

DK-model2014

Model opdatering og kalibrering

Anker L. Højberg, Simon Stisen, Martin Olsen, Lars Trolborg,
Tobias B. Uglebjerg & Lisbeth F. Jørgensen

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



GEUS

DK-model2014

Model opdatering og kalibrering

Anker L. Højberg, Simon Stisen, Martin Olsen, Lars Troldborg,
Tobias B. Uglebjerg & Lisbeth F. Jørgensen

DK-model2014

Model opdatering og kalibrering

Anker L. Højberg, Simon Stisen, Martin Olsen, Lars Trolborg,
Tobias B. Uglebjerg & Lisbeth F. Jørgensen

Indholdsfortegnelse

1.	Resumé	5
2.	Indledning	9
2.1	Formål	9
2.2	Modelbenyttelse	10
2.3	Beskrivelse af modelområdet	11
2.4	Grundvandsmagasiner.....	13
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	25
3.3	Jylland	29
3.4	Bornholm.....	37
3.5	Hydrologiske afgrænsninger (randbetingelser)	40
3.5.1	Dræn og vandløb (indre randbetingelser).....	40
3.5.2	Ydre modelrande	41
3.6	Hydrauliske størrelser	42
3.7	Vandbalanceforhold	44
3.8	Indvindingsforhold	47
4.	Modelsystem	50
4.1	Overfladisk afstrømning	50
4.2	Umættet strømning	51
4.3	Grundvandsstrømning	52
4.4	MIKE 11	54
5.	Modelopstilling	56
5.1	Diskretisering	56
5.1.1	Beregningslag – DK1, DK2 og DK3 (Sjælland, Sydhavsøerne og Fyn).....	56
5.1.2	Beregningslag – Jylland	57
5.1.3	Beregningslag – DK7 (Bornholm)	62
5.2	Nettonedbør og fordeling til grundvand/overfladevand	62
5.3	Vandløb og Søer	69
5.3.1	Vandløbsnetværk	69
5.3.2	Vandløbstværsnit	72
5.3.3	Punktkilder.....	75
5.4	Indvindinger.....	77
5.4.1	Markvanding	80
5.5	Numeriske parametre	82

6.	Kalibreringsstrategi og data	83
6.1	Valg og bearbejdning af potentialer og afstrømningsdata.....	83
6.1.1	Databehandling - potentialer.....	83
6.1.2	Databehandling - afstrømningsdata.....	86
6.2	Opstilling af kalibreringsmål og -kriterier	88
6.2.1	Kalibreringsmål og performance kriterier - potentialer.....	88
6.2.2	Kalibreringsmål og performance kriterier - afstrømningsdata	91
6.2.3	Samlet kalibreringsmål.....	92
6.3	Valg af kalibreringsparametre.....	94
7.	Kalibrerings- og valideringsresultat	98
7.1	Kvantitativ vurdering af kalibrerings og validerings resultater.....	98
7.1.1	Kvantitativ vurdering af trykniveau simuleringer	98
7.1.2	Kvantitativ vurdering af vandførings simuleringer.....	100
7.2	Kvalitativ vurdering af kalibreringsresultat.....	104
7.2.1	Kvalitativ vurdering af optimerede model parametre	104
7.2.2	Kvalitativ vurdering af den rumlige fordeling af residualer.....	107
8.	Vurdering af model	113
9.	Referencer	115
9.1	Internetsider.....	117

1. Resumé

DK-modellen	<p>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.</p> <p>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 i sær vandløbsnetværket der er blevet væsentligt udvidet.</p>
Modellsystem	<p>Modellen er opstillet i modelsystemet MIKE SHE / MIKE 11, 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 drænastrømning, samt vandstrømning i vandløbene (MIKE 11).</p>
Hydrostratigrafisk model	<p>Modellen blev oprindeligt udviklet på basis af en national hydrostratigrafisk tolkning foretaget af GEUS. I perioden 2005 - 2009 blev modellen opdateret på basis af viden og lokalmodeller opstillet af de tidligere amter frem til 2006. Efterfølgende er der sket en ad hoc opdatering af den hydrostratigrafiske model, hvilket primært har været gennemført for Sjælland (Bitsch et al., 2012) samt enkelte modeller for Fyn. Nærværende opdatering har ikke omfattet en yderligere national indbygning af kortlægningsmodeller.</p>
Diskretisering	<p>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.</p>
Overfladevands-	<p>Modellen er en integreret grundvands-/overfladevandsmodel med en</p>

systemet	<p>direkte kobling mellem de to systemer. Under opdateringen af overfladevandssystemet er der taget udgangspunkt i MIKE 11 opsætningen fra den tidligere DK-model, og der er tilføjet vandløbsstrækninger, der muliggør en repræsentation af vandløb i topografiske oplande på ca. 15 km². Til beskrivelse af vandstrømningen i overfladevandssystemet, er det valgt at anvende 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.</p>
Udledninger	<p>Data om udledninger fra rensningsanlæg er indhentet fra DCE. Rensningsanlæg med udledningsdata fra perioden år 2000-2014, samt alle anlæg der i perioden før år 2000 har haft en gennemsnitlig udledning på mere end 0,005 m³ s⁻¹ er indlagt som MIKE 11 randbetingelse i modellen.</p>
Klimainput	<p>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).</p>
Indvindinger	<p>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.</p> <p>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.</p>
Hydrauliske	<p>Under modelopstillingen er det tilstræbt at anvende så få parametre</p>

Parametre	<p>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 indenfor de enkelte enheder er således alene distribueret jf. variationen i deres tykkelse.</p>
Kalibrering	<p>Modellen er kalibreret inverst med softwareprogrammet PEST, hvor der er anvendt dynamiske modelkørsler. Som kalibreringsmål er der anvendt observerede grundvandspotentialer for perioden 2000 – 2006. For vandløbsafstrømning er der anvendt daglige afstrømningsdata for udvalgte vandløbsstationer ligeledes for perioden 2000 - 2006. Som kalibreringskriterier er der anvendt RMS (kvadratafgivelsessummen) for potentialer. For vandløbsafstrømningen er der medtaget tre kriterier 1) den samlede vandbalancefejl, 2) Nash-Sutcliffe (NSE) 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.</p>
Validering/test	<p>Modellen er valideret ved en split-sampling test, hvor data for perioderne 2007 – 2010 samt 1996 - 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.</p>
Vurdering af modellen	<p>En væsentlig opgave ved opdatering af modellen har været en udbygning af vandløbsnetværket, så der nu er inkluderet ca. 16.000 km vandløb i modellen. Dette har givet en væsentlig forbedring af modellens beskrivelse af udveksling mellem grundvand og overfladvand, specielt for de mindre vandløbsoplande, og har muliggjort modellens anvendelse til en opdateret retentionskortlægning.</p> <p>Modellen er kalibreret og valideret over fire plus to gange fire år, hvori der optræder naturlige klimatiske variationer, mens der ikke er gjort forsøg på at vurdere modellens evne til simulering af egentlige klimaforandringer.</p> <p>Generelt lever modellen op til de opstillede performance kriterier for simuleret trykniveau, hvor især ME ligger væsentligt under de opstillede kriterier. Den rumlige fordeling af middelfejl på simuleret trykniveau viser dog betydelige regionale forskelle, med største afvigelser omkring Frederikshavn, Århus, Vejle, Østfyn, Helsingør og Bornholm.</p>

For vandføringssimuleringer lever modellen på nationalt niveau op til kravene til NSE og WBE for både kalibreringsperioden og den tidlige valideringsperiode (1996-1999), dog med en del regional variation i performance, hvor den bedste performance ses i det sydlige Danmark og den svageste på tværs af Midtjylland. For den sene valideringsperiode (2007-2010) er NSE simuleringen betydeligt forværret. Dette kan være forårsaget af en væsentlig udtynding af netværket af nedbørsstationer for denne periode, men dette har ikke kunnet eftervises.

Det anvendte princip om færrest mulige kalibreringsparametre samt kalibrering af store områder 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 recalibrering for en bedre tilpasning af de lokale forhold.

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 del rapporter for de enkelte delområder refereret heri.

DK-modellen har efterfølgende været anvendt til vurdering af klimaeffekter (Henriksen et al., 2012) og blev i denne forbindelse opdateret med klimadata efter anbefalingerne i Refsgaard et al. (2011) efterfulgt af en national kalibrering.

For at forbedre det faglige grundlag for vandforvaltningen igangsatte Naturstyrelsen i 2013 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 der bl.a. finansieret et oplandsmodelprojekt bestående af to hovedprojekter:

- "Oplandsmodel – belastningsberegninger og virkemidler", hvori der er udviklet en national kvælstofmodel. Modellen giver en beskrivelse af den nationale kvælstofbelastning til hav og er anvendt til etablering af et nationalt kvælstofretentionskort på en finere og mere ensartet opløsning end det tidligere retentionskort (Højberg et al., 2015)
- "Effekt af vandindvinding" til belysning af effekten af vandvinding på vandføringer, baseret på nye øko-hydrologiske indikatorer. (Henriksen et al., 2014)

I begge delprojekter har den nationale vandressource model været anvendt til beskrivelse af det hydrologiske system, vandbalancen og til beregning af vand- og stoftransport. Endvidere har nærværende version af DK-modellen dannet grundlag for en revision af grundvandsforekomster, som bekræftet i Troldborg et al. (2014).

I nærværende rapport beskrives opstilling, kalibrering og validering af den opdaterede DK-model (version 2014) for hele Danmark.

2.1 Formål

Det primære formål for opdateringen af DK-modellen til version 2014 har været at udbygge den rumlige beskrivelse af vandløbsnetværket medtaget i DK-modellen. Dette har været nødvendigt i forhold til modellens anvendelse i den nationale modelstrategi. Endvidere er

der sket mindre opdatering af den vertikale diskretisering af modellag, samt en detaljering af parameteriseringen i den umættede zone.

I perioden fra 2005 er der været etableret adskillige kortlægningsmodeller. Flere af disse er lagret i den nationale modeldatabase, men i nærværende opdatering af DK-modellen er der ikke finansieret en indbygning af disse kortlægningsmodeller i DK-modellen. I forhold til version 2009 af DK-modellen er der således kun sket en begrænset opdatering af den hydrogeologiske model, hvor der primært er sket en opdatering på Sjælland.

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 oppumpning 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 11 systemet valgt (Abbott et al., 1986a,b; Havnø et al., 1995). MIKE SHE / MIKE 11 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 11 giver en 1D beskrivelse af vandløbsstrømningen.

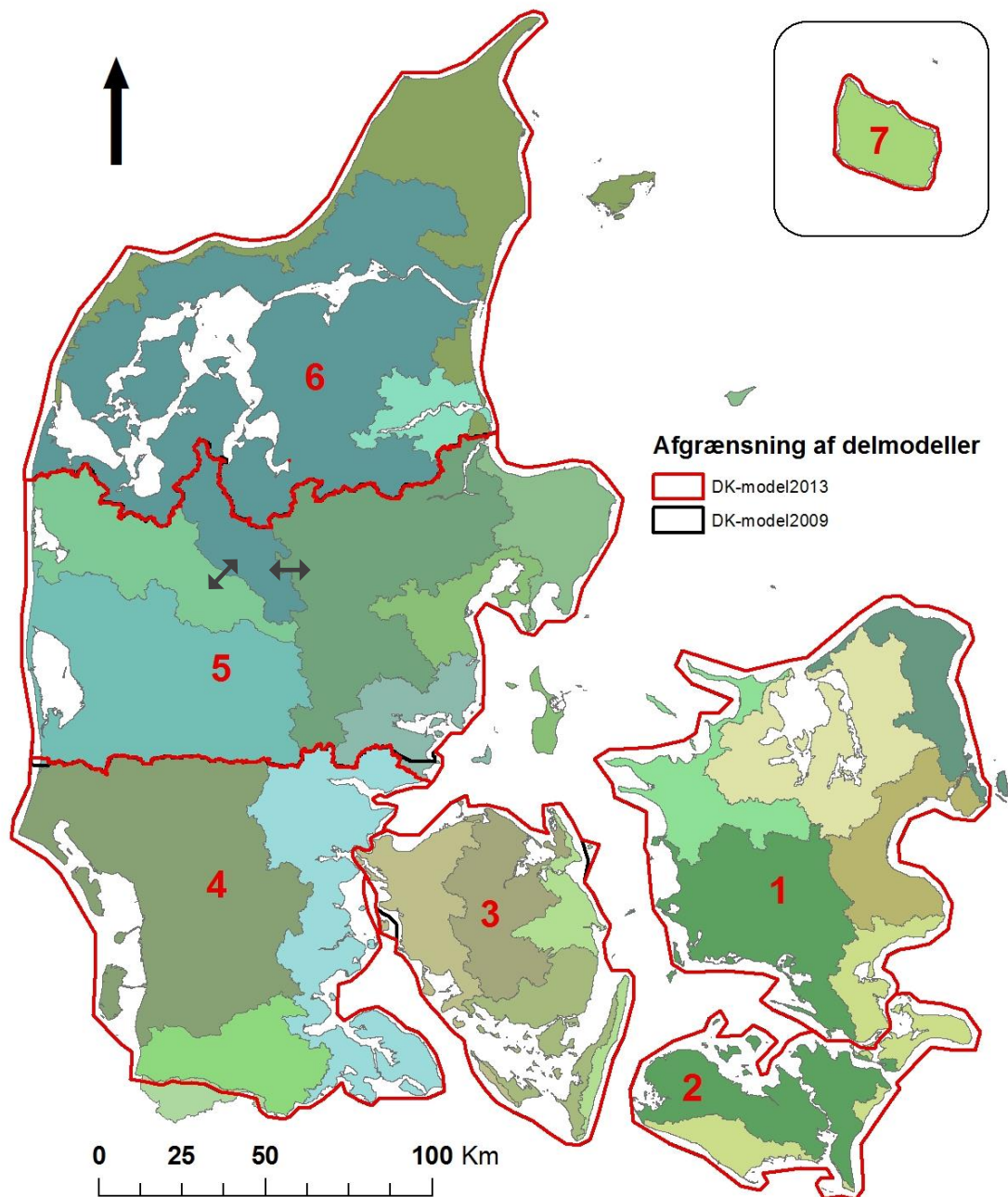
2.3 Beskrivelse af modelområdet

DK-model2014 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.

I forhold til DK-model2009 er afgrænsningen mellem modelområde 4 og 5 flyttet så der nu er overensstemmelse mellem delmodelafgrænsning og vandplanernes hovedvandoplande, Figur 1. Afgrænsningen mellem delmodel 5 og 6 følger ikke afgrænsningen 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-model2014, landareal for hver delmodel og vandplanoplande som delmodeller dækker, samt afstand fra kyst til rand i havet.

Delmodel	Areal (km ²)	Vandplanopland
1 (Sjælland)	7163	2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6
2 (Lolland, Falster, Møn)	2042	2.5, 2.6
3 (Fyn)	4023	1.12, 1.13, 1.14, 1.15
4 (Sønderjylland)	7832	1.10, 1.11, 4.1
5 (Midtjylland)	11514	1.2, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, 1.9
6 (Nordjylland)	9896	1.1, 1.2, 1.3
7 (Bornholm)	588	3.1



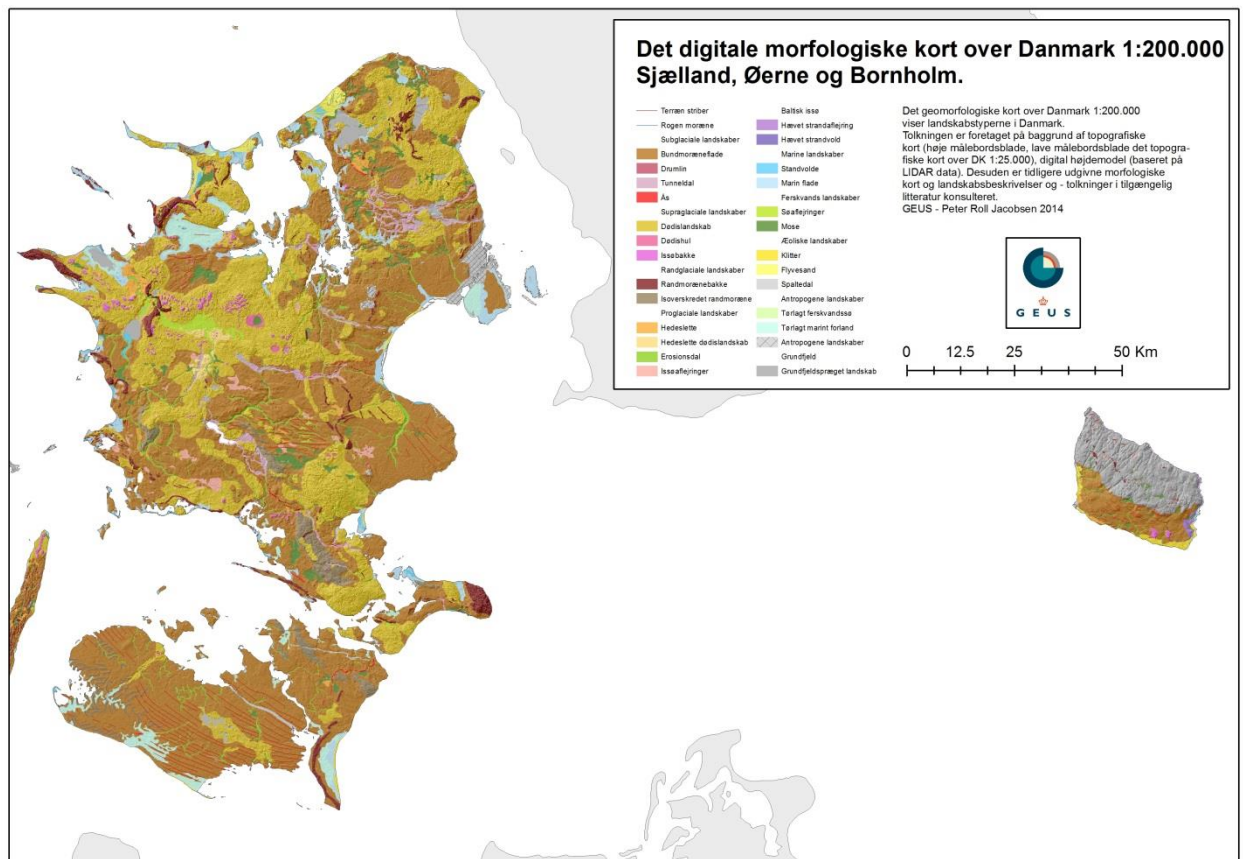
Figur 1. Afgrensning af de syv delmodeller i DK-model2014 (rød), samt afgrensninger fra DK-model2009 (sort). Baggrundskortet viser grænser for vandplanernes 23 hovedvandoplande. De to pile viser den potentielle vandstrømning fra Karup Å oplandet til nabooplande.

