifer*. Denne metode kan anvendes, hvis vandløbet står i direkte kontakt med akviferen, dvs. det antages, at vandløbsbunden ikke udgør en lavpermeabel barriere.
2. *Kun vandløbsbund*. I nogle tilfælde vil sedimentet i vandløbsbunden udgøre en lavpermeabel zone med en hydrauliske ledningsevne, der er betydelig lavere end den omkringliggende akvifer. Tryktabet over den lavpermeable vandløbsbund kan derfor være dominerende, og det vil være tilstrækkeligt at tage hensyn til ledningsevnen i vandløbsbunden.
3. *Akvifer + vandløbsbund.* I dette tilfælde beregnes konduktansen ud fra en kombination af den hydrauliske ledningsevne i akviferen samt vandløbsbunden.

I DK-model2019, ligesom i DK-model2014 er *akvifer + vandløbsbund* anvendt for at beregne konduktansen.

5. Modelopstilling

De syv delmodeller dækker tilsammen et landareal på i alt 42704 km^2, der er fordelt på de syv delområder som angivet i Tabel 8. Læsø, Anholt og Samsø er ikke inkluderet i DK modellen. Delmodellerne er opstillet i UTM zone 32 EUREF89 og modeltopografien er baseret på DHM/raster 1,6m, mens havbunden er fra AIS databasen (www.dmu.dk).

Tabel 8. Areal samt UTM koordinater for de 7 delmodeller i DK-modellen

Delområde	Samlet areal (km^2)	Landareal (km^2)	UTM nord	UTM øst
DK1 (Sjælland)	9607	7195	6035000 - 6240000	615000 - 750000
DK2 (Sydhavsøerne)	3443	2036	6035000 - 6120000	615000 - 740000
DK3 (Fyn)	5329	3484	6064000 - 6167000	542000 - 628000
DK4 (Sønderjylland)	9674	7907	6071000 - 6186000	439000 - 571500
DK5 (Midtjylland)	13112	11551	6172000 - 6278000	439000 - 624000
DK6 (Nordjylland)	12632	9943	6248000 - 6405500	442000 - 602000
DK7 (Bornholm)	728	589	6109000 - 6145000	861000 - 894000
Samlet	**54525**	**42704**		

5.1 Diskretisering

Havet er benyttet som en ydre randbetingelse for modellen. For at minimere effekten af randen er den placeret 0,5 - 2,5 km fra kysten. Delmodellerne er opstillet med en horisontal diskretisering på 500 x 500 m for delmodel 1 - 6 og 250 x 250 m for delmodel 7.

I det vertikale plan er den hydrostratigrafiske model repræsenteret i den numeriske grundvandsmodel ved anvendelse af gennemgående beregningslag. Antallet af vertikale lag varierer for de enkelte delområder afhængigt af de hydrogeologiske forhold. Fælles for alle delmodeller, undtaget Bornholm, er at den hydrostratigrafiske model for de øverste 2 m er defineret på baggrund af jordsartskortet og at det øverste beregningslag ligeledes er defineret med en konstant tykkelse på 2 m fra topografien. Det øverste beregningslag for Bornholm er 3 m.

De numeriske modeller for Sjælland, Sydhavsøerne og Fyn er endvidere opstillet efter samme princip, hvor alle de hydrostratigrafiske lag er repræsenteret i den numeriske model. Modsat forholder det sig for Jylland, hvor det ikke er alle de hydrostratigrafiske lag der er repræsenteret i de tre delområder, og her er den numeriske model derfor konstrueret ved at sammenlægge to eller flere at de hydrostratigrafiske lag.

5.1.1 Beregningslag DK1, DK2 og DK3 (Sjælland, Lolland, Falster, Møn, Fyn og Sydhavsøerne)

Beregningslagene følger den hydrostratigrafiske model med skift mellem ler- og sandenheder (magasiner). Beregningslaget umiddelbart over kalklaget indeholder både den nedre

kvartære ler enhed (KL5 og KL4 for hhv. DK1-DK2 og DK3) og den paleocæne ler (PL1). Herudover er der et beregningslag for toplaget (top2m), samt et beregningslag for kalken.

I den kvartære lagpakke (under toplaget) er der defineret et beregningslag for hvert af de vertikale niveauer med sandlegemer. Disse lag er lagt ind ved at benytte top og bund af de tolkede sandlegemer. I områder hvor sandlegemerne eksisterer, er top og bund af beregningslaget således sammenfaldende med top og bund af sandlegemet. I områder uden sand er der ikke defineret nogen tykkelse af sandlegemerne i den hydrostratigrafiske model, dvs. top og bund er sammenfaldende, for disse områder er der anvendt en minimumstykkelse på 0,5 m for beregningslagene, der automatisk genereres af MIKE SHE under præprocesseringen. Mellem hvert sandlag er der defineret beregningslag til repræsentation af det kvartære ler.

På Sjælland genfindes den prækvartære ler kun i den vestlige del, hvilket er indbygget som en linse på samme vis som sandenhederne, hvor den prækvartære overflade er anvendt som top mens kalken udgør den nedre grænse.

Den numeriske model består således af 9 og 11 beregningslag for hhv. Fyn og Sjælland/Sydhavsøerne. Den vertikale opdeling af modellen er illustreret på principskitserne, Figur 6 og Figur 9, mens en beskrivelse af de hydrostratigrafiske enheder og angivelse af beregningslagsnumre er angivet i Tabel 2 og Tabel 3.

5.1.2 Beregningslag – DK4, DK5 og DK6 (Jylland)

I lighed med den numeriske model for øerne er det øverste beregningslag for hele Jylland gennemgående med en fast lagtykkelse på 2 m, der er repræsenteret ved de geologiske enheder i jordartskortet. Den samlede hydrostratigrafiske model for Jylland er defineret ved 25 flader, der beskriver seks vertikalt arrangerede sandenheder i den kvartære lagpakke og seks niveauer af sand i den prækvartære lagpakke samt en kalk enhed. Kalk enheden er nedadtil afgrænset til 50m under toppen af kalken.

Der er imidlertid en betydelige variation i udbredelsen af de enkelte sandenheder i de tre delmodeller for Jylland og derfor ligeledes forskel på opstillingen af den numeriske model mht. antallet af beregningslag. Her er der taget udgangspunkt i lagtykkelserne i den hydrostratigrafiske model, hvor lag med en betydelig udbredelse og mægtighed er medtaget som beregningslag, mens lag med mindre udbredelse og tykkelse er slået sammen til ét beregningslag. De kvartære og prækvartære sandlegemer er lagt ind i modellen ved at benytte deres tolkede top og bund. I områder hvor de hydrostratigrafiske enheder eksisterer, er top og bund af beregningslaget således sammenfaldende med top og bund af den hydrostratigrafiske enhed. I områder hvor den hydrostratigrafiske enhed ikke eksisterer, dvs. top og bund er sammenfaldende, er der anvendt en minimumstykkelse på 0,5 m for beregningslagene, der automatisk genereres af MIKE SHE under præprocesseringen. Mellem hvert sandlag er der defineret beregningslag til repræsentation af leret mellem de forskellige niveauer af sandlegemer.

DK4 - Sydjylland
I område 4 genfindes alle de kvartære sandenheder, men KS1-KS2 og KS5-KS6 er typisk ikke adskilt af ler, hvorfor disse er slået sammen parvis til beregningslag. I prækvartæret genfindes typisk alle sand- og ler enheder, og i modellen repræsenteres disse ved individuelle beregningslag. Det nedre kvartære ler (KL7) og øvre prækvartære ler (PL1), er slået sammen i ét beregningslag. Nedadtil er modellen afgrænset ved et beregningslag der strækker sig 50 m under bunden af PS6 Da kalken dykker kraftigt mod syd, indeholder dette beregningslag udelukkende PL7 inden for modelområdet. Den numeriske model for område 4 består således af 22 beregningslag. Den vertikale opdeling af modellen er illustreret på principskitsen, Figur 12, mens en beskrivelse af de hydrostratigrafiske enheder og beregningslagene er angivet i Tabel 4.

DK5 - Midtjylland
I område 5 genfindes alle de kvartære sandenheder, men KS1-KS2 og KS5-KS6 er typisk ikke adskilt af ler, hvorfor disse er slået sammen parvis til beregningslag. I prækvartæret genfindes typisk alle sand- og ler enheder, og i modellen repræsenteres disse ved individuelle beregningslag. Det nedre kvartære ler (KL7) og øvre prækvartære ler (PL1), er slået sammen i ét beregningslag. Nedadtil er modellen afgrænset ved et beregningslag der strækker sig 50 m under bunden af PS6. Da kalken dykker kraftigt mod syd, indeholder dette beregningslag primært PL7 i den sydlige og vestlige del af modelområdet og primært Kalk mod øst ved Djursland og Aarhus. Den numeriske model for område 4 består således af 22 beregningslag. Den vertikale opdeling af modellen er illustreret på principskitsen, Figur 12, mens en beskrivelse af de hydrostratigrafiske enheder og beregningslagene er angivet i Tabel 4.

DK6 - Nordjylland
I område 6 genfindes alle de kvartære sandenheder, men KS1-KS2 og KS5-KS6 er typisk ikke adskilt af ler, hvorfor disse er slået sammen parvis til beregningslag. I prækvartæret er PS2 og PS5 typisk ikke eksisterende, hvorfor ler enhederne PL2-PL3 og PL5-PL6 er slået samme, ellers genfindes de resterende prækvartære sand- og ler enheder inden for modelområdet, og i modellen repræsenteres disse ved individuelle beregningslag. Det nedre kvartære ler (KL7) og øvre prækvartære ler (PL1), er slået sammen i ét beregningslag. Nedadtil er modellen afgrænset ved et beregningslag der strækker sig 50 m under bunden af PS6. Dette lag indeholder primært Kalk inden for modelområdet, på nær mindre områder mod syd hvor PL7 optræder i større mægtighed. Den numeriske model for område 4 består således af 22 beregningslag. Den vertikale opdeling af modellen er illustreret på principskitsen, Figur 12, mens en beskrivelse af de hydrostratigrafiske enheder og beregningslagene er angivet i Tabel 4.

5.1.3 Beregningslag – DK7 (Bornholm)

Den hydrogeologiske tolkning for Bornholm er baseret på en pixeltolkning, og der er ikke udviklet en egentligt hydrostratigrafisk model, der afgrænser geologiske enheder med ensartede hydrauliske egenskaber. Dette skyldes den komplekse geologiske opbygning af Bornholm, der hydraulisk set kompliceres yderligere af sprækker. Det øverste beregningslag er her afgrænset til de øverste 3 m, med en blanding af sand, ler og andet fra jordartskortet. Under toplaget er der defineret 6 beregningslag, hvoraf det første indeholder de kvartære

aflejringer, med undtagelse af aflejringer i de dybe dalstrukturer. De næste fire beregningslag opdeler det opsprækket grundfjeld og underste lag udgør bundlag af primært ikke opsprækkede bjergarter, se i øvrigt Tabel 7.

5.2 Nettonedbør og fordeling til grundvand/overfladevand

Den drivende variabel for grundvandsdannelsen er nettonedbøren, der beregnes med det integrerede Two-Layer UZ-modul baseret på daglige værdier for nedbør, potentiel fordampning og temperatur. Som input er der anvendt DMI klimagrid i opløsningerne 10 x 10 km for nedbør (Vejen et al, 2014) samt 20 x 20 km for temperatur og fordampning (Scharling, 1999).

For at tage højde for systematiske målefejl som følge af befugtningstab og vindkorrektion er der foretaget en korrektion af nedbøren. Med det nationale vandbalanceprojekt (Refsgaard et al., 2011), blev det anbefalet at anvende en dynamisk korrektion af nedbøren, ligesom der kom konkrete anbefaler mht. beregning af fordampningen. Baseret på disse anbefalinger har DMI etableret et nyt 10 x 10 km nedbørsgrid baseret på en dynamisk korrektion (Vejen et al. 2014). Til kalibrering af modellen er der anvendt de dynamisk korrigeret nedbørs klimagrid fra DMI. For perioden efter 2010 er der anvendt en simpel dynamisk korrektion af DMI's ukorrigerede nedbørsdata, da analyse af DMI's dynamisk korrigerede data for denne periode ikke var konsistente med den foregående periode. Dette skyldes sandsynligvis at der er sket en stor reduktion i antallet af nedbørsstationer samtidig med at DMI har skiftet målere. Reference fordampningen korrigeret med en faktor 0.95 for arealet Vest for Storebælt, som anbefalet i (Refsgaard et al., 2011). Der er genereret klimafiler dækkende hele landet for hhv. nedbør, reference fordampning samt temperatur.

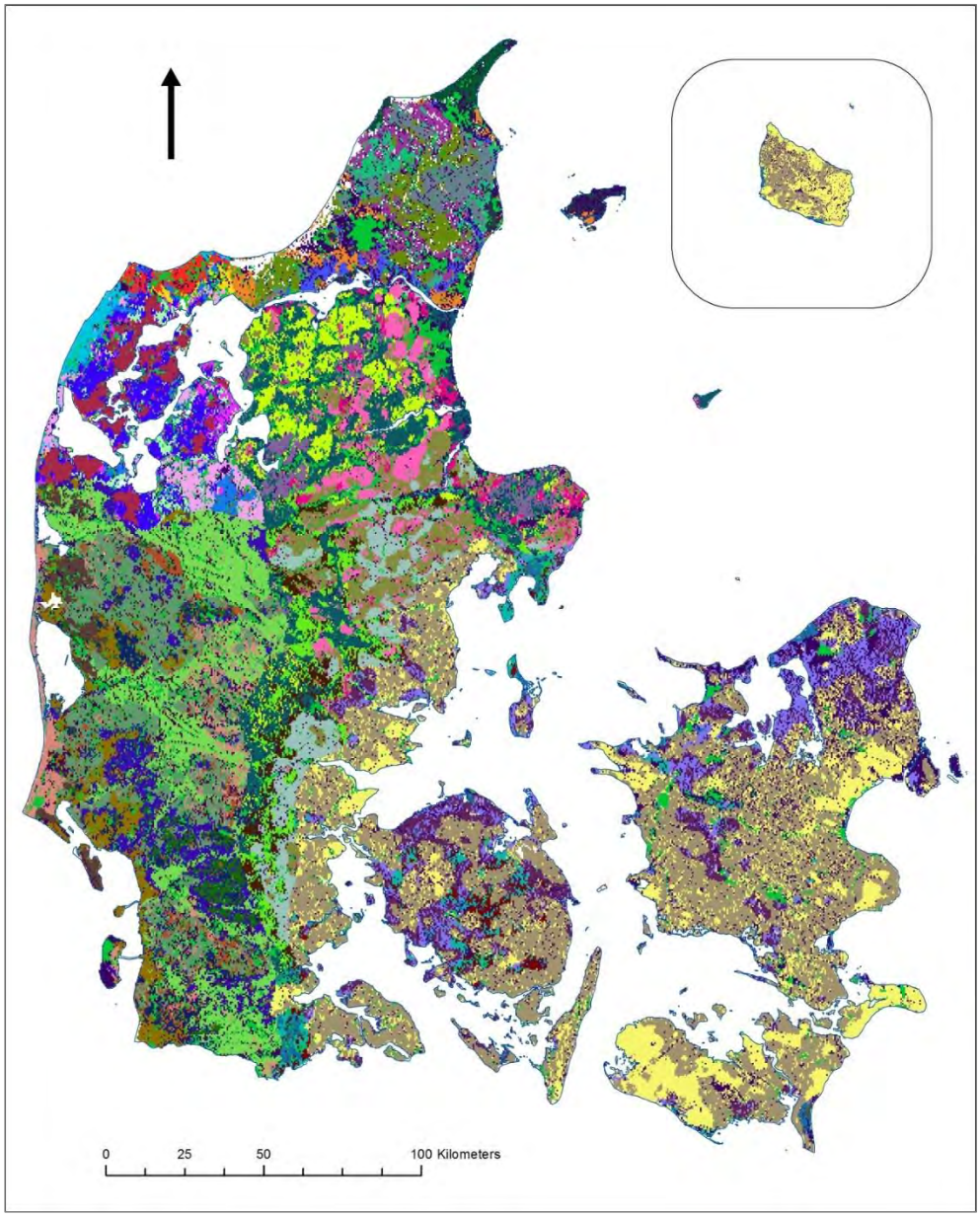
Nedbør der rammer modeloverfladen vil være tilgængelig for fordampning og nedsivning til grundvandet. En stor del af den nedbør der falder på bebyggede arealer vil imidlertid bortledes direkte til vandløbene via kloakering og således ikke give tilskud til grundvandsdannelsen. Dette er medtaget i modellen ved anvendelse af MIKE SHE optionen "Ponded drainage", hvor det er muligt at angive et areal inden for hvilket en specificeret andel af nedbøren ledes direkte til vandløbet eller til modelranden. Bortledningen af vand fra disse arealer følger drænopsætningen, se afsnit 5.2.1. Fraktionen af vand der skal bortledes fra hvert grid i modellen er beregning på basis af et GIS tema (Levin, 2012), der i en 10 x 10 m opløsning angiver hvor impermeabelt et grid er. De 10 x 10 m grid er aggregeret til DK-modellens grid (500 m og 250 m for Bornholm), hvoraf det er beregnet hvor mange procent af et grid, der er impermeabelt. Dette kort anvendes som udgangspunkt for en skalering ved kalibrering af fraktionen af vand der bortledes fra via ponded drainage. På dets vej til vandløbet forsinkes det bortledte vand fra ponded drainage i et konceptuelt storage (kloaksystemet), som i modellen styres af en tidskonstant.

Fordampningen i den umættede zone er betinget af hhv. jordtypen i den umættede zone samt den aktuelle vegetation.

I Two-Layer modulet indgår tre jordfysiske parametre til beregning af den mængde vand, der er tilgængelig for fordampning i den umættede zone: vandindhold ved hhv. mætning (θ_s), markkapacitet (θ_{fc}) og visnepunkt (θ_{wp}). Endvidere skal der specificeres en infiltrationskapacitet, der angives som en mættet hydraulisk ledningsevne for overjorden. Institut for Agro-

økologi ved Århus universitet har i forbindelse med Midtvejsevaluering af Vandmiljø Plan III (Børgesen et al., 2009) inddelt Danmark i fem georegioner og underinddelt hver georegion i forskellige jordtyper, Figur 28. Resultatet er et jordtypekort som er mere detaljeret og regionaliseret end det tidligere JB-type kort (Børgesen & Schaap, 2005) (Greve et al., 2007).

Til parametrisering af DK-modellens Two-layer modul er georegionskortet anvendt med tilhørende jordfysiske parametre for B-horisonten til hver jordtype estimatet af DJF (VMPIII). Da en række jordtyper har tilknyttet samme jordfysiske parametre for B-horisonten er Georegionskortet reelt reduceret til 19 unikke jordtyper for hele Danmark. Værdierne for de jordfysiske parametre anvendt i modellen fremgår at tabel B3-2 i Bilag 3.



Figur 28. Georegionskortet resamplet til gridopløsningen i DK-modellen, se Bilag 3 for legende og værdierne for de jordfysiske parametre.

Rodzonedybden (RZD) er en anden væsentlig parameter i Two-layer modulet og afhænger af såvel vegetationstype samt jordbundens beskaffenhed. Rodzonedybden vil således være

forskellig for eksempelvis skov og landbrugsarealer, ligesom der vil være forskel på arealer med en permanent afgrøde og arealer, der indgår i almindelig omdriftspraksis. Af manualen til programmet EVACROP til beregning af den aktuelle fordampning og afstrømningen fra rodzonen (Olesen og Heidemann, 2002) samt anbefalingerne i (Refsgaard et al., 2011) fremgår det, at den mest betydende faktor for udviklingen af rodzonedybden er jordbundsforholdende, mens den aktuelle landbrugsafgrøde har mindre betydning. Der er således estimeret maksimale effektive rodzonedybde for de fire dominerende afgrøder anvendt i DK-modellen for fire overordnede jordtyper inddelt efter JB-klassifikationen. De anbefalede maksimale effektive rodzonedybder for landbrugsarealet fremgår af Tabel 9. Variation i rodzonedybderne fremgår af Figur 29.

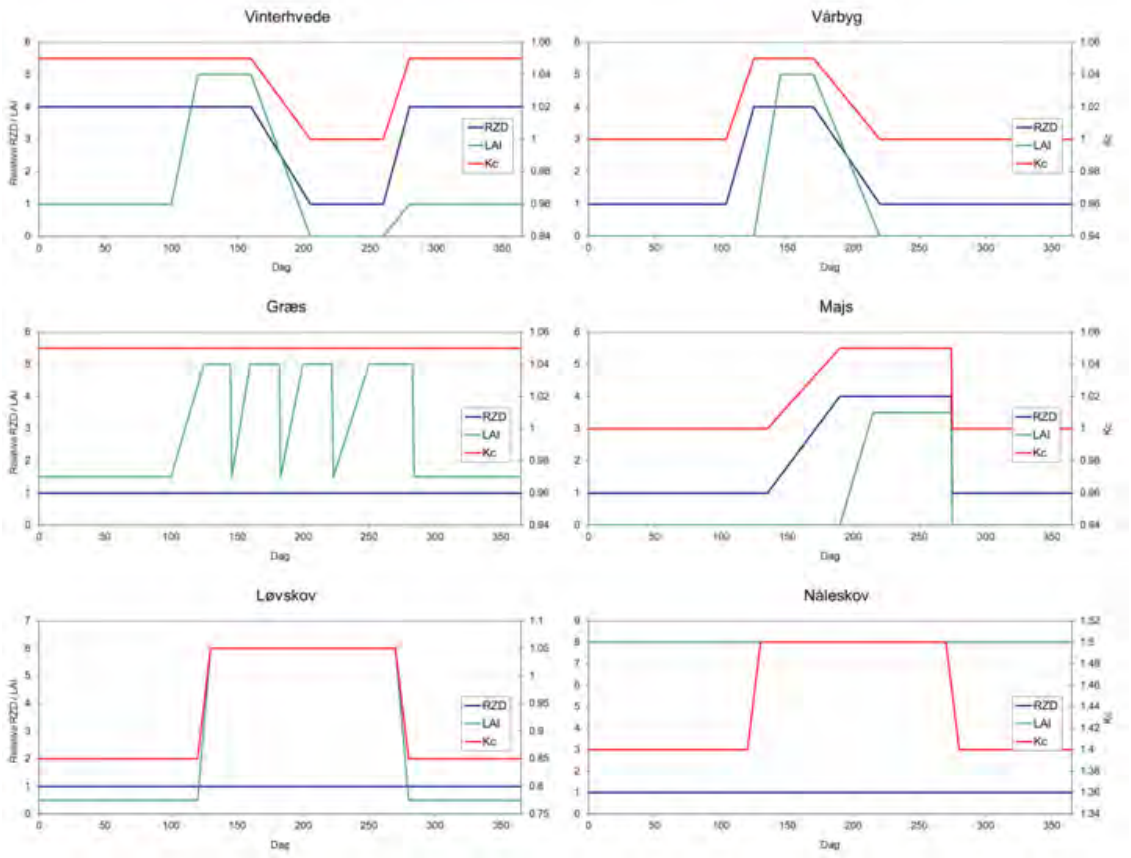
Tabel 9. Anbefalede maksimale effektive rodzonedybde (mm) for forskellige afgrøder og jordbundstyper (JB.

JB Type	Vinterhvede	Vårbyg	Majs	Græs
JB1	600	600	600	600
JB2	900	800	900	700
JB3-4	1200	1100	1200	800
JB5-10	1500	1400	1500	900

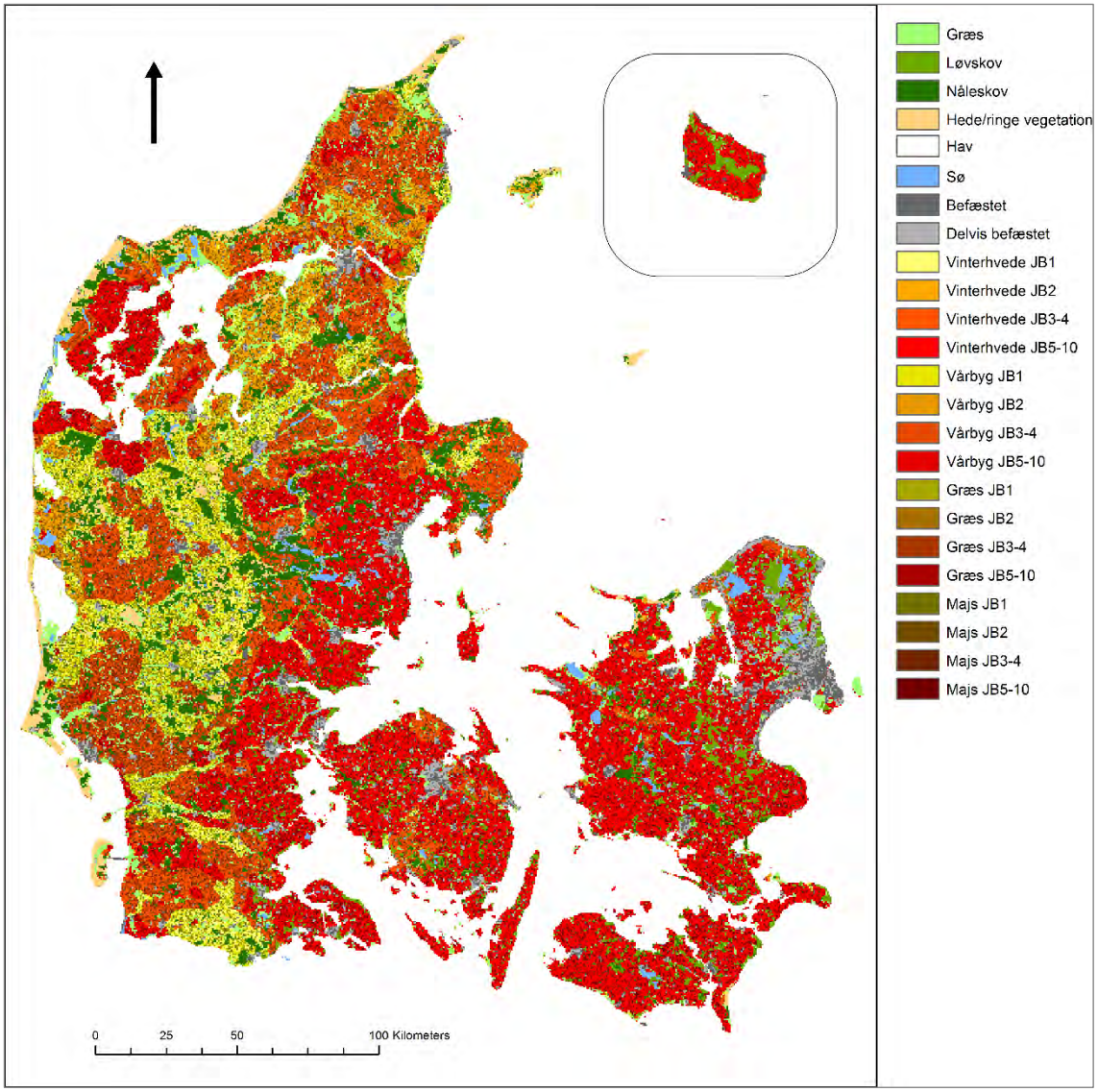
Arealanvendelsen er opdelt i seks overordnede ”vegetationstyper” på basis af Corine-data /www.dmu.dk/.1) permanent græs 2) Skov, 3) Hede/ringe vegetation, 4) Søer/hav, 6) By/befæstet areal og 6) Landbrug i omdrift. ”Vegetationstyperne” ”by” og ”søer” er medtaget for at opnå en fordampning fra disse arealer. For skov er der desuden skelnet mellem løvskov og nåleskov. Kategorien Landbrug er desuden underinddelt i fire afgrøder, Vinterhvede, vårbyg, græs og majs. Disse fire afgrødetyper er fordelt tilfældigt ud over landbrugsarealet ud fra en procentuel fordeling som svarer til andelen af en given afgrøde inden for de gamle amter jævnfør tal fra Danmarks statistik.

På basis af antagelsen om, at rodzoneudviklingen primært er bestemt af jordtypen og i mindre grad af den aktuelle afgrøde, er vegetationstypen ”landbrug” opdelt i 4 grupper svarende til én for hver af JB-typerne 1, 2 samt én for JB3-JB4 og én for JB5 – JB10. Samlet set giver dette 16 kombinationer af afgrøde og jordtype for landbrugsarealerne, Tabel 9.

For alle vegetationstyper er der specificeret værdier for bladareal indeks (LAI), rodzonedybde (RZD) samt en afgrøde koefficient (Kc). Den sæsonmæssige udvikling af LAI, RZD og Kc varierer for hver unik vegetationstype, dog er dynamikken for samme afgrøde bibeholdt for LAI og Kc, mens RZD varierer med jordtypen. Dynamikken for udvalgte vegetationstyper er illustreret i Figur 29. Et samlet kort over alle 23 arealanvendelser og kombination af jordtype og vegetationstype som anvendt i DK-modellen er illustreret i Figur 30.



Figur 29. Tidslig udvikling af rodzonedybde (RZD), LAI og Kc for landbrugsafgrøder samt skov (bemærk at RZD er angivet relativt til minimums RZD, hvilket er identisk for alle jordtyper)



Figur 30. Rumlig fordeling af arealtypekoder

5.2.1 Dræn

Dræn er i DK-model2019 er differentieret efter arealanvendelse, jordtype og topografisk variabilitet. Tidligere, var drændybden konstant (0.5m under terræn), mens dræn tidskonstanten var uniform inden for hvert modelområde, men via kalibrering forskellig mellem modelområderne.

Det nye dræn- parametriseringskoncept bygger på regionalisering, hvor en rumlig konsistent parametrisering opnås på tværs af hele landet vha. en simpel konceptuel forståelse af drændynamikken og nogle få kalibreringsparametre. Drændybden er således regionaliseret efter et koncept hvor søer (0 m) og vådområder (0.1 m) har ingen eller meget lav drændybde, skov og landbrugsarealer har en overordnet drændybde på 0.75 m. Derudover er der indført en rumlig variation i drændybden som en funktion af den topografiske variation, bestemt som standard afvigelsen i topografi inden for hvert 500m grid. Dette er indført for at afspejle at der i områder med stor topografisk variabilitet vil opstå delområder hvor dræning aktiveres på

trods af at vandstande i 500m cellen står dybere end den generelle drændybde. Med kombinationen af den arealspecifikke og topografisk varierede parametrisering ligger drændybden i intervallet 0 - 1.125 m.

For dræntidskonstanten kan det omvendt forventes at den i områder med stor topografisk variabilitet er mindre, da dræning initialiseres tidligere samt at dræningen kun er aktive i en del af cellen. Dette afspejles ved at dræntidskonstanten ligeledes er parametriseret ved en kombination af specifikke tidskonstanter for forskellige arealanvendelser, jordtyper samt topografisk variabilitet og åbne drænsystemer.

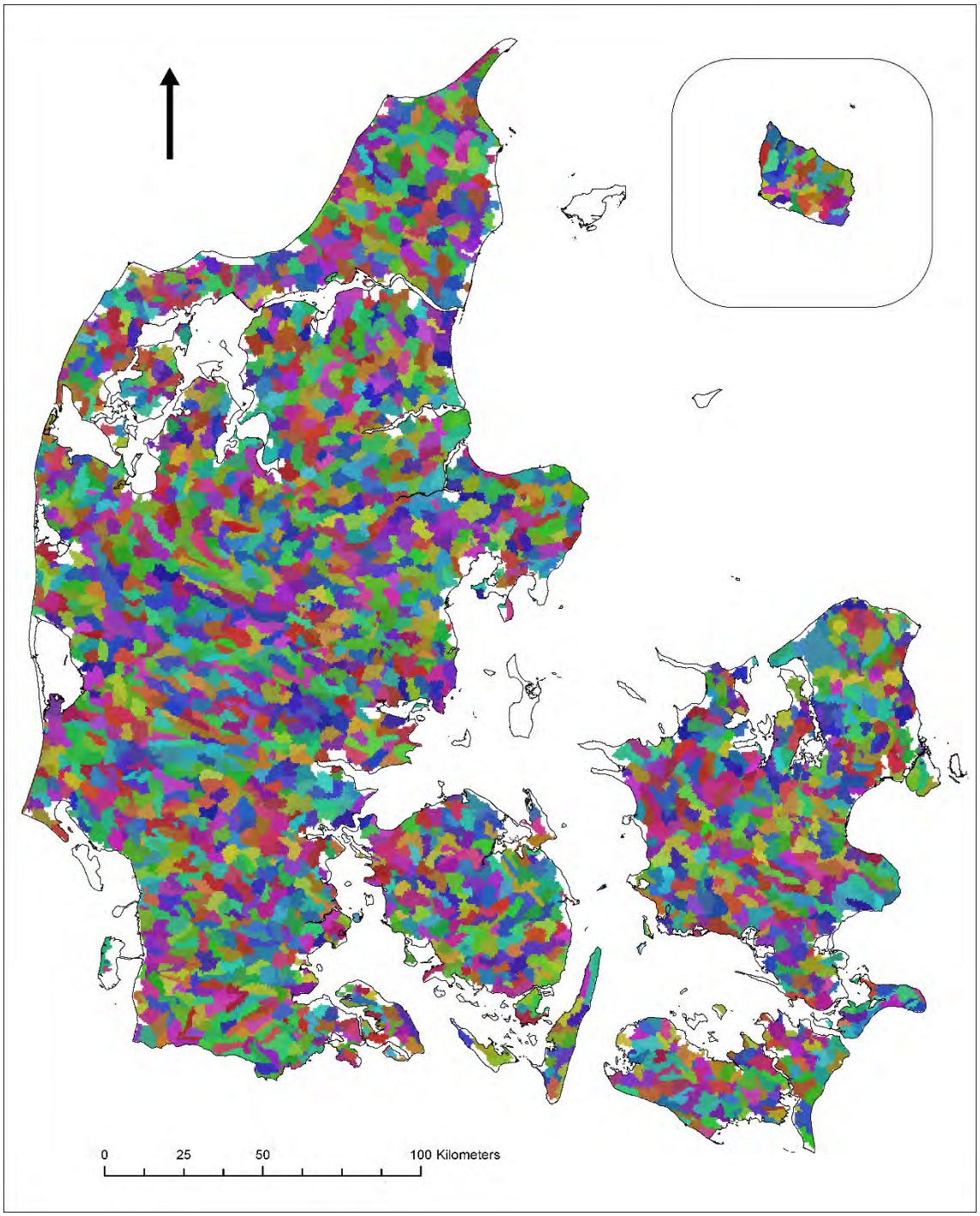
De åbne drænsystemer er inkluderet via et grid datasæt som afspejler tætheden af de FOT-vandløb der ikke indgår i DK-modellens vandløbs netværk. Disse udgøres overvejende af åbne dræn-kanaler og netværk i lavtliggende områder og skovområder, som ikke afspejler et naturligt vandløb der følger topografien. Den samlede længde af disse FOT-vandløb er beregnet pr. model-grid og anvendes til at øge dræntidskonstanten i områder hvor dræning foregår via åbne kanaler.

En samlet oversigt over de enkelte drænparametre er givet i afsnittet ”Udvælgelse af kalibreringsparametre”. Rumlige kort over drænparametre for hele landet baseret på ovennævnte regionaliseringsprincipper er illustreret i Figur 32 og Figur 33. En oplagt fordel ved den nye parametrisering af dræn er at den afspejler forskellige arealanvendelser og variationer i landskabet samt at den er rumlig konsistent på tværs af landet. Der vil være behov for fortsat ar arbejde med den optimale parametrisering og regionalisering i kommende versioner af DK-modellen, men dette er første skridt i retning af en mere konsistent regionalisering.

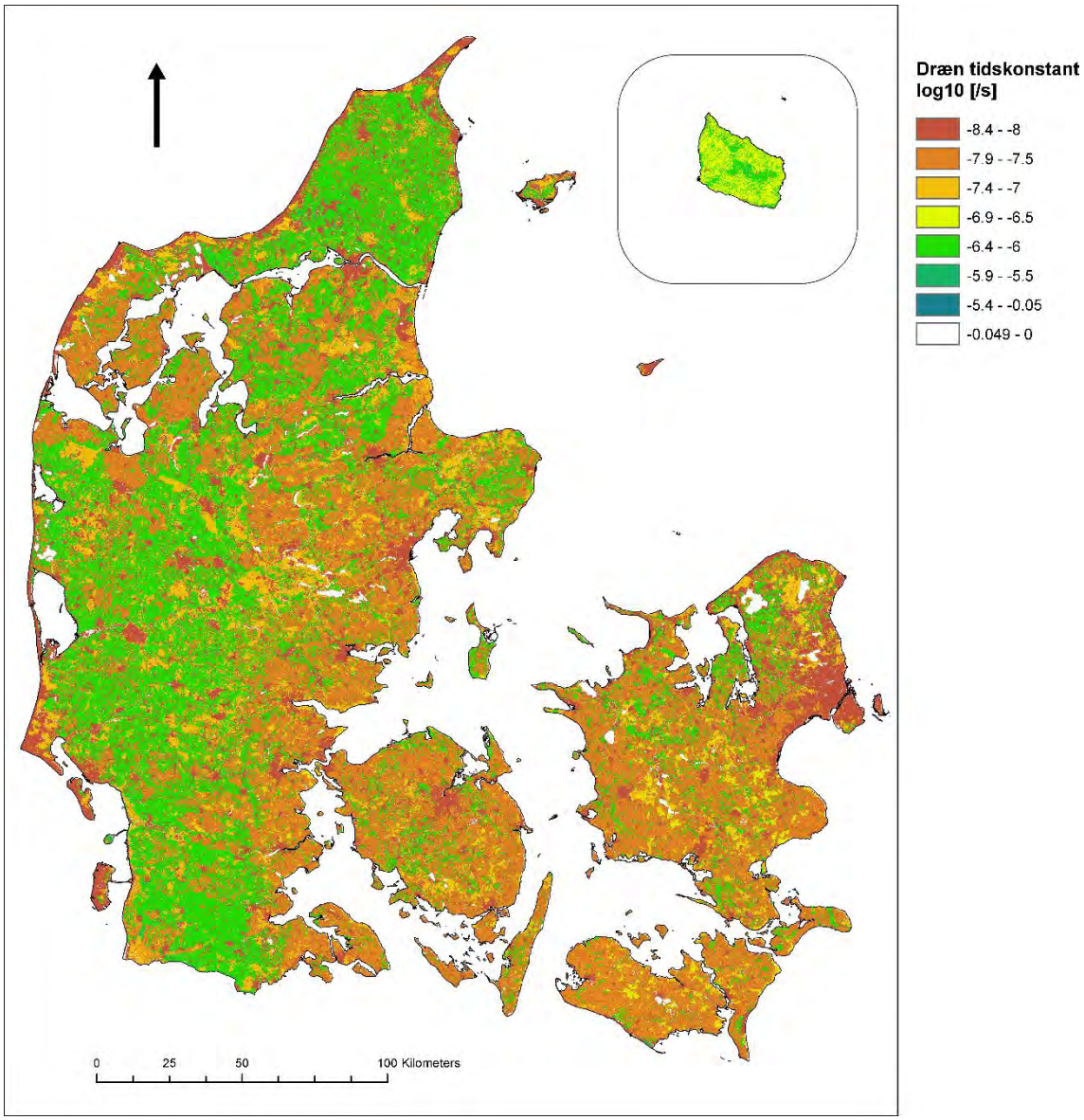
Dræningen sker til nærmeste vandløb ved definition af drænoplande. Oplandene er defineret på basis af et GIS-polygontema, der afgrænser - topografiske oplande med et middel areal på ca. 15 km^2, de såkaldte ”ID15-oplande”, der også er anvendt i den nationale kvælstofmodel (Højberg et al., 2015) og ved vurdering af indvindingers effekt på vandføringen (Henriksen et al., 2014). Drænoplandene til DK-model2019 er genereret ved:

1. Områder uden vandløbsoplande (kystnære områder) er tildelt værdien -1, hvorved der sker en dræning til havet (modelranden).
2. Oplande indeholdende MIKE HYDRO River vandløb er tildelt en unik drænoplandskode.
3. Drænoplandene med tilhørende drænkoder er konverteret til et 500 m grid (delmodel 1-6) eller 250 m grid (delmodel 7) og importeret til MIKE SHE. Efter præprocessering i MIKE SHE er drænoplandene gennemgået, og oplande med dræning til lokal depression er tildelt samme drænkode som nærmeste opland med MIKE HYDRO River vandløb inden for samme vandløbsopland.

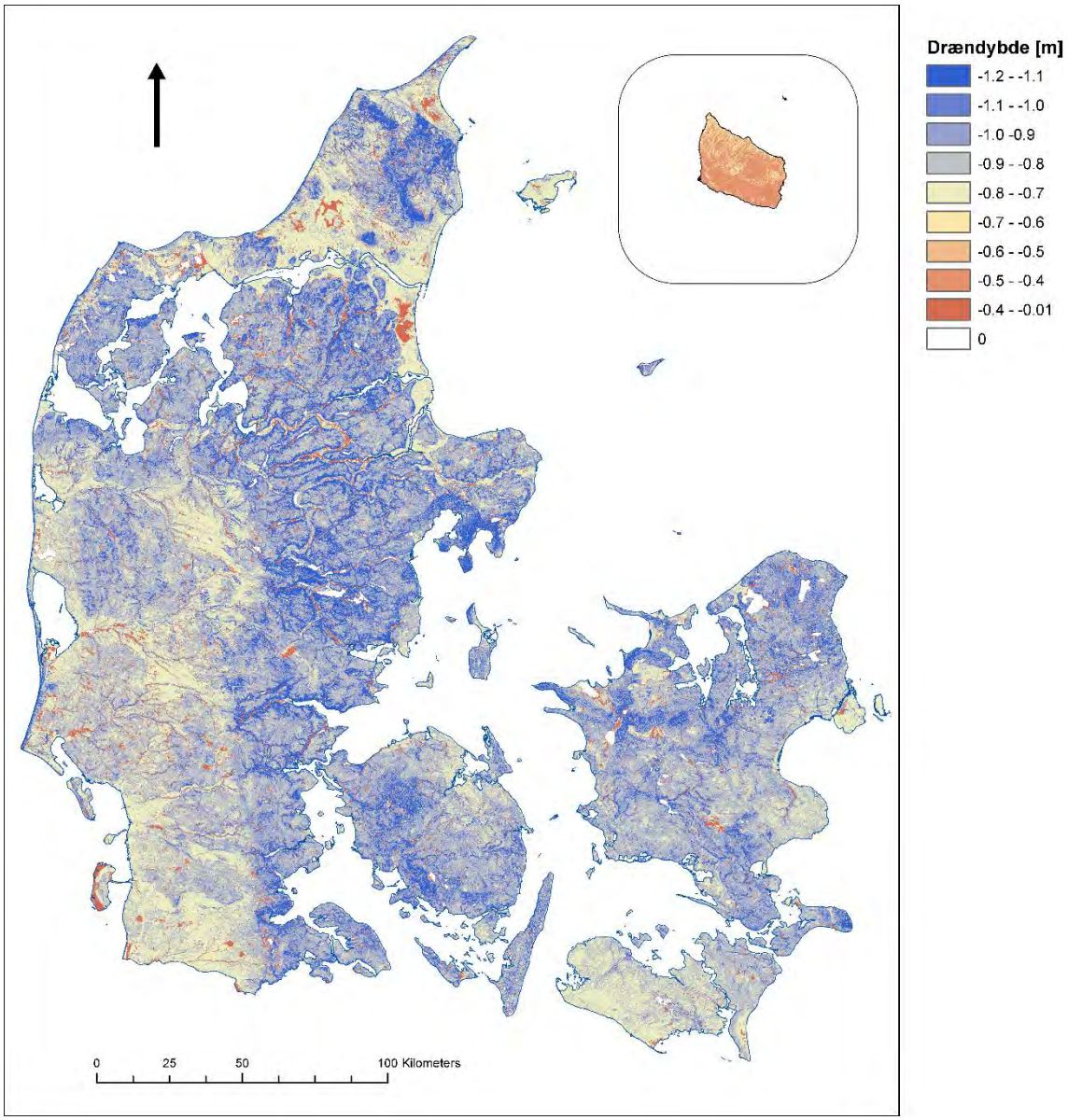
Det resulterende drænkodekort er illustreret i Figur 31.



Figur 31. Underopdeling efter drænkoder til bestemmelse af drænstrømningen. Inden for hver drænkodes polygon drænes der til nærmeste vandløb. De hvide områder er kystnære 1. ordens vandløbsoplande uden MIKE HYDRO River vandløb, fra disse arealer drænes der direkte til havet.



Figur 32. Dræn tidskonstant.



Figur 33. Drændybde.

5.3 Vandløb og Søer

I dette afsnit beskrives de vandløb inkl. tværsnit og søer, distribueret lækagekoefficient samt punktkilder inkluderet i DK-model2019.

Da modellen er opstillet til betragtning af den overordnede vandbalance, er det valgt at løse vandløbsstrømningen ved routing ("No discharge transformation"), hvor vandet i vandløbene bliver routet (flyttes) med en simpel routing metode. Af modeltekniske grunde er der i randbetingelsesfilen i MIKE HYDRO River specificeret en konstant minimumsvandføring opstrøms på 0,1 l/s, så vandløbene ikke løber tør.

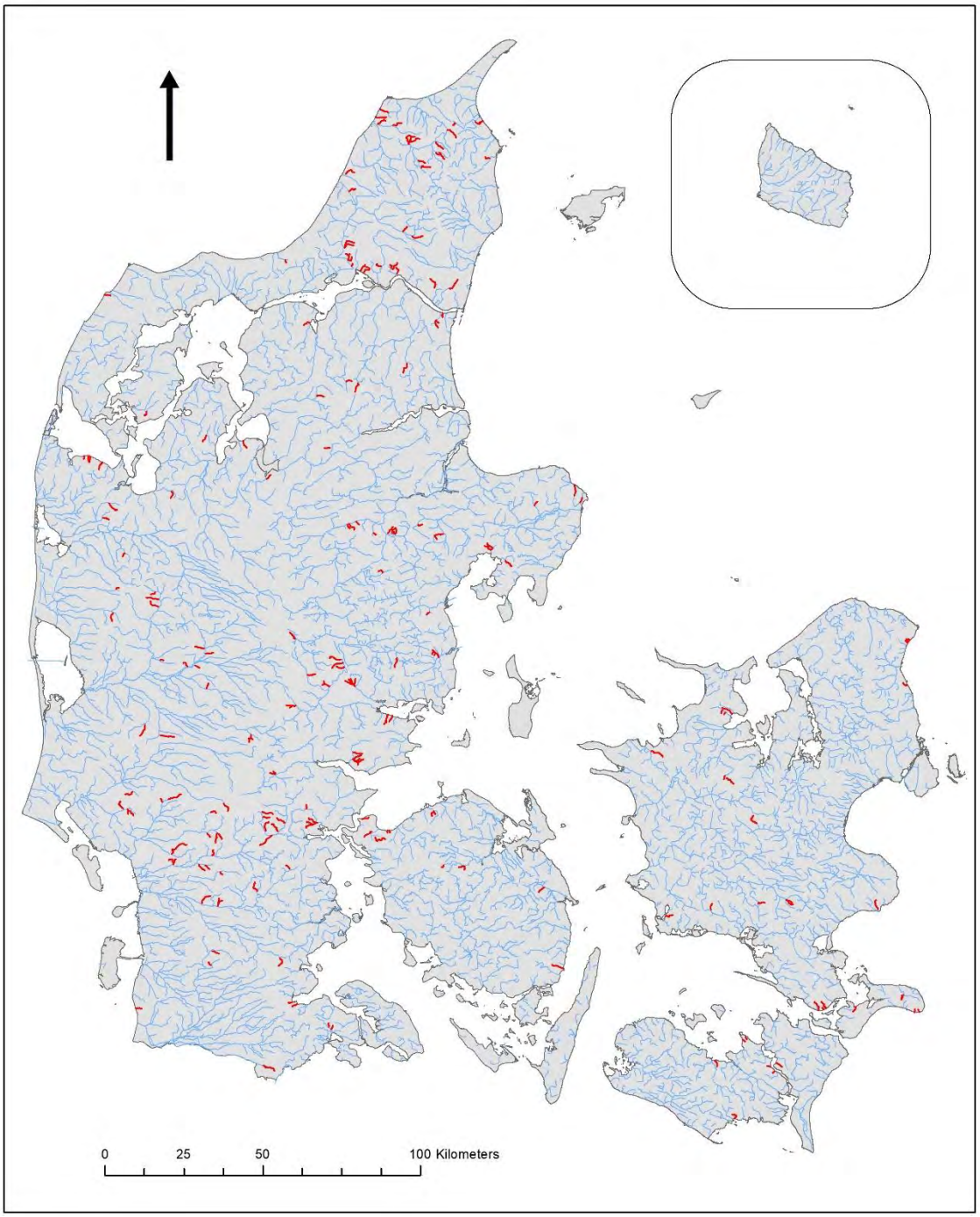
5.3.1 Vandløbsnetværk

Vandløbsnetværket er blevet opdateret én gang siden DK-model version 2014, hvor opdateringen indeholdt udbygning af vandløbsnetværket for at sikre at hver af de 3134 ID15-oplande inkluderer mindst et vandløb (undtaget kystnære oplande). I DK-model2019 er vandløbsnetværket udbygget med yderligere 202 vandløbsstrækninger og samlet indeholder DK-model2019 i alt 2933 vandløbsstrækninger, med en samlet længde på knap 16.500 km, Figur 34, med en fordeling for de enkelte delområder som vist i Tabel 10.

De nye vandløbsstrækninger er baseret på vandløbstemaet fra FOT (Fællesoffentligt Geografisk Administrationsgrundlag) der i nogle tilfælde er suppleret med vandløb fra AIS (www.dmu.dk). Det nye vandløbsnetværk er konverteret og samlet i MIKE HYDRO River filer (netværks-, tværsnits- og randbetingelsesfiler), som er tilføjet den eksisterende MIKE HYDRO River opsætning fra 2014.

Tabel 10. Vandløbsstrækninger og samlet antal km i hvert modelområde. Tal i parentes angiver opdateringen fra DK-model version 2014 til 2019.

Modelområde	Antal	Km
1	664 (21)	2849 (48)
2	201 (11)	832 (18)
3	256 (12)	1310 (26)
4	487 (49)	3222 (134)
5	778 (55)	4851 (135)
6	490 (54)	3312 (146)
7	54 (0)	253 (0)
Total	2930 (202)	16628 (509)



Figur 34. Oversigt over vandløbsstrækninger medtaget i MIKE HYDRO River. Strækninger angivet med blåt stammer fra DK-model2014, mens strækninger tilføjet ved opdateringen (DK-model2019) er angivet med rødt.

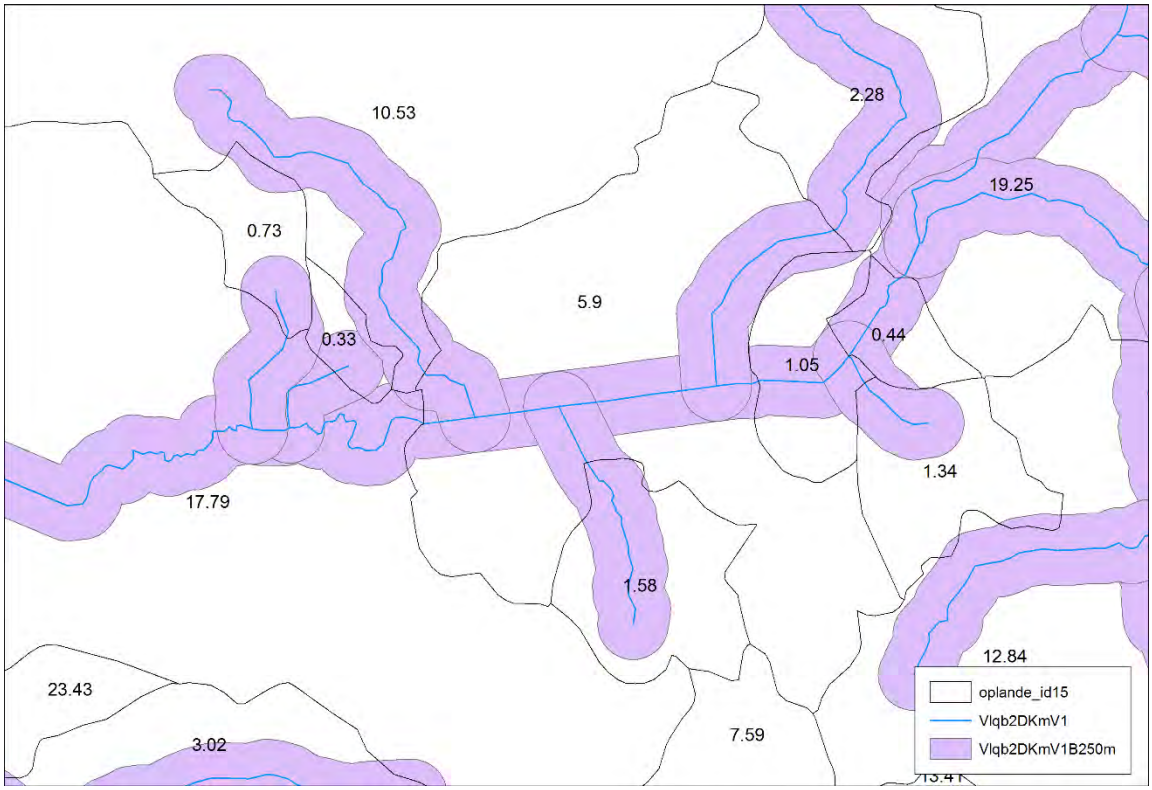
Det nye vandløbsnetværk for DK-model2019 dækker ikke samtlige omkring 22.000 km vandløb, der er målsat i vandområdeplanerne 2015-2021. I forhold til det samlede hydrologiske kredsløb, er der imidlertid i flere tilfælde opstillet målsætninger for vandløb, der har ringe betydning for det hydrologiske kredsløb på den skala som DK-model2019 opererer på.

Med begrænsningen i MIKE SHE med kun ét vandløb pr. gridcelle, vil det mange steder ikke være muligt at forfine vandløbsnetværket yderligere ved anvendelse af 500 m gridceller. Skal

der opnås en betydelig bedre opløsning af netværket, vil det være nødvendigt samtidigt at forfine den horisontale opløsning i modellen.

Målet med mindst ét vandløb inden for hvert ID15-opland har nogle steder været vanskeligt at opnå, idet nogle ID15-oplande er meget små, i nogen tilfælde under en kvadratkilometer. Dette er illustreret i Figur 35, hvor der er lagt en buffer ind omkring vandløbene på 250 m, svarende til at der skal være minimum 500 m mellem vandløbene før der kan defineres en udveksling mellem grundvand og overfladevand. Ved koblingen mellem MIKE SHE og MIKE HYDRO River det derfor i nogle tilfælde været nødvendigt at foretage mindre justeringer i vandløbsnetværksfilen, så der på nogle strækninger ikke er udveksling mellem MIKE HYDRO River og MIKE SHE. Det har ingen betydning for vandløbsberegningerne i MIKE HYDRO River, da alle vandløb er beholdt med deres korrekte længde.

Ved kobling mellem MIKE HYDRO River og MIKE SHE vil der mangle udvekslingspunkter, hvor vandløbstrækningerne er mindre end størrelsen af det numeriske grid, ligesom nogle udvekslingspunkter vil være geografisk forskudt, hvor der er mindre end 500 m mellem vandløbene. For meget lokale forhold vil det kunne betyde en ændring i udvekslingen mellem grundvand og vandløb, og vandløbsnetværket bør derfor revurderes, hvis det skal anvendes videre i detaljeret modellering.



Figur 35. Meget små ID15 oplande (0,33 km^2 og 0,73 km^2) hvor indbyrdes afstand mellem vandløbsstrækninger er mindre end 500 m.

5.3.2 Vandløbstværsnit

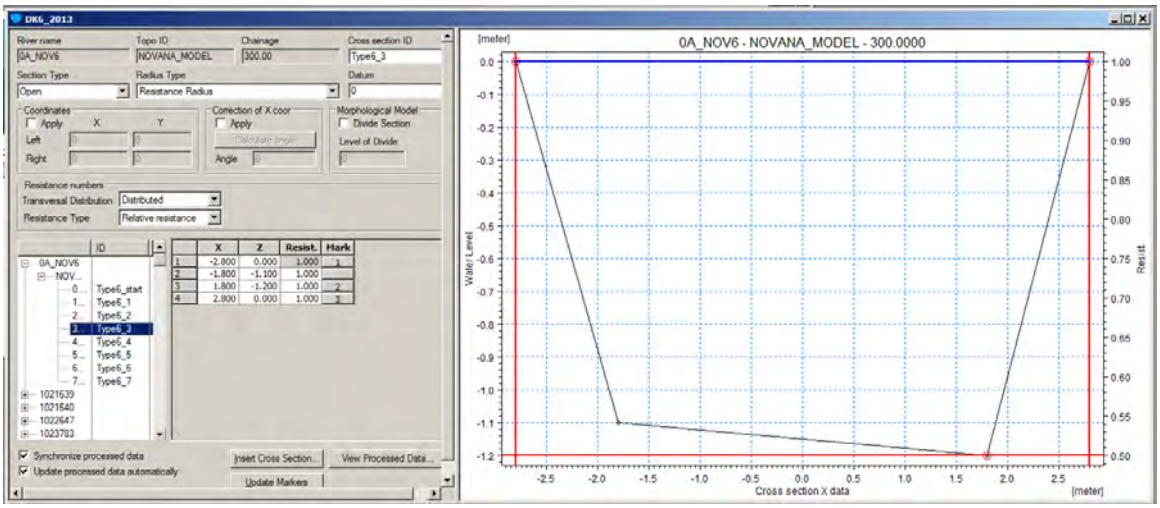
I MIKE HYDRO River angives tværsnittenes udformning ved en række x-z punkter, Figur 36, hvor z-koordinaten enten kan angive en absolut kote eller en relativ kote, hvor sidstnævnte kombineres med datum for opnåelse af den absolutte kote for tværsnittet. Samtlige tværsnitsbeskrivelser er blevet justeret til at følge denne konvention. Anvendelsen af en relativ z-koordinat og datum har den fordel, at vandløbenes kote (datum) kan fastsættes fra en højdemodel i punkter, hvor der ikke foreligger et opmålt datum.

For de nye vandløbsstrækninger, der er tilføjet til DK-model2019, er vandløbstværsnittene beskrevet ved typetværsnit da der ikke er tilgængelige opmålinger for disse vandløb. Dimensioneringen af disse typetværsnit er foretaget som beskrevet i (Olsen og Højberg, 2011). Metoden bygger på en analyse af eksisterende opmålte tværsnit, hvor der er opstillet en relation mellem vandløbenes bredde/dybde forhold og oplandets størrelse for forskellige geografiske placeringer (delområde 1 - 6). Da det opmålte datasæt for delområde 7 er meget begrænset, er der ikke estimeret typetværsnit specifikt for delområde 7, i stedet antages det, at dimensionerne af typetværsnit er de samme som for delområde 1. For de Jyske deloplande der afvander til både øst og vest har geologien betydning for vandløbenes udformning så tværsnittene i de vestvendte vandløb generelt er bredere end de østvendte vandløb. For delområde 4 og 5 er der derfor udviklet to varianter af typetværsnit, en variant for de vandløb der løber ud på østkysten af Jylland (4 - 5øst) og en variant for de vandløb der løber ud på vestkysten af Jylland (4 - 5vest). Ud fra Tabel 11 kan der de enkelte deloplande således aflæses en dimension for vandløbets start samt slutpunkt, hvor størrelsen ved slutpunktet afhænger af oplandets areal.

Tabel 11. Estimeret bredde (W) og maksimumdybde (D) af typetværsnit i DK-model med oplandsareal af forskellig størrelse (Type) for de forskellige delområder (Omr), modificeret fra Olsen og Højbjerg (2011).

Type\Omr	1		2		3		4-5øst		4-5vest		6	
	W	D	W	D	W	D	W	D	W	D	W	D
Start	1	1,2	1	1,4	1	1,3	1	1,3	1	1,2	1	0,8
<10km²	5,5	1,2	7,4	1,4	9,3	1,3	6,9	1,3	10,4	1,2	3,7	0,8
10-20km²	6,6	1,4	9,7	1,7	10,6	1,5	8,4	1,4	12,9	1,5	4,8	1
20-30km²	7,4	1,5	11,3	2	11,4	1,7	9,4	1,5	14,7	1,6	5,6	1,1
30-40km²	8,1	1,6	12,6	2,1	12	1,8	10,2	1,5	16,1	1,7	6,3	1,2
40-50km²	8,6	1,7	13,8	2,3	12,5	1,9	10,9	1,5	17,3	1,8	6,9	1,3
50-60km²	9	1,8	14,8	2,4	12,9	2	11,4	1,6	18,3	1,9	7,4	1,4
>60km²	10,4	2	18	2,7	14,2	2,3	13,2	1,7	21,6	2,1	9	1,6

Alle typetværsnit der er indlagt i DK-model2019 er udformet som simple trapezoider, Figur 36, hvis størrelse vokser i nedstrøms retning (Olsen og Højberg 2011). Der er kun ét udvekslingspunkt mellem MIKE SHE og MIKE HYDRO River for hver MIKE SHE gridcelle og med en diskretisering på 500 x 500 m opnås der ikke en mere detaljeret beskrivelse af udvekslingen ved anvendelse af flere tværsnit inden for et MIKE SHE grid. Derfor er der mellem start og slut typetværsnit indlagt interpolerede tværsnit med en afstand på maksimum 500 m for delmodel 1-6 og maksimum 250 m for delmodel 7.