2.4 Grundvandsmagasiner

I grundvandsmæssig sammenhæng er Danmark velsignet med rigelige mængder grundvand til at dække vores nuværende forbrug. Stort set over 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 imidlertid store regionale forskelle geologisk set, hvilket er bestemmende for udstrækning og sammenhænge mellem grundvandsmagasiner både lateralt og vertikalt. Samtidig er geologien 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 underti-

den 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 (Søndersødal 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 3–5 meter kan være stærkt opsprækket, hvilket medfører, at magasinerne mange steder er højtydende. De fleste prækvartære magasiner er dækket af moræneler og er oftest spændte

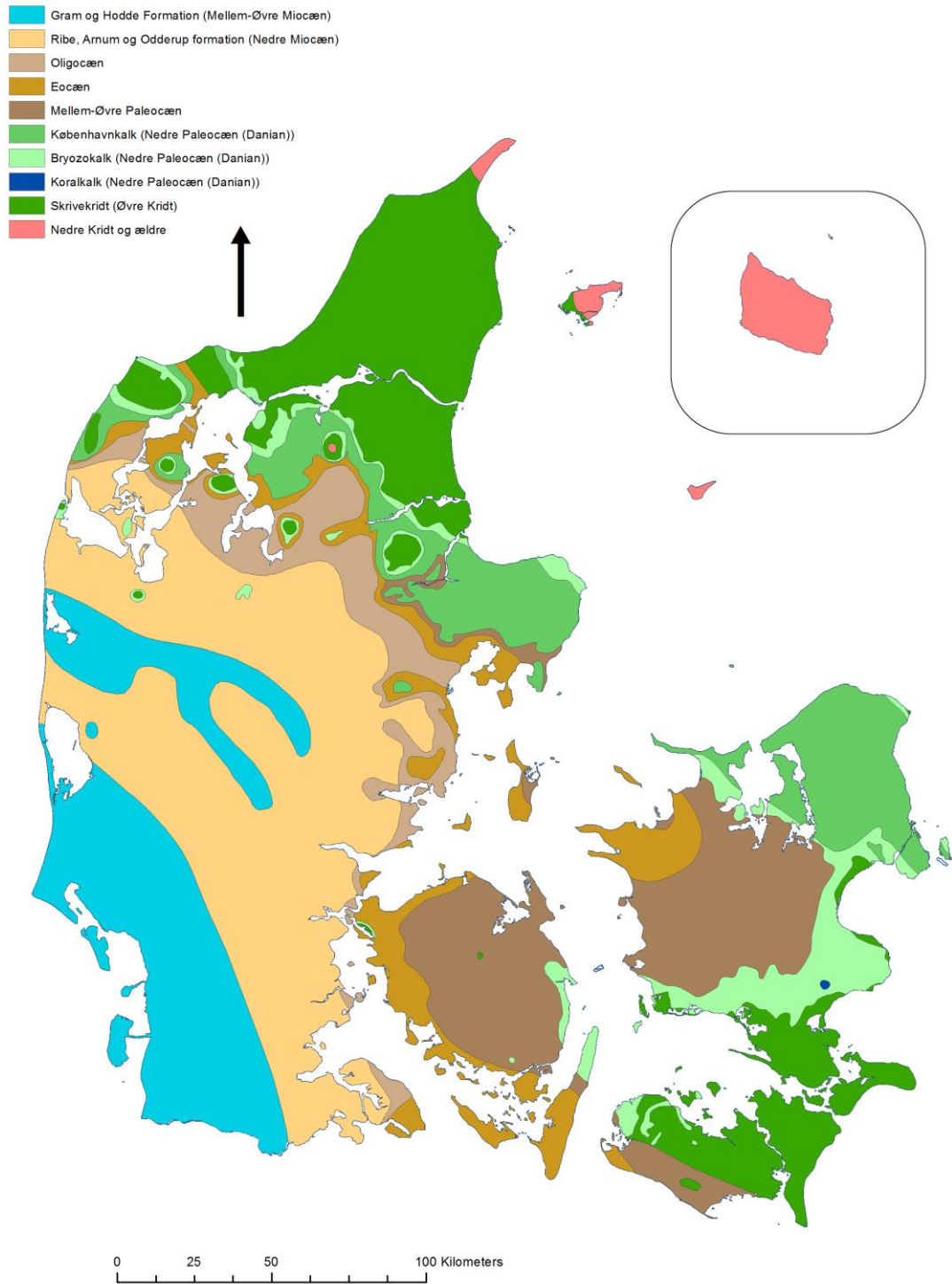
2.4.2 Fyn

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 af tykke morænelerslag, se Figur 4.

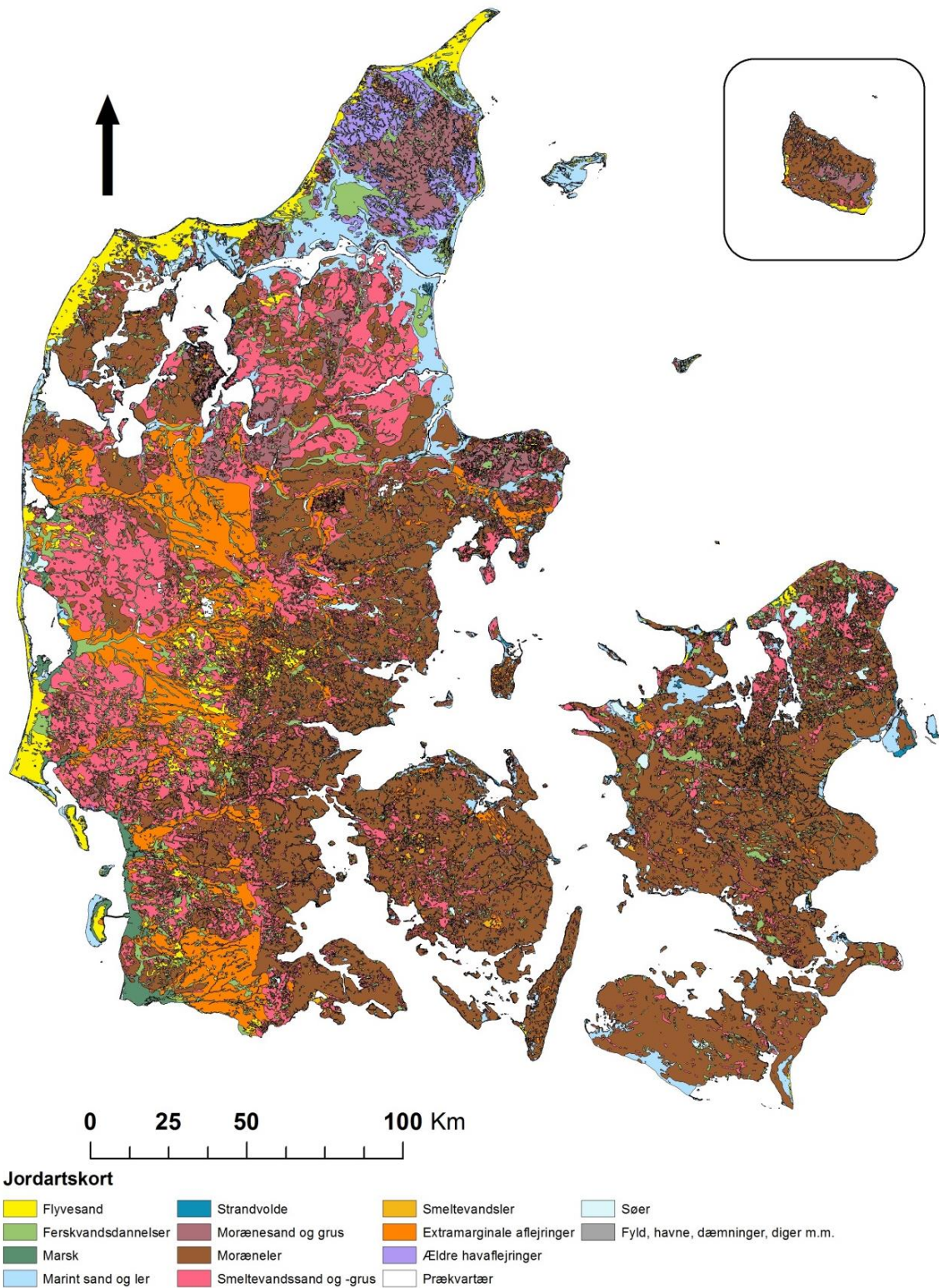
De vigtigste prækvartære grundvandsmagasiner findes i Danienkalken på det østlige Fyn (fra Nyborg mod Svendborg) samt på den nordlige del af Langeland, se Figur 3, og tykkelsen af kalken skønnes til mellem 30 og 80 meter. Danienkalken overlejrer skrivekridtet, der desuden findes i et mindre område syd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

De prækvartære aflejringer er overalt på Fyn dækket af kvartærtidens glaciære sedimenter. Disse består mest 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 glaciært 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.

Kort over det danske prækvarter



Figur 3. Prækvarter 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.

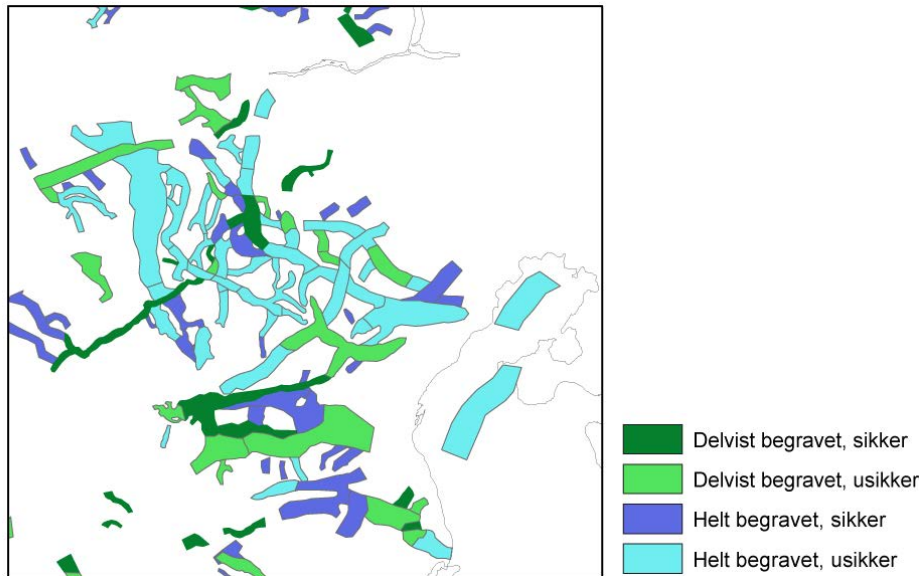
I den vestlige del af Jylland, vest og syd for isens Hovedopholdslinie under sidste istid (Weichsel), er landskabet præget af bakkeøer fra næstsidste istid (Saale). Disse bakkeøer er gennemskåret og omsluttet af hedesletter fra sidste istid – Weichsel, se Figur 4. Bakkeøerne er ældre end landskaberne 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 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 indvindingsammenhæng

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 sedimente 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 sedimente 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 grundvandsmagasin 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 Centraljylland. Yngste betydende tertiære grundvandsmagasiner findes i Odderup Formationen med bl.a. dannelse af brun-kulsaflejringer; 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 stadig vigtige i indvindingsammenhæng.



Figur 5. Eksempel på dybe dale i Århus-området (Jørgensen og Sandersen, 2009). Bornholm

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 krystalline bjergarter - prækambriske granitter og gnejser - i tæt samspil med overliggende kværtære 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:

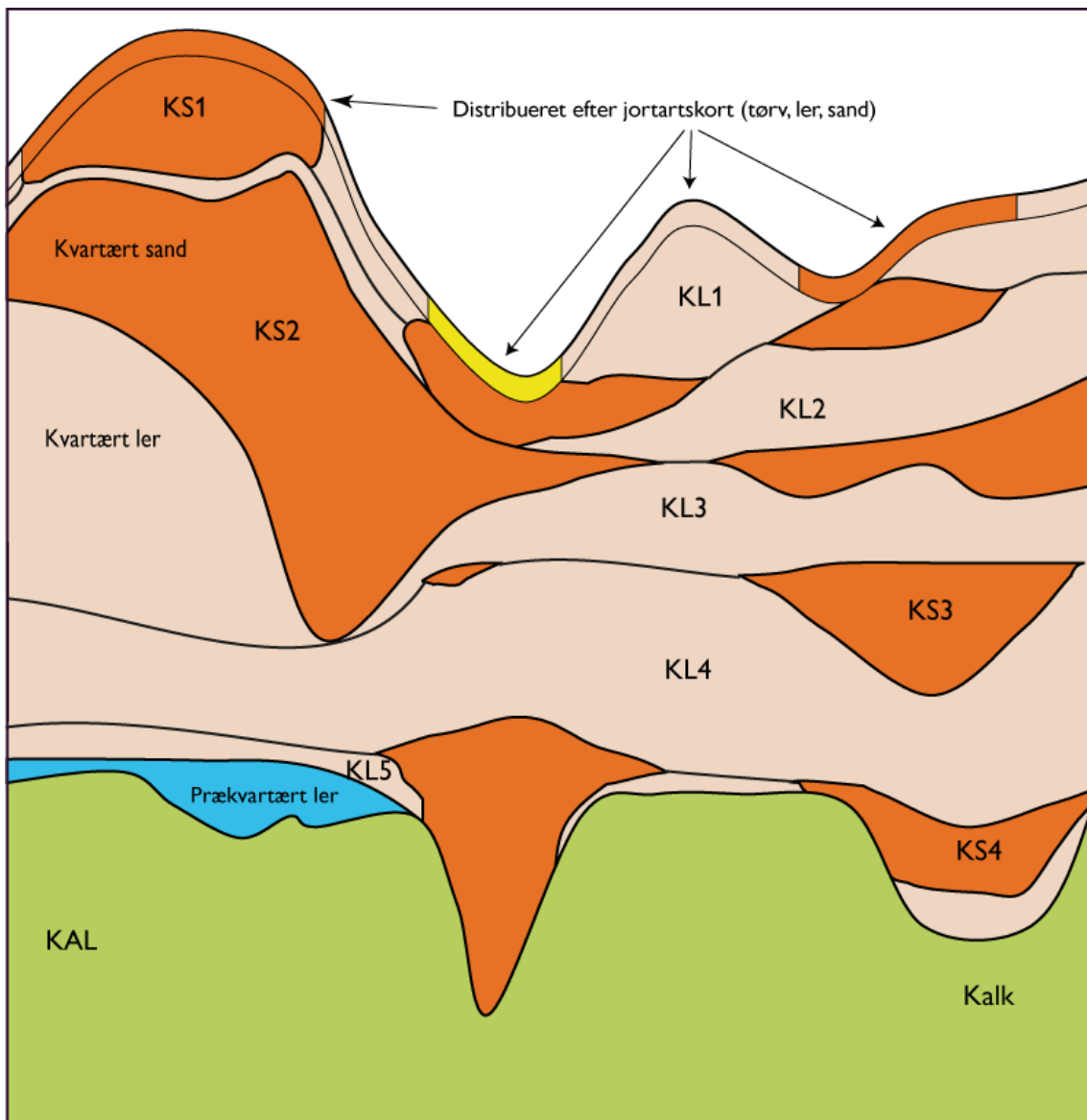
1. Den hydrostratigrafiske model, der beskriver den rumlige fordeling af hydrostratigrafiske enheder karakteriseret ved deres hydrauliske egenskaber. Hydrostratigrafiske enheder repræsenterer således en eller flere geologiske enheder med samme hydrauliske karakteristika, der er slået sammen til en enhed 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 DK-model2009 (Nyegaard et al., 2010). For Sjælland er denne efterfølgende opdateret med nye kortlægningsmodeller og der er sket en samlet kvalitetssikring af den hydrogeologiske model (Bitsch, et al., 2012). For Fyn er DK-modellen opdateret på basis af modellerne for Odense syd og Odense vest samt en mindre model for Lillebæk. Den hydrogeologiske tolkning for Jylland er kun opdateret med en lokal model for Silkeborg, mens der ikke er sket en opdatering af den hydrostratigrafiske model for Bornholm.

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 Nyegaard et al. (2010).