Figur 36. Eksempel på vandløbstypetværsnit i MIKE 11 fra delområde 6 med et oplandsareal på 20-30 km^2 (Olsen og Højberg 2011).

Kote (datum) for vandløbstværsnit i DK-model2019 er justeret vha. CrossSectionHeights (HydroInform 2019) i forhold til et topografi raster i 100m baseret på den Danske Højdemodel (1.6 m DEM). Højdemodellen i 1.6m er først aggregeret med middelværdi til 10 m og derefter aggregeret yderligere til et 100 m grid, hvor minimumsværdien fra 10 m griddet er anvendt. Anvendelsen af dette topografiske raster med minimumsværdien er at sikre vandløbets placering i det topografisk laveste punkt inden for et 100m grid.

Det antages, at et sidevandløb ikke kan ligge under et hovedvandløb. I tilfælde hvor den situation optræder, er tværsnittet for sidevandløbet korrigeret, så bundkoterne er den samme for de to vandløb ved sammenløbet.

5.3.3 Søer

Der anvendes en simpel beskrivelse af søer, hvor disse indlægges i modellen som brede vandløbstværsnit. Den anvendte routing metode til beskrivelse af vandstrømningen i vandløbene inkluderer ikke en opmagasinering i vandløbssystemet og tager derfor ikke tage hensyn til, at søer har en given volumen, der først skal fyldes op, før der sker en udstrømning herfra. Søernes vandstand beregnes, som for resten af vandløbene, ved Mannings formel ud fra den beregnede vandstrømning. Denne metode til beregning af vandstanden vil generelt resultere i estimering af en meget lille vandstand i søerne, da den vandmængde der strømmer igennem en sø kun vil resultere i en meget lille vandstand i et bredt sø-tværsnit.

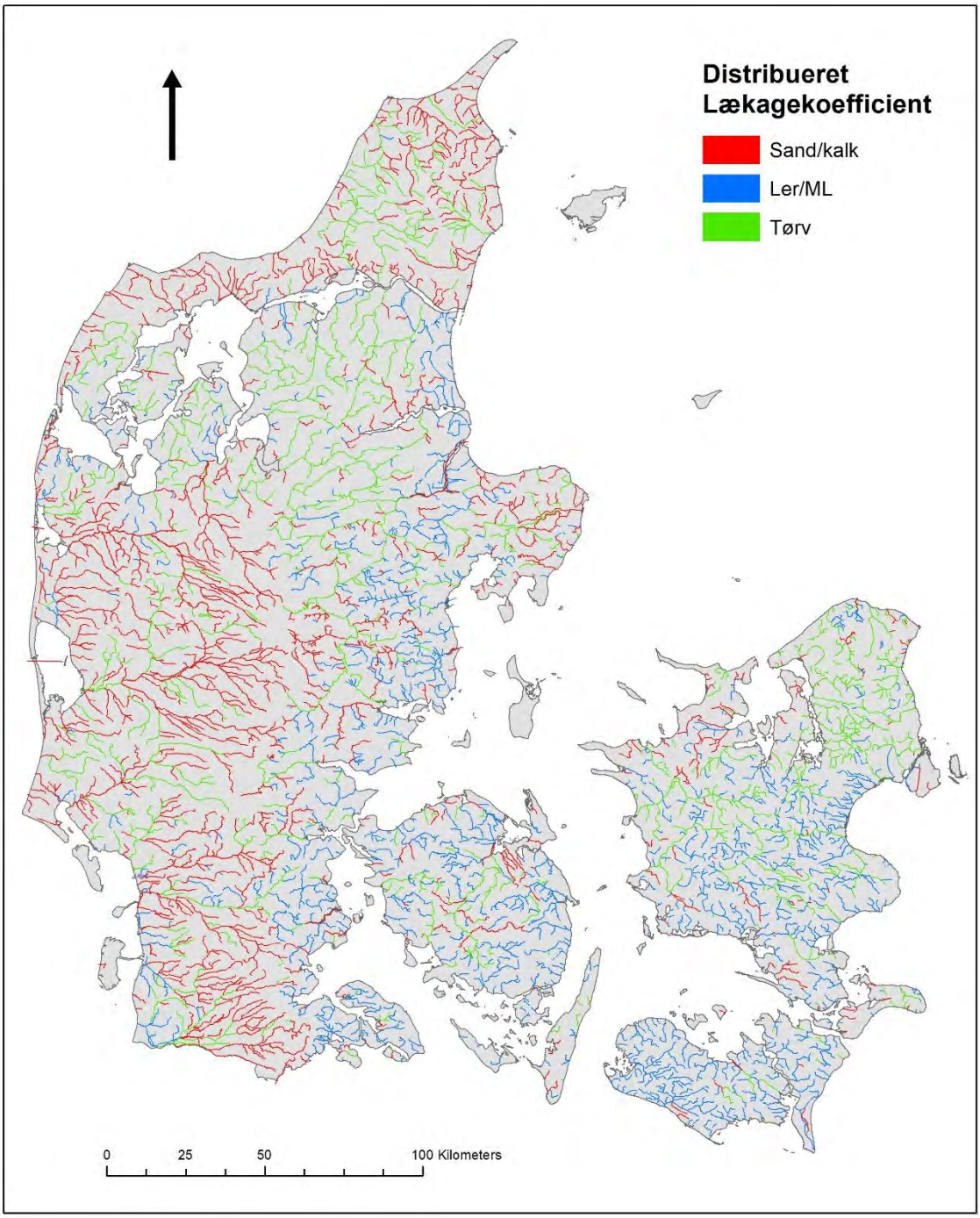
For at opnå en mere korrekt beskrivelse af vandstanden i søerne, og dermed en mere korrekt estimering af udvekslingen mellem grundvandet og søerne, er der indlagt user-defined Q-h relationer i søerne. Disse Q-h relationer er indlagt på de vandløbs strækninger, der repræsenterer søer, dog med den begrænsning at der kun kan angives én strækning med 'user-defined' Q-h relation per vandløbsstrækning. Q-h relationerne er defineret således, at søerne har en fastholdt vandstand, idet samme 'h' angives for både meget små og meget store 'Q'. Reelt betyder det, at vandstanden ikke kan variere i søerne selv ved en ændring i vandføring. Til gengæld kan vandstanden fastsættes til et realistisk niveau, som sikrer en fornuftig ud-

veksling med grundvandet, samtidig med at den simple og beregningsmæssigt hurtige routing metode anvendes. 'H' niveauet er sat individuelt for hver sø svarende til koten over havniveau af den forventede middelvandstand. Denne middelvandstand er for de fleste søer fundet i beskrivelser af de enkelte søer (Wikipedia) ellers er den sat til 1 m over bundkoten af udløbet fra søen.

Da vandløb placeres på randen mellem to gridceller i MIKE SHE, vil der kun ske en udveksling mellem vandløbet og disse celler selv i tilfælde, hvor bredden af vandløbene overstiger gridcellens dimension (500 m). Ved anvendelsen af brede vandløbstværsnit til beskrivelse af søerne sker der således kun en lokal udveksling mellem søerne og nabocellerne i MIKE SHE griddet. Det betyder, at modellen ikke er egnet til en detaljeret beskrivelse af dynamikken i og tæt ved søerne samt udvekslingen mellem søer og grundvand.

5.3.4 Distribueret lækagekoefficient

Udvekslingen mellem vandløb og grundvand er styret ved en lækagekoefficient, der er baseret på de hydrauliske egenskaber af såvel vandløbsbunden som den omgivende akvifer ("Aquifer + Bed" i MIKE HYDRO River). Inden for hvert delmodelområde er der foretaget en simpel distribuering af den hydrauliske ledningsevne for vandløbsbunden baseret på den dominerende jordartstype langs med vandløbsstrækningen. Den dominerende jordartstype er identificeret ved at lægge en buffer på 250 m omkring vandløbs strækningen og dele jordartskoret op i tre kategorier; Sand/kalk, Ler/Moræneler samt Tørv, se resultatet i Figur 37.



Figur 37. Simpel distribution af vandløbets lækage koefficient efter jordartskortet.

5.3.5 Punktkilder

Der er ikke foretaget nogen opdatering af punktkilder til DK-model2019 og alt beskrevet i dette kapitel er udført og implementeret i DK-model2014 og anvendes uden yderligere justeringer i DK-model2019. Baseret på data fra Fagdatacentret for punktkilder (tidligere Miljøstyrelsen, nu under Naturstyrelsen) havde DCE opbygget en base til intern brug, og gennem deres anvendelse foretaget en fejlretning. Dette datasæt vurderedes derfor at være det bedste på nationalt niveau og blevet stillet til rådighed for en opdatering i DK-model2014. Det er antaget at de geografiske koordinater fra datasættet angiver udledningspunkter og ikke spildevandsanlæg. Da datasættet ikke indeholder information om hvorvidt spildevand udledes til hav eller vandløb, er det antaget at alle udledninger der ligger på land og mere end 100 m fra kysten, udleder vand til nærmeste vandløb.

Tabel 12. Spildevandsdata inkluderet i DK-model2019 modtaget fra DCE.

Udvælgelseskriterier	DCE
Samlet	2336
På land og >100m fra kyst	1936
Data i perioden efter 2000	1140

I spildevandsdatasættet til DK-model2014 var det valgt at medtage alle spildevandsudledninger med udledningsdata efter 2000, Tabel 12 (1140), samt alle stationer der i perioden før år 2000 har haft en gennemsnitlig udledning på mere end 0,005 m^3 s^{-1} (yderligere 28 stationer). I alt er der medtaget 1168 punktudledninger i DK-model2014.

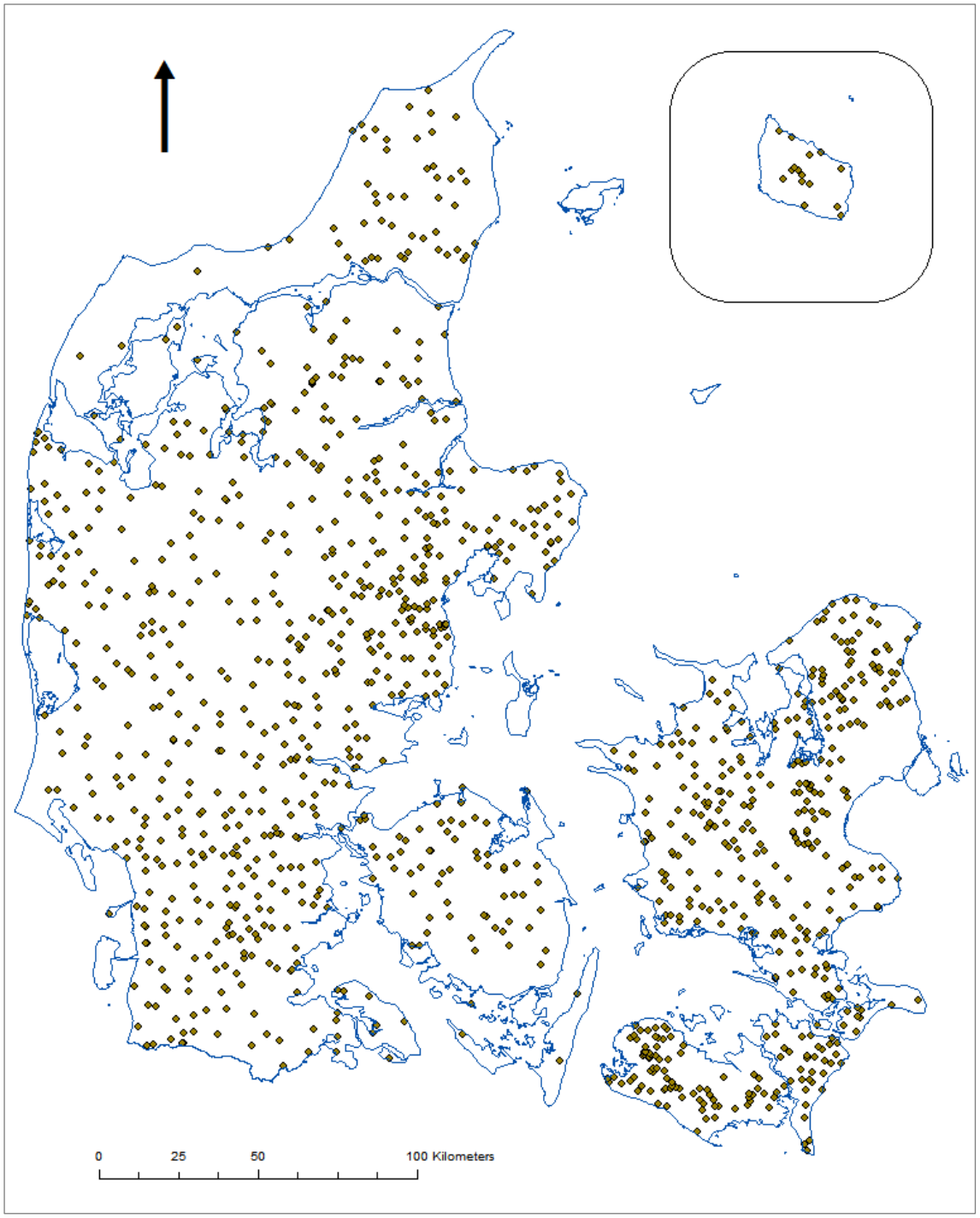
Baseret på tidligere undersøgelser i forbindelse med opsætningen af grundvandsmodel for både Københavns og Frederiksborg Amter er det estimeret, at tørvejrskomponenten af spildevandet udgør ca. halvdelen af de målte mængder. Før udledningsmængderne er anvendt i modellen er den årlige spildevandsudledning derfor halveret. Det er gjort for at spildevandsudledningen skal repræsentere et tørvejrsestimat, dvs. udledningen af reelt spildevand uden den vandmængde, der siver ind i kloaksystemet.

Spildevandsudledninger er inkluderet som punktkilder i vandløbsopsætningen ved i GIS at koble udledningen til det vandløb der ligger tættest på og inden for samme ID15-opland. Placeringen af de indlagte spildevandsudledninger fremgår af Figur 38.

Tabel 13. Antal spildevandsudledninger der er inkluderet i vandløbsopsætning for de forskellige delmodeller i DK-model2019.

Delmodel	Spildevandsudledninger
1	292
2	130
3	66
4	217
5	297
6	151
7	15

DCE spildevandsdatasættet dækker perioden 1. januar 1990 til 31. december 2011. I de tilfælde, hvor det har været nødvendigt er datasættet forlænget ved at kopiere data fra 2011 til de fremtidige år og kopiere data fra 1990 til de foregående år. I DCE spildevandsdatasættet er udledningsvolumen angivet som årsudledninger (mio. m^3 per år), der er distribueret til daglige værdier i vandløbsopsætningen ved at antage, at udledningen er ligelig fordelt over året dvs. dividere den årlige udledningsvolumen med 365.



Figur 38. Placering af punktkildeudledninger der er medtaget i DK- model2019.

5.4 Indvindinger

For at opnå en samlet oversigt over indvindingerne og deres fysiske placering er det valgt at medtage samtlige indvindinger lagret i Jupiter, uden skelen til indvindingernes størrelse og betydning for vurdering af den overordnede vandbalance. Samtlige indvindinger er endvidere fordelt jævnt ud på de enkelte indtag inden for et anlæg.

Data er udtrukket som en række Access filer fra Jupiter med data fra januar 1990 til december 2017. Data er processeret vha. programmet "WellViewer" udviklet af HydroInform (2019) specifikt til dette formål. I WellViewer er indtag tilhørende anlæg med en årlig indvinding under 1 m^3/år frasorteret, hvorefter der er foretaget en 'autocorrect missing screen data', der automatisk tildeler top og bund til filtre, hvor denne information ikke er lagret i Jupiter. Top og/eller bund estimeres på basis af informationer om forerør og dybde af boring i en prioriteret rækkefølge som angivet i Tabel 14. Findes der ingen oplysning om boredybde, top/bund eller forerør, vil boringen ikke blive anvendt i modelberegningerne. Det samme gør sig gældende, hvis der ikke er oplysninger om boringens placering (x,y-koordinater), derfor vil indvindingen fra et anlæg kun blive fordelt ligeligt på de tilknyttede boringer, der kan indplaceres både vertikalt og horisontalt.

Tabel 14. Prioriteret rækkefølge for estimering af top og/eller bund af filter, hvis denne information ikke findes i Jupiter.

Manglende top	Manglende bund
Bund af filter - 2 m	Top af filter + 2 m
Bund af forerør	Bund af boring
Bund af boring	Bund af forerør + 2m

I DK-model2019 er den hydrostratigrafiske model opbygget af varierende ler og sandlag, dvs. akvitard og magasiner. I nogle tilfælde vil en placering af indtagene efter kote resultere i, at indtagene vil blive indplaceret i en ler enhed frem for en magasinenhed som forventelig. En sådan umiddelbar uoverensstemmelse mellem filterplacering og hydrostratigrafiske enheder kan have flere årsager. Dels kan der være fejl i den hydrostratigrafiske model, enten ved forkert magasin afgrænsning eller manglende repræsentation af magasiner pga. den anvendte skala. Andre årsager kan være, at interpolationen i 500 x 500 m grids er for grov til at opløse mindre variationer, hvorved et indtag kommer til at falde uden for magasinet. Endeligt kan der være fejl i de angivne koter i Jupiter databasen.

I forbindelse med en vurdering af ressourcen, er det imidlertid vigtigt, at indvindingerne henføres til de korrekte magasiner, så der oppumpes de korrekte mængder fra de enkelte magasiner. Dette er specielt vigtigt for modellens anvendelighed i forbindelse med vandplanerne og rapporteringen til Vandramme direktivet, hvor indvindinger skal angives på grundvandsforekomst niveau. Indtag der ved deres kote angivelse ikke falder inden for en magasinenhed, er efterfølgende blevet koblet til nærmeste magasin, i det omfang det har været muligt. Det skal understreges, at der ikke er sket en justering af filterkoterne i Jupiter, men udelukkende er tale om, at indtagene er blevet associeret til et bestemt modellag under opstillingen af den numeriske model. Den overordnede procedure for indplacering af indtag i modellen har været:

1. Indtag der er helt eller delvist placeret i et vandførende lag er associeret dette lag. I de særlige tilfælde, hvor et indtag strækker sig over flere vandførende lag vil der ske en indvinding fra samtlige modellag som indtaget strækker sig over.
2. Hvor indtaget ikke falder sammen med en vandførende enhed i modellen, angives den nærmeste vandførende enhed enten under eller over indtaget med prioritet i nedadgående retning, såfremt denne har en tykkelse på minimum 3 m. I tilfælde hvor der ikke eksisterer en magasin enhed umiddelbart under eller over et indtag associeres indtaget til en magasin enhed beliggende mere end et lag under/over, dog med en maksimal vertikal forskydning på 15 m.
3. For de resterende indtag er det antaget, at indtaget står i ler eller et mindre sandmagasin, der ikke er repræsenteret i den geologiske model. Disse indtag henføres derfor ikke til et andet beregningslag, men bibeholdes i lerlaget.

Foruden generering af model input filer, giver processeringen i WellViewer også information om hvilke anlæg, med tilhørende indvindingsmængder, der ikke indgår i beregningerne pga. manglende informationer. I Tabel 15, fremgår den samlede middelindvinding grundvand (summen af almen indvinding, markvanding og ikke stedfæstet indvinding) per år for hele landet. Der fremgår også hvor stor % markvandingen udgør af den samlede indvinding samt hvor stor del indvinding som ikke er stedfæstet. Tallene for de enkelte delmodeller er vist i Bilag 2.

Den årlige middelindvinding i Tabel 15, er beregnet for perioden 1990 – 2018, og udviklingen fremgår også i Figur 24 og placeringen i Figur 25. I Tabel 15 fremgår det også, hvor stor en del af indvindingen, der ikke indgår i beregningerne pga. manglende stedfæstning, på landsplan i perioden 1990 – 2016 mellem 0,7 % og 2,4 %.

I 2017 ses en afvigende stor del af indvindingen ikke at være stedfæstet, 8.7 %, og klart største del skyldes ikke stedfæstede markvandinger i DK5. Der er således stor forskel mellem de forskellige områder, se Tabel 16, og Bilag 2, idet al almen indvinding i DK7 er stedfæstet, mens DK2, DK3 og DK5 alle år ligger under 1 %. I den lidt tungere ende ligger DK1 der ofte ligger mellem 3 % og 4 % og i elve ud af 28 år når op over 4 % af den samlede årlige indvindingsmængde. Tabeller for de enkelte modelområder kan ses i Bilag 2.

Den manglende indplacering skyldes i nogen grad mangelfulde informationer om indtagenes, x,y-koordinater samt angivelse af filtersætning (kote). Den primære årsag til manglende indplacering af indvinding skyldes imidlertid manglende information om tilknytning mellem indtag og anlæg, altså manglende stedfæstning, se oversigt i Tabel 17.

Som det fremgår, kan over 10 % af indvindingsanlæggene mangle tilknyttede boringer i et givet modelområde, men da der sandsynligvis er tale om mindre indvindinger, beløber det sig mængdemæssigt til en mindre del af indvindingen jævnfør Tabel 15.

Tabel 15. Oversigt over middelindvinding (mio. m^3/år) samt størrelsen af ikke stedfæstet indvinding for hele Danmark.

År	Almen indvinding (inkl. ikke stedfæstet)	Markvanding (inkl. ikke stedfæstet)	Grundvand (samlet)	% markvanding af samlet grundvand	Ikke stedfæstet (almen indvinding)	Ikke stedfæstet (markvanding)	% indvinding som ikke er stedfæstet (samlet)	Indvinding fra overfladevand
1990	712	119	830	14.28	15	0.8	2.0	6
1991	671	136	807	16.88	15	0.7	2.0	5
1992	684	247	931	26.54	15	1.4	1.8	5
1993	656	207	862	23.96	14	1.2	1.7	5
1994	605	154	759	20.32	8	1.0	1.2	4
1995	611	193	804	23.99	14	1.0	1.9	5
1996	599	200	799	25.06	14	1.2	1.9	5
1997	583	198	781	25.39	14	0.9	1.9	4
1998	546	108	654	16.51	11	0.6	1.8	4
1999	517	74	591	12.53	11	0.3	2.0	4
2000	533	102	635	16.04	12	0.6	2.0	4
2001	525	82	607	13.48	14	0.5	2.4	5
2002	524	75	599	12.45	14	0.3	2.3	4
2003	522	90	612	14.65	13	0.4	2.2	4
2004	521	144	666	21.65	13	0.8	2.1	4
2005	516	127	643	19.73	11	0.7	1.8	3
2006	487	182	669	27.17	4	0.7	0.8	0
2007	473	88	561	15.63	8	0.5	1.5	1
2008	511	199	710	28.03	8	1.2	1.3	0
2009	492	208	700	29.67	10	1.0	1.6	15
2010	495	188	683	27.50	11	1.0	1.7	0
2011	495	209	704	29.64	9	0.9	1.4	0
2012	487	112	599	18.62	8	0.6	1.5	3
2013	498	234	731	31.95	8	1.5	1.3	16
2014	490	239	729	32.77	4	1.5	0.8	19
2015	469	177	646	27.38	4	0.7	0.8	19
2016	471	166	637	26.01	3	0.9	0.7	24
2017	456	241	698	34.59	3	57.4	8.7	24

Tabel 16. Oversigt over hvor stor en procentdel af indvindingen (inkl. Markvanding), i hvert modelområde der ikke indgår i modelberegningerne pga. manglende indplacering.

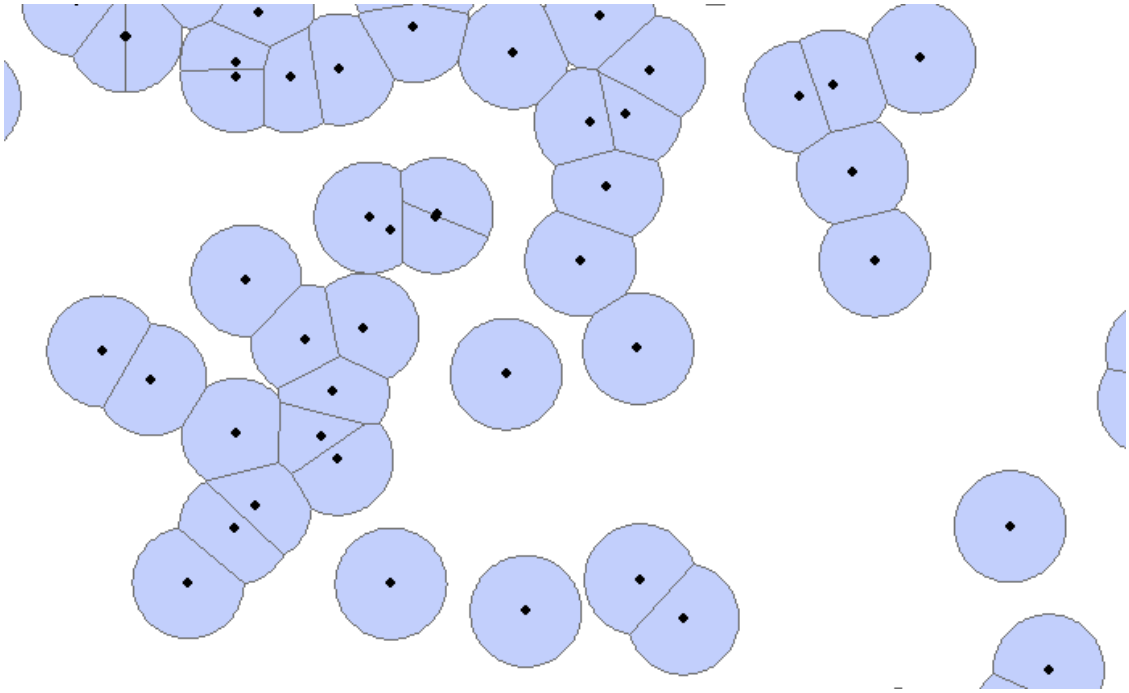
År	DK1	DK2	DK3	DK4	DK5	DK6	DK7
1990	3.4	0.2	0.5	1.7	0.8	2.1	3.4
1991	3.7	0.3	0.5	1.3	0.9	2.0	3.7
1992	3.7	0.3	0.4	1.0	0.9	2.0	3.7
1993	3.6	0.3	0.4	1.1	0.8	1.8	3.6
1994	1.2	0.3	0.5	1.7	0.8	1.5	1.2
1995	4.4	0.3	0.4	1.3	0.6	1.4	4.4
1996	4.0	0.3	0.4	1.3	0.6	2.0	4.0
1997	4.3	0.5	0.4	1.2	0.5	1.6	4.3
1998	3.8	0.4	0.2	1.6	0.5	1.5	3.8
1999	4.0	0.5	0.3	2.0	0.3	1.5	4.0
2000	4.5	0.5	0.4	1.5	0.3	1.3	4.5
2001	4.4	0.5	0.5	2.6	0.3	2.4	4.4
2002	4.4	0.5	0.5	2.9	0.3	2.1	4.4
2003	4.3	0.5	0.6	2.8	0.3	1.8	4.3
2004	4.6	0.6	0.7	2.4	0.3	1.5	4.6
2005	4.4	0.7	0.6	1.1	0.3	1.4	4.4
2006	1.4	0.3	0.4	0.5	0.2	1.4	1.4
2007	3.5	0.3	0.6	0.5	0.1	1.4	3.5
2008	3.5	0.2	0.1	0.7	0.3	1.1	3.5
2009	3.4	0.2	0.1	1.0	0.8	1.5	3.4
2010	4.0	0.2	0.1	0.6	0.8	2.1	4.0
2011	3.2	0.2	0.3	0.7	0.7	2.0	3.2
2012	3.8	0.2	0.1	0.6	0.9	0.4	3.8
2013	3.5	0.2	0.2	0.7	0.7	0.6	3.5
2014	1.2	0.1	0.2	0.7	0.7	0.5	1.2
2015	1.1	0.2	0.2	0.8	0.4	1.2	1.1
2016	1.0	0.2	0.2	0.8	0.3	1.0	1.0
2017	0.7	0.2	0.4	0.8	18.2	1.6	0.7

Tabel 17. Anlæg uden tilknyttede boringer samt boringer med manglende informationer.

Model-område	Antal anlæg	Heraf anlæg uden tilknyttede boringer	Antal boringer	Boringer med manglende oplysninger
DK1	2427	177	6720	164
DK2	273	10	919	20
DK3	1132	68	2628	137
DK4	1417	272	3866	410
DK5	2247	229	5196	233
DK6	1675	262	3908	407
DK7	64	0	276	3
Hele DK	9235	1018	23513	1374

5.4.1 Markvanding

Til beskrivelse af indvindinger til markvanding er samtlige boringer lagret i Jupiter som markvandingsboringer (virksomhedstype V40) medtaget. Markvandingsboringer i modellen er således beskrevet ved deres faktiske geografiske koordinater (x,y) og filterplaceringer. Ved at basere beskrivelsen på Jupiter udtræk er det antaget, at al indvinding til markvanding er baseret på vand fra boringer, idet indvindinger fra fx vandløb ikke medtages. For hver markvandingsboring er der tilknyttet et areal (command area), der beskriver hvilket område, der forsynes af vand til markvanding fra de enkelte boringer. Dette areal er defineret ved en buffer omkring markvandingsboringerne. Arealerne er lavet i GIS ved at generere Thiessen polygoner omkring alle boringer, som dernæst 'klippes' med en cirkulær bufferzone omkring hver boring. Det medfører, at det vandede areal per boring vil variere i størrelse alt efter, hvor tæt boringerne står, se Figur 39.



Figur 39. Lyseblå felter illustrerer arealet, der forsynes af de enkelte markvandingsboringer (sorte prikker).

Radius på den cirkulære bufferzone er estimeret til 450 m. Dette er baseret på en undersøgelse foretaget for delmodellen der dækker Midtjylland, hvor det vandede areal bestemt ved forskellig størrelse bufferradius er sammenlignet med data for det samlede vandede areal og middelarealet per markvandingsboringer fra de tidligere Ribe og Ringkøbing Amter. Det er nødvendigt at overdimensionere bufferzonen lidt, idet zonen beskriver de arealer, der kan vandes, men ikke nødvendigvis må vandes. Arealer der må vandes er bestemt som de på AIS-kortet beskrevne landbrugsarealer (kode 2112). Disse arealer beskrives ved et vandingsbehov (såkaldt Irrigation demand). Bufferzonen vil således indeholde noget areal, der ikke er landbrugsjord og derfor ikke vandes i modellen.

Det er valgt at bruge vandindholdet i rodzonen til at styre vandingsbehovet. Vanding starter, når vandindholdet er mindre end en specificeret procentdel af markkapaciteten (defineret

under opsætning af den umættede zone) og slutter når vandindholdet når en højere specificeret andel af markkapaciteten. Vanding tillades fra midt april til midt september, men varierer fra afgrøde til afgrøde. Ligeledes er start og stopkriterierne for markvanding justeret for hvert et af de Jyske modelområde indtil der er opnået bedst mulig overensstemmelse med de årlige markvandingsmængder afrapporteret i Grundvands Moniterings (GRUMO) rapporterne fra de tidligere amter.

Det store antal markvandingsboringer (ca. 10.000 i delmodellen for Midtjylland) kan ikke håndteres i MIKE SHE brugerfladen, hvorfor der er udviklet et program (MikeSheWrapper Irrigation), som indsætter alle data for Command areas i præprocesseringsfasen fra en GIS-fil, hvorefter markvandingsdataene slettes, således at modelopsætningen igen kan åbnes i brugerfladen.

5.5 Numeriske parametre

Ved de dynamiske simuleringer er der anvendt følgende parametre for tidsskridt og iterationer:

Overland flow	
Løsningsalgoritme	SOR
Maks. tidsskridt	12 timer
Iterationskontrol	
Maks. H-ændring pr. iteration	1,0e-4 m
Maks. residual fejl	1,0e-4 m/d
Maks. iterationer	200
Umættet zone	
Maks. tidsskridt	24 timer
Iterationskontrol	
Maks. profil vandbalancefejl	1,0e-3 m
Mættede zone	
Løsningsalgoritme	PCG
Maks. tidsskridt	24 timer
Iterationskontrol	
Maks. H-ændring	0,01 m
Maks. residual fejl	0,01 m/d
Maks. iterationer	100
Nedbørsafhængig tidsskridt kontrol	
Maks. nedbør pr. tidsskridt	100 mm
Maks infiltration pr. tidsskridt	100 mm
Nedbørs rate der kræver eget tidsskridt	4 mm/time

Simuleringsresultater for vandløb er gemt for hver 12 timer, mens øvrige data er gemt for hver 336 timer svarende til hver 14. dag.

6. Kalibreringsstrategi og data

DK-model2019 er kalibreret ved anvendelse af en dynamisk version af modellen. Kalibreringen blev gennemført ved anvendelse af det modeluafhængige optimeringsprogram PEST version 16 (PEST). Pest er ikke inkluderet i MIKE SHE's brugerflade, hvorfor koblingen er sket "bagom" MIKE SHE brugerfladen. Modellen er opstillet for perioden 1990 – 2018. Erfaringer har vist, at der kan gå lang tid før effekten af en ændring i en parametre er slået fuldt igennem. Det er derfor valgt at anvende en 10-årig opvarmningsperiode for modellen.

Der er anvendt en split-sampling test, hvor den 11-årige periode: 1/1 2000 – 31/12 2010 anvendes il kalibrering, og to perioder; 1/1 1995 - 31/12 1999 samt 1/1 2011 – 31/12 2015 er anvendt til validering. Tidligere analyser (DK-model rapport 2014) har vist at en valideringsperiode fra 1/1 1995 – 31/12 1999 kan være hensigtsmæssig pga. et væsentligt stærkere datagrundlag for nedbørsdata i denne periode. Dog har det har for Bornholm været nødvendigt at reducere kalibreringsperioden til perioden 2000-2007, da der var store uoverensstemmelser mellem observeret nedbør og afstrømning sidst i perioden som pegede på en fejl i nedbørsdata på Bornholm.

Én markant ændring i forhold til tidligere kalibreringer af DK-modellen er at delområderne DK1 - DK6 (hele landet med undtagelse af Bornholm) er kalibreret som én samlet model og ikke som 6 uafhængige delmodeller. Dette er gjort med henblik på at sikre størst mulig rumlig konsistens i model parametriseringen og dermed sikre optimale rumlige estimater på tværs af landet. Helt konkret er kalibreringen udført ved at teste ét fælles parameterset på tværs af alle delmodeller samtidigt, og gentage denne optimeringsprocedure gennem PEST værktøjet indtil simuleringsfejlen for en række performance kriterier ikke længere kan forbedres. Da de geologiske forhold på tværs af landet varierer meget, vil parametrene for de dybereliggende geologiske enheder være opdelt i regioner (Jylland, Fyn og Sjælland+Øerne). For disse regioner vil de hydrogeologiske parametre (K-værdier i dybere lag) blive kalibreret specifikt for disse områder. Omvendt er der for parametriseringen af de mere overfladenære hydrologiske processer anvendt en parameter regionaliserings strategi som sikre en landsdækkende konsistent parametrisering af, jordtype-, vegetations-, lækage- og dræn-parametre.

Den nye kalibrerings strategi betyder at der samlet set er færre, men landsdækkende kalibrerings parametre for den overfladenære hydrologi, da man i stedet for at kalibrede enkelte parametre for hvert delområde separat, kalibrerer fordelingen på tværs af landet, med én samlet kalibrering. Bornholm (DK7), som er hydrologisk væsentlig forskellig domæne i forhold til resten af landet kalibreres fortsat som én isoleret model.

6.1 Valg og bearbejdning af potentialer og afstrømningsdata

Modellen er kalibreret mod potentialer og afstrømningsdata. Potentialerne er udtrukket fra Jupiter databasen, mens afstrømningsdata er indhentet fra fagdatacenter for ferskvand, Bioscience, Aarhus Universitet.

6.1.1 Databehandling - potentialer

Indtag med tilhørende pejlinger er trukket ud af Jupiter databasen som et JupiterXL udtræk. For at opnå så god rumlig dækning som muligt er der udtrukket data fra 1990 og frem. Pejlinger kan være markeret som værende foretaget i "ro" eller "drift". Denne oplysning mangler imidlertid for et stort antal pejlinger og det er derfor valgt at udtrække både pejlinger markeret som "ro" og "unknown" som grundlag for den videre analyse. Pejlinger markeret med "drift" er udeladt, da de er vurderet at afspejle såvel sænkning i magasin samt filtertab, hvilket ikke simuleres med modellen.

Indledningsvist er der via WellViewer (HydroInform 2019) foretaget en fejlscreening for manglende x,y-koordinater samt indtag, hvor top og bundkoter af indtaget ikke kunne bestemmes på baggrund af informationerne i Jupiter databasen.

Efter den indledende fejlscreening er indtagene indplaceret i modellens beregningslag. Den hydrostratigrafiske og den numeriske model er opbygget af vekslende sand og lerlag og når koterne for top og bund af pejleindtagene fra Jupiter databasen anvendes direkte, bliver indtagene i nogle tilfælde placeret helt eller delvist i beregningslag, der repræsenterer ler. Da langt hovedparten af pejlinger foretages i magasiner er der således en manglende overensstemmelser mellem filterets kote angivelse samt den hydrostratigrafiske model. Der er flere årsager til, at en sådan manglende overensstemmelse kan opstå, som beskrevet under afsnittet om indvindinger, afsnit 5.4. Indtag placeret i ler er, i det omfang det har været muligt, efterfølgende associeret til de sandmagasiner/beregningslag de er vurderet at repræsentere. Den overordnede procedure har været:

1. For de boringer, hvor indtaget helt eller delvist falder sammen med et vandførende lag i modellen associeres pejlingen til det aktuelle lagnummer. I de særlige tilfælde, hvor et indtag sidder i to vandførende lag er indtaget angivet placeret i det dybeste lag.
2. Hvor indtaget ikke falder sammen med et vandførende lag i modellen, angives det nærmeste vandførende lag under indtaget, såfremt dette har en tykkelse på minimum 3 m. Hvis det nærmeste vandførende lag under indtaget ikke har tilstrækkelig tykkelse anvendes det nærmeste vandførende lag over indtaget, såfremt dette opfylder kravet om 3 m tykkelse. Indtaget flyttes maximalt +/- 15 m. Disse indtag får specificeret nye indtagsbund-, midt- og topkoter svarende til det vandførende lag de flyttes til.
3. For de resterede indtag er det antaget, at indtaget står i ler eller mindre sandmagasin, der ikke er repræsenteret i den geologiske model. For disse indtag angives det lerlag, hvor indtaget sidder.
4. Enkelte tilbageværende indtag er placeret i det øverste lag, idet indtagets top-kote ligger højere end topografien.

På grund af den anvendte pixeltolkning for Bornholm vil de enkelte lag i den hydrostratigrafiske model og derved også den numeriske model indeholde såvel sand og ler pixler. Det er derfor ikke meningsfuldt at associere indtagene med bestemte beregningslag og det er derfor valgt, at indplacere pejleboringernes indtag efter koterne i Jupiter. Da der generelt ikke observeres store vertikale hydrauliske gradienter mellem et sandlag og et lerlag umiddelbart

over/under dette sandlag, vurderes denne fremgangsmetode ikke at være problematisk i forbindelse med kalibreringen for Bornholm.

Efter indplacering af indtagene i modellen er der foretaget en gennemgang og kvalitetssikring af pejledata, for perioden 1990 – 2011, som beskrevet mere detaljeret i (Jørgensen, 2013). Denne gennemgang indeholder:

- En visuel gennemgang af alle pejletidsserier, der indeholder mindst 20 pejlinger inden for perioden 1990 – 2010 og hvor der samtidigt er data efter 1999. I gennemgangen er outlier i tidsserier frasorteret og i nogle tilfælde er hele tidsserien fravalgt, hvis den er skønnet utroværdig, f.eks. pga. et brat skift i niveau.
- Sammenligning mellem observeret og simuleret potentiale fra tidligere DK-model beregninger til identificering af eventuelle faktorer, der kan forklare stor forskel mellem observerede og simulerede værdier, eksempelvis påvirkninger fra indvindinger.

Baseret på gennemgang i Jørgensen (2013) er der foretaget en udvælgelse af pejlinger, der skal medtages i kalibreringen. Her er der anvendt forskellige kriterier for fravælgelse af indtag/pejletidsserier:

- Tæt på rand. Indtag der er placeret i en gridcelle med én eller flere naboceller der udgør modelrand er frasorteret.
- Vurderet at være indvindingspåvirket. Observationer fra boringer placeret tættere end 250 m på en indvinding med en indvinding på mere end 50.000 m^3/år og hvor middelfejlen er mindre end -10 m (den simulerede grundvandsstand er mere end 10 m højere end den observerede), er antaget at være påvirket af en indvindingstragt, der ikke kan repræsenteres i modellen.
- Observeret potentiale forskellig fra omkringliggende. Pejleindtag med en absolut middelfejl på mere end 10 m, er gennemgået manuelt, og indtag med en observeret værdi der afviger meget fra omkringliggende observationer er frasorteret. Disse pejlinger findes hovedsageligt i højtliggende områder, og den store middelfejl kan f.eks. skyldes hængende vandspejl, manglende opløsning af lokal topografi eller fejl i observeret potentiale.
- Middelpejl over terræn i øverste lag. I nogle tilfælde er der registreret et potentiale der står over modeltopografien. For de øverste lag vil der primært optræde frie forhold, hvorved det ikke er muligt at simulere et potentiale over terræn for disse lag.

Pejletidsserier kan indlægges i MIKE SHE opsætningen som tidsserie filer (dfs0-filer) under ”Detailed timeseries output”. Når data indlægges på denne måde genererer MIKE SHE automatisk en simuleret tidsserie af potentialet for den gridcelle, hvori observationen er placeret, og der er mulighed for optegning af de observerede og simulerede tidsserier i MIKE SHE’s brugerflade. Det er således formålstjenstligt at medtage dfs0-filer for at opnå en automatisk og hurtig optegning af de observerede og simulerede tidsserier. Pga. det store model setup med flere tusinder indtag der anvendes til pejling, er det imidlertid ikke hensigtsmæssigt at indlægge alle observationer som tidsserier. I stedet er der indlagt 270 pejlestationer som indgår i det nationale pejlenetværk, som bliver afrapporteret i den årlige GRUMO rapport. Alle pejlinger er derfor medtaget i kalibrering ved anvendelse af programmet ”Layersta-

tistics" (HydroInform, 2019). Med Layerstatistics er det muligt at medtage pejlinger ved angivelse af deres x, y, z-koordinater, tidspunkt for observationen samt den observerede værdi. Programmet udtrækker det simulerede potentiale for det tilsvarende tidspunkt på den samme lokalitet og beregner forskellen mellem den observerede og simulerede værdi. Da der ikke gemmes data for hvert tidskridt udtrækkes data for den nærmeste dato, hvor der er gemt data i MIKE SHE resultatfilen. Det simulerede potentiale beregnes ved en bi-lineær interpolation af potentialet i de fire omkringliggende gridceller. Efter den beskrevne databehandling fordeler de brugbare pejlinger sig som angivet i Tabel 18.

Tabel 18. Fordeling af indtag pr. beregningslag fordelt på delområder.

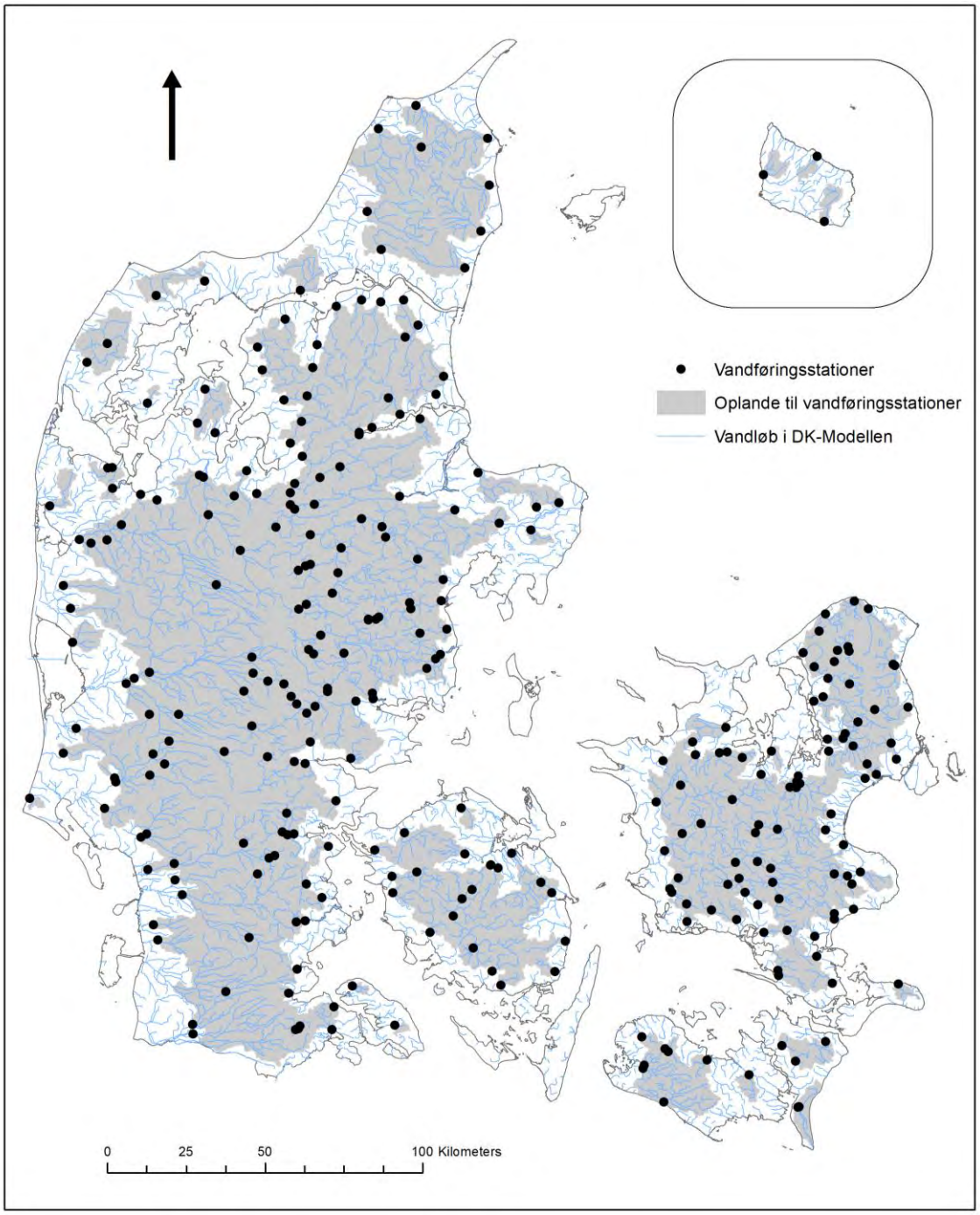
Beregningslag	DK1	DK2	DK3	DK4	DK5	DK6	DK7
1	5	0	83	82	129	212	8
2	693	89	708	76	138	397	44
3	523	36	360	550	331	1254	70
4	1388	155	872	384	594	514	33
5	1882	64	832	1262	1343	1488	53
6	449	68	224	246	313	423	36
7	665	126	113	1503	2387	1180	28
8	194	31	56	129	329	131	
9	260	2	128	336	854	149	
10	169	3		43	174	52	
11	3742	458		331	1012	18	
12				16	52	10	
13				79	16	21	
14				9	19	9	
15				47	106	20	
16				23	30	16	
17				3	381	36	
18				1	28	1224	
19				13	8		
20				9	11		
21				34	257		
22				13	424		
I alt	**9970**	**1032**	**3376**	**5189**	**8936**	**7154**	**272**

6.1.2 Databehandling - afstrømningsdata

Fra DCE er der indhentet tidsserier for 628 vandføringsstationer for hele landet. En del af disse (ca. 130) har dog kun observationer før 2000, ligesom flere kun har data i få af årene inden for kalibrering eller valideringsperioden. Da modellen er en storskala model vil det ikke være muligt at opnå en tilfredsstillende simulering af vandføringerne for de mindste oplande. Dette har i tidligere versioner af DK-modellen betydet at stationer < 50 km^2 er fravalgt til kalibreringen (dog var enkelte mindre stationer i områder med lav dækning inkluderet). I DK-model2019 er det valgt at medtage langt flere mindre stationer for at tilgodese disse i kalibreringen og øge opmærksomheden på modellens performance i forhold til små vandløb.

Som udgangspunkt er det derfor valgt kun at medtage data fra stationer med et oplandsareal på mere end 10 km^2 og med minimum 5 års data inden for kalibreringsperioden 2000 - 2010. Da vandløbsbeskrivelsen ikke indeholder effekten af en eventuel regulering af et vandløb er det vurderet på basis af en visuel inspektion af data, og vandløb med markant regulering er udeladt fra kalibrering og validering, da disse aspekter ikke er medtaget i modelopsætningen.

Samlet er der udvalgt 305 stationer til kalibrering (til DK-model2014 var der udvalgt 185). Udvælgelsen af afstrømningsstationer er baseret på oplandsstørrelse, driftsperiode samt eventuel påvirkning af reguleringer i vandløbet. De 305 vandføringsstationer har en fordeling på de enkelte delmodeller og hhv. 293 (1995 - 1999) og 216 (2010 - 2015) stationer til de to valideringsperioder og placeringen af dem fremgår af Figur 40.



Figur 40. Placering af vandføringsstationer anvendt til kalibrering af DK-model2019.

6.2 Opstilling af kalibreringsmål og nøjagtighedskriterier

Til modelkalibrering er der opstillet nogle kvantitative nøjagtighedskriterier for en række observationsgrupper til beskrivelse af hvor godt modellen er i stand til at simulere de observerede data. Disse kriterier og observationsgrupper gennemgås nærmere for hhv. potentiale data samt afstrømningsdata i afsnit 6.2.1og 6.2.2. Nøjagtighedskriterierne følger Geovejledning 2017/1 (Henriksen et al., 2017) og præsenteres i Tabel 19.

Formålet med nærværende model er en vurdering af vandbalancen på overordnet niveau, hvorfor der stiles der mod et kalibreringsmål, defineret som "overslagsberegninger" i Geovejledning 2017/1 (Henriksen et al., 2017) med hensyn til simulerede trykniveauer og "Screening" med hensyn til simulerede vandføringer.

Foruden disse kvantitative kriterier skal resultatet af kalibreringsprocessen vurderes på basis af nogle kvalitative kriterier. De kvalitative kriterier opstillet i forbindelse med nærværende kalibrering er:

- De estimerede parametre skal have realistiske værdier.
- Residualer skal være fordelt fornuftigt arealmæssigt.
- For vandløbene skal den rigtige dynamik afspejles. Dvs. en hændelse giver den rigtige respons både i tid og sted.

Tabel 19. Numeriske mål for nøjagtighedskriterier til vurdering af observationsgrupper for den simulerede vandføring (Fbal og NSE) og for trykniveau (ME og RMS) / Tabellen er hentet fra Henriksen et al., 2017.

	Screening	Overslags-beregning	Detailmodellering
Kriterium 1			
β_1 (ME/dH_{max})	0,05	0,025	0,01
Kriterium 2 og 3			
β_2 (RMS/S_{obs} - Se Appendix A)	2,6	2	1,65
Kriterium 4			
β_3 (RMS/dH_{max})	0,1	0,05	0,025
Kriterium 5 (75 % af stationerne skal overholde kravværdien[1])			
β_4 (NSE)			
Type 1 $Q_{10}/Q_{90} < 5$	0,55	0,65	0,75
Type 2 $5 < Q_{10}/Q_{90} < 10$	0,60	0,70	0,80
Type 3 $10 < Q_{10}/Q_{90} < 20$	0,65	0,75	0,85
Type 4 $20 < Q_{10}/Q_{90}$	0,70	0,80	0,90
Kriterium 6 (75 % af stationerne skal overholde kravværdien)			
β_5 (Fbal, år)			
Type 1 $Q_{mid} < 100$ l/s	40	25	15
Type 2 100 l/s $< Q_{mid} <$ 500 l/s	25	15	10
Type 3 500 l/s $< Q_{mid} <$ 2000 l/s	15	10	5
Type 4 2000 l/s $< Q_{mid}$	10	5	3
Kriterium 7 (75 % af stationerne skal overholde kravværdien)			
β_6 (Fbal, sommer)			
Type 1 $Q_{min} <$ 10 l/s	80	40	25
Type 2 10 l/s $< Q_{min} <$ 50 l/s	50	25	15
Type 3 50 l/s $< Q_{min} <$ 200 l/s	30	15	10
Type 4 200 l/s $< Q_{min}$	15	10	5

[1] NSE kriteriet er meget følsomt i forhold til kvaliteten af nedbørsinput og kan generelt ikke opfyldes efter 2007 pga. for få nedbørsstationer i DMIs klimagrid (her opfylder typisk kun 50 % af stationerne kravværdien).

6.2.1 Observationsgrupper og nøjagtighedskriterier - potentialer

Modellens evne til at reproducere potentialet vurderes ved hjælp af to observationsgrupper, middelfejl (ME) og middelværdien af kvadratafvigelsessummen ('Root mean squared', RMS). Disse måles ved følgende funktionsudtryk:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (H_{obsi} - H_{simi})$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(H_{obsi} - H_{simi} \right)^2}$$

hvor

$H_{obs,i}$: er det observerede potentiale for observation *i* (m)
$H_{sims,i}$: er det simulerede potentiale svarende til observation *i* (m)
n : er det samlede antal observationer

Middelfejlen udtrykker modellens evne til at simulere det generelle trykniveau. En positiv *ME* angiver, at modellen i middel simulerer et potentiale, der er lavere end det observerede, mens en negativ *ME* angiver, at modellen i middel simulerer et potentiale, der er for højt. *RMS* er et mål for spredningen på residualer, dvs. forskellen mellem observerede og simulerede værdier. Den optimale værdi for *ME* og *RMS* er således 0 (nul).

Som noget nyt i DK-model2019 anvendes en anderledes beskrivelse af trykniveau residualer. Dette gøres i et forsøg på at minimere to uhensigtsmæssigheder ved den traditionelle kvadratafvigelsessum, nemlig at den flytter fokus i parameter optimeringen mod de største fejl og at den ikke specifikt optimerer middelfejlen. Fordelen er at man ikke på forhånd skal tage subjektivt stilling til hvilke pejlinger som er uden for "rækkevidde", samt at man stadig kan afrapporterer den samlede model fejl (som kan blive større, afhængigt af hvordan man beregner den), og at man kan få udpeget områder hvor store fejl er konsistente og hvor man derfor bør udvikle modellen ved næste opdatering. Årsagen til at man ikke altid ønsker at prioritere minimering af de største fejl er en erkendelse af at modellens forsimplede hydrogeologiske struktur samt mulige fejlobservationer kan betyde at minimering af store residualer ikke nødvendigvis resulterer i bedre model parametre (Schneider et.al, 2020).

Observationsgruppen beskrives med CRPS (continuos ranked probability score), som normalt anvendes til ensemble forecast evaluering. I dette tilfælde er den omformuleret til at beskrive residualer i simuleret trykniveau på tværs af et stort antal pejleboringer med stor spredning i performance. For en detaljeret beskrivelse af CRPS (Stisen et.al, 2018).

$CRPS_{DK1\text{-}6}$*:* Beregnes på basis af de enkelte observationer. Residualer beregnes for hvert eneste par af observationer og simuleringer i både tid og rum vha. programmet Layerstatistics. Efterfølgende beregnes middelfejlen for hvert modelgrid på tværs af alle observationer i tid og af eventuelt overlappende pejleboringsfiltre i samme modelgrid. Efterfølgende beregnes hver modelgrids bidrag til CRPS-værdien og denne vægtes efter antallet af observationer som ligger bag hver grids middelfejl, så grids som indeholder flere observationer vægtes højere i kalibreringen.

Ved kalibrering af DK-model2009, var der defineret en observationsgruppe *HTS_ME*, der var udtrykt for amplituden for udvalgte tidsserier. Erfaringer opnået med kalibrering siden 2009 versionen har vidst, at inddragelsen af denne observationsgruppe kun har begrænset effekt ved national kalibrering og den har været udeladt fra DK-model2014 samt DK-model2019 kalibreringerne. Det er dog ønskeligt på sigt at tilføje en objektiv funktion som tilgodeset modellens evne til at ramme sæsondynamikken i trykniveauer.

I Henriksen et al. (2017), er der givet et bud på en acceptabel størrelse for middelfejlen på trykniveau simuleringer:

$$\frac{|ME|}{\Delta h_{\max}} \leq \beta_1$$

hvor Δh_{max} er forskellen mellem maksimum og minimum hydraulisk trykniveau i området, og β_1 afhænger af nøjagtighedskriteriet for modellen, hvilket betyder her at β_1 antager værdien 0,025 (overslagsberegning), Tabel 19. I Tabel 20 er den maksimale variation i observeret trykniveau samt nøjagtighedskriteriet til ME for de enkelte delmodeller givet.

I Geovejledning 2017/1 er der endvidere opstillet to forskellige kriterier for vurdering af acceptabel størrelse for RMS. Det første udtryk er givet ved

$$\frac{RMS}{s_{obs}} \leq \beta_2$$

hvor s_{obs} er et udtryk for usikkerhederne på observationerne samt modellens forventelige evne til at simulere trykniveauet. For at kunne estimere størrelsen s_{obs} er der behov for en vurdering af den rumlige heterogenitet i den hydrauliske ledningsevne. Datagrundlaget for estimering af denne heterogenitet er imidlertid ofte begrænset og utilstrækkelig, og Kriterium 2 og 3, hvor β_2 værdien indgår anvendes ikke i kalibreringen af DK-model2019.

I stedet anvendes det andet udtryk, kriterium 4, for RMS, som er relateret til den samlede variation i potentialet for modelområdet (Δh_{max}):

$$\frac{RMS}{\Delta h_{\max}} \leq \beta_3$$

Fordelen ved dette udtryk er, at det er meget simpelt at beregne den maksimale forskel mellem observationsdataene anvendt i kalibreringen. Til gengæld er udtrykket meget følsomt mht. frasortering af ”outliers”. Blot en enkelt outlier, der er væsentligt forskelligt fra det generelle trykniveau, vil resultere i en meget stor Δh_{max}, mens betydningen ved udregning af RMS vil være relativt begrænset. Med outliers i datasættet vil det derfor være forholdsvist svært at overholde kriteriet, og det er således nødvendigt med en kritisk gennemgang af observationerne forud kalibreringen. Trods denne svaghed er det valgt at anvende udtrykket, da det er muligt at formulere samme kriterier for samtlige delmodeller indeholdt i DK-model2019.

Jævnfør geovejledning 2017/1 (Henriksen et al., 2017) er et passende kriterium for "overslagsberegninger", at ME beregnes med β_1 = 0,025 og RMS er 5 % af den samlede variation i potentialet (β_3 = 0,05). Dette er anvendt til beregning af nøjagtighedskriteriet til de 7 delmodeller, som er gengivet i Tabel 20.

Tabel 20. Nøjagtighedskriterie for potentialer (overslagsberegning), DK-model2019.

	DK1	DK2	DK3	DK4	DK5	DK6	DK7
dHmax (m)	109,7	61,2	114,8	103,9	144,0	106,0	117,1
Kriterium - ME (m)	2,7	1,5	2,9	2,6	3,6	2,6	2,9
Kriterium - RMS (m)	5,5	3,1	5,7	5,2	7,2	5,3	5,9

6.2.2 Observationsgrupper og nøjagtighedskriterier - afstrømningsdata

Til kvantificering af modellens evne til at reproducere den målte afstrømning i vandløbene har der traditionelt været fokuseret på NSE (Nash-Sutcliffe "model Efficiency") og vandbalancefejlen WBE. De to størrelser er givet ved

$$NSE = \frac{\sum (Q_{obs} - \overline{Q}_{obs})^2 - \sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \overline{Q}_{obs})^2}$$

$$WBE = 100 \frac{\overline{Q}_{obs} - \overline{Q}_{sim}}{\overline{Q}_{obs}}$$

hvor Q_{obs} *og* Q_{sim} er hhv. den observerede og den simulerede vandføring.

NSE-værdien (Nash and Sutcliffe, 1970) udtrykker modellens forklaringsgrad eller evne til at simulere dynamikken i afstrømningen. Da værdien vurderer kvadratafvigelsen har den en tendens til at favorisere høje afstrømningsværdier, så der kan opnås en rimelig NSE-værdi på trods af en dårlig overensstemmelse mellem observerede og simulerede afstrømninger i low-flow situationer. Samlet set vil NSE og WBE således favorisere et godt fit til de store vandføringer, mens low-flow situationerne vil blive tilgodeset i mindre grad.

Da det imidlertid ofte er minimumsvandføringer, der er kritiske ved vurdering af vandløbenes økologiske tilstand, er det valgt at medtage WBE_{sommer} som er specifikt rettet mod opnåelse af en god simulering af low-flow situationerne (sommervandføringen). Derudover, har NSE den ulempe ved kalibrering på tværs af mange stationer at den resulterer i meget store negative værdier hvis f.eks. vandbalancen ikke simuleres godt. Dette er særligt problematisk når der som i denne version medtages flere små oplande i kalibreringen. Nogle små oplande vil uundgåeligt ikke opnå en lille vandbalance fejl i en samlet national model og disse vil med deres store fejl på NSE ofte dominere kalibreringen (kvadratafvigelsessummen) som det også var tilfældet med pejlingerne.