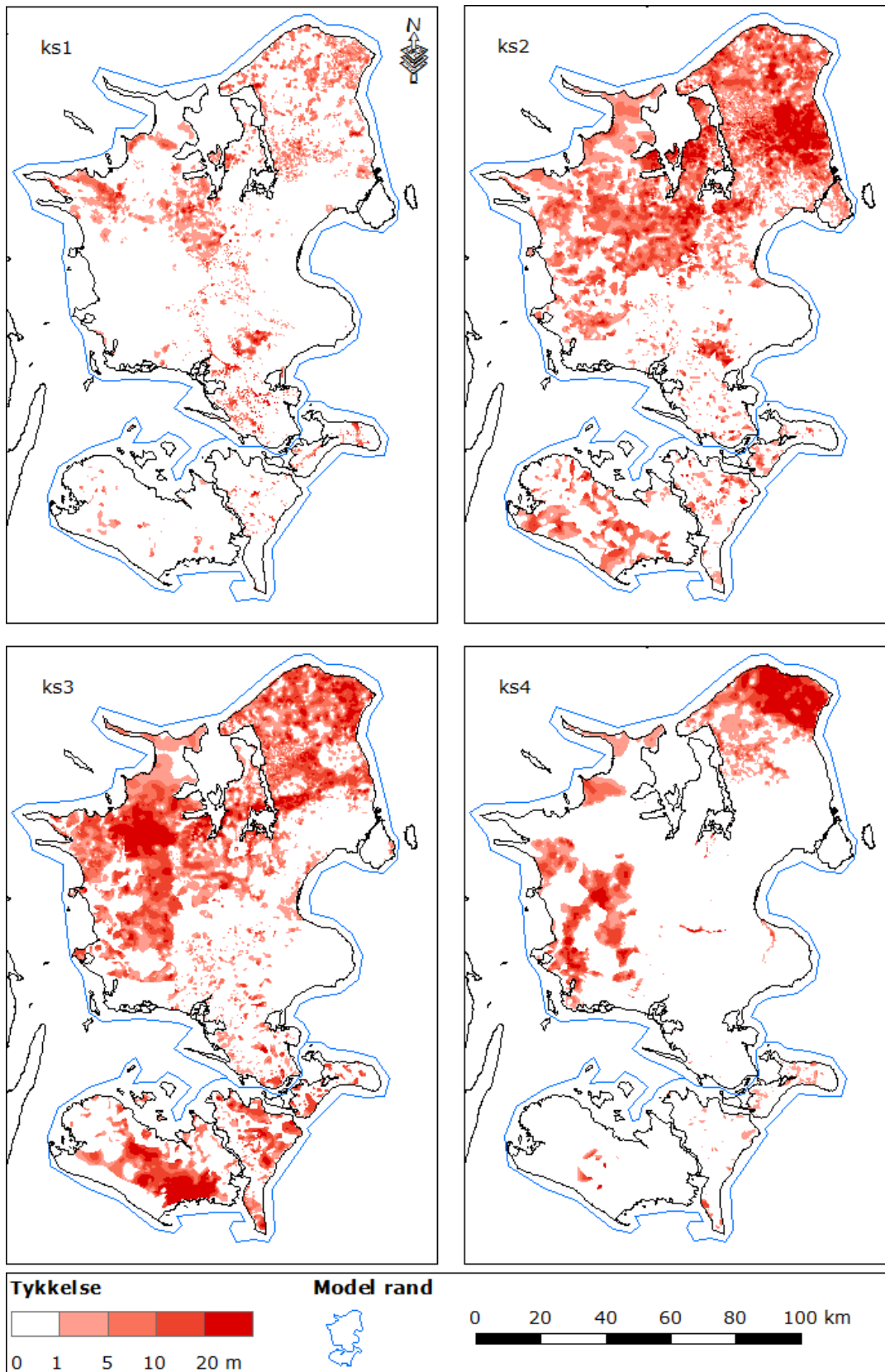
Den hydrostratigrafiske model for Sjælland, Lolland, Falster og Møn er opbygget med samme antal lag som den geologiske forståelsesmodel. Den hydrostratigrafiske model indeholder således i alt 12 flader. Figur 6 viser en principskitse for den hydrostratigrafiske model, mens Tabel 2 giver en beskrivelse af de enkelte lag. De lavpermeable kvartære lerenheder 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, Lillebæltssler, Røsnæsler og Kerteminde Mergel og de prækvartære vandførende enheder er zoneret ind i det prækvartære lag.



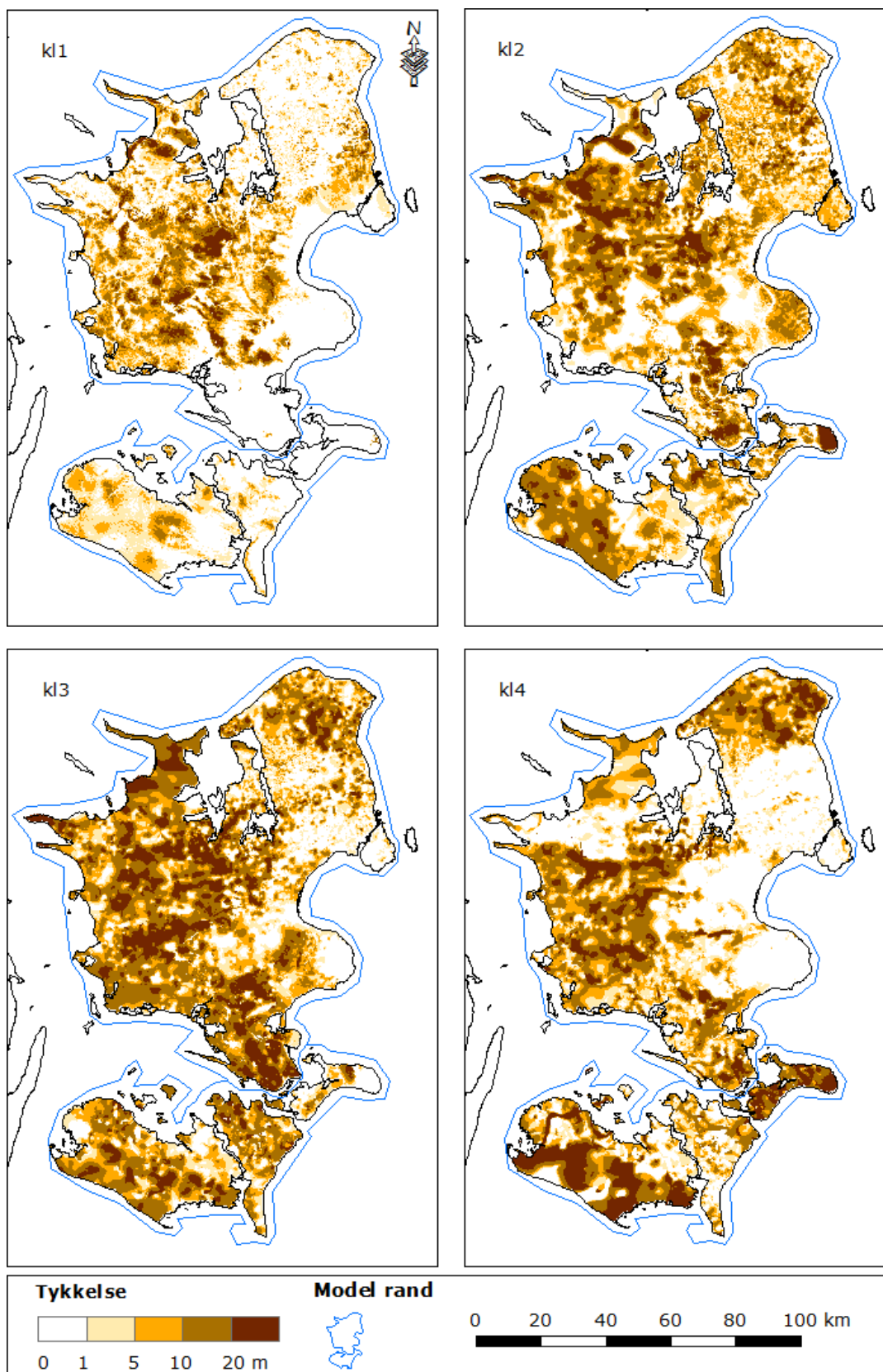
Figur 6. Principskitse af de hydrostratigrafiske enheder og beregningslag for modellen for Sjælland, Lolland, Falster og Møn.

Tabel 2. Oversigt over de hydrostratigrafiske lag samt de afgrænsende flader for Sjælland, Lolland, Falster og Møn.

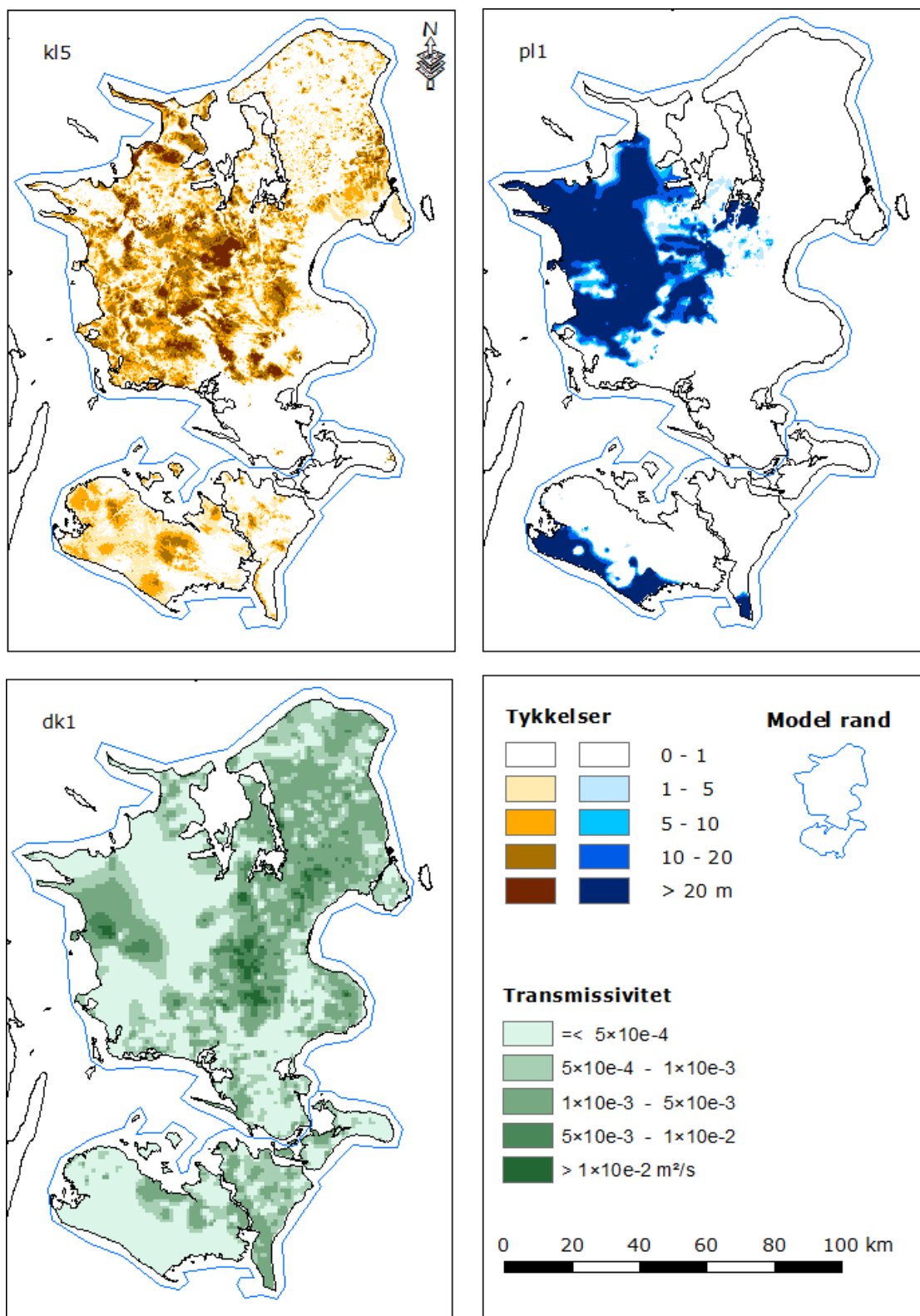
Nr	Navn	Topflade	Bundflade	Beskrivelse
1	Top3m	dkms_topo	dkms_top3m	Det øvre toplag. Strækker sig fra terræn 3 meter ned. Laget er opdelt i sand, ler og tørv, defineret på basis af jordartskortet.
2	KL1	dkms_top3m	dkms_ks1t	Øvre kvartære lerenhed, strækker sig fra bund af Top3m og ned til top af sand 1. De øvre 10 meter regnes for opsprækket og har således en højere hydraulisk ledningsevne end det øvrige ler.
3	KS1	dkms_ks1t	dkms_ks1b	Det øverste sandlag/linser, udgør mindre højtliggende sekundære 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 og udgør primærmagasin.
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 og udgør primærmagasin. 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.
11	PL1	dkms_preq	dkms_pl1b	Prækvartært ler. Laget genfindes primært fra Midtsjælland og mod vest.
12	KAL	dkms_pl1b	dkms_bund	Prækvartære kalkaflejringer, bestående af Grøndsandskalk, Danien kalk og Skrivekridt. De hydrauliske egenskaber for laget er distribueret.



Figur 7. Udbredelse og tykkelse af kvartære sandmagasiner for delmodel 1 (Sjælland) og delmodel 2 (Lolland, Falster, Møn). De blå polygoner angiver udbredelsen af modelrand for de to delmodeller.



Figur 8. Udbredelse og tykkelse af ler mellem kvartære sandlegemer for delmodel 1 (Sjælland) og delmodel 2 (Lolland, Falster, Møn). De blå polygoner angiver udbredelsen af modelrand for de to delmodeller.

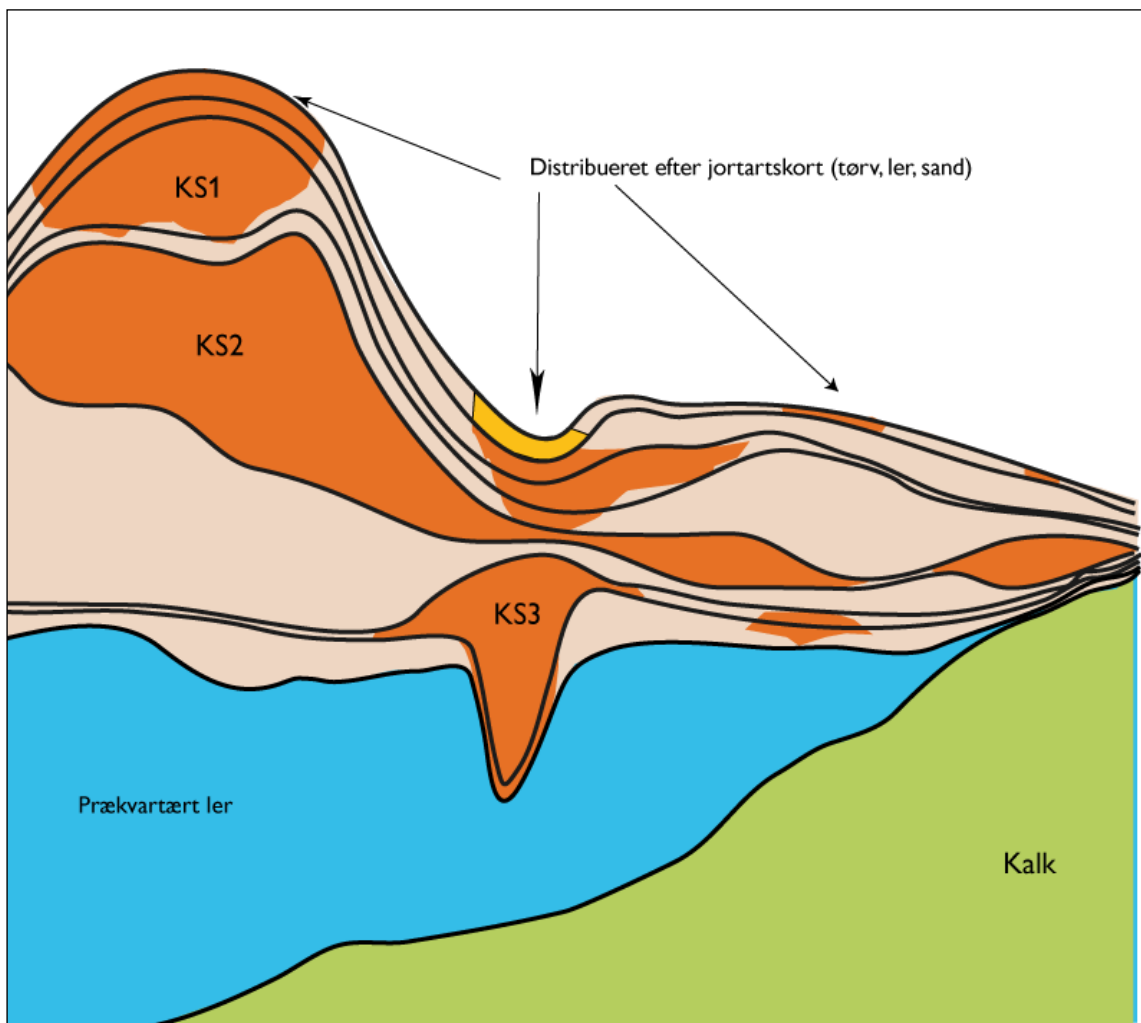


Figur 9. Udbredelse og tykkelse af ler mellem kvartære sandlegemer (øverst venstre) og prækvartære sandlegemer (øverst højre), samt transmissivitet i kalk (nederst venstre) for delmodel 1 (Sjælland) og delmodel 2 (Lolland, Falster, Møn). De blå polygoner angiver udbredelsen af modelrand for de to delmodeller.

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 Nyegaard et al. (2010).

Den hydrostratigrafiske model for Fyn er opbygget med samme antal lag som den geologiske forståelsesmodel. Den hydrostratigrafiske model indeholder således i alt 10 flader. Figur 10 viser en principskitse for den hydrostratigrafiske model, mens Tabel 3 giver en beskrivelse af de enkelte lag. De lavpermeable kvartære lerenheder 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.

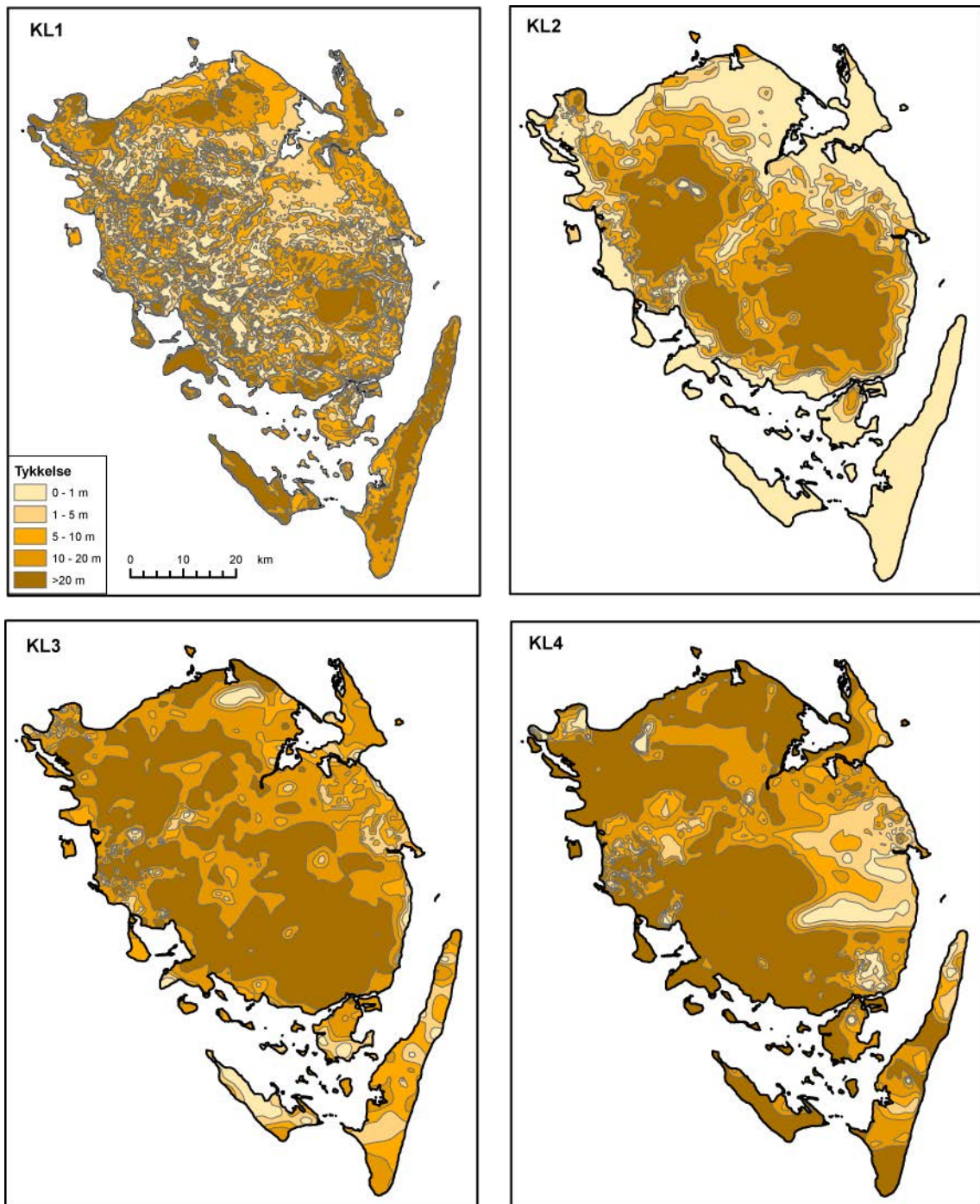


Figur 10. Principskitse af de hydrostratigrafiske enheder og beregningslag for modellen for Fyn.

Tabel 3. Oversigt over de hydrostratigrafiske lag samt de afgrænsende flader for Fyn

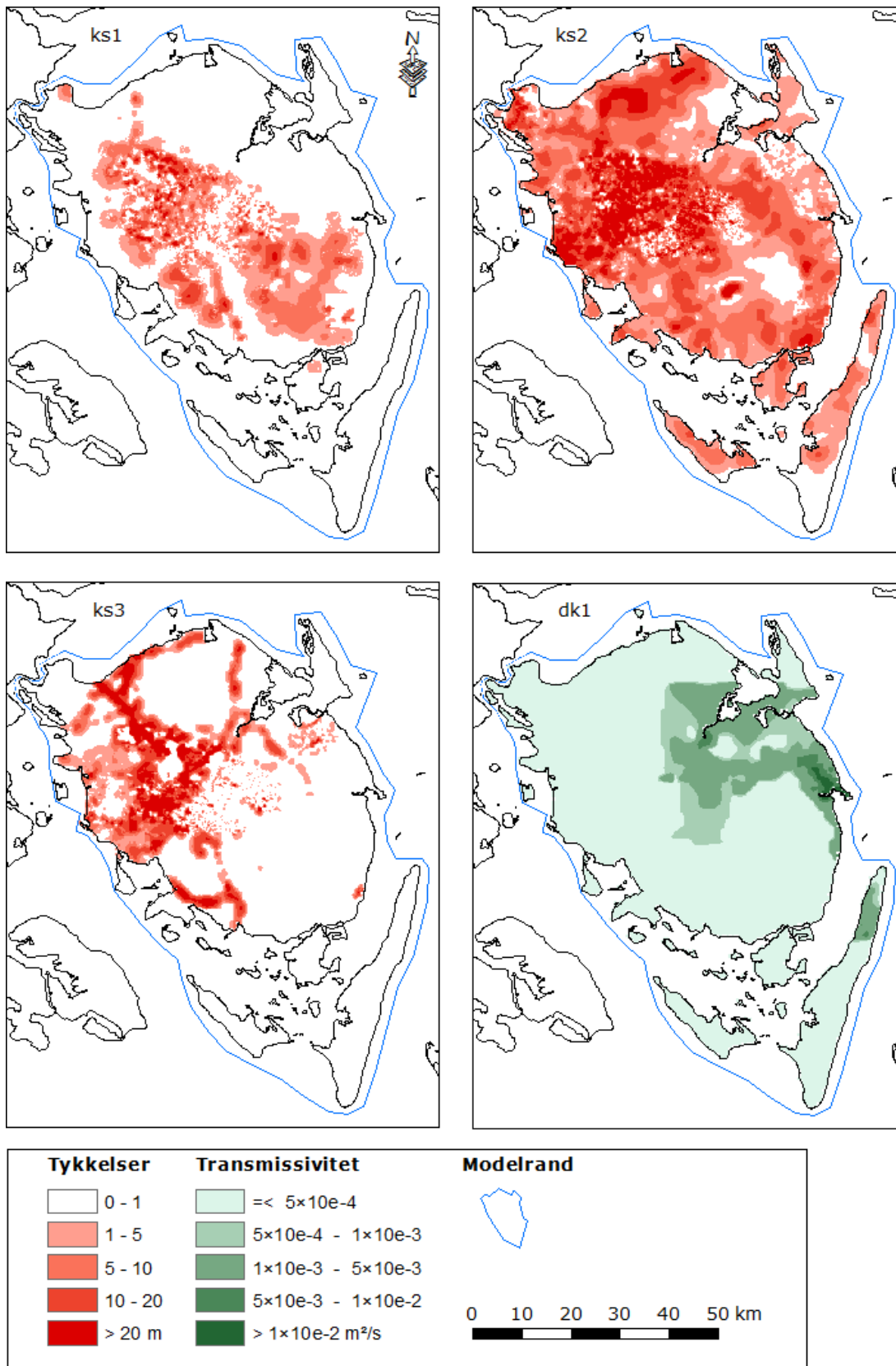
Nr	Navn	Topflade	Bundflade	Beskrivelse
1	Top3m	dk_topo	dk_top3	Det øvre toplag. Ler, sand og tørv defineret på basis af jordartskortet. Leret regnes for opsprækket og har således en højere hydraulisk ledningsevne end det øvrige ler i modellen.
2	KL1	dkmf_top3m	dkmf_ks1t	Øvre kvartære lerenhed, strækker sig fra bund af LST og ned til top af sand 1. Den øverste del af leret regnes for opsprækket og har således en højere hydraulisk ledningsevne end det øvrige ler i modellen.
3	KS1	dkmf_ks1t	dkmf_ks1b	Det øverste sandlag/linser, udgør mindre højtliggende sekundære 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 og udgør primærmagasin.
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 og udgør primærmagasin. 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.
9	PL1	dkmf_preq	dkmf_pl1b	Prækvartært ler.
10	KAL	dkmf_pl1b	dkmf_bund	Prækvartære kalkaflejringer, primært bestående af Grøndsandskalk og Danien kalk. De hydrauliske egenskaber for laget er distribueret. 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. Vandudvekslingens størrelse mellem en øvre og en dybere vandførende enhed antages således omvendt proportional med tykkelsen af det lavpermeable lag ved en given trykniveauforskel. 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 leret mellem de tre niveauer af sandlegemerne fremgår af Figur 11.



Figur 11. Udbredelse og tykkelse af ler mellem sandlegemerne.

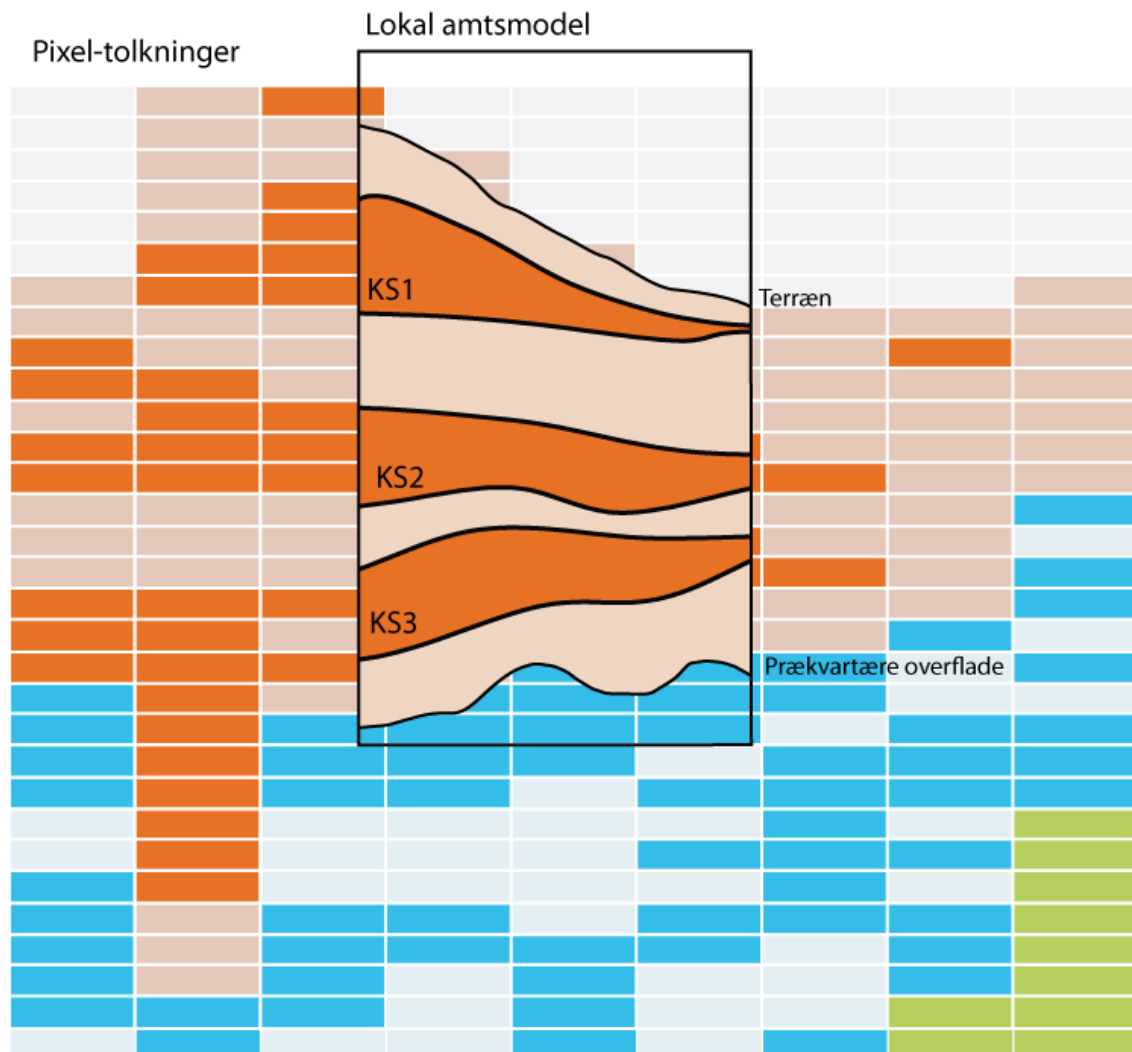
Modellernes sandenheder består overvejende af smeltevandssand og -grus. For sandenhederne findes der relativt få pumpe-test data samt specifik ydelse. Datagrundlaget er ikke vurderet tilstrækkeligt til at foretage en interpolation af de hydrauliske ledningsevner indenfor de enkelte sandlegemer. I stedet 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 12. For prækvartæret er der specificeret en fast mægtighed på 50 m for hele modelområdet.



Figur 12. Udbredelse og tykkelse af kvartære sandmagasiner (ks1-ks3) og transmissivitet i kalk (nederst højre) for delmodel 3 (Fyn). Det blå polygon angiver udbredelsen af modelrand for delmodel 3.

3.3 Jylland

Det vigtigste element i opstillingen af den hydrogeologiske model for Jylland er pixel geologisk tolkning og en hydrostratigrafisk tolkning af undergrunden. Under DK-model2009 blev der lagt et stort arbejde i at opbygge en ny geologisk model for Jylland som en hybrid bestående af en kombination af pixler fra den første version af DK-modellen og lag fra de tidligere amtsmodeller. En sådan løsning er teknisk mulig ved at anvende pixlerne som "baggrundsgeologi" for hele Jylland og overlægge disse med linser, der udgøres af lag fra de tidligere amtsmodeller, Figur 13.

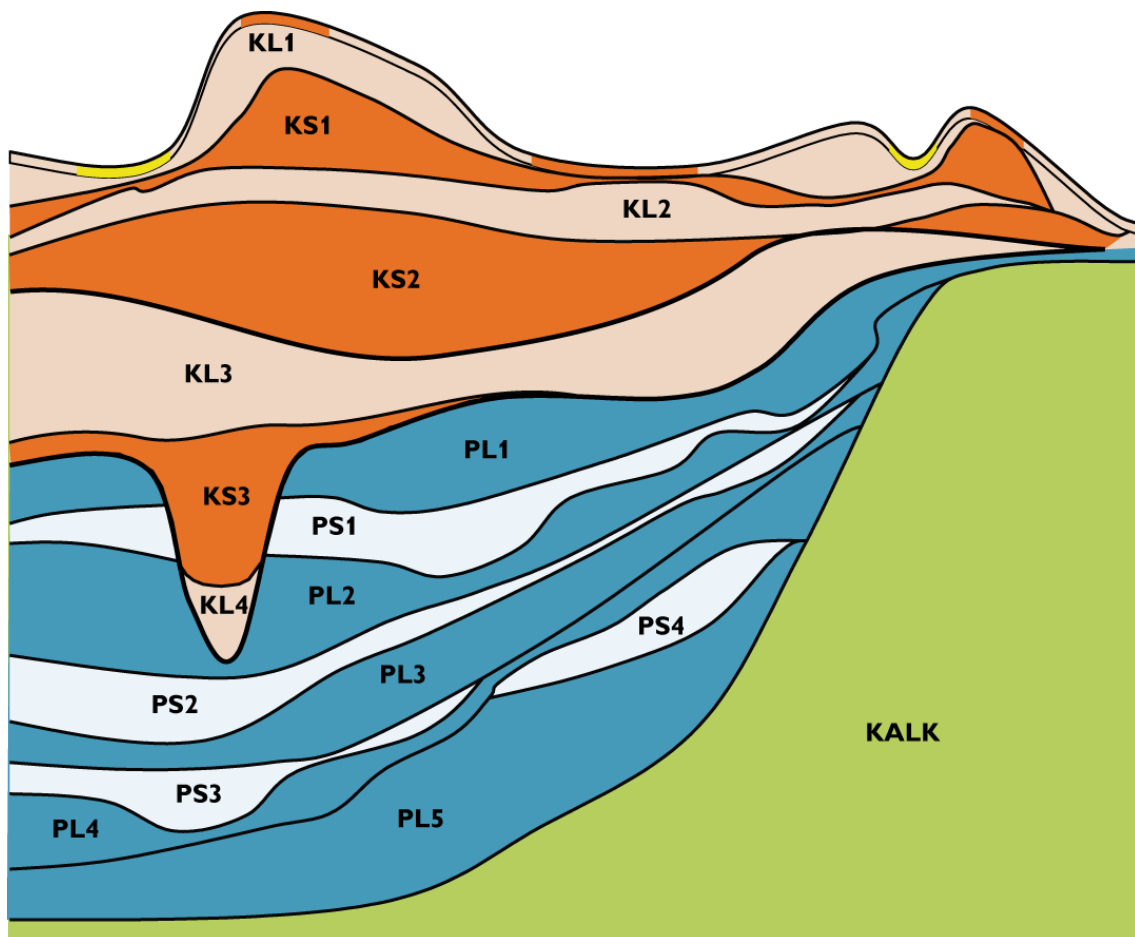


Figur 13. Principskitse illustrerende opbygningen af den hydrostratigrafiske model for Jylland med pixler som "baggrundsgeologi" overlægret af linser beskrivende lag fra tidligere amtsmodeller.

Den geologiske forståelsesmodel for magasinforholdene i Jylland består af sandlinser i tre niveauer for kvartæret og fire niveauer for prækvartæret, samt vandførende prækvartære kalkaflejringer fra Senkridt og Danien. For at tilgodese lokale variationer har det været nødvendigt at underindele nogle af sandlegemerne i en øvre og nedre enhed. Da dette kun forekommer få steder og er af lokal udbredelse, er det valgt kun at navngive de omtalte syv

niveauer med sandmagasiner og referere til en øvre og nedre del, hvor dette er aktuelt. Datagrundlaget samt fremgangsmetoden for konstruktion af de hydrostratigrafiske lag for Jylland er nærmere beskrevet i Nyegaard et al. (2010).