Derfor er der i DK-model2019 kalibreringen valgt en alternativ statistisk størrelse til beskrivelse af den simulerede vandføringsdynamik nemlig Kling-Gupta Efficiency (KGE). Denne

størrelse beskriver performance af den simulerede vandføring vha. tre delelementer: Korrelation, variabilitet og bias.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r(Q_{sim}, Q_{obs}) - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{Qsim}}{\sigma_{Qobs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{Qsim}}{\mu_{Qobs}} - 1\right)^2}$$

Hvor *r,σ* og *μ* referere til helholdsvis korrelations koefficient, standard afvigelse og middelværdi. Styrken ved KGE er at den dels muliggør en analyse af hvilke aspekter (delkomponenter) af den observerede vandføring som simuleringen ikke kan genskabe og dels at den erfaringsmæssigt bevæger sig i et andet interval selv for stationer som ikke performer optimalt.

Således vil man for de 305 stationer anvendt til kalibreringen af DK-model2019 typisk se variationer i KGE i intervallet [-1:1] og for NSE ca. [-10:1]. Dette betyder at enkelte vandføringsstationer ikke i samme grad dominerer den samlede kalibrering og at nogle stationer kan vurderes at performe tilfredsstillende til nogle formål selvom kun én eller to af delkomponenterne i KGE performer godt.
Disse observationsgrupper som er medtaget i kalibreringen er således:

1. *KGE:* Kling-Gupta KGE-værdi beregnet på basis af samtlige observationer inden for kalibreringsperioden.
2. *WBE:* Vandbalancefejl beregnet på basis af samtlige observationer inden for kalibreringsperioden.
3. *WBE_{sommer}:* Vandbalancefejl beregnet på basis af observerede og simulerede vandføringer for sommermånederne juni, juli og august alene.

NSE værdierne beregnes fortsat for alle stationer, og indgår i model evalueringen, men ikke i parameter optimeringen. Der er behov for at oparbejde erfaringer med KGE performance kriteriet, og derfor er der i det følgende anvendt de eksisterende nøjagtighedskriterier baseret på NSE. Det skal derfor forventes at modellen muligvis ikke performer på højde med tidligere modeller ift. NSE (da den ikke har været et kalibreringsmål). Generelt ligger den numeriske værdi af KGE typisk en anelse højere end NSE, så de to kriterier kan ikke sammenlignes indbyrdes.

Jævnfør geovejledning 2017/1 (Henriksen et al., 2017) er foreslået forskellige nøjagtighedskriterier afhængig af vandløbets dynamik, udtrykt ved fraktionen Q_{10}/Q_{90}, samt middel og minimumsvandføringen, kriterium 5, 6 og 7. De numeriske mål for nøjagtighedskriterierne er gengivet i Tabel 19. Det opstillede nøjagtighedskriterie for DK-model2019, ”Screening”, betyder at 75% af stationer har NSE>0,55, WBE < 40 % samt WBE_{sommer} < 80 %.

Som noget nyt i forhold til tidligere DK-model kalibreringer er simuleret vandmængde til markvandingen inkluderet som en objektiv funktion. Markvanding i Jylland (DK4 - DK6) beregnes dynamisk og afhænger af klima, jordtype og arealanvendelse, se afsnit 5.4.1. Tidligere er markvandingen kalibreret manuelt ved at sammenligne den med årlige indberetninger som er summeret og korrigeret for evt. mangelfuld indberetning. Pga. det tætte sammenspil mellem den beregnede markvanding og vegetationsparametre (særligt roddybde) er det dog

langt mere hensigtsmæssigt at kalibrere markvandingen som en integreret del af den samlede DK-model kalibrering. Med den nye nationale kalibrerings metodik sikrer dette også at parametre som påvirker markvanding er rumligt konsistente på tværs af Jylland. Den objektiv funktion som er anvendt til at bestemme modellens evne til at simulere markvanding er en RMSE på årlige værdier, altså modellens evne til at beregne den samlede markvanding og år-til-år variationer. Objektiv funktionen vurderer ikke om markvandingen foregår på de rette steder eller på de rette dage. Da markvanding i modellen kun er mulig fra boringen som i Jupiter er markeret som markvandingsboringer (V40) vurderes det at markvandingens rumlige fordeling vil afspejles fornuftigt ved kombinationen af information om boringsplaceringer, jordtype og afgrødetype.

I nærværende kalibrering opstilles en observationsgruppe for markvanding, der er inkluderet i den samlede objektivfunktion:

RMSE$_{Irrigation}$: Beregnes på basis af de årlige residualer mellem registreret og korrigeret markvanding for hele Jylland og den modelberegnede markvanding.

6.2.3 Samlet objektivfunktion

Den inverse kalibrering blev gennemført i PEST ver. 16 (PEST). Formålet med en kalibrering er at minimere forskellene (eller residualerne) mellem de observerede og simulerede variable. Dette gennemføres ved at opstille en funktion (objektiv funktion), der angiver et mål for residualerne som funktion af de anvendte modelparametre, og derefter søge at minimere denne funktion vha. en matematisk algoritme. I PEST er objektivfunktionen, G, givet ved

$$G(\underline{b}) = \sum_{i=1}^{n} w_i r_i^2$$

hvor $\underline{b}$ er en vektor med kalibreringsparametrene, r_i er residualet for den i'te observation og dennes simulerede værdi og w_i er vægten af det i'te residual. Objektivfunktionen er således en vægtet kvadratsum af residualerne, på engelsk benævnes denne weighted summed squared residuals (SSR_w). I tilfældet hvor residualerne ikke vægtes, benævnes objektivfunktion blot summed squared residuals (SSR). Vægtningen af de enkelte residualer gør det muligt at lade de enkelte residualer have forskellig betydning under optimeringen, dvs. hvor meget vægt PEST skal tillægge de enkelte residualer i dens forsøg på at opnå en optimal løsning. Ideelt skal vægtningen af de enkelte residualer reflektere den forventede usikkerhed på observationerne, så observationer med stor usikkerhed tæller mindre i optimeringen end observationer med lille usikkerhed, hvilket kan gøres ved at vægte de enkelte observationer med den reciprokke værdi af standard afvigelsen på observationen ($1/s_{obs}$). En detaljeret vurdering af usikkerheden for samtlige potentialeobservationer er ikke praktisk mulig. I forbindelse med optimeringen af modelparametrene er det imidlertid ikke den faktiske værdi af vægtningen, men derimod den relative vægt mellem de enkelte observationer og observationsgrupper, der er vigtig. I nærværende optimering er det derfor valgt at anvende en simpel vægtning, sammensat af de variable som modellen efterfølgende ønskes anvendt til at simulere. Dette er opnået ved at opstille en objektiv funktion med bidrag fra hver af observationsgrupperne gennemgået ovenfor:

$$G(\underline{b}) = \sum_{j=1}^{m} v_j \sum_{i=1}^{n} w_i r_i^2$$

hvor *j* er antallet af bidrag til objektivfunktionen (dvs. observationsgrupper) og v_j er vægten af det j'te bidrag. Med w_i kan residualerne således vægtes inden for én observationsgruppe, mens det er muligt at foretage en vægtning mellem de enkelte observationsgrupper med v_j. I kalibreringen er det tilstræbt at opnå en balanceret vægtning mellem potentialer og vandløbsafstrømningen, dvs. sikre at de to observationstyper bidrog omtrentligt lige meget til den samlede objektivfunktion for den optimerede model. Dette kan kontrolleres ved justering af vægtningen mellem de forskellige observationsgrupper (v_j). Formålet med optimeringen er en reduktion af residualerne og under optimeringen vil disse ændres. Én iteration under optimeringen med PEST kan derfor resultere i, at residualet primært reduceres for den ene af de to observationstype. Da observationernes bidrag til den samlede objektivfunktion er produktet af residualet og den anvendte vægtning, vil bidragene fra de enkelte observationsgrupper ændre sig løbende gennem optimeringen. En balanceret vægtning er derfor søgt tilgodeset ved at anvende "fornuftige" startgæt på parameterværdier (baseret på erfaringer fra tidligere versioner af modellen, og beregne en vægtning mellem de enkelte observationsgrupper der sikrede en balanceret vægtning mellem potentialer og afstrømningsdata for dette startgæt.

Objektivfunktionen kan enten bestå af en enkelt norm for residualerne for en enkelt type af observationer, f.eks. middelfejlen på simulerede potentialer. Alternativt kan objektivfunktionen sammensættes af forskellige bidrag og eksempelvis inkludere forskellige statistiske størrelser (metrics) og/eller forskellige observationstyper. Ved at inddrage forskellige variabler og observationstyper i objektivfunktionen opnås en bedre udnyttelse af observationsdata, samt en mere robust kalibrering, hvor der ikke fokuseres ensidigt på modellens evne til at simulere en enkelt variable. Ved anvendelse af forskellige variable og metrics i objektivfunktionen vil kalibreringen endvidere bidrage med et kvantitativt mål for, hvor god modellen er til at repræsentere de forskellige størrelser. En sådan multi-variabel objektiv funktion anvendes til kalibrering af DK-model2019, hvor forskellige metrics for vandføring kombineres med metrics for trykniveau samt markvandingsvolumen i én samlet objektiv funktion.

Inden for de enkelte observationsgrupper er der foretaget en simpel vægtning. For pejlingerne er hvert modelgrid implicit vægtet efter antallet af observationer bag grid middelfejlen som en del af CRPS beregningen.

For vandføringen ønskes modellen at kunne reproducere alle de medtagede stationer uanset den faktiske oplandsstørrelse. Dog ønskes det at vandbalancen prioriteres særligt for de største oplande da modellens overordnede vandbalance har højest prioritet. Desuden er der en overrepræsentation af små stationer med et oplandsareal på under 100 km^2. Anvendes der derfor en ligelige vægtning af alle stationer under kalibreringen, vil det resulterer i en større vægtning af små stationer, mens de større stationer vil vægte mindre.

Baseret på vandløbsstationernes oplandsstørrelser er der derfor foretaget en opdeling af vandløbsobservationerne i tre oplandsgrupper: *opland1*: < 100 km^2; *opland2:* 100 - < 200 km^2 og *opland3:* > 200 km^2. Inden for observationsgrupperne KGE, WBE og WBE_{sommer} er det således muligt at vægte hver gruppe forskelligt så der opnås en ønsket vægtning imellem

de pågældende *opland*-grupper. Den samlede vægtning for de enkelte observationsgrupper er gengivet i Tabel 21.

Tabel 21. Vægtning inden for og imellem observationsgrupperne

Observations gruppe	Forklaring	Vægtning mellem grupper	Intern vægtning i obs.-gruppe
WBE_1	Vandbalancefejl [%] små stationer	1.0	
WBE_2	Vandbalancefejl [%] mellem stationer	4.0	
WBE_3	Vandbalancefejl [%] store stationer	6.0	
WBE_s_1	Sommer Vandbalancefejl [%] små stationer	1.0	
WBE_s_2	Sommer Vandbalancefejl [%] mellem stationer	4.0	
WBE_s_3	Sommer Vandbalancefejl [%] store stationer	6.0	
KGE_1	Kling-Gupta efficiency [-] små stationer	4.0	
KGE_2	Kling-Gupta efficiency [-] mellem stationer	6.0	
KGE_3	Kling-Gupta efficiency [-] store stationer	8.0	
DK1_w_crps	CRPS fejl [m] DK1	10.0	Efter antal obs.
DK2_w_crps	CRPS fejl [m] DK2	5.0	Efter antal obs.
DK3_w_crps	CRPS fejl [m] DK3	10.0	Efter antal obs.
DK4_w_crps	CRPS fejl [m] DK4	10.0	Efter antal obs.
DK5_w_crps	CRPS fejl [m] DK5	10.0	Efter antal obs.
DK6_w_crps	CRPS fejl [m] DK6	10.0	Efter antal obs.
RMSE_vanding	RMSE på årlige markvanding [mio m^3/år]	2.0	

Den samlede objektiv funktion bliver da summen af alle observationsgrupper. Her vægtes vandføring samlet med 40, pejlinger samlet med 55, mens markvanding vægtes med 2. Disse vægte knytter sig til det initiale parametersæt og vil ændres i takt med parameter optimeringen. Ved at vægte observationsgrupperne forskelligt påvirkes kalibreringen da den samlede objektiv funktion reduceres mest ved samme relative forbedring af residualer i en observationsgruppe med stor vægt. Er der ingen trade-off mellem observationsgrupperne, vil vægtningen ingen betydning have, men vægtningen har betydning når en given parameter ændring påvirker flere objektiv funktioner i forskellig retning.

6.3 Valg af kalibreringsparametre

I kalibrering af DKmodel2019 er der valgt samme overordnede koncept som i 2014 versionen, dvs. anvendelse af færrest mulige ”frie” parametre. Der er dog foretaget en betydelig ændring primært for Jylland således at alle hydrogeologiske enheder på tværs af Jylland kalibreres samlet for at sikre at samme enhed ikke kalibreres til forskellige parameterværdier i forskellige DK-model delområder. Dette giver i princippet færre hydrauliske ledningsevne parametre til kalibrering, men omvendt er den hydrogeologiske model udbygget med FOHM geologien, hvilket medfører flere hydrogeologiske enheder. Som beskrevet tidligere er der for overflade delen af modellen ligeledes gennemført en samlet kalibrering af fælles parametre for DK1 - DK6, hvilket ligeledes reducerer det samlede antal parametre, men også her er der til gengæld indført nye parametre til distribuering af parameterværdier. Det samlede

antal kalibrerings parametre er 32 for DK1 - DK6 samt 16 for DK7. De øvrige parametre er bundet til disse kalibreringsparametre, Bilag 3.

Det er således valgt at anvende samme hydrauliske parametre for geologiske enheder med sammenlignelige hydrauliske egenskaber. Dette betyder, at der for den kvartære lagpakke kun differentieres mellem sand og ler, dog er der foretaget en opdeling af leret i "opsprækket ler" (øvre 2 m) samt øvrigt ler. For den prækvartære lagpakke skelnes mellem sand karakteriseret som hhv. kvartssand og glimmersand, mens der kun er anvendt én enhed repræsenterende prækvartært ler.

Med det anvendte modelkoncept er der således følgende mulige kalibreringsparametre:

- Umættet zone parametre – for hver af de 19 anvendte kombinationer af jordtyper og effektive rodzonedybder (Tabel 9).
    - Vandindhold ved mætning θ_s
    - Vandindhold ved markkapacitet θ_{fc}
    - Vandindhold ved visnepunkt θ_{wp}
    - Mættet hydraulisk ledningsevne
    - Effektiv rodzonedybde (varierer med vækstsæson, vegetationstype og jordtype)
    - Mætnings deficit for vandindhold i rodzonen hvor markvanding initieres
- Hydrauliske ledningsevner (horisontale og vertikale) samt frie og spændte magasin tal for:
    - ler (øvre 2 m)
    - sand (øvre 2 m)
    - tørv/andet (øvre 2 m)
    - smeltevandssand (kvartært sand)
    - kvartært ler
    - kvartssand (prækvartært sand)
    - glimmersand (prækvartært sand)
    - glimmersilt/ler
- Dræn
    - tidskonstant
    - dybde placering
- Overfladisk afstrømning
    - overflade ruhed (Manning tal)
    - overflade magasinering (detention storage)
    - koefficient for afstrømning fra befæstede arealer
- Vandløb
    - Manning tal
    - lækage koefficient fordelt på hhv. ler-, sand- og tørvejorde

Baseret på erfaringer fra simple følsomhedsanalyser udført for tidligere version af DK-modellen, hvor de enkelte parametre blev varieret enkeltvis for successive modelkørsler, er der foretaget følgende reduktion af de frie parametre:

- *Jordfysiske parametre.* For de jordfysiske parametre er der kun en beskeden forskel på de anvendte værdier for vandmætningsgraderne mellem de forskellige georegions jordtyper, hvorimod der er betydelig forskel på den maksimale rodzonedybde (afsnit 0). Vandmætningsgraderne og rodzonedybden indgår samlet ved beregning af den vandmængde, der er tilgængelig for fordampning og er således delvist korreleret. Det er derfor valgt at bibeholde de initiale værdier for vandmætningsgraderne. De initiale rodzone parametre, Tabel 9, er justeret ved at kalibrere én rodzonedybde (Vinterhvede JB1) mens alle andre værdier i Tabel 9 er justeret relativt til denne parameter. Denne kalibrering er tidligere foretaget for hvert DK-model delområde for at optimere vandbalance simuleringerne. Dette har dog vist sig at være uhensigtsmæssigt ud fra en rumlig konsistens betragtning, da dette har medført at f.eks. en vinterhvede på JB1 ikke har samme roddybde overalt i landet. Derfor er der i denne version af DK-modellen gennemført én samlet kalibrering af rodzone dybden på tværs af hele landet. Dette sikrer større grad af konsistens, mere ensartede rumlige simuleringsresultater på bl.a. fordampning og grundvandsdannelse. Det medfører dog også en mindre frihedsgrad til at kalibrere vandbalancerne for de enkelte delmodeller. Det er vurderet at det deraf følgende mulige tab i performance kompenseres ved mere realistiske rumlige simuleringsresultater.
- *Toplag.* For det øvre toplag er det antaget at leret er opsprækket og derfor vil have en højere ledningsevne end det øvrige ler, hvorimod sandet i de øverste lag blev antaget at have samme hydrauliske egenskaber som det øvrige kvartære sand. Den sidste kategori i toplaget "Tørv/andet" har en begrænset udbredelse, og tideligere kalibreringsresultater fra DK-modellen viste, at det ikke var muligt at estimere en fornuftig bestemt værdi for denne enhed. Tørv/andet i toplaget blev derfor sat til en mellemting mellem sand og ler, og under optimering bundet til parameterværdien for kvartært sand med en faktor 10 lavere.
- *Prækvartæret*. For Jylland er det forsøgt at differentiere mellem kvartære og prækvartære aflejringer ved anvendelse af forskellige hydrauliske ledningsevner for sand/ler aflejret under de to perioder.
- *Anisotropi.* Det er antaget, at der er en anisotropi faktor på 10 mellem den horisontale og vertikale ledningsevne (Kx/Kz=10) for alle hydrostratigrafiske enheder, med undtagelse af den opsprækkede ler, hvor der er anvendt en anisotropi faktor på 100.
- *Magasintal.* Følsomhedsanalyser fra tidligere delmodeller udviste en relativ stor følsomhed overfor såvel de frie som de specifikke magasintal. Magasintallene er imidlertid ikke alene betydende over for den simulerede sæsonvariation i pejlingerne, men har også stor betydning mht. simulering af dynamikken i vandløbene. Tidligere erfaringer med optimering af magasintallene viste, at kalibreringen af magasintallene primært blev kontrolleret af vandføringsobservationerne, hvilket resulterede i urealistiske estimater af magasintallene. Det er derfor valgt ikke at kalibrere magasintallene, men derimod vurdere disse størrelser manuelt ved en visuel sammenligning af den observerede og simulerede dynamik i pejletidsserierne.
- *Dræn.* Vandløbsdynamikken blev fundet følsom overfor såvel dræntidskonstanten samt hvilken dybde drænene blev placeret i. Baseret på en sensitivitetsanalyse samt vurdering af fysisk realistiske værdier for drændybden blev det besluttet at drændybden ikke inkluderes i kalibreringen, men distribueres efter principperne beskrevet under drænopsætningen, afsnit 5.2.1. Denne distribuering medfører en overordnet drændybde på mellem 0m (søer), 0.1 m (vådområder) og 1 m (landbrugsjord), som

derefter korrigeres ift. topografisk variabilitet og tæthed af overfladisk drænnetværk. For dræntidskonstanten er to tidskonstanter inkluderet i kalibreringen, nemlig tidskonstanterne for landbrugsjord på hhv. sandede og lerede jorde. De resterende tidskonstanter er bundet til disse to parametre.

- *Overfladisk afstrømning.* Parametrene for overfladisk afstrømning blev fundet at have lille betydning for simuleringerne som helhed, hvilket formegentligt skyldes den anvendte skala. Pga. den ubetydelige følsomhed blev værdierne for OL fastholdt på startværdierne.
- *Ruhed af vandløbsbund.* For vandløbene blev der kun fundet en lille følsomhed overfor manningtallet som følgelig blev fastholdt på startværdien.

Tabel 22 og Tabel 23 viser en oversigt over hvilke parametre der er inkluderet i kalibreringen af hver delmodel. For alle delmodeller er der desuden en række andre parametre som er "bundet" til disse kalibrerings parametre, f.eks. er den vertikale og horisontale hydraulisk ledningsevne bundet til hinanden med den angivne anisotropi faktor, mens forskellige hydrogeologiske enheder ligeledes kan være bundet til hinanden, typisk hvis den ene har en ringe repræsentation i et givent modelområde. Alle relationen mellem bundne parametre samt startværdier for alle parametre er angivet i Bilag 3. Det skal bemærkes at relationen mellem bundne parametre er baseret på relationen mellem deres startværdier.

Tabel 22. Oversigt over kalibrerings parametre for delmodellerne 1-6.

	Betegnelse	**DK1-2**	**DK3**	**DK4-6**	**DK1-6**
Hydrogeologi	Top jordart				X
	Kvartær Ler	X	X	X	
	Kvartær Sand	X	X	X	
	Prækvartær sand			X	
	Prækvartær Ler/mergel	X	X	X	
	Kalk	X	X	X	
Vandløb	Dræn tidskonstant				X
	Vandløbs lækage				X
	Deficit faktor markvandings-start				X
	Befæstet runoff multiplikator				X
	Rodzone dybde				X

Tabel 23. Oversigt over kalibreringsparametre for delmodel 7.

	Betegnelse	DK7
Hydrogeologi	Opsprækket ler	X
	Kvartær sand og grus	X
	Kvartært ler og silt	X
	Prækvartær sand	X
	Prækvartær ler	X
	Grundfjeld	X
	Sandsten og kvartsit	X
	Skifre	X
	Grønne skifre	X
	Forkastning	X
Vandløb	Dræn tidskonstant	X
	Vandløbs lækage	X
	Rodzone dybde	X

7. Kalibrerings- og valideringsresultat

Resultatet af kalibrering og validering af DK-model2019 er opsummeret herunder med udvalgte plots til illustration og sammenlignet med DK-model2014. Ekstra tabeller over modelperformance og plots for alle vandføringsstationer er vedlagt i Bilag 4.

Alle delmodeller 1 - 6 samt delmodel 7 er kalibreret ved invers modellering i PEST. Det er i videst muligt omfang forsøgt at homogeniserer både modelopsætninger, parametrisering samt invers opsætning i PEST. Dette betyder bl.a. at objektivfunktioner og indbyrdes vægtning er ens for alle modelområder, nærmere beskrevet i afsnit 6.2.3. Forud for kalibrering er der lavet en sensitivitetsanalyse, som har dannet baggrund for udvælgelse af kalibreringsparametre. Dog er der også inddraget erfaringer fra tidligere kalibreringer, som opsummeret i forrige afsnit, og ønsket om homogenitet i kalibreringsopsætningerne mellem delområderne.

7.1 Kvantitativ vurdering af kalibrerings og validerings resultater

I det følgende afsnit beskrives den kvantitative vurdering af kalibrerings og validerings resultaterne samlet for hhv. trykniveauer og vandføring.

7.1.1 Kvantitativ vurdering af trykniveau simuleringer

Fordelingskurven for middelfejl pr. gridcelle samt RMSE for de pejlinger som er medtaget i kalibrering samt valideringer plottet separat for DK1 - DK7 i Figur 41 - Figur 47. Desuden er simuleringsresultater for kalibreringsperioden ligeledes angivet for den tidligere version DK-model2014. Kalibrerings og validerings statistik for trykniveauer for alle delmodeller er opgjort i Tabel 24.

Sammenholdes den opnåede performance med de opstillede kriterier, ses det at alle modelområder opfylder kriterierne for ME mens de fleste modelområder har RMSE værdier på niveau med kriteriet for RMSE med undtagelse af DK6 og særligt DK7 som overskrider kriteriet betydeligt. Dette er samme overordnede resultat som for DK-model2014.

For valideringsperioderne varierer performance meget i sammenligning med kalibreringsperioden. Dette skyldes formentligt primært at valideringsdata ikke er kvalitetssikret på samme niveau som de pejledata som er anvendt til kalibrering. Desuden kan fordelingen af pejledata på tværs af zoner og geologiske lag varierer i tid og medføre forskelle i performance statistikken. Særligt for DK3 ses et markant fald i performance for valideringsperioden, Figur 43, hvilket sandsynligvis primært skyldes variationer i valideringsdata og utilstrækkelig kvalitetssikring, da fejlen er entydigt i negativ retning, kan indvindingspåvirkede pejlinger, som ikke er frasorteret, være hovedårsagen.

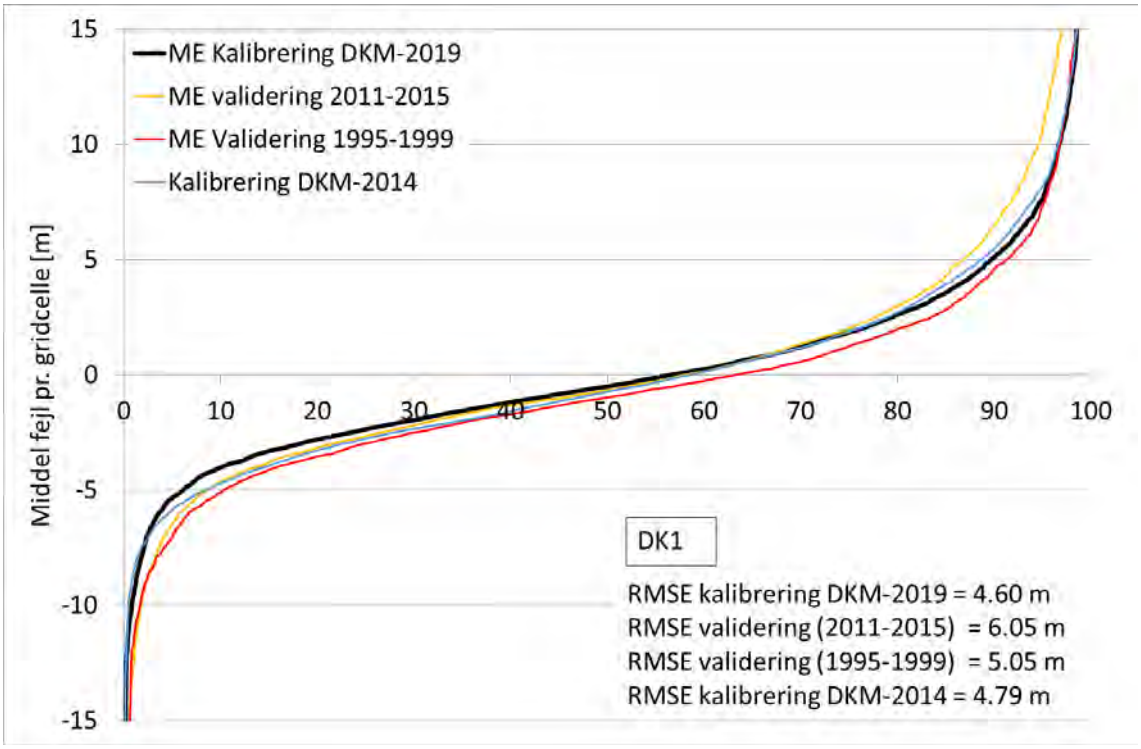
For valideringsperioderne (1995 - 1999 samt 2011 - 2015) falder performance, og for disse perioder overholder DK3 og DK6 heller ikke kriteriet for RMSE, mens alle delområder overholder kriterierne for ME.

Tabel 24. Kalibrerings og validerings statistik for trykniveauer for alle delmodeller.

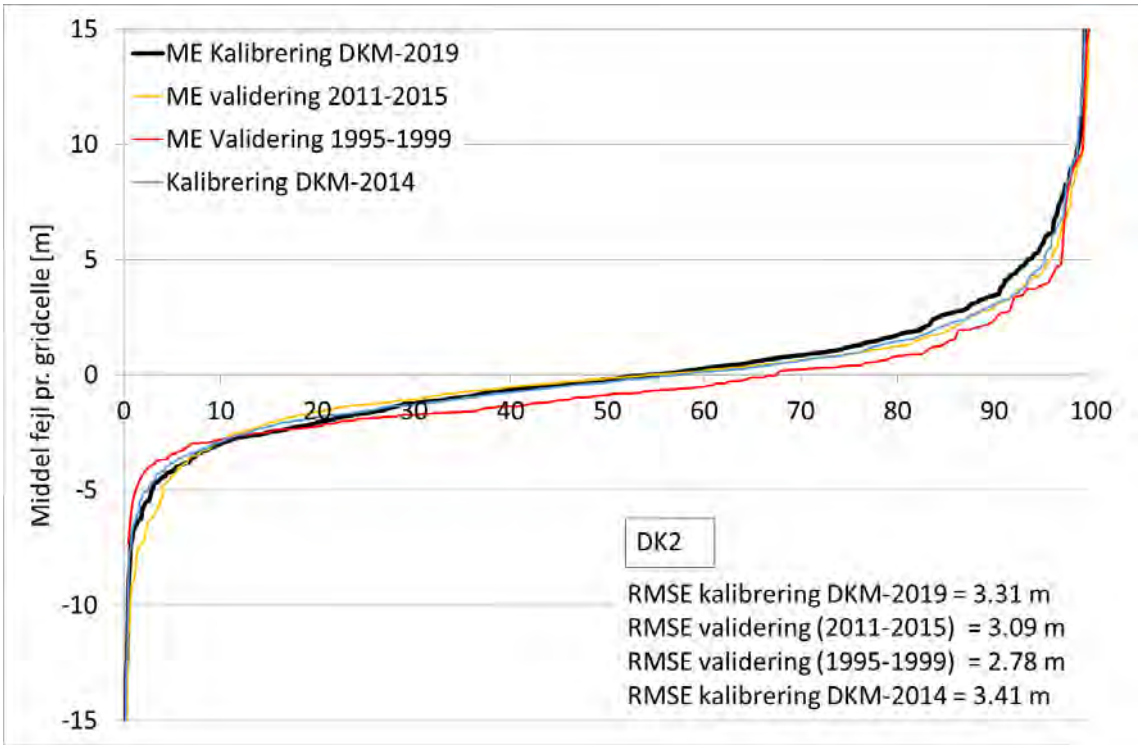
	DK1	DK2	DK3	DK4	DK5	DK6	DK7
dHmax (m)	109,7	61,2	114,8	103,9	144,0	106,0	117,1
Kriterium - ME (m)	2,7	1,5	2,9	2,6	3,6	2,6	2,9
Kriterium - RMSE (m)	5,5	3,1	5,7	5,2	7,2	5,3	5,9
Kalibrering 00-10							
ME (m)	0,2	0,1	0,9	0,1	0,3	0,7	0,3
RMSE (m)	4,6	3,3	5,8	5,5	7,1	6,0	8,3
$ME_{90\%}$ (m)	-0,4	-0,3	-0,5	-0,3	-0,3	-0,3	-0,8
$RMSE_{90\%}$ (m)	2,7	1,9	3,0	3,1	4,1	3,5	5,2
Validering 95-99							
ME (m)	-0,5	-0,4	0,5	-0,3	-0,3	0,3	0,1
RMSE (m)	5,1	2,8	8,5	5,0	6,7	6,2	8,7
Validering 11-15							
ME (m)	0,3	-0,1	-0,1	-0,2	0,6	0,6	-0,2
RMSE (m)	6,1	3,1	7,9	5,4	6,7	6,5	9,1
DK-model2014 00-10							
ME (m)	0,0	0,0	0,9	-0,5	0,1	0,3	0,8
RMSE (m)	4,8	3,4	6,2	5,6	7,4	5,9	8,7
$ME_{90\%}$ (m)	-0,7	-0,3	2,6	2,4	3,1	2,5	4,0
$RMSE_{90\%}$ (m)	3,0	1,7	3,3	3,2	4,1	3,3	6,5

Enkelte pejleboringer simuleres med meget store fejl hvilket primært tilskrives ikke repræsentative målinger eller boringer påvirket af meget lokale forhold som ikke er opløst af modelgrid samt manglende nøjagtighed i den geologiske model. I et forsøg på at kvantificere modellens performance for den store del af pejlingerne som vurderes at være repræsenteret af modellens regionale strukturer og geologi er ME samt RMSE ligeledes angivet for de 90% bedste af pejlingerne, dvs. de 90% af gridcellerne som har den laveste ME. Denne statistik viser en $RMSE_{90\%}$ som er ca. 40% lavere end RMSE for alle delområder for kalibreringsperioden, hvorimod ME typisk ligger på samme niveau, men med modsat rettet bias, Tabel 24.