For at kunne opløse de lokale variationer med underinddeling af nogle af sandlagene, er der for disse sandlag defineret en lagflade for top og bund af såvel øvre og nedre del. Den hydrostratigrafiske model indeholder således i alt 25 flader. Figur 14 viser en principskitse for den hydrostratigrafiske model, mens Tabel 4 giver en beskrivelse af de enkelte lag.



Figur 14. Principskitse for den hydrostratigrafiske model for Jylland. Lagene KS2, KS3 og PS2 er lokalt underinddelte i en øvre og nedre del.

Tabel 4. Oversigt over de hydrostratigrafiske lag samt de afgrænsende flader for Jylland.

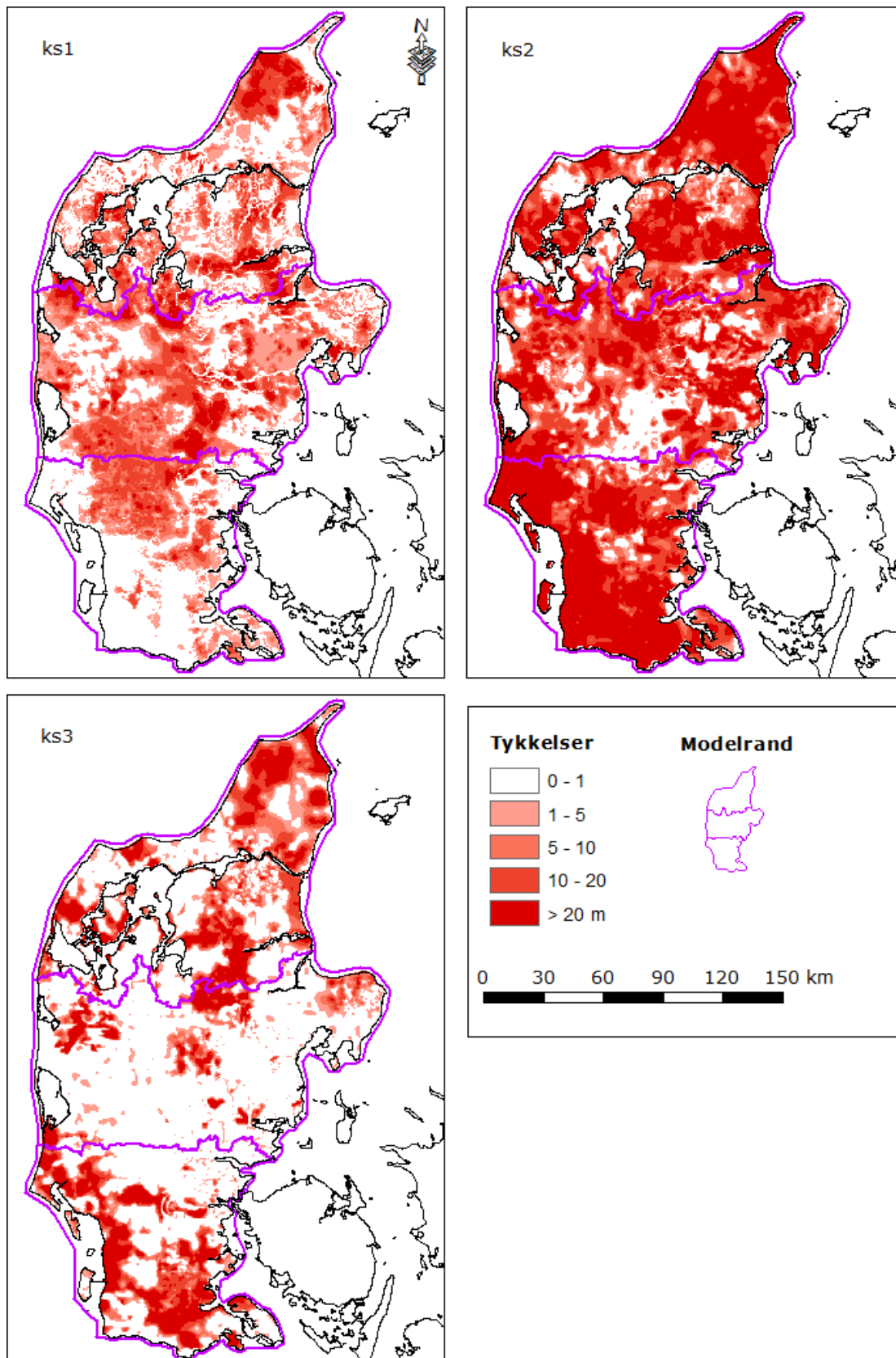
Nr.	Navn	Topflade	Bundflade	Bemærkning
1	LST	dkmj_topo_0	dkmj_top3m	Øverste 3 m er distribueret med ler, sand og tørv defineret på baggrund af jordartskort.
2	KL1	dkmj_top3m	dkmj_ks1t	Fra 3 m under terræn til øverste sandenhed.
3	KS1	dkmj_ks1t	dkmj_ks1b	Kvartært sand KS1, kan indeholde lerpixler.
4	KL2	dkmj_ks1b	dkmj_ks2t	Kvartært ler adskiller KS1 og KS2, kan indeholde sandpixler.
5	KS21	dkmj_ks21t	dkmj_ks21b	Øverste del af kvartært sand KS2, kan indeholde lerpixler.
6	LKS2	dkmj_ks21b	dkmj_ks22t	Lokalt kvartært ler i KS2.
7	KS22	dkmj_ks22t	dkmj_ks22b	Nederste del af kvartært sand KS2, kan indeholde lerpixler.
8	KL3	dkmj_ks22b	dkmj_ks31b	Kvartært ler adskiller KS2 og KS3, kan indeholde sandpixler.
9	KS31	dkmj_ks31t	dkmj_ks31b	Øverste del af kvartært sand KS3, kan indeholde lerpixler.
10	LKS3	dkmj_ks31b	dkmj_ks32t	Lokalt kvartært ler i KS3.
11	KS32	dkmj_ks32t	dkmj_ks32b	Nederste del af kvartært sand KS3, kan indeholde lerpixler.
12	KL4	dkmj_ks32b	dkmj_ks4t	Kvartært ler adskiller typisk KS3 og Prækvartær overfladen, indeholder ofte både sand og lerpixler.
13	KS4	dkmj_ks4t	dkmj_preq	Lokalt sand placeret direkte på prækvartæret KS4.
14	PL1	dkmj_preq	dkmj_ps1t	Prækvartært ler adskiller prækvartær overfladen og PS1, indeholde ofte både sand- og lerpixler.
15	PS1	dkmj_ps1t	dkmj_ps1b	Prækvartært sand PS1, kan indeholde lerpixler.
16	PL1	dkmj_ps1b	dkmj_ps21t	Prækvartært ler adskiller PS1 og PS2, kan indeholde sandpixler.
17	PS21	dkmj_ps21t	dkmj_ps21b	Øvre del af prækvartært sand PS2, kan indeholde lerpixler.
18	LP2	dkmj_ps21b	dkmj_ps22t	Prækvartært ler i PS2.
19	PS22	dkmj_ps22t	dkmj_ps22b	Nedre del af prækvartært sand PS2, kan indeholde lerpixler.
20	PL3	dkmj_ps22b	dkmj_ps3t	Prækvartært ler adskiller PS2 og PS3, kan indeholde sandpixler.
21	PS3	dkmj_ps3t	dkmj_ps3b	Prækvartært sand PS3, kan indeholde lerpixler.
22	PL4	dkmj_ps3b	dkmj_ps4t	Prækvartært ler adskiller PS3 og PS4, kan indeholde sandpixler.
23	PS4	dkmj_ps4t	dkmj_ps4b	Prækvartært sand PS4, kan indeholde lerpixler.
24	PL5	dkmj_ps4b	dkmj_kalk	Prækvartært ler adskiller PS4 og KAL, kan indeholde sandpixler.
25	KAL	dkmj_kalk	dkmj_bund	Vandførende del af kalk, tykkelse sat til 50 meter, overfladen er sammenfaldende med Prækvartær overfladen i Nordjylland.

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 3 m, hvor det geolo-

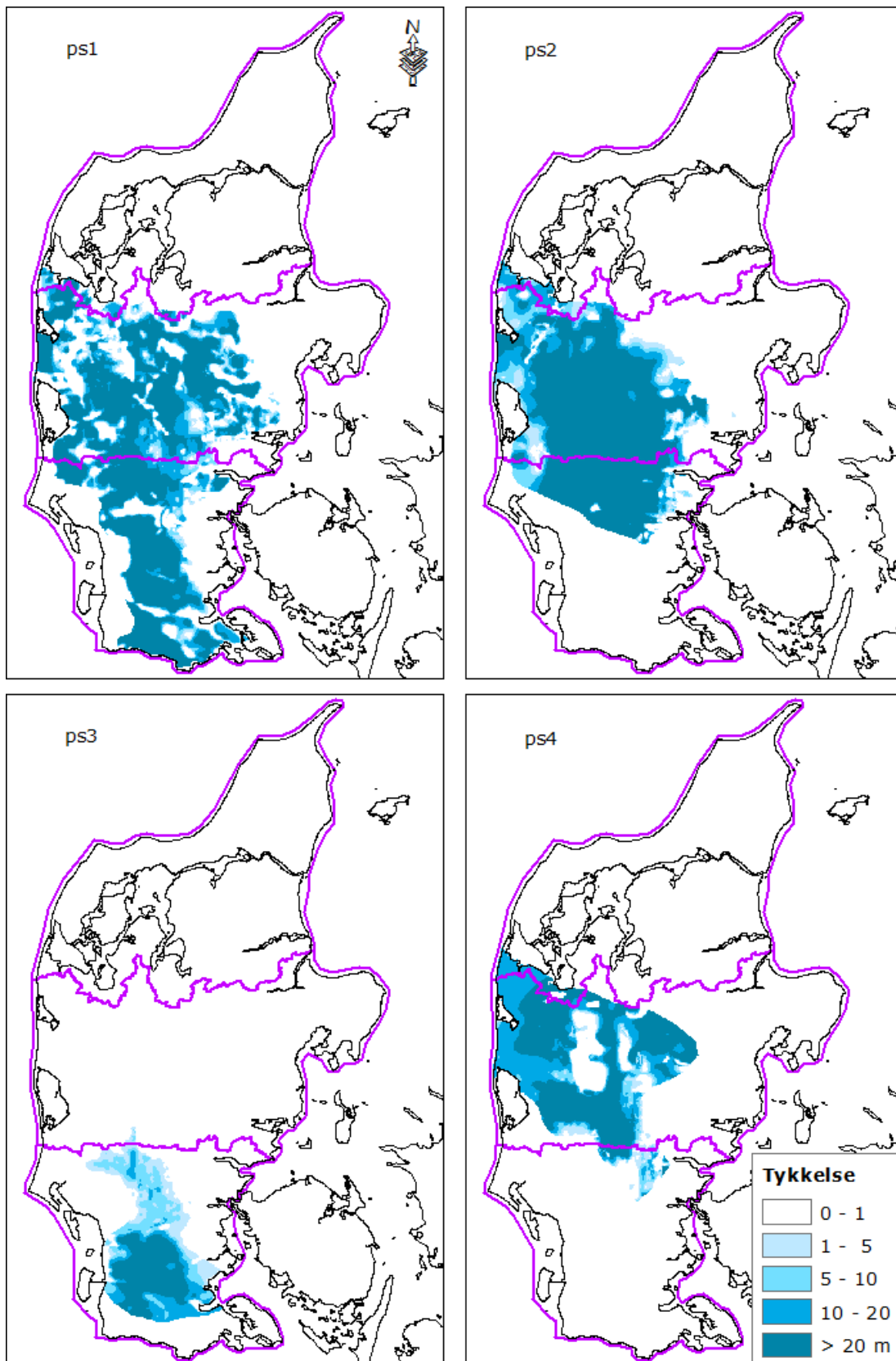
giske lag er defineret på baggrund af jordartskortet (Figur 4), er opsprækket og har en højere hydraulisk ledningsevne end det øvrige ler. Udbredelse og tykkelse af leret mellem sandlegemerne fremgår af Figur 17 og Figur 18.

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.

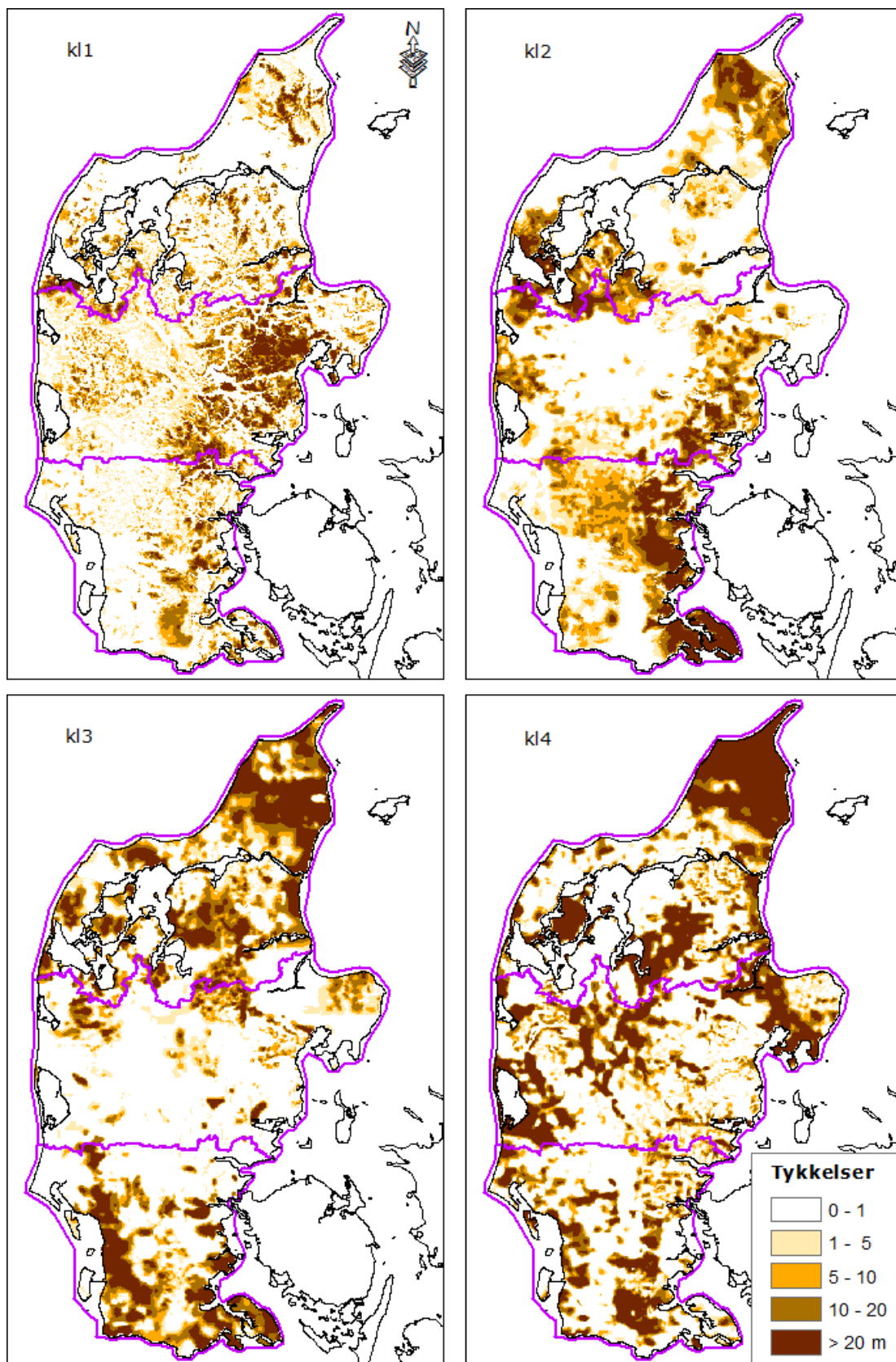
Ikke alle hydrostratigrafiske lag er til stede over det hele. Hvor et lag ikke er eksisterende er top og bundflade for laget sammenfaldende, så laget har ingen tykkelse. Udbredelse og tykkelse af de hydrostratigrafiske magasinlag er vist på Figur 15 og Figur 16 for henholdsvis den kvartære (KS) og prækvartære (PS) lagpakke, mens de mellemliggende vandstandsede lag for de to perioder er vist på Figur 17 og Figur 18.