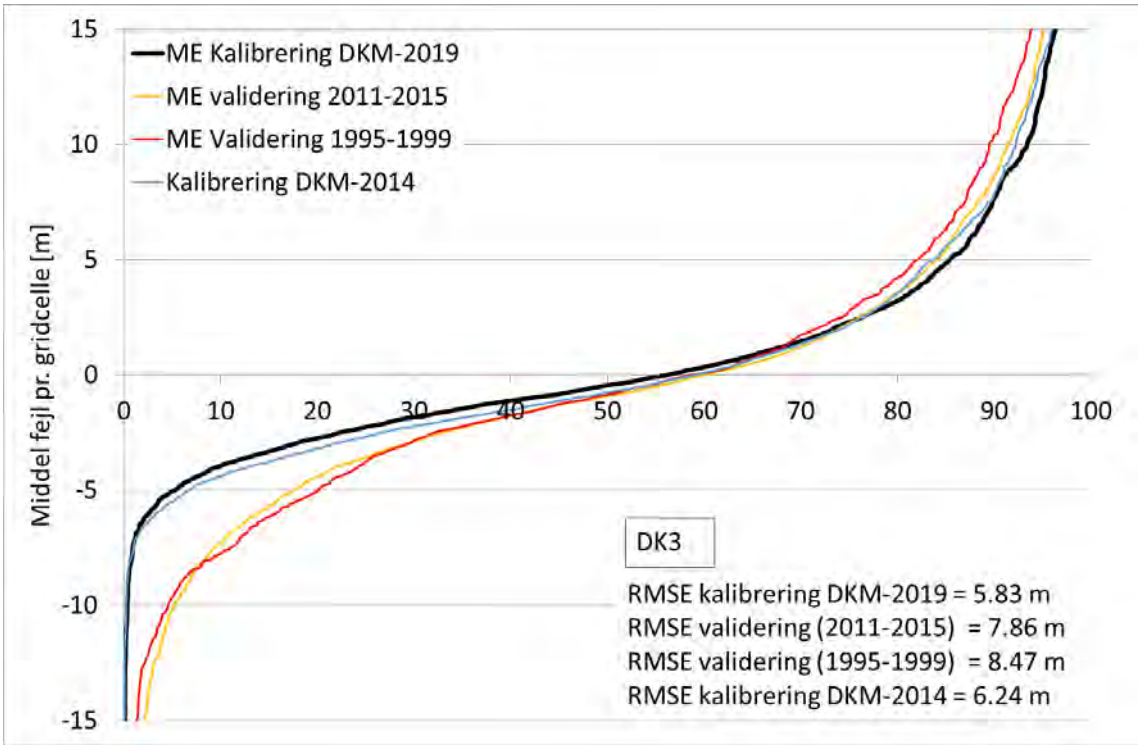
Generelt er model performance bedst for kalibreringsperioden for DK-model2019, sammenlignet med DK-Mode2014, Tabel 24. Typisk er RMSE ca. 0.1 - 0.5 m lavere i DK-model2019 sammenlignet med DK-model2014. Den store forskel på DK-model2019 og DK-model2014 ses på statistikken for de 90% bedste pejlinger. Her ses en markant forbedring i $ME_{90\%}$ for den nye version af DK-modellen, med $ME_{90\%}$ værdier som ligger på ca. 5 gange mindre for DK-model2019 for områderne DK3, DK4, DK5, DK6 og DK7. Denne væsentlig forbedring for de 90% af pejlingerne som vurderes at passe bedst in i den konceptuelle model skyldes primært det nye kalibreringskoncept baseret på CRPS vægtningen, som netop skulle sikre fokus på ME af de pejlinger som ligger centreret omkring nul fejlen, mens pejlinger med meget store fejl tildeles mindre vægt i parameter optimeringen.



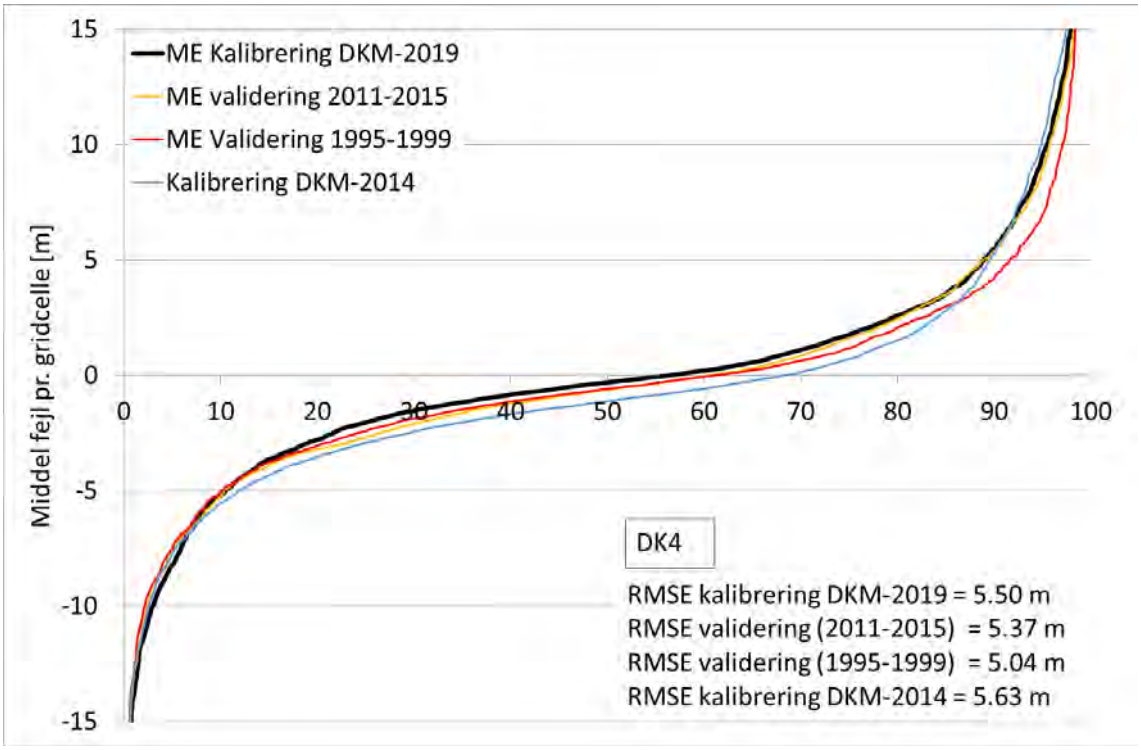
Figur 41. DK1, Statistik for trykniveauer udtrykt som ME pr. gridcelle med pejleobservationer, for både kalibreringsperiode, og to valideringsperioder for DK-model2019 samt sammenligning med DK-model2014.



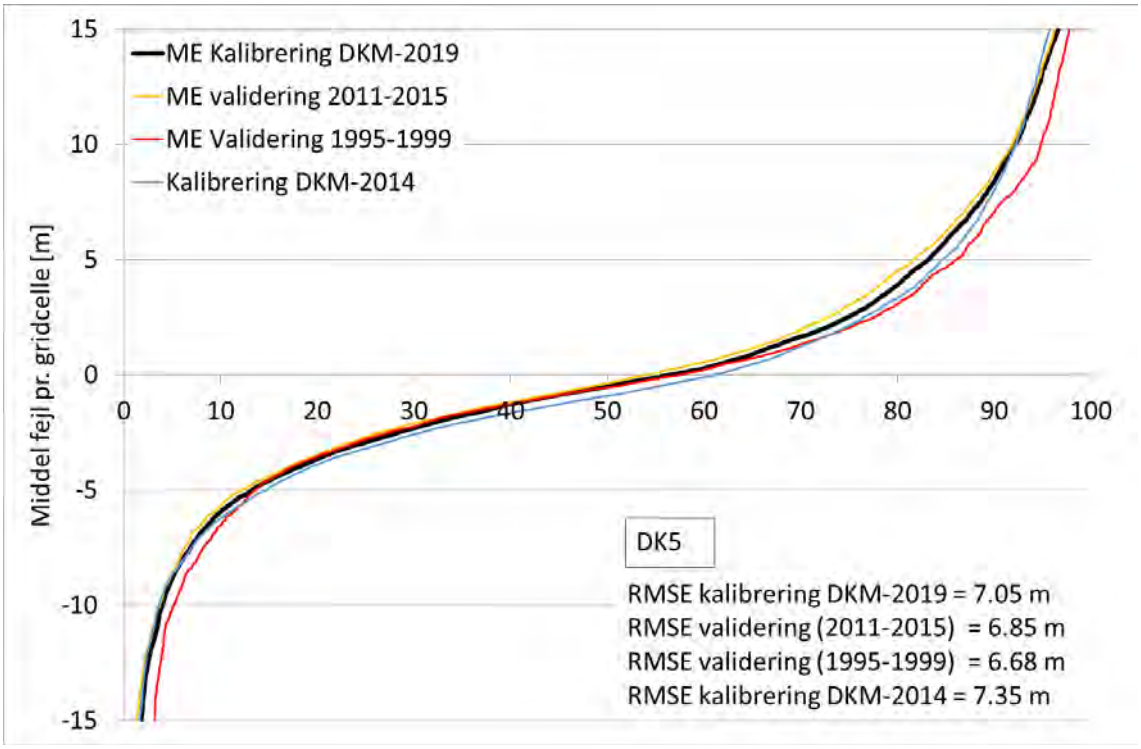
Figur 42. DK2, Statistik for trykniveauer udtrykt som ME pr. gridcelle med pejleobservationer, for både kalibreringsperiode, og to valideringsperioder for DK-model2019 samt sammenligning med DK-model2014.



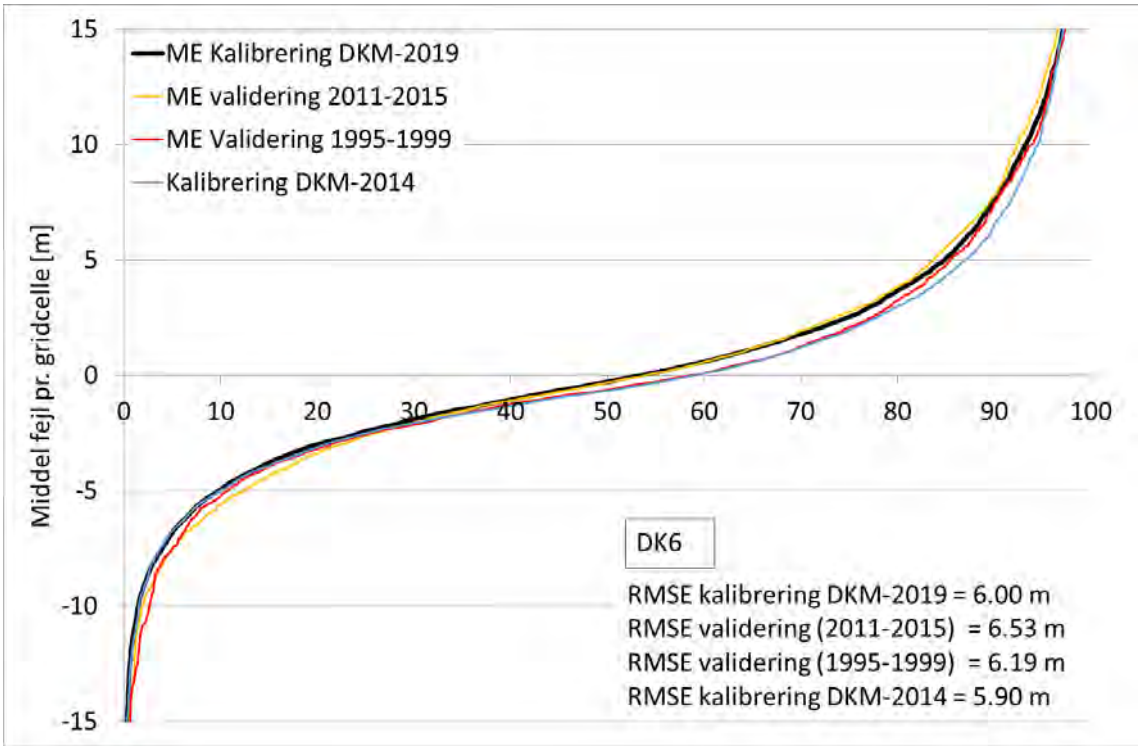
Figur 43. DK3, Statistik for trykniveauer udtrykt som ME pr. gridcelle med pejleobservationer, for både kalibreringsperiode, og to valideringsperioder for DK-model2019 samt sammenligning med DK-model2014.



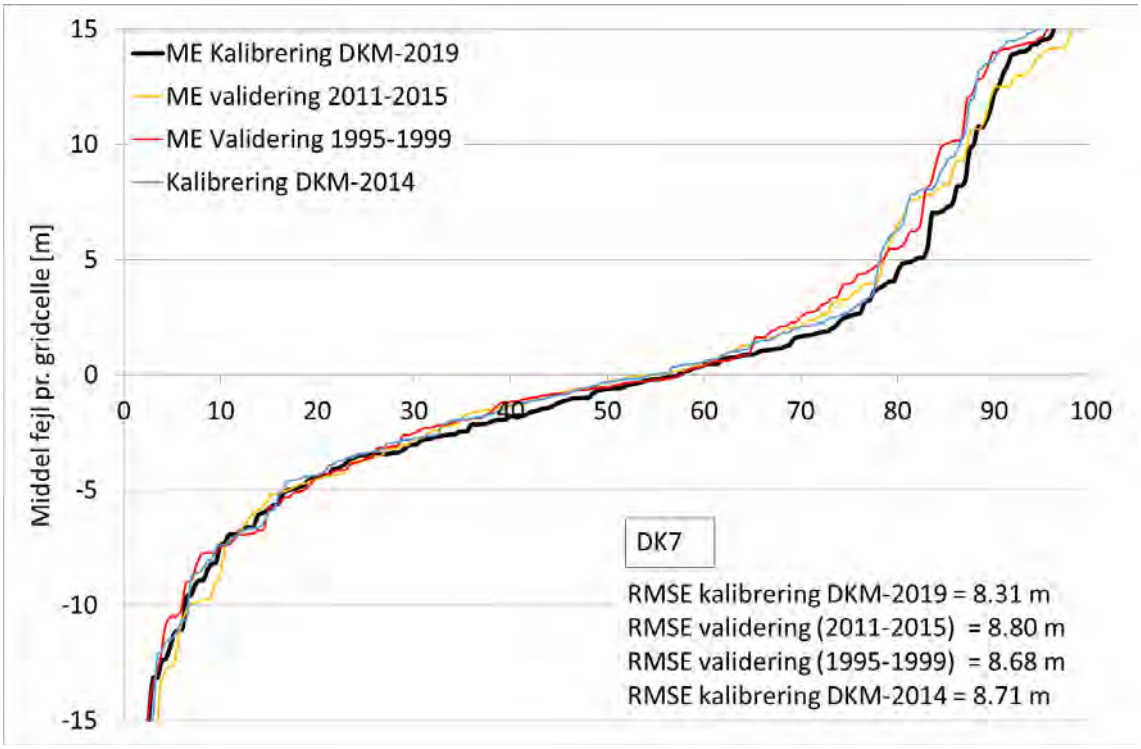
Figur 44. DK4, Statistik for trykniveauer udtrykt som ME pr. gridcelle med pejleobservationer, for både kalibreringsperiode, og to valideringsperioder for DK-model2019 samt sammenligning med DK-model2014.



Figur 45. DK5, Statistik for trykniveauer udtrykt som ME pr. gridcelle med pejleobservationer, for både kalibreringsperiode, og to valideringsperioder for DK-model2019 samt sammenligning med DK-model2014.



Figur 46. DK6, Statistik for trykniveauer udtrykt som ME pr. gridcelle med pejleobservationer, for både kalibreringsperiode, og to valideringsperioder for DK-model2019 samt sammenligning med DK-model2014.



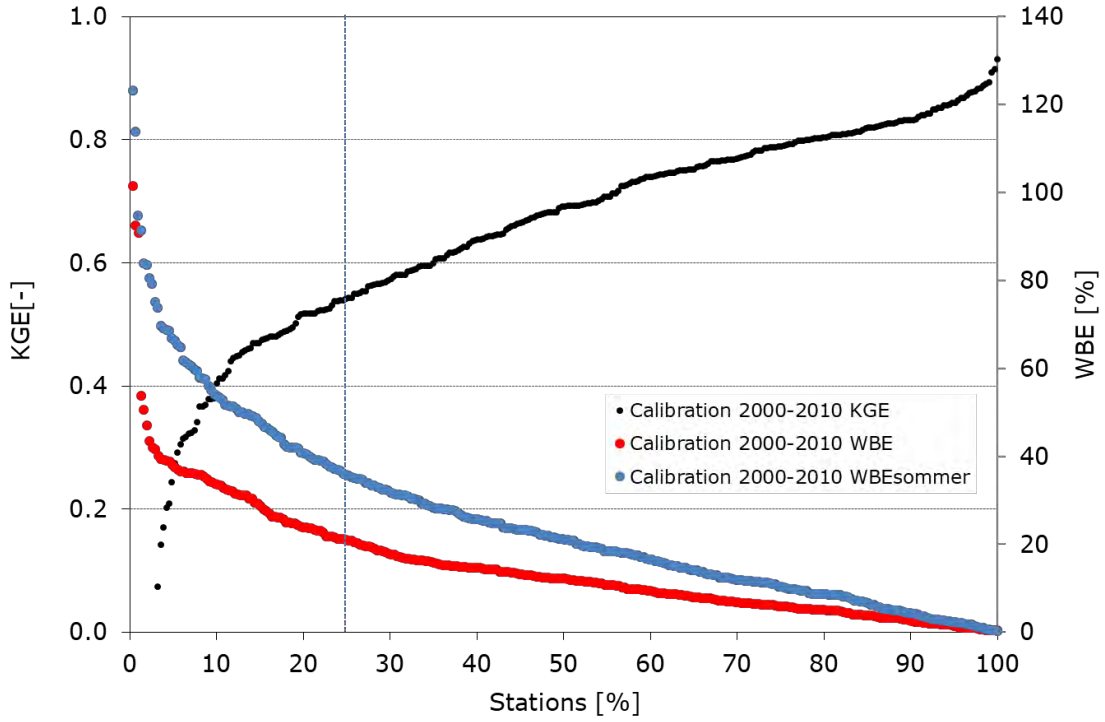
Figur 47. DK7, Statistik for trykniveauer udtrykt som ME pr. gridcelle med pejleobservationer, for både kalibreringsperiode, og to valideringsperioder for DK-model2019 samt sammenligning med DK-model2014.

7.1.2 Kvantitativ vurdering af vandførings simuleringer

Modellens evne til simulering af vandføringer er kvantificeret ved de tre observationsgrupper, KGE, WBE og WBE_{sommer} samt for NSE. Kriterierne for vandføring ønskes generelt overholdt til screeningsniveau for kriterie 5 – 7, Tabel 19, men da vandløbskriterier er flow afhængige (type1 - 4) er det vanskeligt at foretage en entydig vurdering baseret på performance af alle vandføringsstationer samtidigt. Da der i DK-model2019 er tilføjet 120 små vandløbsstationer vil kriterierne for NSE, WBE samt WBE_{sommer} for den samlede DK-model være lavere end for tidligere afrapporteringer af DK-model performance. DK-model2014 er kalibreret mod 185 stationer, DK-model2019 mod 305 stationer og i nedstående statistikker er de samme 305 stationer anvendt til sammenligning.

Generelt vurderes det at de 305 stationer anvendt i DK-model2019 overholder kravene til type 1 vandløb, se Tabel 19. Dette skyldes at større vandløb typisk overholder kravene, mens det er performance for de mindre vandløb som er afgørende for opfyldelse af særligt kriterie 5 og 6.

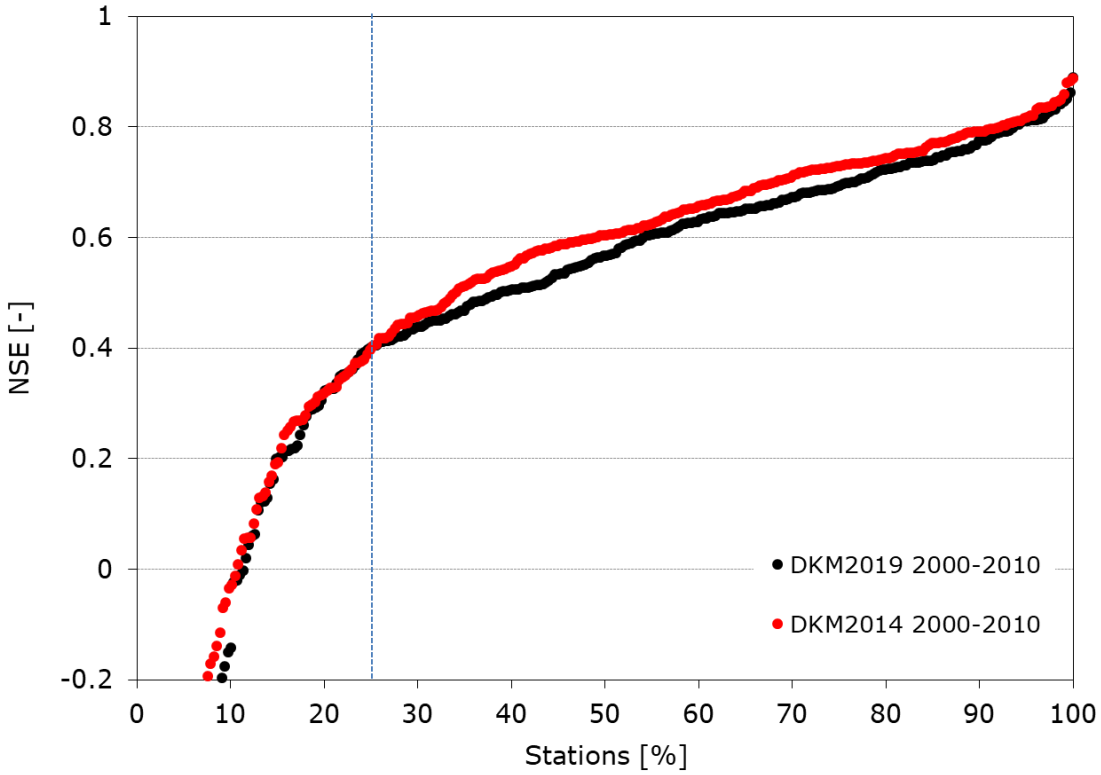
De kriterier som er anvendt i den følgende vurdering af modellen er at 75% af stationer har: NSE>0,55, WBE < 40 % samt WBE_{sommer} < 80 %.



Figur 48. Kalibreringsstatistik for de vandføringsstationer anvendt i kalibrering af de syv modelområder.

For hver af de statistiske størrelser er fordelingskurven for alle 305 vandføringsstationer illustreret i Figur 48. For KGE er median værdien 0,69 mens 75 % af stationerne ligger over en KGE på 0,54. For WBE er median værdien 12 % mens 75 % af stationerne har en vandbalance fejl mindre end 21 %. For WBE_{sommer} er median værdien 21 % mens 75 % af stationerne har en vandbalance fejl mindre end 36 %. Til sammenligning med tidligere modeller og kriterier er NSE værdien ligeledes angivet i Figur 49. For NSE ligger medianen på 0,57 mens 75 % af stationerne ligger over 0,40.

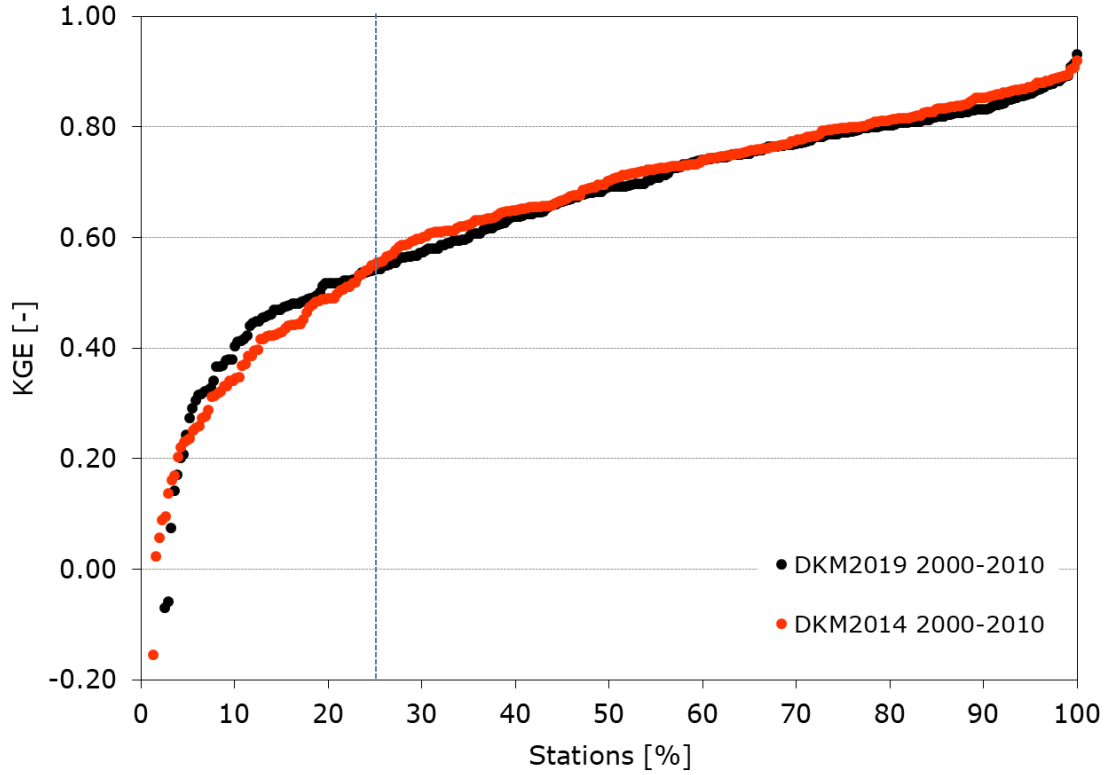
Det vurderes at kriterierne for både screening- og overlagsniveau overholdes for WBE og WBE_{sommer}, mens det ikke overholdes for NSE. Det er dog vigtigt at understrege at DK-model2019 ikke er kalibreret mod NSE samt at der er manglende erfaring med fastsættelse af kriterier for KGE generelt og NSE særligt når en stor andel af stationerne repræsenterer meget små vandløb. Erfaringerne fra DK-model2014 viser at 76% af alle store stationer kan leve op til NSE kravet, mens kun 53% af de små stationer (< 30 km²) kan leve op til kravet. Samlet set overholder 60-70% af alle stationer NSE kravet i begge modeller. Af Figur 49 kan iagttages en lidt højere procent sats overholder NSE krav på 0,55 i DK-model2014 end i DK-model2019.



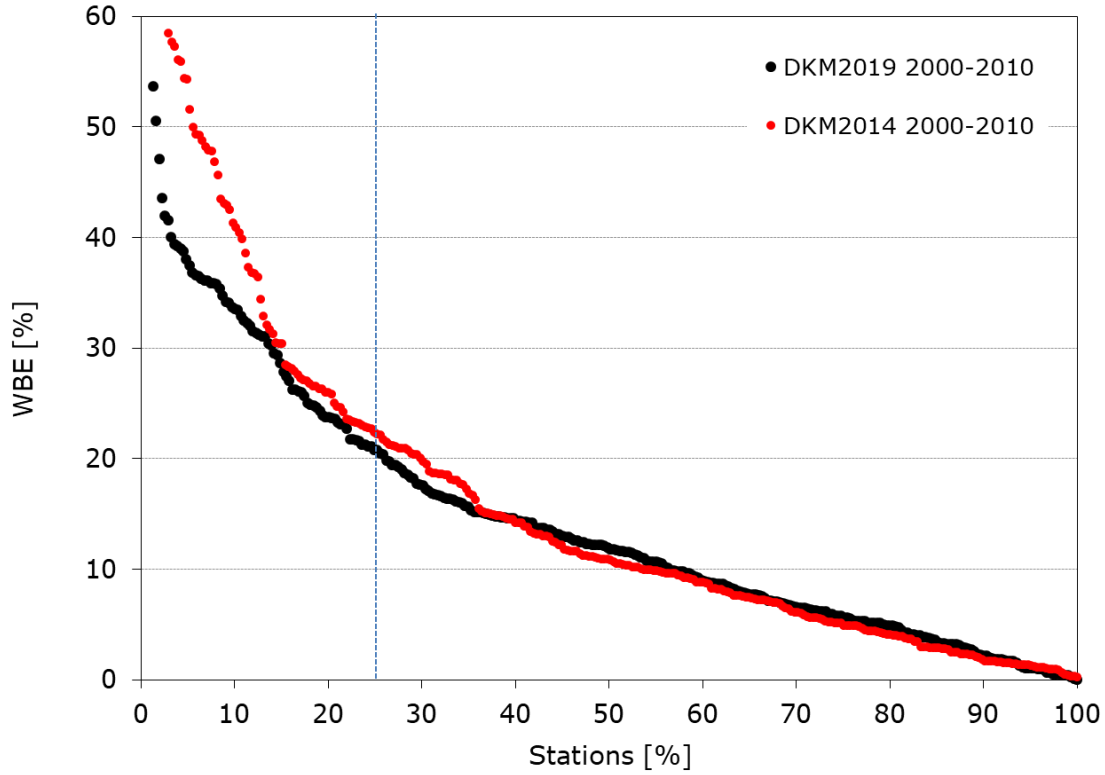
Figur 49. Kalibrerings og valideringsstatistik for NSE for de vandføringsstationer der er anvendt i kalibreringen for DK-model2019.

Der er desuden lavet en sammenligning af den nye DK-model2019 og den forrige DK-model 2014 for de øvrige kalibreringskriterier. Denne er illustreret i Figur 50 til Figur 52 for KGE, WBE og WBE_{sommer}, samt NSE i Figur 49. Denne sammenligning mod samme vandførings-stationer for perioden 2000 - 2010 viser meget sammenlignelige resultater for alle statistiske størrelser med et mindre fald i performance for NSE og KGE samt en mindre forbedring for WBE og WBE_{sommer}.

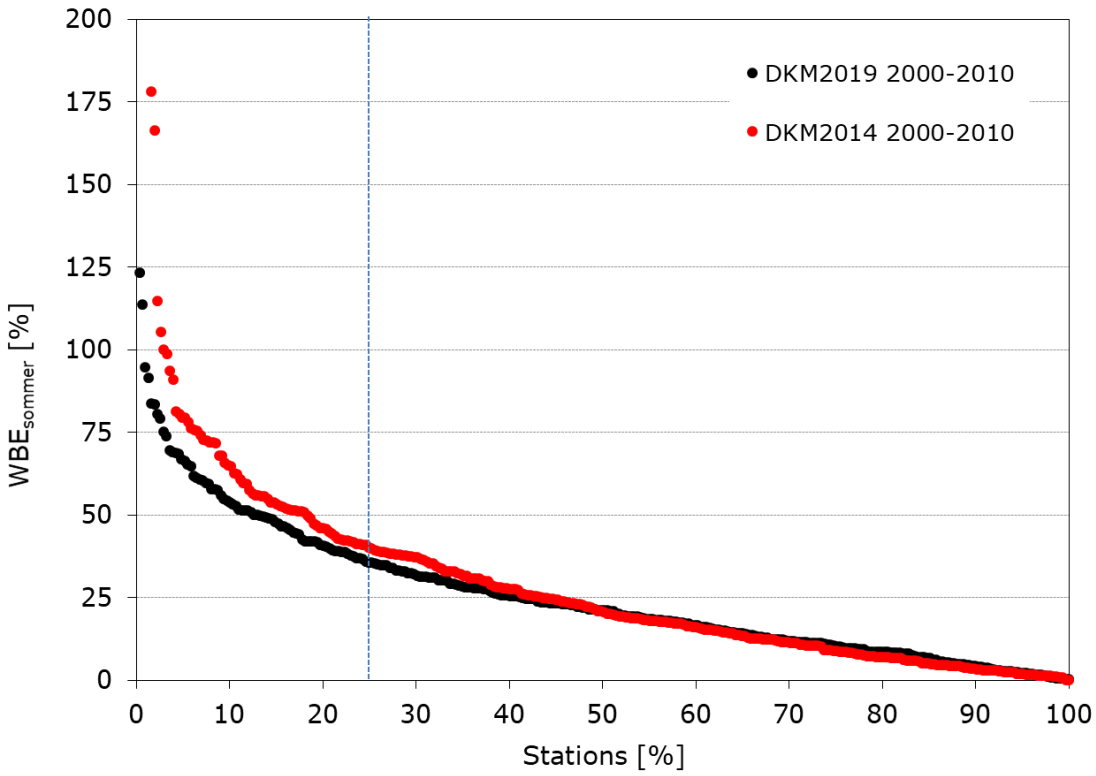
Da DK-model2014 blev vurderet til at overholde kalibrerings kriterierne vurderes det på den bagrund at DK-model2019 har en tilsvarende performance. Der bør ligeledes tages højde for at kalibreringsperioden inkluderer data fra perioden efter 2007, hvor det tidligere har vist sig at vandføringssimuleringer performer generelt dårligere formentligt pga. faldet i antallet af nedbørsstationer.



Figur 50. Kalibrerings og valideringsstatistik for KGE for de vandføringsstationer der er anvendt i kalibreringen for DK-model2019.



Figur 51. Kalibrerings og valideringsstatistik for WBE for de vandføringsstationer der er anvendt i kalibreringen for DK-model2019.



Figur 52. Kalibrerings og valideringsstatistik for WBE$_{sommer}$ for de vandføringsstationer der er anvendt i kalibreringen for DK-model2019.

Til validering af vandføringssimuleringerne er anvendt to perioder; 1995 - 1999 samt 2011 - 2015. Dette er valgt for at separere modelvalideringen fra en test af de anvendte klimadata.

For perioden 2007 - 2015 er antallet af nedbørsstationer som indgår i DMI's 10 km grid nedbørsprodukt reduceret voldsomt, til ca. en tredjedel og som det vil fremgå af den følgende validering er dette tab af datadækning sammenfaldende med et voldsomt fald i model performance. Da antallet af tilgængelige vandføringsstationer varierer mellem perioderne kan det dog være vanskeligt at sammenligne forskellige perioder. Valideringsresultater for KGE, WBE, WBE$_{sommer}$ samt NSE er angivet i Figur 53 til Figur 56.

For **valideringsperioden 1995 - 1999 er** median værdien af KGE 0,72 mens 75 % af stationerne ligger over en KGE på 0,57, Figur 53. For WBE er median værdien 12 % mens 75 % af stationerne har en vandbalance fejl mindre end 23 %, Figur 54.For WBE$_{sommer}$ er median værdien 24 % mens 75 % af stationerne har en vandbalance fejl mindre end 44 %, Figur 55. For NSE, Figur 56, ligger medianen på 0,70 mens 75% af stationerne har en NSE højere end 0,51.

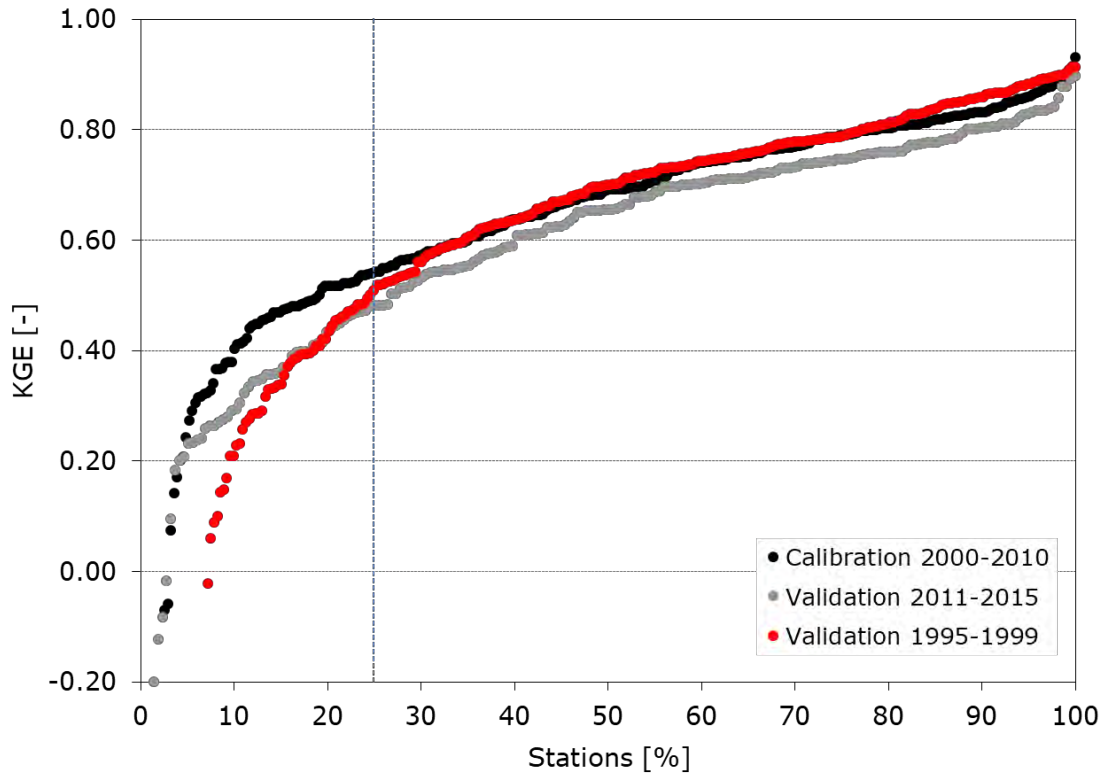
Dermed er modellens evne til at simulere vandføring for valideringsperioden (1995-1999) på lignende niveau som for kalibreringsperioden og overholder screeningsniveau undtaget for NSE som dog er lidt bedre i denne periode forhold til de andre perioder.

For **valideringsperioden 2011 - 2015 e**r median værdien af KGE 0,66 mens 75 % af stationerne ligger over en KGE på 0,48, Figur 53. For WBE er median værdien 15 % mens 75 %

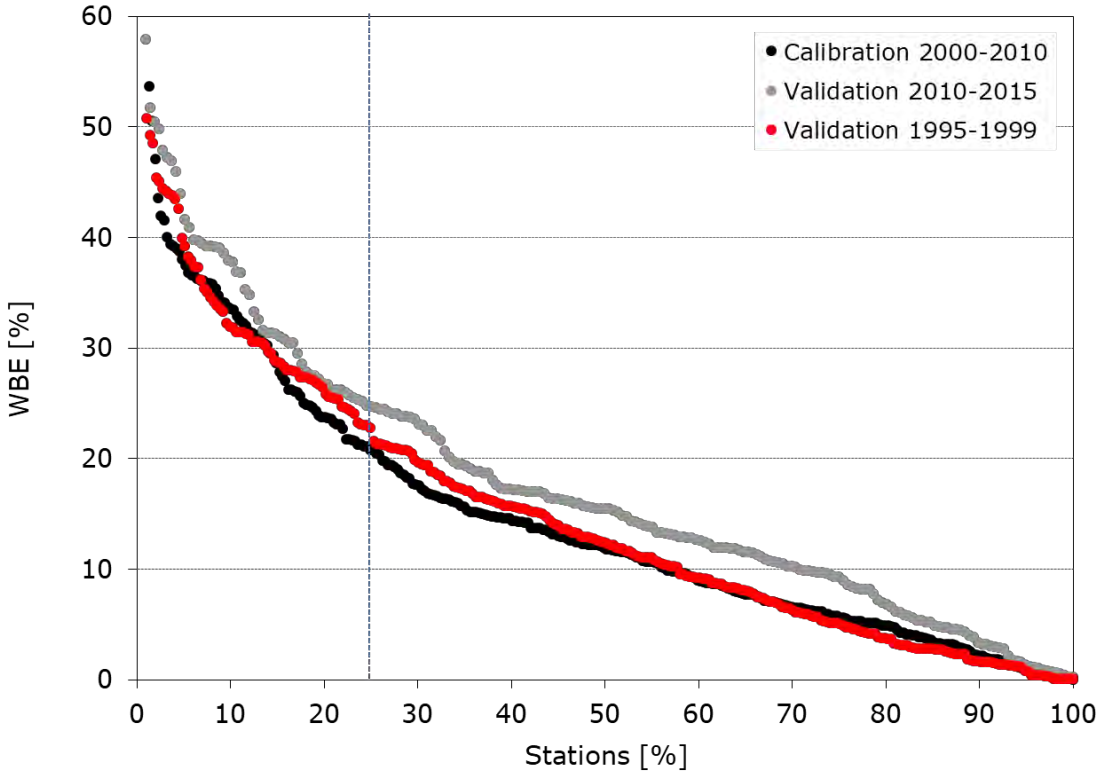
af stationerne har en vandbalance fejl mindre end 25 %, Figur 54.For WBE_{sommer} er median værdien 22 % mens 75 % af stationerne har en vandbalance fejl mindre end 41 %, Figur 55. For NSE, Figur 56, ligger medianen på 0,57 mens 75% af stationerne har en NSE højere end 0,39.

Dermed er modellens evne til at simulere vandføring for valideringsperioden (2011-2015) på lignende niveau som for kalibreringsperioden og overholder screeningsniveau undtaget for NSE.

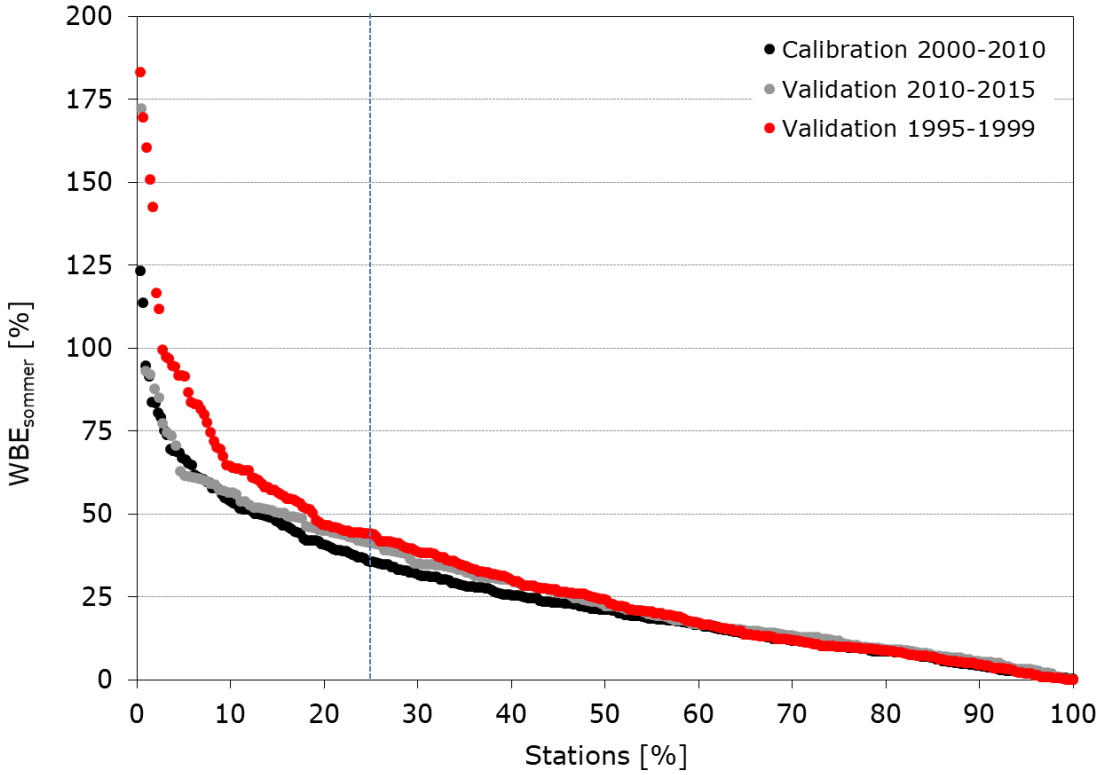
Statistik for samtlige vandføringsstationer for alle tre perioder er angivet i Bilag 4, som ligeledes inkluderer en opgørelse over på hvilket niveau for model anvendelse hver enkelt station vurderes gyldig. Af tabellen fremgår det at selvom den nationale model overordnet opfylder de opstillede krav for kalibrerings- og en af valideringsperioderne er der væsentlige regionale forskelle på modellens performance, hvilket også vil blive illustreret under en kvalitative del af modelevalueringen.



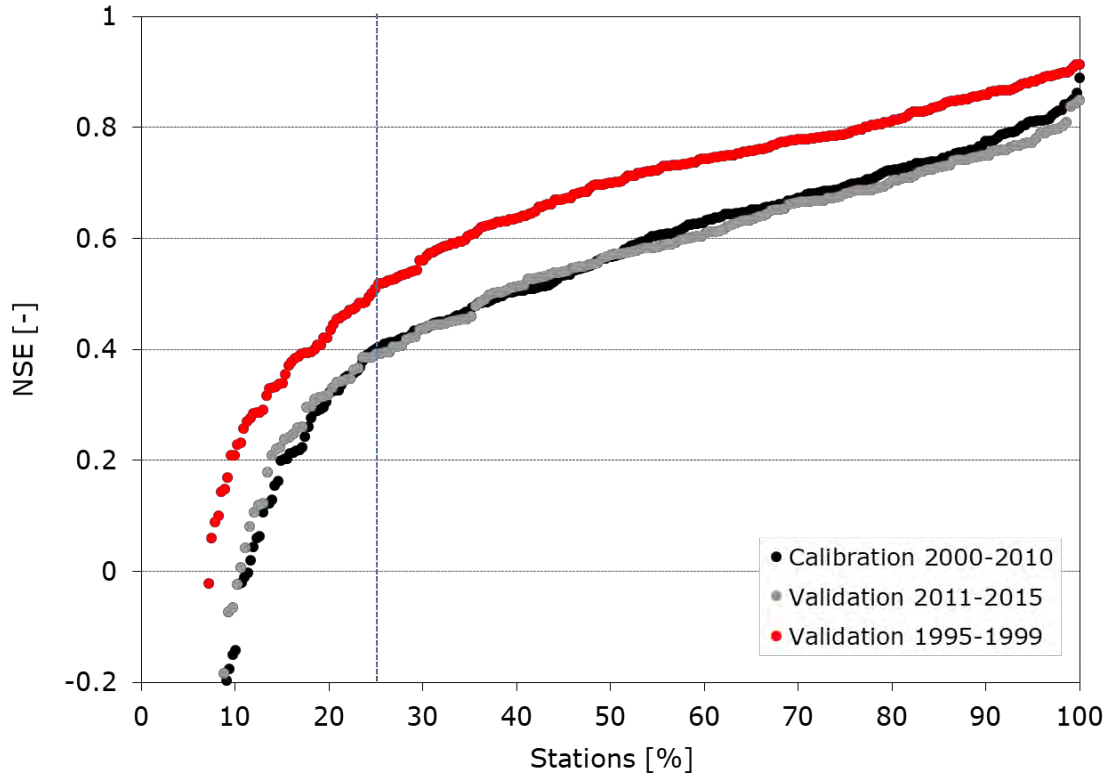
Figur 53. Valideringsstatistik for KGE for de vandføringsstationer der er anvendt i valideringen for de to valideringsperioder.



Figur 54. Valideringsstatistik for absolut WBE for de vandføringsstationer der er anvendt i valideringen for de to valideringsperioder.



Figur 55. Valideringsstatistik for absolut WBE$_{sommer}$ for de vandføringsstationer der er anvendt i valideringen for de to valideringsperioder.



Figur 56. Valideringsstatistik for NSE for de vandføringsstationer der er anvendt i valideringen for de to valideringsperioder.

7.2 Kvalitativ vurdering af kalibreringsresultat

Foruden de kvantitative kriterier som vurderes i afsnit 7.1 skal modellen opfylde også de kvalitative kriterier opsat i afsnit 6.2:

- De estimerede parametre skal have realistiske værdier.
- Residualerne skal være arealmæssigt fornuftig fordelt.
- For vandløbene skal den rigtige dynamik afspejles, dvs. en hændelse giver den rigtige respons både i tid og sted.

7.2.1 Kvalitativ vurdering af optimerede model parametre

De optimerede parameterværdier for de parametre der er kalibreret samlet for hele landet med undtagelse af Bornholm er angivet i Tabel 25. Desuden er der i Tabel 26 - Tabel 29 angivet optimerede parametre for hver region (Jylland, Fyn, Sjælland samt Bornholm).

Værdierne af de optimerede parametre ligger generelt i de forventede intervaller med fin adskillelse af sandede og lerede enheder. Nogle parametre for Bornholm har dog været dårligt bestemt pga. få observationer og ligeledes vurderes lækagekoefficient og roddybde for DK7 at være lavere end forventet.

Tabel 25. Optimerede parameterværdier for parametre kalibreret samlet for DK1 - DK6.

DK1-6	Betegnelse	ID	Enhed	Estimeret værdi
Hydro-geologi	Kx top sandjord	kx_j25_s	m/s	3.32E-04
	Kx top lerjord	kx_j25_l	m/s	8.46E-08
	Kx top tørvejord	kx_j25_t	m/s	2.31E-05
Vandløb	Dræn-tidskonstant landbrug sand	dt_agr_sand	m/s	4.11E-07
	Dræn tidskonstant landbrug ler	dt_agr_clay	s-1	1.88E-08
	Vandløbs lækage organiske jorde	leak_org	s-1	1.27E-05
	Deficit faktor markvandings-start	def_fac_a	-	97
	Befæstet runoff multiplikator	runoff_mult	-	0.36
	Rodzone dybde	rd_ww_jb1	mm	818

Tabel 26. Optimerede parameterværdier for DK1 - DK2.

DK1-2	Betegnelse	ID	Enhed	Estimeret værdi
Hydrogeologi	Kx Kvartært ler 1	kx_kl1_s	m/s	6.73E-06
	Kx Kvartært ler 3	kx_kl3_s	m/s	2.67E-08
	Kx Kvartært sand 1	kx_ks1_s	m/s	5.43E-04
	Kx Kvartært sand 2	kx_ks2_s	m/s	6.96E-05
	Kx Kvartært sand 3	kx_ks3_s	m/s	1.23E-04
	Kx Kvartært sand 4	kx_ks4_s	m/s	1.03E-04
	Kx Præ-Kvartært ler 1	kx_pl1_s	m/s	5.03E-07
	Kalk Multiplikator	dk12_chalk	-	0.61

Tabel 27. Optimerede parameterværdier for DK3.

DK3	Betegnelse	ID	Enhed	Estimeret værdi
Hydrogeologi	Kx Kvartært ler 1	kx_kl1_f	m/s	1.25E-06
	Kx Kvartært ler 3	kx_kl3_f	m/s	1.51E-08
	Kx Kvartært sand 1	kx_ks1_f	m/s	3.48E-04
	Kx Kvartært sand 2	kx_ks2_f	m/s	1.90E-04
	Kx Kvartært sand 3	kx_ks3_f	m/s	5.28E-05
	Kx Præ-Kvartært ler 1	kx_pl1_f	m/s	2.12E-08
	Kalk Multiplikator	dk3_chalk	-	0.39

Tabel 28. Optimerede parameterværdier for DK4-6

DK4-6	Betegnelse	ID	Enhed	Estimeret værdi
Hydrogeologi	Kx Kvartært ler 1	kx_kl1_j	m/s	6.02E-07
	Kx Kvartært ler 4	kx_kl4_j	m/s	5.65E-08
	Kx Kvartært ler 5	kx_kl5_j	m/s	2.13E-07
	Kx Kvartært sand 1	kx_ks1_j	m/s	4.72E-05
	Kx Kvartært sand 3-4 Vest	kx_ks34w_j	m/s	7.14E-04
	Kx Kvartært sand 3-4 Øst	kx_ks34e_j	m/s	2.71E-04
	Kx Kvartært sand 5	kx_ks5_j	m/s	5.17E-05
	Kx Præ-Kvartært ler 1	kx_pl1_j	m/s	5.66E-08
	Kx Præ-Kvartært sand 1	kx_ps1_j	m/s	2.33E-04
	Kx Præ-Kvartært sand 2	kx_ps2_j	m/s	1.92E-04
	Kx Præ-Kvartært sand 5	kx_ps5_j	m/s	1.24E-04
	Kalk Multiplikator	dk46_chalk	-	1.71

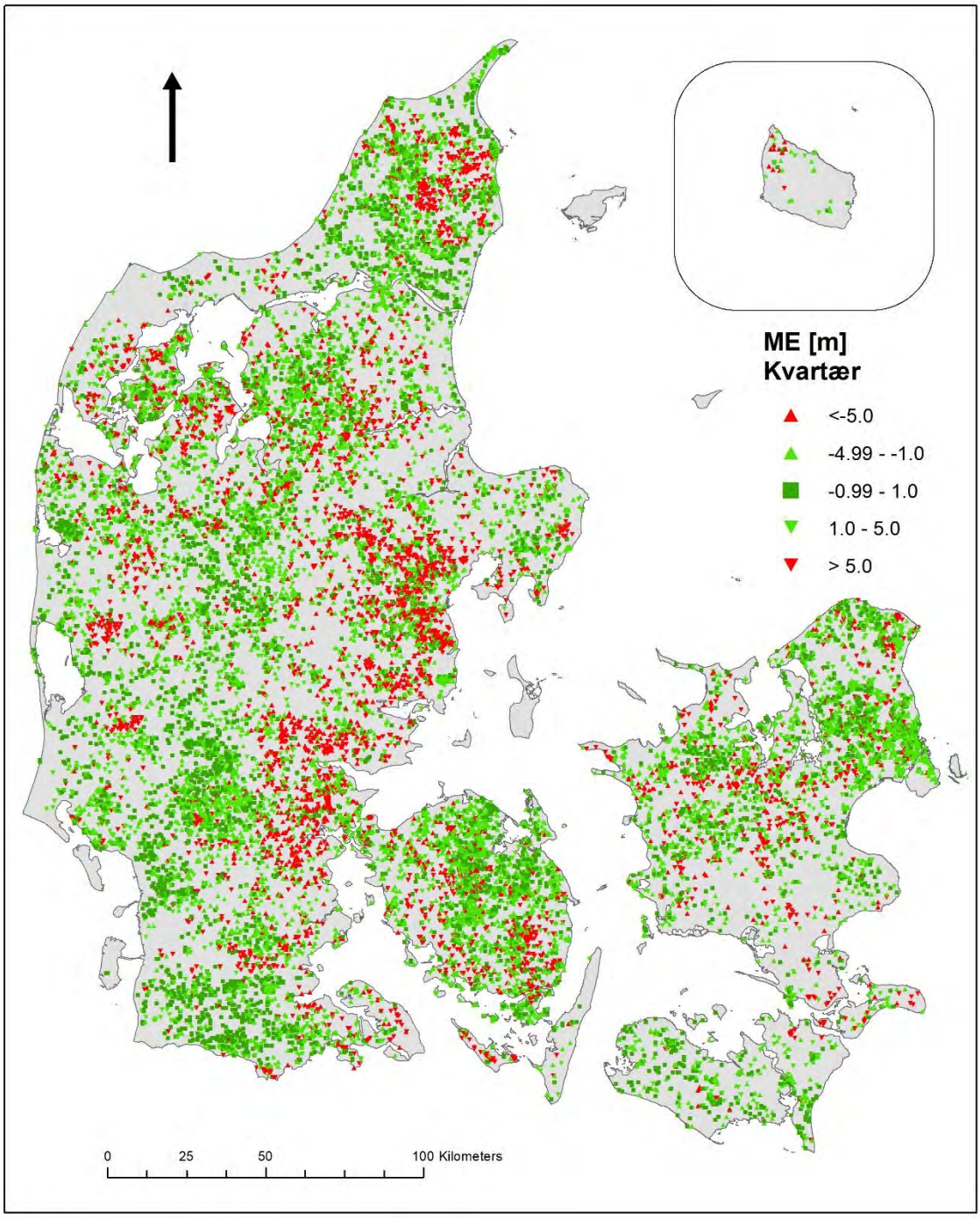
Tabel 29. Optimerede parameterværdier for DK7.

DK7	Betegnelse	ID	Enhed	Estimeret værdi
Hydro-geologi	Kx Opsprækket ler	j25l_hc	m/s	1.66E-06
	Kx Kvartær sand og grus	ks_hc	m/s	4.27E-06
	Kx Kvartært ler og silt	kl_hc	m/s	2.63E-06
	Kx kalk	pk_hc	m/s	6.89E-05
	Kx Prækvartær sand	ps_hc	m/s	4.57E-04
	Kx Robbedale sand	rs_hc	m/s	9.87E-04
	Kx Prækvartær ler	pl_hc	m/s	1.98E-06
	Kx Grundfjeld	grfj_hc	m/s	1.49E-09
	Kx Sandsten og kvartsit	ss_hc	m/s	9.47E-07
	Kx Skifre	sk_hc	m/s	7.68E-09
	Kx Grønne skifre	grsk_hc	m/s	1.66E-06
	Kx Forkastning	fkst_hc	m/s	1.99E-06
Vandløb	Dræn-tidskonstant skov	dt_forest	m/s	3.43E-07
	Dræn tidskonstant landbrug	dt_agr_int	s-1	2.84E-07
	Vandløbs lækage	leak_coef	s-1	3.90E-09
	Rodzone dybde	rd_ww_jb1	mm	275

7.2.2 Kvalitativ vurdering af den rumlige fordeling af residualer

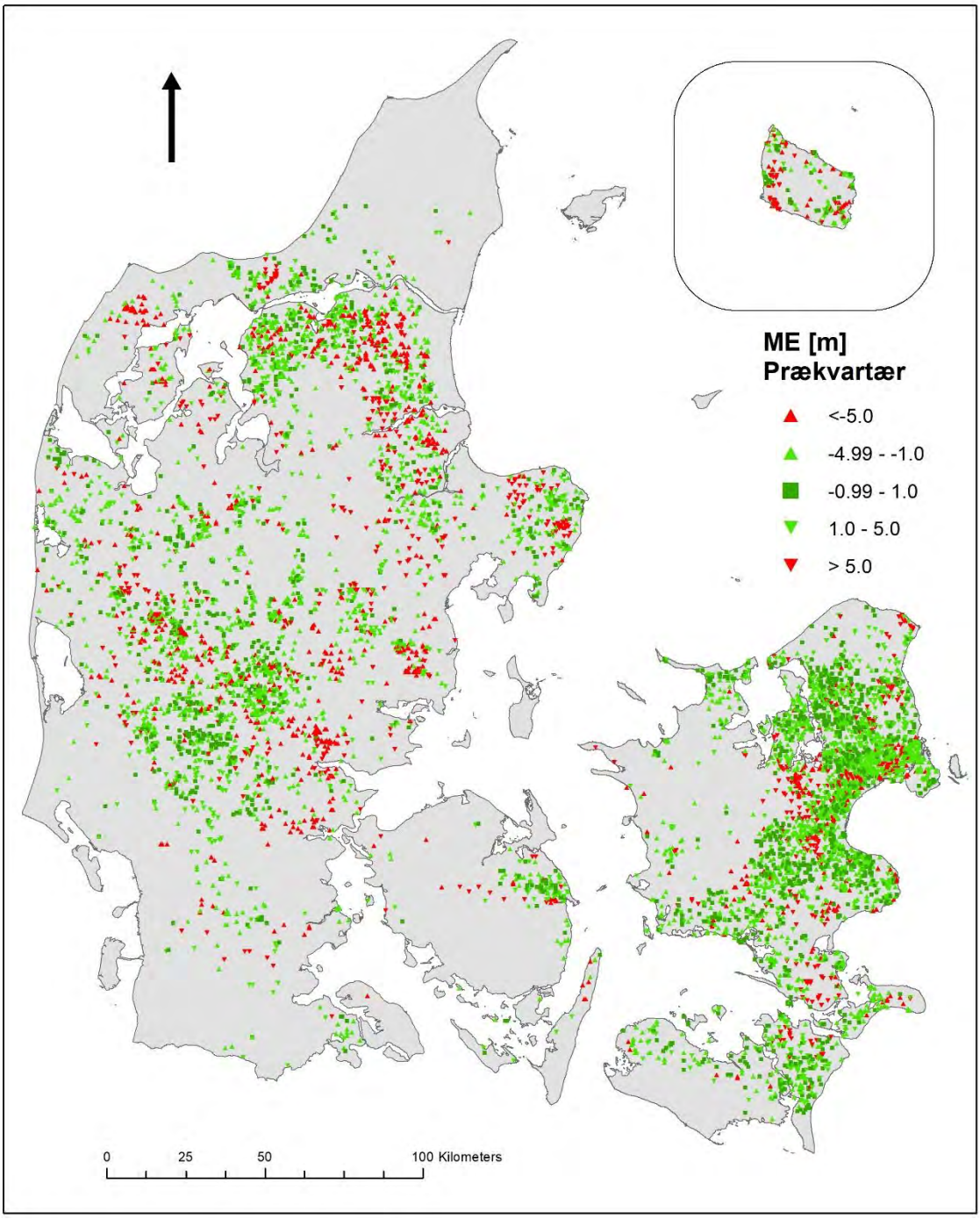
Den rumlige fordeling af middelfejl på potentialer er illustreret i Figur 57 og Figur 58, som inkluderer alle delmodeller og beregningslag for hhv. kvartære og prækvartære aflejringer.