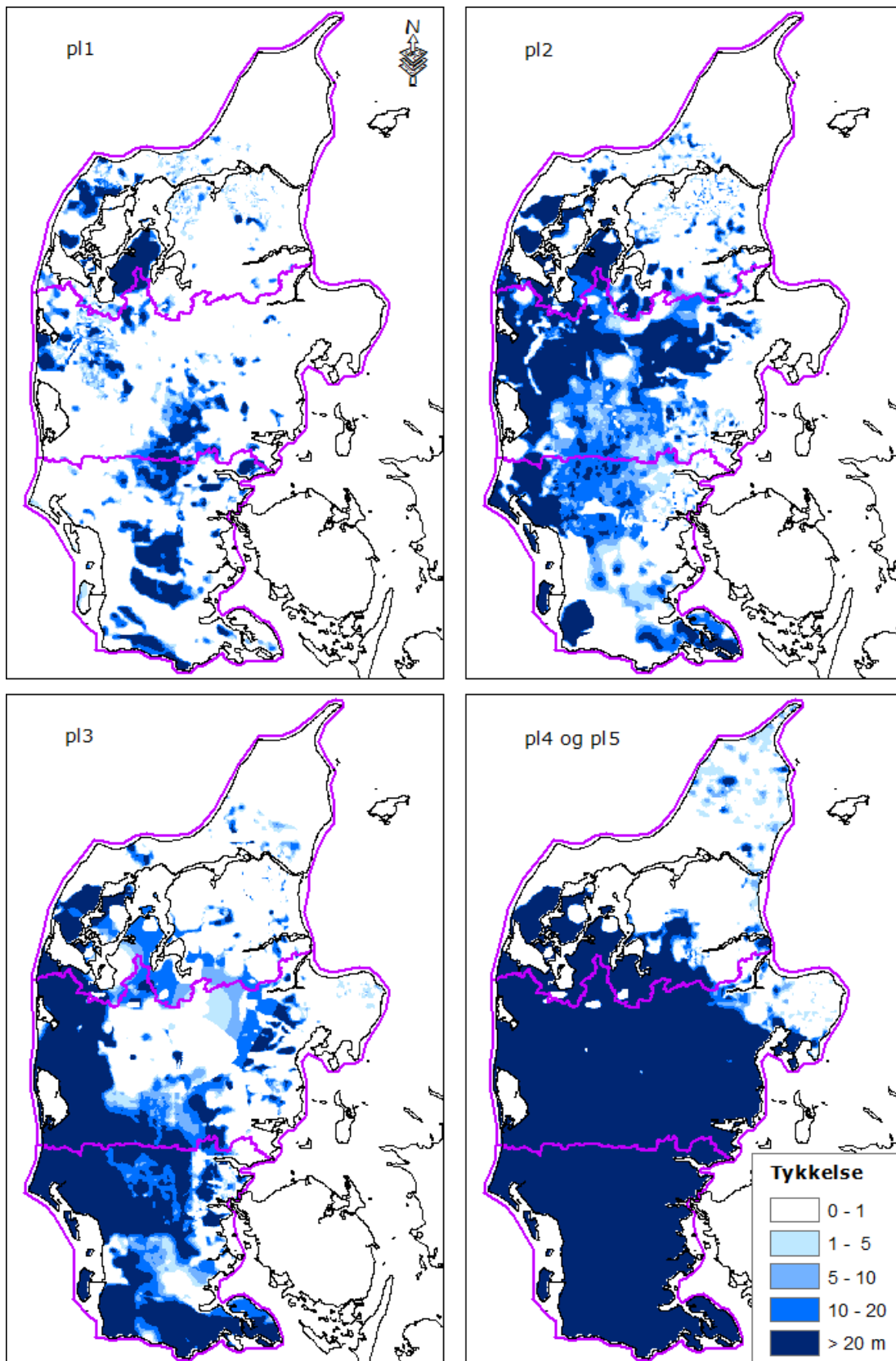
Figur 15. Udbredelse og tykkelse af kvartære sandmagasiner. De lilla polygoner angiver udbredelsen af modelrand for de tre delmodeller.



Figur 16. Udbredelse og tykkelse af prækvartære Miocæne sandmagasiner. De lilla polygoner angiver udbredelsen af modelrand for de tre delmodeller.



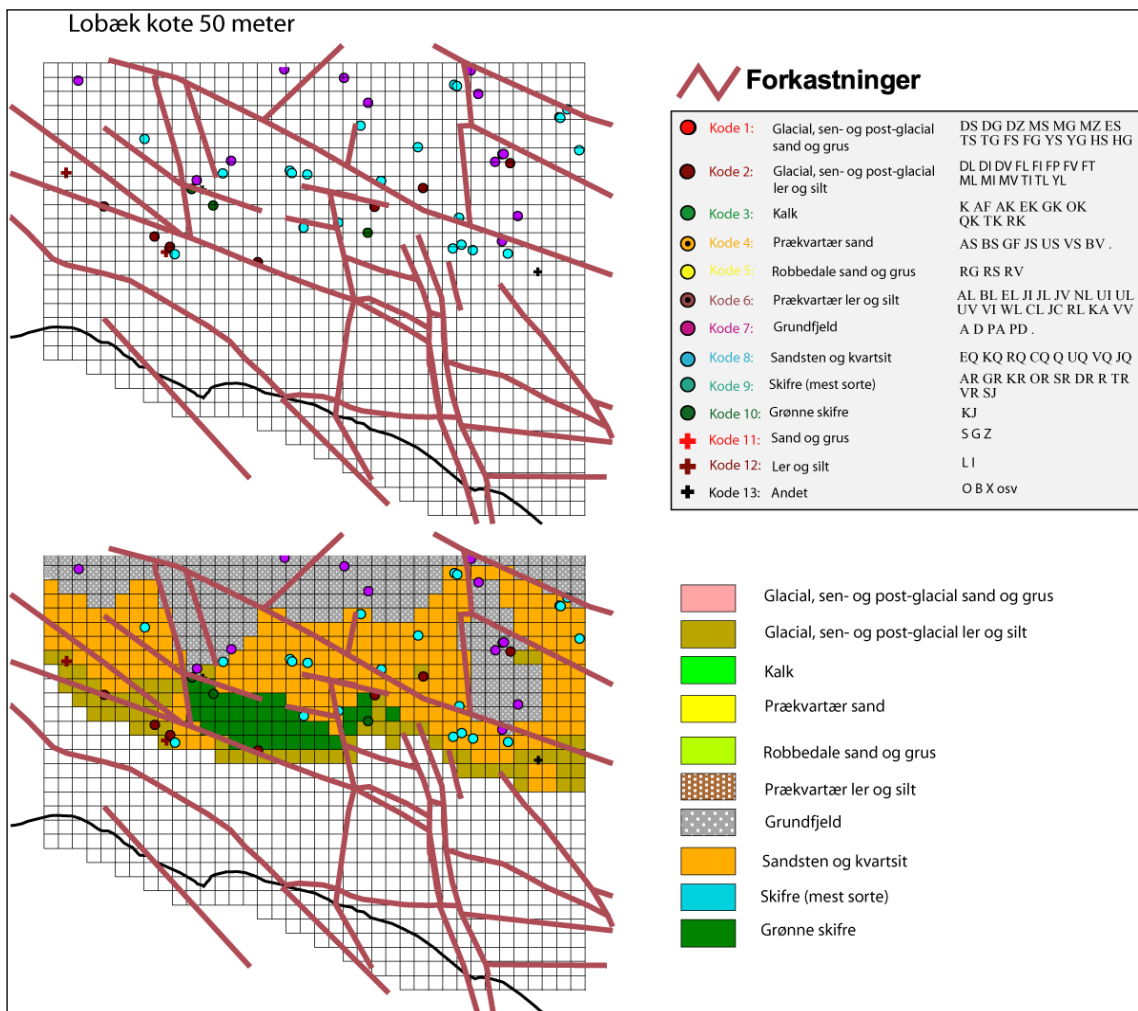
Figur 17. Udbredelse og tykkelse af ler mellem kvartære sandlegemerne. De lilla polygoner angiver udbredelsen af modelrand for de tre delmodeller.



Figur 18. Udbredelse og tykkelse af ler mellem prækvartære sandlegemerne. De lilla polygoner angiver udbredelsen af modelrand for de tre delmodeller.

3.4 Bornholm

For Bornholm er der ligeledes anvendt en pixeltolkning af hydrogeologien. Gridmaskestørrelsen 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 19. Pixelgeologien er tolket i horisontale snit, hvor boringsoplysningerne er apriori hydrogeologisk tolket til 13 enheder med hver sin geokode, Tabel 5. Det skal bemærkes at modellen i nærværende opdatering er flyttet fra den tidligere anvendte UTM 32 ED50 projektion til UTM 32 Euref89, samt at der nu er taget udgangspunkt i samme topografiske model som for resten af DK-model opsætningerne (DHM/raster 1.6m).



Figur 19. Tolkningemetodik for Bornholm (Trolborg 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 pixel-uafhængig 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 (Trolborg et al., 2009).

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.

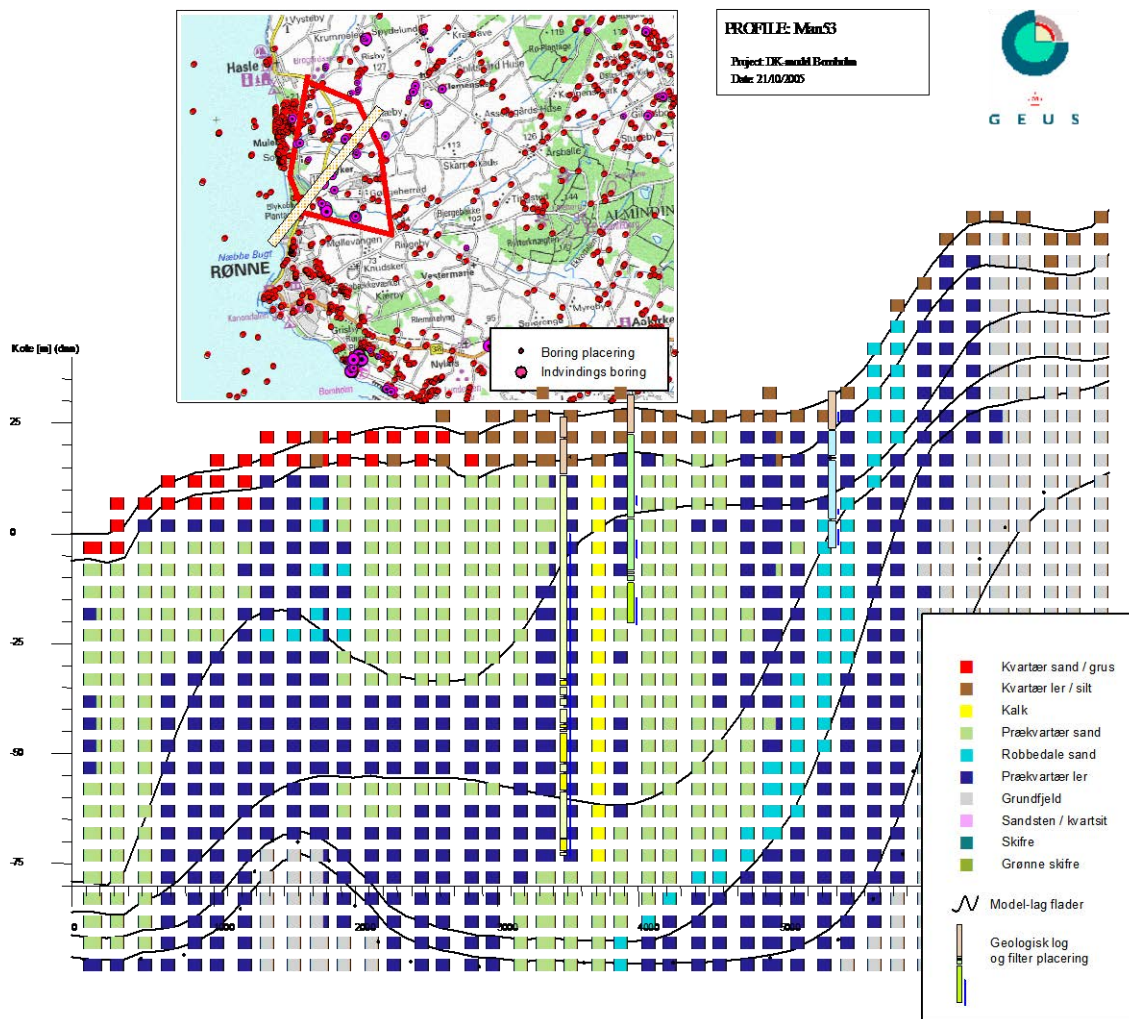
Tabel 6. Enheder fra jordartskortets geologi implementeret for Bornholm.

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
Prækvtr	24	PKV
Andet	25	BY, FJ, HAV, O, SØ, X

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.

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

Nr.	Navn	Topflade	Bundflade	Bemærkning
1	Top3m	dkmb_topo_0	dkmb_top3m	Øverste 3 m er distribueret som angivet i Tabel 6.
2	brk-lay1	dkmb_top3m	dkmb_kvbtb	Indeholder de kvartære materialer med undtagelse af de dybere dalstrukturer.
3	brk-lay2	dkmb_kvbtb	dkmb_blag2	Grundfjeldet opsprækket, Kystnært prækvartært sand, Sandsten opsprækket, Skifre og Grønne Skifre opsprækket.
4	brk-lay3	dkmb_blag2	dkmb_blag3	Grundfjeldet opsprækket, kystnært prækvartært sand og ler, Sandsten opsprækket, Skifre og Grønne Skifre opsprækket.
5	brk-lay4	dkmb_blag3	dkmb_blag4	Grundfjeldet opsprækket, robbedale magasinerne, Sandsten og skifre opsprækket, Grønne skifre ikke opsprækket.
6	brk-lay5	dkmb_blag4	dkmb_blag5	Grundfjeldet opsprækket i dalstrukturer, prækvartært ler, Sandsten ikke opsprækket, Grønne skifre.
7	brk-lay6	dkmb_blag5	dkmb_blag6	Bundlag primært grundfjeld og ikke opsprækkede Sandsten, Skifre og Grønne skifre.



Figur 20. Tværsnit gennem prækvartære sandmagasiner (Trolborg et al., 2009).

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. Der eksisterer imidlertid ikke nogen veldokumenteret og operationel metode til at foretage en distribuering af de hydrauliske forhold i vandløbsbunden på stor skala. Det er derfor valgt at anvende en uniform vandløbslækagekoefficient for alle vandløb inden for hvert modelområde. Den samlede modstand mellem vandløbet og magasinet kan imidlertid 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 den vandløbsnære geologi. For nærmere beskrivelse af vandløbsopsætningen henvises til afsnit 5.3

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 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. 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. Der er anvendt en drændybde på 0,5 meter under terræn i hele modelområdet.

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 bereg-

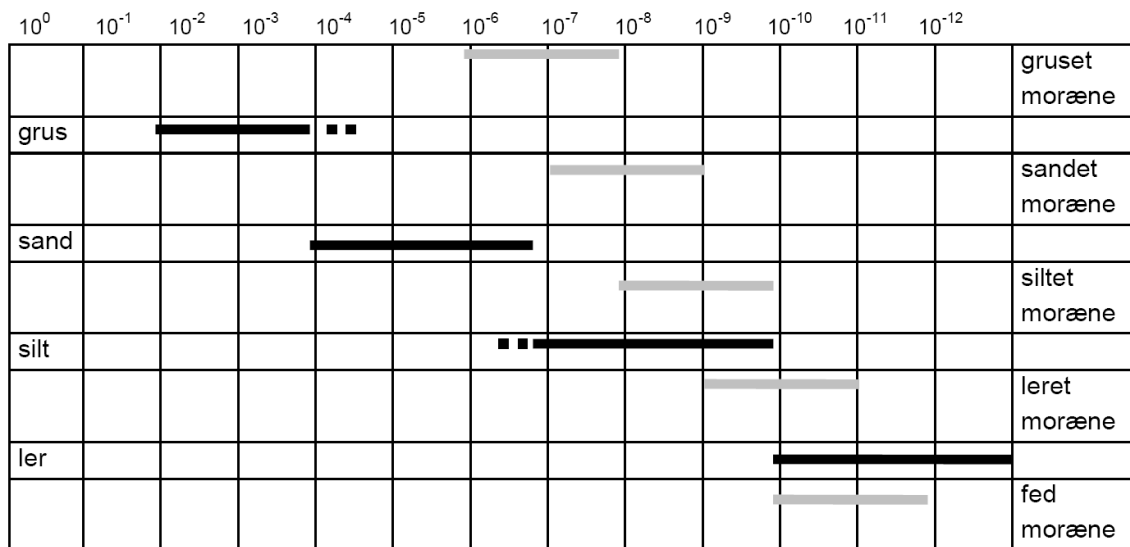
ningslag, svarende til, at der 0,5-2,5 km ude fra kysten, hvor modelranden er placeret, ikke forekommer horisontale strømninger under havbunden. Alternativt kunne der anvendes et fastholdt tryk for samtlige beregningslag, hvorved en ind-/udstrømning over randen ville være muligt. Vandløbsafstrømningen er den variabel den samlede vandbalance kan vurderes ud fra, og for denne viste en følsomhedsanalyse, at den samlede vandløbsafstrømning var meget lidt følsom overfor 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-model2014 er det, ligesom i DK-model2009, 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 dalstrukturene 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 3 meter under topografien) antages den hydrauliske ledningsevne for leret at være væsentligt større end de øvrige lerenheder pga. tilstedeværelsen af sprækker og grovsandet morænelersaflejringer. 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. Indenfor 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.

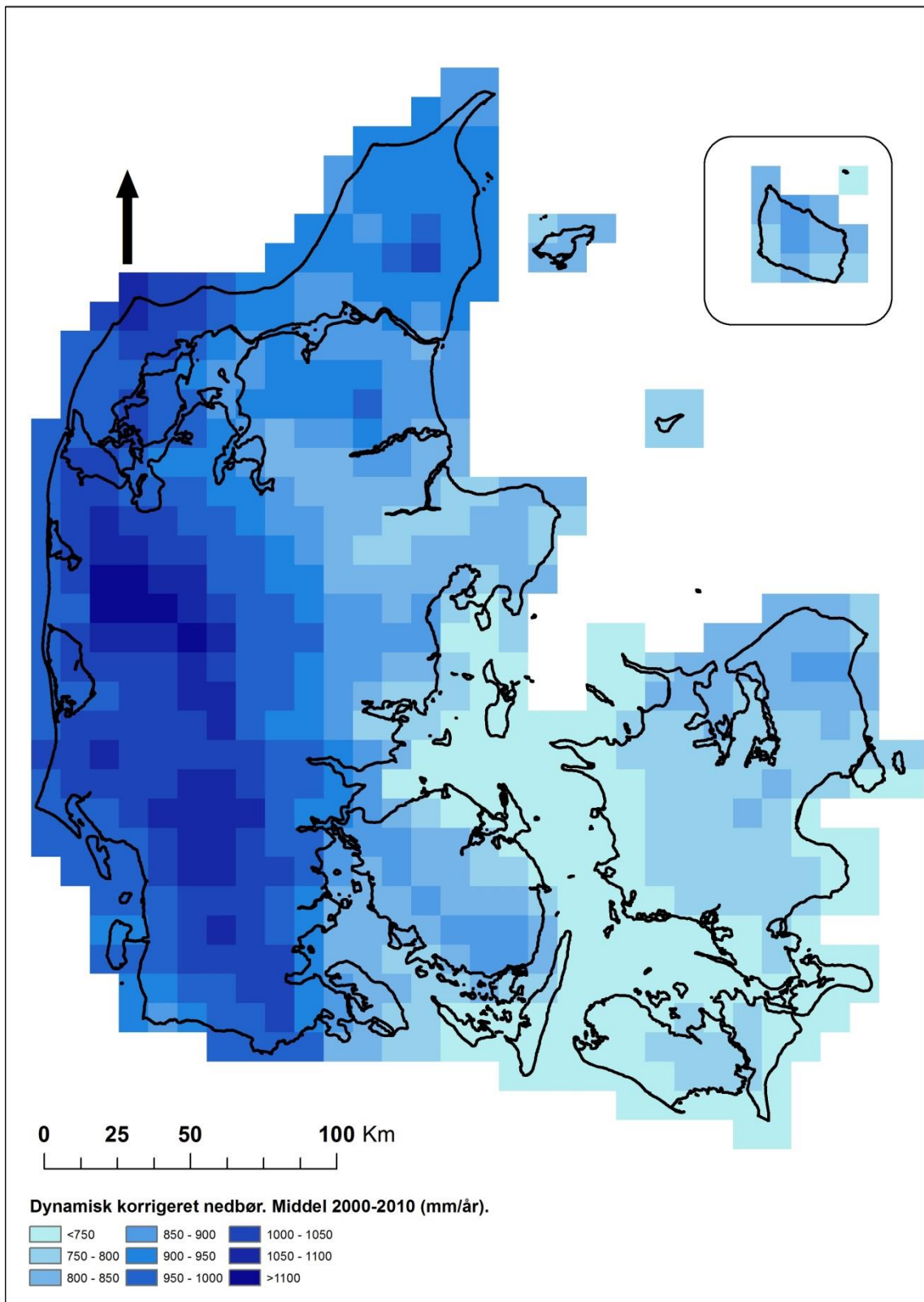
Lerenheder under toplaget antages (som for sandet) at kunne repræsenteres ved én hydrauliske ledningsevne i henholdsvis kvartære og prækvartære lag samt en anisotropi faktor på 10. Det vurderes, at den effektive horisontale ledningsevne for disse lerenheder varierer indenfor intervallet: 10^{-8} - 10^{-6}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

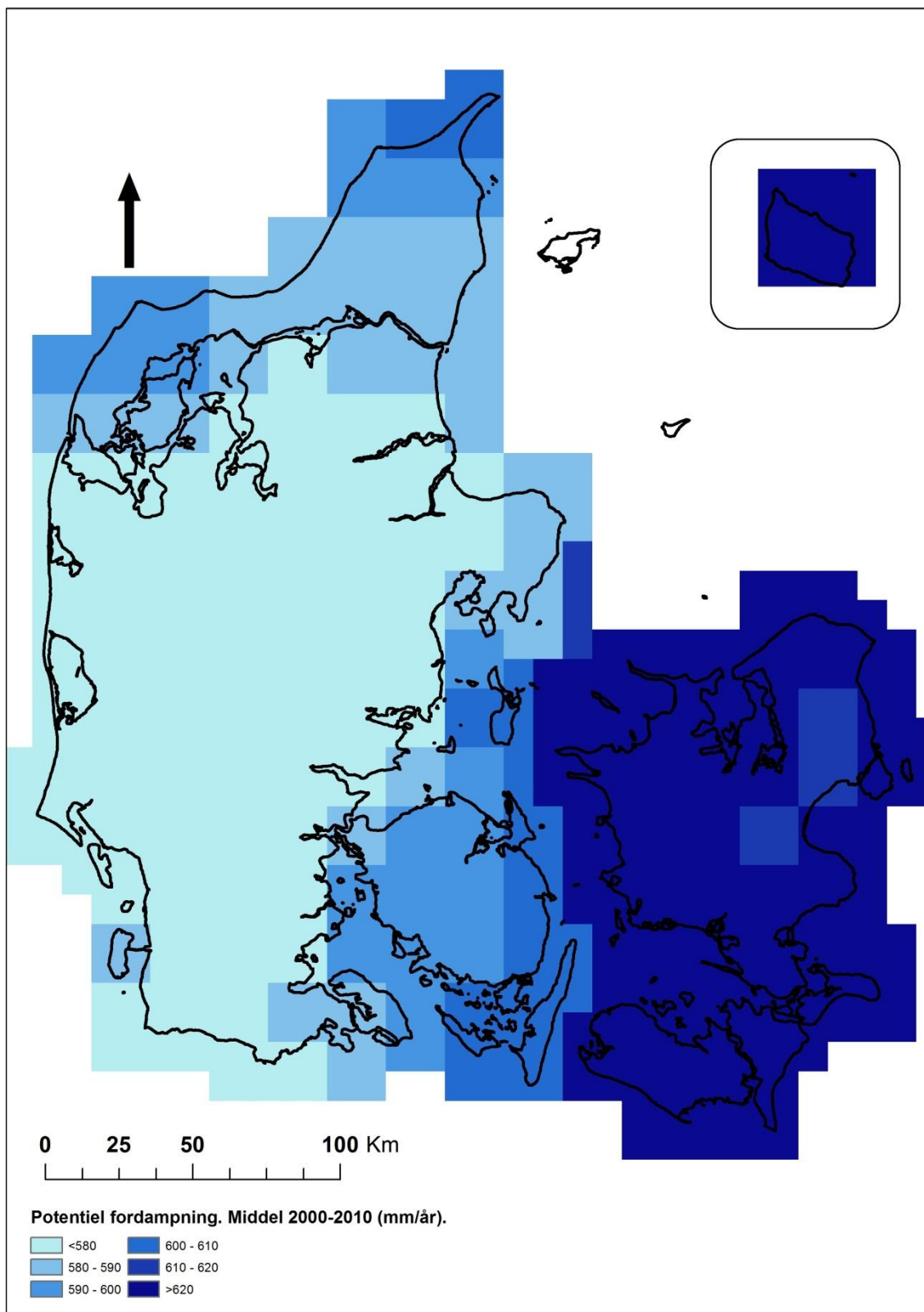
Den specifikke ydelse (frie magasiner) antages at variere indenfor intervallet 0,15-0,25. For artesiske forhold antages det specifikke magasintal (pr. meter) at være i størrelsesordenen 0,0001.

3.7 Vandbalanceforhold

Baseret på DMI's 10 x 10 km klimagrid for dynamisk korrigeret nedbør og 20 x 20 km klimagrid for fordampning er middel af den korrigerede nedbør samt den potentielle fordampning for den samlede kalibrerings- og valideringsperiode (2000 – 2010) beregnet til 866 og 595 mm/år for hele landet, med en rumlig fordeling som angivet i Figur 22 og Figur 23.



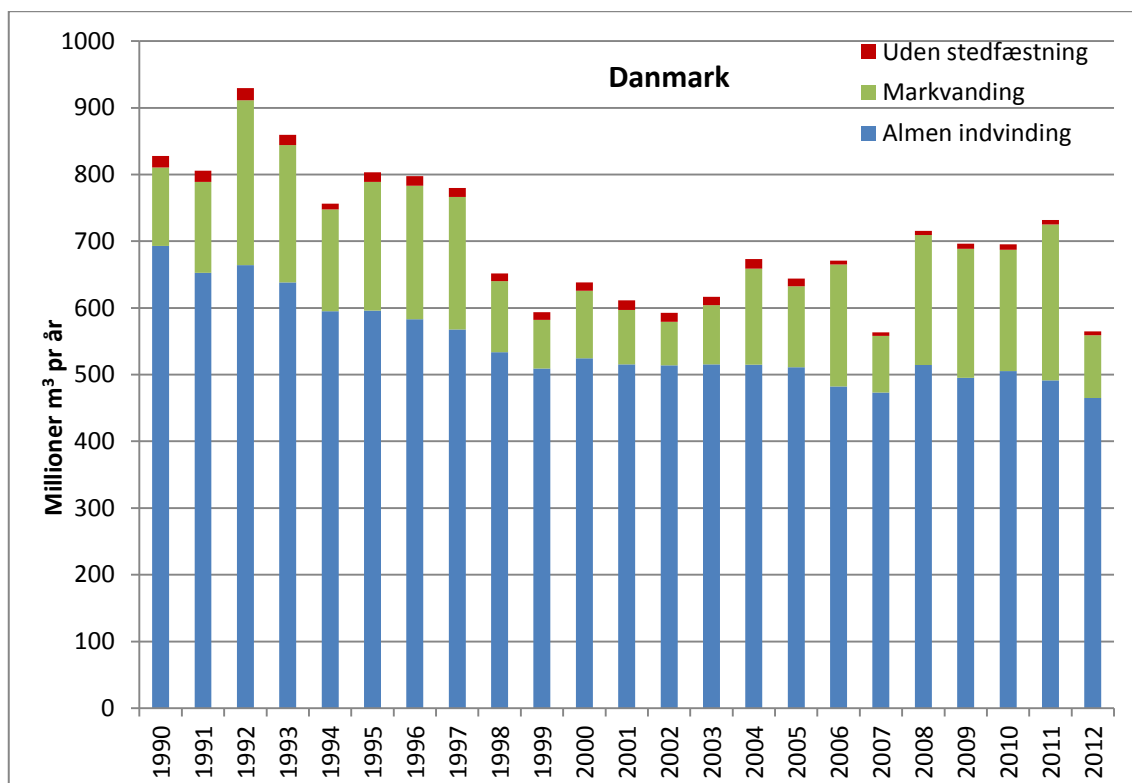
Figur 22. Middel dynamisk korrigeret nedbør for perioden 2000 – 2010.



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

3.8 Indvindingsforhold

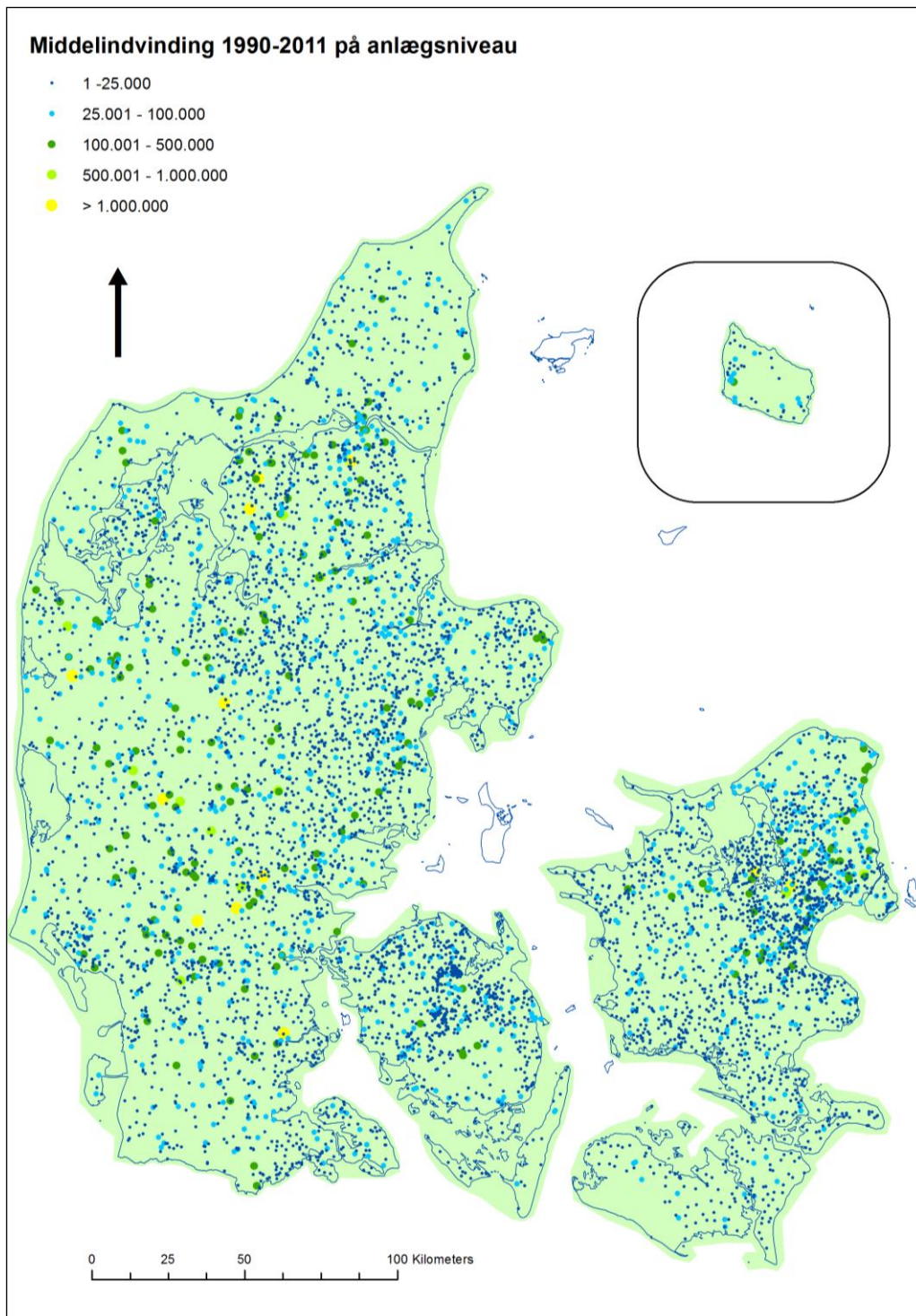
Udviklingen i den samlede indvinding i Danmark, er vist i Figur 24 for perioden 1990-2011. Det fremgår, at der er sket et fald på lidt under 30 % i indvindingen primært gennem 90'erne, fra ca. 700 til lidt under 500 mio. m³/år, et niveau, der har ligget rimeligt stabilt siden årtusindeskiftet. Udviklingen i de syv modelområder kan ses i Bilag 1, 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 2007-2011, hvilket må tilskrives fejl i indberetningen, idet data for 2012 er i niveau med perioden før 2001. Relativt set er der sket den største reduktion i DK2 (Lolland-Falster og øer) på ca. 40 % fra omkring 15 mio. til ca. 9 mio. m³/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 11 og 32 % af den årlige indvinding. Endelig fremgår det af figuren, at en mindre del (1,1-2,7 %) af den indberettede vandmængde ikke kan tilknyttes en boring, men blot er indberettet på anlægsniveau.



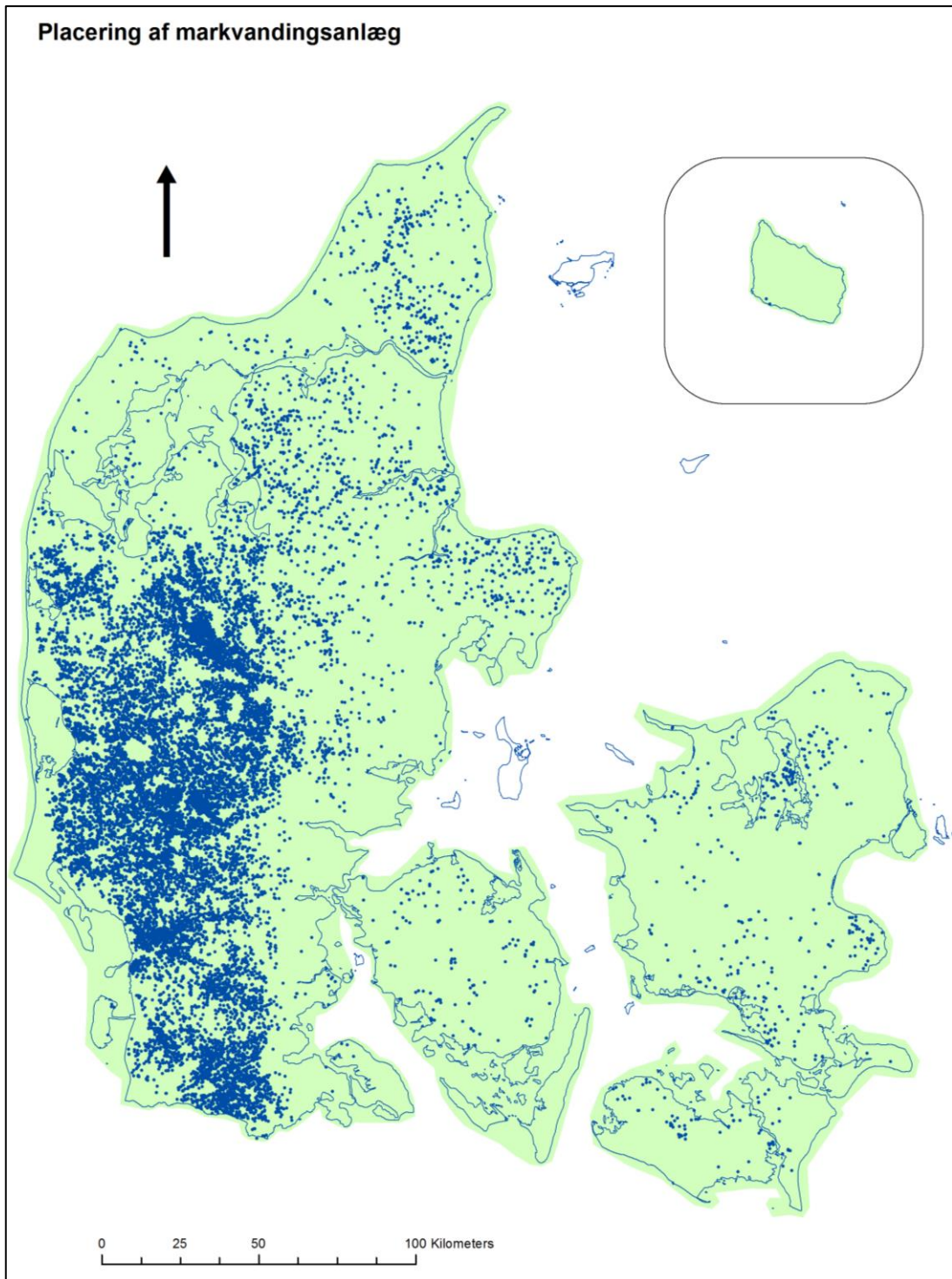
Figur 24. Udvikling i den samlede indvinding (ekskl. indvinding til markvanding) i Danmark i perioden 1990 - 2011.