For kvartæret, Figur 57, er det dominerende billedet, de fleste steder i landet, fejl på under ±5 m (grønne symboler). Der er dog nogle områder med udpræget dominans af større fejl. I nogle af disse områder har de større fejl en dominerende positiv bias (det simulerede trykniveau er for lavt), dette gælder for områderne omkring Nordjylland vest for Frederikshavn, Nord for Århus, bakkeøerne i Vestjylland samt for et mindre område på Østfyn. Andre steder, som i Østjylland, Syd for Århus, ved Mariager og Vejle fjord er billedet mere broget med fejl over 5 m med både positivt og negativt fortegn.



Figur 57. Rumlig fordeling og størrelse af middelfejl for potentialer i alle kvartære lag. Middelfejlen er beregnet for observationsgruppen Hobs_dyn.

I de prækvartære lag, Figur 58, er der flest pejlemålinger i kalken på Sjælland og i Nordjylland, og her er fejlene typisk relativt små (< ± 5 m). Dog ses der større fejl enkelte steder i Østjylland. I disse områder er der ikke en entydig positiv eller negativ bias i de større fejl.



Figur 58. Rumlig fordeling og størrelse af middelfejl for potentialer i alle prækvartære lag. Middelfejlen er beregnet for observationsgruppen Hobs_dyn.

Generelt er den rumlige fordeling af middelfejl på potentialer meget lig den rumlige fordeling som blev opnået for den tidligere version DK-model2014 på trods af at den hydrogeologiske model er opdateret med FOHM geologien.

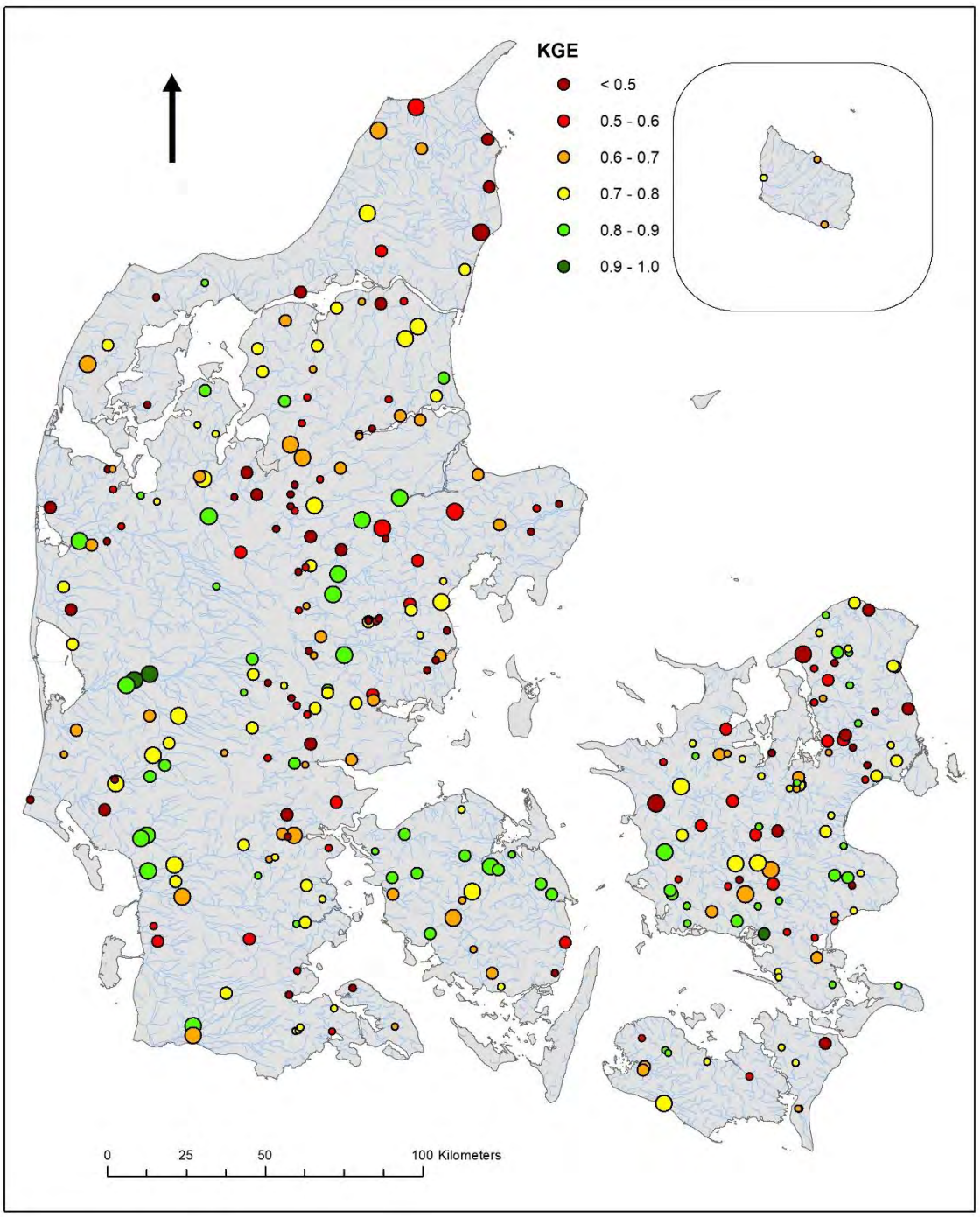
De områder som viser betydelige fejl med varierende fortegn er vanskelige at forbedre ved kalibrering da den relativt simple parametrisering baseret på store hydrogeologiske enheder ikke understøtter dette. Omvendt bør der være mulighed for at forbedre den hydrogeologiske tolkningsmodel i de områder hvor trykniveau fejlene er store og har en entydig retning.

Den rumlige fordeling af KGE på tværs af alle vandføringsstationer er illustreret i Figur 59. For sydlige Sjælland, Fyn og Midtvest- og Sønderjylland opnås fine simuleringsresultater for KGE med flest værdier omkring 0,7 - 0,9 for de større stationer. Andre steder er performance mere varierende og særligt svag omkring Østjylland og Nordjylland samt for nogle områder i Nordsjælland.

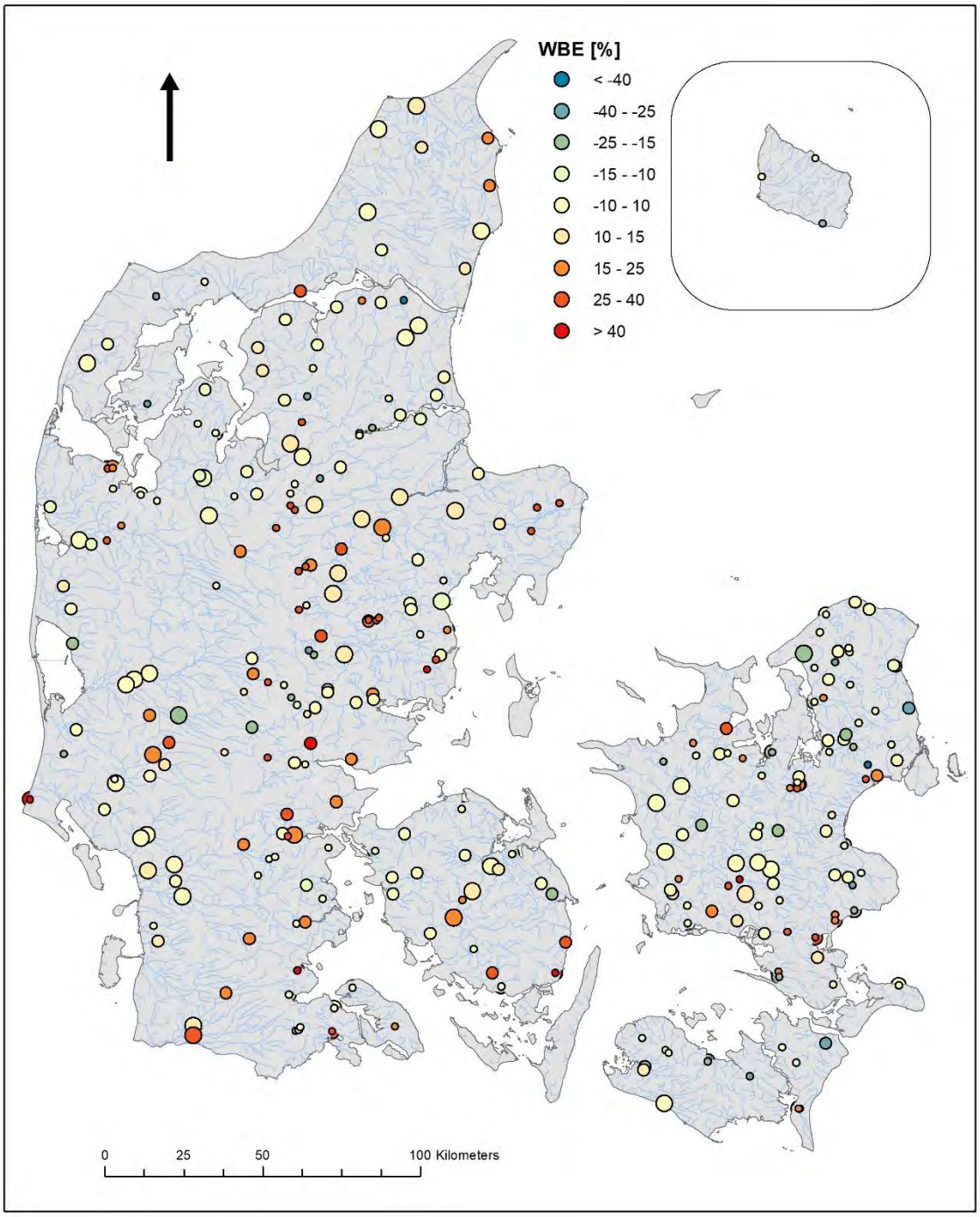
Generelt performer store stationer tilfredsstilende, mens små stationer har vanskeligt ved at opfylde kriterierne. Der er derfor ikke opnået en ensartet performance på KGE på tværs af landet, hvilket sandsynligvis skyldes de store variationer i kompleksiteten af geologien, samt at der endnu ikke er tilstrækkelig erfaring med det nye parameter regionaliserings koncept for drænafstrømning.

Hvad angår vandbalancefejlen i modelsimuleringerne opnås fine resultater på tværs af hele landet, Figur 60, som domineres af værdier på mindre end 20 % afvigelse dog med undtagelser for små stationer i Midtjylland. Det samme gør sig gældende for sommer vandbalancen, Figur 61 som generelt ligger på fejl mindre end 50%.

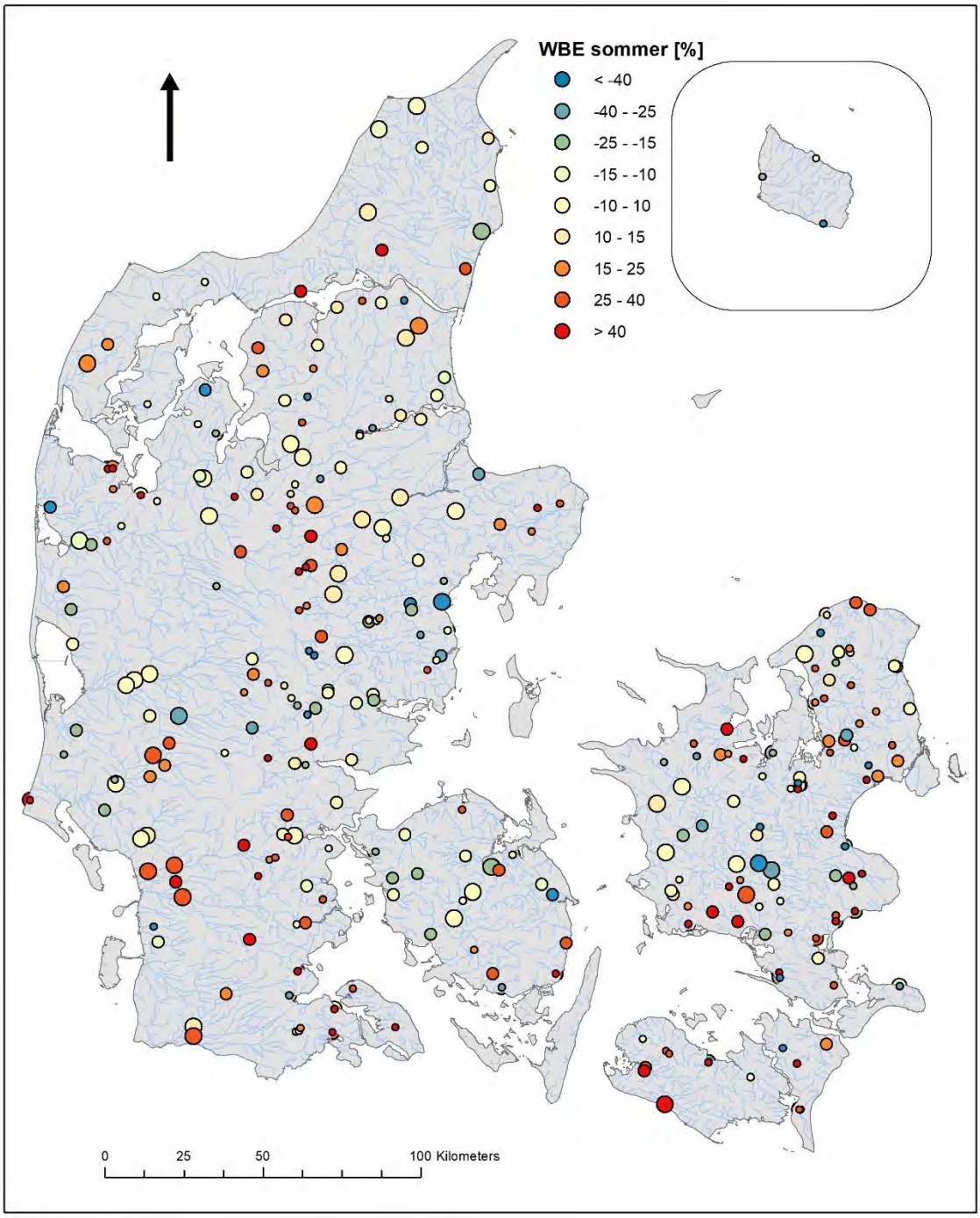
Vandløbs dynamikken, dvs. om en hændelse giver den rigtige respons både i tid og sted, ser overordnet fornuftig ud. For en nærmere redegørelse henvises til Bilag 4.



Figur 59. Rumlig fordeling af KGE for alle vandføringsstationer i kalibreringsperioden. Cirklernes størrelse angiver oplands-størrelsen, små cirkler < 100 km^2, mellem cirkler mellem 100-200 km^2 og store cirkler > 200 km^2.



Figur 60. Rumlig fordeling af vandbalancefejlen (WBE) for alle vandføringsstationer i kalibreringsperioden. Cirklernes størrelse angiver oplands-størrelsen, små cirkler < 100 km^2, mellem cirkler mellem 100-200 km^2 og store cirkler > 200 km^2.



Figur 61. Rumlig fordeling af vandbalancefejlen i sommermånederne (WBE_{sommer}) for alle vandføringsstationer i kalibreringsperioden. Cirklernes størrelse angiver oplands-størrelsen, små cirkler < 100 km^2, mellem cirkler mellem 100-200 km^2 og store cirkler > 200 km^2.

8. Vurdering af model

DK-modellen er opstillet og kalibreret med henblik på at kunne opnå en kvantificering af det hydrologiske kredsløb på national/regional skala, i forhold til vandbalancen og de overordnede strømningsforhold, og modellen er vurderet jvf. Geovejledning 2017/1 til kunne anvendes på screeningsniveau vurderet på alle pejlinger og alle vandføringsstationer. Hvis man fra regner de 10% procent med størst afvigelse, jvf. principperne i CPRS, overholder modellen kriterierne på overslagsniveau. Nedenfor er nogle generelle vurdering i forhold til modellens anvendelighed, men ved enhver konkret anvendelse af modellen bør der foretages en særskilt vurdering heraf.

Middelfejlen på potentialerne opfylder klart kravet til overslagsniveau for alle delmodeller, med en maksimal fejl på 0,9 m for Fyn. Den generelle grundvandsniveau reproduceres således tilfredsstillende af modellen. RMSE kriteriet på overslagsniveau ikke er opfyldt for alle delmodeller, Tabel 24, og RMSE ligger under eller på niveau med kriterierne for overslagsberegninger med undtagelse af DK6 og DK7. Den opnåede performance er en anelse bedre for DK-model2019 end DK-model2014 hvad angår RMSE.

Afvigelserne mellem observeret og simuleret grundvandspotentialer kan bl.a. skyldes: 1) at potentialerne er udtryk for lokale forhold der ikke repræsenteres i modellen, såsom lokale sandmagasiner eller hængende vandspejl, eller 2) at der er væsentlige forskelle i de hydrauliske ledningsevner inden for en geologisk enhed, hvorfor det anvendte princip med én hydraulisk ledningsevne for hhv. sand og ler ikke er tilstrækkelig, eller 3) fejl i indberetning af observationer. I praksis vil det nok være en kombination af disse forhold, men det vurderes, at en væsentlig årsag er den manglende repræsentation af heterogenitet i de hydrauliske ledningsevner.

På baggrund af ovennævnte forhold kan det være interessant at rette fokus i evalueringen på de pejlinger som harmonerer med modelskala og konceptuel model. Dette er forsøgt ved at kigge på statistik for de 90% af pejlingerne som har mindst fejl for hhv. ME og RMSE. Dette fokus er også afspejlet i det nye kalibreringskoncept for pejlinger baseret på CRPS vægtningen, afsnit 6.2.1. For $RMSE_{90\%}$ opnår logisk set bedre statistik end for alle pejlinger og DK-model2019 performer som DK-model2014. Kigger man derimod på $ME_{90\%}$, så ser vi en væsentlig forbedring i DK-model2019, med værdier som typisk er 5 gange mindre end for DK-model2014. Denne forbedring tilskrives primært CRPS kalibreringen hvor der er mindre vægt på outliers, men kan sekundært også skyldes den opdaterede hydrostratigrafiske model.

Samlet kan modellen reproducere det generelle vandspejlsniveau og de overordnede strømningsforhold. På mindre skala kan der imidlertid være væsentlig forskel mellem observerede og simulerede værdier, og niveau samt strømningsretning kan derfor være behæftet med en væsentlig usikkerhed. Mens en sådan usikkerhed kan have mindre betydning for beskrivelsen af de generelle strømningsveje via grundvand eller til overfladevandssystemet, kan modellen ikke forventes at kunne beskrive de specifikke lokale transportveje, eksempelvis til brug for udpegning af indvindingsoplande, eller til en specifik mindre vandløbsstrækning.

Valideringen i forhold til trykniveauer skal tages med forbehold, da de anvendte pejledata ikke er kvalitetssikret på samme niveau som for kalibreringsperioden. Dog faldt valideringen generelt på niveau med kalibreringen for de fleste modelområder, med undtagelse af DK1 og DK3.

Ifølge Geovejledning 2017/1 bør nøjagtighedskriterierne for vandløbene variere afhængigt af vandløbsdynamikken (Q10/Q90, Tabel 19). Den samlede vurdering af DK-model2019 som fremgår af denne rapport er dog foretaget samlet for alle vandføringsstationer. For den dynamiske beskrivelse af vandføringerne, er det vurderet at der opnås en performance på screeningsniveau, mens vandbalancer (WBE og WBE_{sommer}) generelt er opfyldt på screeningsniveau eller bedre. Median værdierne ligger på 0,69, 12% og 21% for hhv. KGE, WBE og WBE_{sommer}.

Sammenlignes performance på vandføring med DK-model2014, er de to modeller meget sammenlignelige. Det er dog vigtigt at pointere at DK-model2019 ikke er kalibreret mod NSE (men mod KGE) og at DK-model2014 ikke er kalibreret mod alle stationer som indgår i sammenligningen. Desuden er parametriseringen af dræn og roddybde, som har stor betydning for vandløbssimuleringen ændret væsentligt. Denne ændring er primært foretaget for at sikre en konsistent rumlig parametrisering og færre kalibreringsparametre og vil ikke nødvendigvis sikre bedre performance. Resultaterne er dog lovende, da en bedre rumlig parametrisering er opnået uden tab i performance. Der er behov for fremadrettet at opstille performance kriterier for KGE, da det anbefales fremover at bruge KGE frem for NSE i parameteroptimering.

Validering af modellen for perioden 1995 - 1999 gav resultater der er sammenlignelig med kalibreringsperioden (bortset fra NSE), mens der blev opnået lidt dårligere valideringsresultater for perioden 2011 - 2015. Dette tilskrives som tidligere, primært en drastisk reduktion i antallet af nedbørsstationer efter 2007. Denne reduktion kan altså ligeledes have påvirket kalibreringsperioden. Generelt antages det at antallet af nedbørsstationer primært påvirker simulering af vandløbsdynamik (NSE og KGE) og i mindre grad WBE og WBE_{sommer}.

Vandbalancen for hele perioden 1995 – 2015 beskrives med sammenlignelig præcision og modellen kan således anvendes til dette formål for hele perioden. Er fokus derimod på en god beskrivelse af dynamikken, vil modellen være mindre egnet hertil fra 2007 og frem.

9. Referencer

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986a): An introduction to the Europeen Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and Philosophy of af Physically-Based, Distributed Modelling System. J. Hydrol. 87, 45-59.

Abbott, M.B., Bathurst, J.C., Cunge, J.A., O'Connell, P.E. and Rasmussen, J. (1986b): An introduction to the Europeen Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: Structure of af Physically-Based, Distributed Modelling System. J. Hydrol. 87, 61-77.

Bitsch, K., Richardt, N. & Hansen, H. (2012). Kvalitetssikring af den geologiske Sjællandsmodel. Rambøll.

Børgesen C.D. & Schaap M.G. (2005) Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. Geoderma 127 (1-2):154-167.

Børgesen C.D., Petersen J.W., Iversen T.M., Grant R., Jacobsen B. & Elmholt S.(2009). Midtvejsevaluering af Vandmiljøplan III, Hoved- og baggrundsnotater. DJF Rapport Markbrug 142. Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet, Aarhus Universitet.

Carlsson, L. & G. Gufstafson (1984): Provpumpning som geohydrologisk undersökningsmetodik. Byggforskningsradet, Chalmers Tekniske Högskola, Göteborg. R41:1984.

DHI (2017a). MIKE SHE User manual, volume 2: Reference guide, pp 189 (https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Water_Resources/MIKE_SHE_Printed_V2.pdf)

DHI (2017b). MIKE SHE User manual, volume 2: Reference guide, pp 116 (https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Water_Resources/MIKE_SHE_Printed_V2.pdf)

DHI (2014c). MIKE SHE User manual, volume 2: Reference guide, pp. 458

Greve M.H., Greve M.B., Bocher P.K., Balstrom T., Breuning-Madsen H. & Krogh L. Generating a Danish raster-based topsoil property map combining choropleth maps and point information. Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography 107 (2):1-12, 2007.

Harrar, W. G. & Nilsson, B. (1998). Seasonal Variation in fracture flux through a glacial till. 1998 GSA Annual Meeting. ISSN 0016-7592

Havnø, K., Madsen, M.N., Dørge, J. (1995) MIKE 1—a generalized river modelling package. In: Singh, V.P., (Ed.), Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications, pp. 733–782.

Henriksen H.J., Ondracek, M. & Troldborg L. (2019), "Kvantitativ tilstandsvurdering af de danske grundvandsforekomster 2019" Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport (in press)

Henriksen H.J., Troldborg L., Sonnenborg T.O., Højberg, A.L., Stisen S., Kidmose J.B., Refsgaard, J.C (2017), "God praksis i hydrologisk modellering. Geovejledning 2017/1". Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse, København. https://www.geovejledning.dk/gv7/

Henriksen H.J., Rasmussen, J., Olsen, M., He, X., Jørgensen, L.F. & Troldborg, L. (2014) Implementering af modeller til brug for vandforvaltning. Delprojekt: Effekt af vandindvinding. GEUS rapport 2014/74, København.

Henriksen, H.J., Højberg, A.L, Olsen, M., Seaby, L.P., van der Keur, P., Stisen, S., Troldborg, L., Sonnenborg, T.O. & Refsgaard, J.C. (2012) Klimaeffekter på hydrologi og grundvand (Klimagrundvandskort). Koordineringsenhed for forskning i klimatilpasning, Aarhus Universitet. (http://www.klimatilpasning.dk/media/340310/klimagrundvandskort.pdf)

Henriksen, H.J., Sonnenborg, A. (2003) Ferskvandets kredsløb, Nova2003 Temarapport, 228p, Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse, København.`

HydroInform (2019). MikeSheTools og wellviewer https://github.com/JacobGudbjerg/hydronumerics

Højberg, A.L, Troldborg, L., Nyegaard, P., Ondracek, M., Stisen, S. & Christensen, B.S.B. (2010). DK-model2009 – Sammenfatning af opdateringen 2005-2009, GEUS rapport 2010/81, pp. 39. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse, København.

Højberg, A.L, Stisen, S., Olsen, M., Troldborg, L., Uglebjerg, T.B. & Jørgensen, L.F. (2015) DK-model2014 Model opdatering og kalibrering, GEUS rapport 2015/8. Danmark og Grønlands Geologiske Undersøgelse, København.

Højberg, A.L., Windolf, J., Børgesen, C.D., Troldborg, L., Tornbjerg, H., Blicher-Mathiesen, G., Kronvang B., Thodsen, H. og Ernstsen, V. (2015) National kvælstofmodel, Oplandsmodel til belastning og virkemidler – Metode Rapport, Revideret udgave september 2015. GEUS.

Jørgensen, F. & Sandersen, P. (2009) Kortlægning af begravede dale i Danmark – opdatering 2007-2009-Særudgivelse, GEUS. pp 374. (www.begravede-dale.dk)

Jørgensen, L.F. (2013) Pejleboringer i DK-modellen - Gennemgang af pejledata fra Jupiter databasen. GEUS notat. http://vandmodel.dk/xpdf/gennemgang_pejlinger_dkmodel_2013.pdf

Levin G, Jepsen MR, Blemmer M (2012) Basemap. Technical documentation of a model for elaboration of a land-use and land-cover map of Denmark. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 47 pp. Technical Report from DCE No. 11. http://www.dmu.dk/Pub/TR11.pdf

Mikkelsen, H.E. & Olesen J.E (1991) Sammenligning af metoder til bestemmelse af potentiel vandfordampning. Landbrugsministeriet, Statens Planteavlsforsøg, Tidsskrift for Planteavls Specialserie, Beretning nr. S 2157.

MST (2020). https://mst.dk/natur-vand/vand-i-hverdagen/grundvand/grundvandskortlaegning/kortlaegning-2016-2020/fohm-faelles-offentlig-hydrologisk-model/ (besøgt 19 februar 2020)

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. (1970) Riverflow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion on principles. Journal of Hydrology 10, 282-290.

Nilsson, B., Sidle, R.C., Klint, K.E., Bøgild, C.E. & Broholm, K. (2001). Mass transport and scale-dependent hydraulic tests in a heterogenous till-sand aquifer system. Journal of Hydrology 243, 162-179.

Nyegaard, P., Troldborg, L. & Højberg, AL (2010) DK-model2009 – Geologisk og Hydrostratigrafisk opdatering, GEUS rapport 2010/80, København.

Olesen, J.E. & Heidmann, T. (2002) EVACROP. Et program til beregning af aktuel fordampning og afstrømning fra rodzonen, Version 1.01,

Olsen, M. & Højberg, A.L. (2011) Udbygning af vandløbsnetværk, DK-model2009, GEUS rapport 2011/139.

PEST. Pest – Model-Independent Parameter Estimation User Manual: 5th Edition, pp. 336 & Addendum to the PEST manual, pp. 206. Watermark Numerical Computing. http://www.pesthomepage.org/Downloads.php

Refsgaard JC, Stisen S, Højberg AL, Olsen M, Henriksen HJ, Børgesen CD, Vejen F, Kern-Hansen C & Blicher-Mathiesen (2011) Vandbalance i Danmark - Vejledning i opgørelse af vandbalance ud fra hydrologiske data for perioden 1990-2010, Danmarks og Grønlands Geologiske Undersøgelse Rapport 2011/77.

Schneider, R., Henriksen, H. J. and Stisen, S. (2020) A robust objective function for calibration of groundwater models in light of deficiencies of model structure and observations, Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., doi:doi.org/10.5194/hess-2019-685, in review, 2020

Stisen, S., Schneider, R .M., Ondracek, M., Henriksen, H.J. (2018) FODS 6.1 Fasttrack metodeudvikling, Modellering af terrænnært grundvand, vandstand i vandløb og vand på terræn for Storå og Odense Å. GEUS.

Scharling, M. (1999): Klimagrid - Danmark, Nedbør, lufttemperatur og potentiel fordampning, 20x20 og 40x40 km.. DMI Technical Report 99-12,Trafikministeriet, DMI.

Scharling, M. & Kern-Hansen C (2002): Klimagrid - Danmark, Nedbør og fordampning, Beregningsresultater til belysning af vandbalancen i Danmark. DMI Technical Report 02-03,Trafikministeriet, DMI.

Troldborg, L. (2019). Afgrænsning af grundvandsforekomster – Fjerde revision af grundvandsforekomster i Danmark. GEUS Rapport (in press)

Troldborg, L, Nyegaard, P og Stisen, S. (2009) National vandsressource model, Opdatering af DK-model Bornholm med data fra detailkortlægningen. GEUS Rapport 2009/2

Troldborg, L., Sørensen, B.L., Kristensen, M., Mielby, S. (2014). Afgrænsning af grundvandsforekomster. Tredje revision af grundvandsforekomster i Danmark. GEUS rapport 2014/58

Vejen, F., Vilic, K., Jensen, H. (2014) Korrigeret Nedbør 1989-2010, 2011-2012 & 2013, DMI Technical Report 14-13. http://www.dmi.dk/fileadmin/Rapporter/TR/tr14-13

Yan J.J. and K.R. Smith (1994) Simulation of Integrated Surface Water and Ground Water Systems - Model Formulation. Water Resources Bulletin, Vol. 30, No. 5, pp 1-12