Den rumlige fordeling af indvindingen er angivet på Figur 25, hvoraf det fremgår, at der er store lokale variationer i indvindingsforholdene med mange indvindinger placeret nær de store byområder; lidt overraskende findes de allerstørste indvindinger (over 1 mio. m³ pr. år) i det centrale Jylland, hvilket dels afspejler de geologiske forhold (store velydende sandmagasiner i Midt- og Vestjylland; mindre ydende magasiner i Østdanmark), dels at de store vandforsyninger har både reduceret og spredt den resterende indvinding. På 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 markvandsboringer.



Figur 25. Middel indvinding i $m^3/\text{år}$ for perioden 1990 – 2011 angivet på anlægsniveau.



Figur 26. Placering af markvandingsboringer.

4. Modelsystem

Som modelkoder er anvendt MIKE SHE og MIKE 11, der udgør et deterministisk fuldt distribueret og fysisk baseret modelkompleks til simulering af de væsentligste strømningsprocesser af det hydrologiske kredsløb på landfasen. Modellen blev konverteret til version 2009 under seneste opdatering (Højberg et al., 2010), men er ved projektets afslutning konverteret til version 2012.

I modelopsætningerne er følgende moduler anvendt:

- Overfladisk afstrømning (OL)
- Evapotranspiration (ET)
- Umættet grundvandsstrømning (UZ)
- Mættet grundvandsstrømning (SZ)
- Vandløbsbeskrivelse (MIKE 11)

Herunder gives en kort beskrivelse af de anvendte moduler. For detaljerede tekniske beskrivelser af MIKE ZERO modulerne henvises der til de relevante manualer (DHI, 2014a,b,c).

4.1 Overfladisk afstrømning

Overfladisk afstrømning kan genereres 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 11.

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 grundvandsspejlet 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. grundvandsspejlet står under extinction depth, og der sker en fri dræning. Det minimale vandindhold varie-

rer ligeledes lineært ned til et vandindhold svarende til visnegrænsen, der optræder, når grundvandspejlet ligger under extinction depth. Vandmængden til rådighed 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.

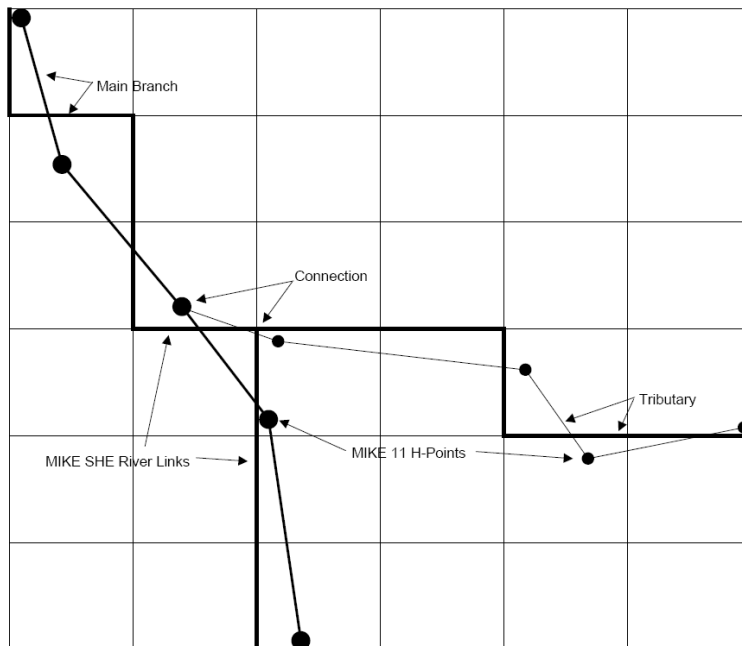
4.3 Grundvandsstrømning

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 tredimensionel beskrivelse af et heterogent magasinssystem 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 (2014b,c). 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 magasinintallene 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, drænastrømningen samt grundvandsindvinding. Vandstrømning i vandløb samt udveksling med grundvandet er beskrevet under afsnittet om MIKE 11. Koblingen mellem vandløbene (MIKE 11) og grundvandssystemet (MIKE SHE) 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 i MIKE SHE. 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 11 (fra DHI, 2008a)

Afstrømningen via dræn er baseret på en empirisk beskrivelse, hvor vandet bliver routet (flyttet) fra en drængenerende celle til en recipient via en lineær reservoir løsning. Drænastrømning 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 dræne. De styrende størrelser for drænastrømningen 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 drænastrømningen kan beskrives på flere måder i MIKE SHE. I denne opsætning er valgt: *Dræning baseret på grid koder*. Her defineres områder indenfor 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.

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 markvandringsrutine skal UZ og ET modulerne være medtaget i modelopsætningen. I markvandringsopsætningen 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 indenfor 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 11

Overfladevandssystemet (vandløb og søer) håndteres af MIKE 11, der er fuldt integreret med MIKE SHE. MIKE 11 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 11 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 beskrivelse af tværsnit). Ved beregningerne i MIKE 11 er det kun den samlede vandløbslængde og tværsnitsgeometri der er betydende, mens den geografiske placering af vandløbene kun har betydning, når MIKE 11 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 chainages 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 11 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 11 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 11 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 11) 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.

5. Modelopstilling

De syv delmodeller dækker tilsammen et landareal på i alt 43066 km², der er fordelt på de syv delområder som angivet i Tabel 8. 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)	9607,25	7178,00	6035000 - 6240000	615000 - 750000
DK2 (Sydhavsøerne)	3443,25	2033,00	6035000 - 6120000	615000 - 740000
DK3 (Fyn)	5329,25	3481,75	6064000 - 6167000	542000 - 628000
DK4 (Sønderjylland)	9674,25	7980,50	6071000 - 6186000	439000 - 571500
DK5 (Midtjylland)	13112,75	11743,25	6172000 - 6278000	439000 - 624000
DK6 (Nordjylland)	12632,50	10060,00	6248000 - 6405500	442000 - 602000
DK7 (Bornholm)	727.875	589,125	6109000 - 6145000	861000 - 894000
Samlet	54527,125	43065,625		

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 er dog, at den hydrostratigrafiske model for de øverste 3 m er defineret på baggrund af jordsartskortet og at det øverste beregningslag ligeledes er defineret med en konstant tykkelse på 3 m fra topografien. 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 af de hydrostratigrafiske lag.

5.1.1 Beregningslag – DK1, DK2 og DK3 (Sjælland, Sydhavsøerne og Fyn)

Den hydrostratigrafiske model for øerne (med undtagelse af Bornholm) består af sandlinser (magasiner) i op til fire vertikale niveauer for Sjællands og Sydhavsøerne samt tre vertikale

niveauer for Fyn, samt et underliggende kalklag der udgør et prækvartært magasin. Den hydrostratigrafiske model er repræsenteret i den numeriske grundvandsmodel ved anvendelse af gennemgående beregningslag for: toplaget (top3m), kalken samt den prækvartære ler over kalken på Fyn. 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 minimum tykkelse på 0,5 m for beregningslagene, der automatisk genereres af MIKE SHE under preprocesseringen. 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 prækvartær overfladen er anvendt som top mens kalken udgør den nedre grænse.

Den numeriske model består således af 10 og 12 beregningslag for hhv. Fyn og Sjælland/Sydhavserne. Den vertikale opdeling af modellen er illustreret på principskitserne Figur 6 og Figur 10, mens en beskrivelse af beregningslagene er angivet i Tabel 2 og Tabel 3.

5.1.2 Beregningslag – Jylland

I lighed med den numeriske model for øerne er det øverste beregningslag for hele Jylland gennemgående med en fast lagtykkelse på 3 m, der er repræsenteret ved de geologiske enheder i jordartskortet. Den samlede hydrostratigrafiske model for Jylland er defineret ved 25 flader, der beskriver op til tre vertikalt arrangerede sandenheder i den kvartære lagpakke og fire niveauer af sand i den prækvartære lagpakke samt en sand forekomst, der lokalt optræder umiddelbart over prækvartæroverfladen. I begge lagpakker kan der lokalt optræde lerlenser i sandenhederne, og nedadtil afgrænses tolkningen med 50 m kalk.

Der er imidlertid en betydelig 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 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 minimum tykkelse på 1 m for beregningslagene, der automatisk genereres af MIKE SHE under preprocesseringen. Mellem hvert sandlag er der defineret beregningslag til repræsentation af leret mellem de forskellige niveauer af sandlegemer.

Det skal erindres, at den geologiske tolkning, der ligger til grund for udviklingen af den hydrostratigrafiske model, i store områder udgøres af den nationale pixel tolkning. I disse

områder er det, baseret på pixeltolkning, søgt at afgrænse hydrostratigrafiske lag der overvejende er ler/sand, men lagene i den hydrostratigrafiske model vil ikke bestå udelukket af en hydrostratigrafisk enhed, eksempelvis ler eller sand, men vil indeholde pixler af begge enheder. I områder, hvor der er indlagt detailmodeller tolket som lagmodeller, vil lagene være karakteriseret ved én enhed.

DK4 - Sydjylland

I område 4 genfindes de tre kvartære sandenheder: KS1, KS2 og KS3, der alle er repræsenteret ved et selvstændigt beregningslag med mellemliggende ler. I prækvartæret genfindes primært PS1 og PS3. Det er derfor valgt at repræsentere PS1 ved et selvstændigt beregningslag, mens de dybereliggende enheder, ned til bunden af PS4, er slået sammen i ét beregningslag. Kalken underlejre det hydrostratigrafiske lag PS4 og underste beregningslag er defineret 50 m under bund af PS4. Den numeriske model for område 4 består således af 12 beregningslag. Den vertikale opdeling af modellen er illustreret på principskitsen, Figur 14, mens en beskrivelse af beregningslagene er angivet i Tabel 9.

Tabel 9. Numeriske beregningslag i delmodel DK4 - Sønderjylland

Beregningslag		Flade for bund af beregningslag	Relation til geologisk og hydrostratigrafisk model
Nr	Navn		
	Topografi	DK_topo500m_0	Topografi tilpasset 500 m grid, med kote 0 i havet
1	top3m_hav	dk_top3m500	Lag med konstant tykkelse på 3 m fra terræn. Geologisk består laget af opsprækket ler og sand/tørv ud fra jordartskortet.
2	kl1	dkmj_ks1t	Fra 3 m under terræn til top af første niveau med sandlinser. Laget består primært af kvartært ler (KL1).
3	ks1	dkmj_ks1b	Til bund af KS1. Indeholder primært kvartært sand (KS1)
4	kl2	dkmj_ks21t	Fra bund KS1 til top af KS2. Består primært af kvartært ler (KL2)
5	ks2	dkmj_ks22b	Til bund af KS2. Indeholder primært kvartært sand (KS2) samt lokal udbredelse af ler i KS2 (LKS2).
6	kl3	dkmj_ks31t	Fra bund KS2 til top af KS3. Består primært af kvartært ler (KL3)
7	ks3	dkmj_ks32b	Til bund af KS3. Indeholder primært kvartært sand (KS3) samt lokal udbredelse af ler i KS3 (LKS3).
8	kl4-pl1	dkmj_ps1t	Fra bund KS3 til top af PS1 (øverste prækvartære

Beregningslag		Flade for bund af beregningslag	Relation til geologisk og hydrostratigrafisk model
Nr	Navn		
			sand). Består primært af kvartært (KL4) og prækvartært ler (PL1)
9	ps1	dkmj_ps1b	Til bund af PS1. Indeholder primært prækvartært sand (PS1).
10	pl2	dkmj_ps21t	Fra bund PS1 til top af PS2. Består primært af prækvartært ler (PL2)
11	ps2-3	dkmj_ps3b	Til bund af PS3. Omfatter sandenheder i niveauerne PS2 og PS3 samt mellemliggende ler og ler i PS2 (LPS2)
12	bund_kalk	dkmj_ps4b-50m	Fra bund af PS3 til bund af model (50 m under nederste prækvartære sandenhed, PS4). Laget antager stor tykkelse og består primært af prækvartært ler underlejret af kalk.

DK5 - Midtjylland

De to øverste kvartære sandlag (KS1 og KS2) samt de overliggende lerlag (KL1 og KL2) er udbredt i størstedelen af modelområdet og repræsenteret ved individuelle beregningslag. Lerlaget KL3 samt den underste kvartære sandenhed (KS3) har kun en meget begrænset udbredelse indenfor modelområdet, og er derfor slået sammen til ét beregningslag. Af de øvrige tre sandenheder indeholder de indlagte detailmodeller primært information om PS1 og PS2 indenfor delmodel 5. Det er derfor valgt at slå det nederste kvartære og øverste prækvartære lerlag (KL4 og PL1) sammen i ét beregningslag. PS1 og det underliggende lerlag (PL2) er repræsenteret ved selvstændige lag, mens der er anvendt ét beregningslag til repræsentation af de underste enheder ned til bund af PS4. Underste lag er indlagt 50 under bunden af PS4.

På Djursland er kalken højtliggende, og de vekslende prækvartære sand og lerenheder genfindes ikke her. Det betyder, at de prækvartære beregningslag antager minimumstykkelsen på Djursland, og geologisk set består af kalk.

Den numeriske model består af 11 beregningslag. Den vertikale opdeling af modellen er illustreret på principskitsen, Figur 14, mens en beskrivelse af beregningslagene er angivet i Tabel 10.

Tabel 10. Numeriske beregningslag i delmodel DK5 - Midtjylland

Beregningslag		Flade for bund af beregningslag	Relation til geologisk og hydrostratigrafisk model
Nr	Navn		
	Topografi	dk_topo500m_0	Topografi tilpasset 500 m grid, med kote 0 i havet
1	top3m_hav	dk_top3m500	Lag med konstant tykkelse på 3 m fra terræn. Geologisk består laget af opsprækket ler og sand/tørv ud fra jordartskortet.
2	kl1	dkmj_ks1t	Fra 3 m under terræn til top af første niveau med sandlinser. Laget består primært af kvartært ler (KL1).
3	ks1	dkmj_ks1b	Til bund af KS1. Indeholder primært kvartært sand (KS1)
4	kl2	dkmj_ks21t	Fra bund KS1 til top af KS2. Består primært af kvartært ler (KL2)
5	ks2	dkmj_ks22b	Til bund af KS2. Indeholder primært kvartært sand (KS2) samt lokal udbredelse af ler i KS2 (LKS2).
6	kl3ks3	dkmj_ks32b	Til bund af KS3. Sandenheden KS3 samt ler mellem KS2 og KS3 har begrænset udbredelse i DK5 og er slået sammen til ét beregningslag
7	kl4pl1	dkmj_ps1t	Indeholder nederste ler i kvartæret og øverste ler i prækvartæret
8	ps1	dkmj_ps1b	Til bund af PS1 og indeholder primært den øverste prækvartære sandenhed
9	pl2	dkmj_ps21t	Består primært af ler der ligger mellem de øverste prækvartære sandenheder, PS1 og PS2
10	ps24	dkmj_ps4b	Indeholder de dybe prækvartære sandenheder samt mellemliggende ler. Det er primært PS2 der er beskrevet på basis af lokalmodeller
11	bund	dkmj_ps4b-50m	Bund placeret 50 m under PS4

DK6 - Nordjylland

I Nordjylland optræder de tre vertikale niveauer af sandenheder i den kvartære lagpakke der er repræsenteret, mens de prækvartære aflejringer næsten udelukkende udgøres af kalken. De tre sandenheder KS1, KS2 og KS3 samt de mellemliggende lerlag er derfor

repræsenteret ved individuelle beregningslag i modellen. Den prækvartære lagpakke består primært af lavpermeable enheder, men kan lokalt indeholde sandede enheder defineret i den geologiske pixelmodel. Pga. den ringe udbredelse af sand i prækvartæret er det valgt at repræsentere prækvartæret ved ét beregningslag, dog er det underste kvartære ler (KL4) og det øverste prækvartære lerlag (PL1) beskrevet ved selvstændige beregningslag. Nedadtil er modellen afgrænset ved et beregningslag der strækker sig 50 m under bunden af PS4.

Den numeriske model består af 10 beregningslag. Den vertikale opdeling af modellen er illustreret på principskitsen, Figur 14, mens en beskrivelse af beregningslagene er angivet i Tabel 11.

Tabel 11. Numeriske beregningslag i delmodel DK6 - Nordjylland

Beregningslag		Flade for bund af beregningslag	Relation til geologisk og hydrostratigrafisk model
Nr	Navn		
	Topografi	DK_topo500m_0	Topografi tilpasset 500 m grid, med kote 0 i havet
1	top3m_hav	dk_top3m500	Lag med konstant tykkelse på 3 m fra terræn. Geologisk består laget af opsprækket ler og sand/tørv ud fra jordartskortet.
2	kl1	dkmj_ks1t	Fra 3 m under terræn til top af første niveau med sandlinser. Laget består primært af kvartært ler (KL1).
3	ks1	dkmj_ks1b	Til bund af KS1. Indeholder primært kvartært sand (KS1)
4	kl2	dkmj_ks21t	Fra bund KS1 til top af KS2. Består primært af kvartært ler (KL2)
5	ks2	dkmj_ks22b	Til bund af KS2. Indeholder primært kvartært sand (KS2).
6	kl3	dkmj_ks31t	Fra bund KS2 til top af KS3. Består primært af kvartært ler (KL3)
7	ks3	dkmj_ks32b	Til bund af KS3. Indeholder primært kvartært sand (KS3).
8	kl4	dkmj_preq	Fra bund KS3 til overfladen af prækvartæret. Består primært af kvartært ler (KL4).
9	pl1	dkmj_ps1t	Til top af det øverste prækvartære sand. Indeholder primært prækvartært ler (PL1)
10	kalk	dkmj_ps4b-50m	Til bund af model placeret 50 m under den dybeste prækvartære sand enhed

5.1.3 Beregningslag – DK7 (Bornholm)

Den hydrogeologiske tolkning for Bornholm er baseret på en pixeltolkning, og der er ikke udviklet en egentlig 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, som de øvrige modeller, 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

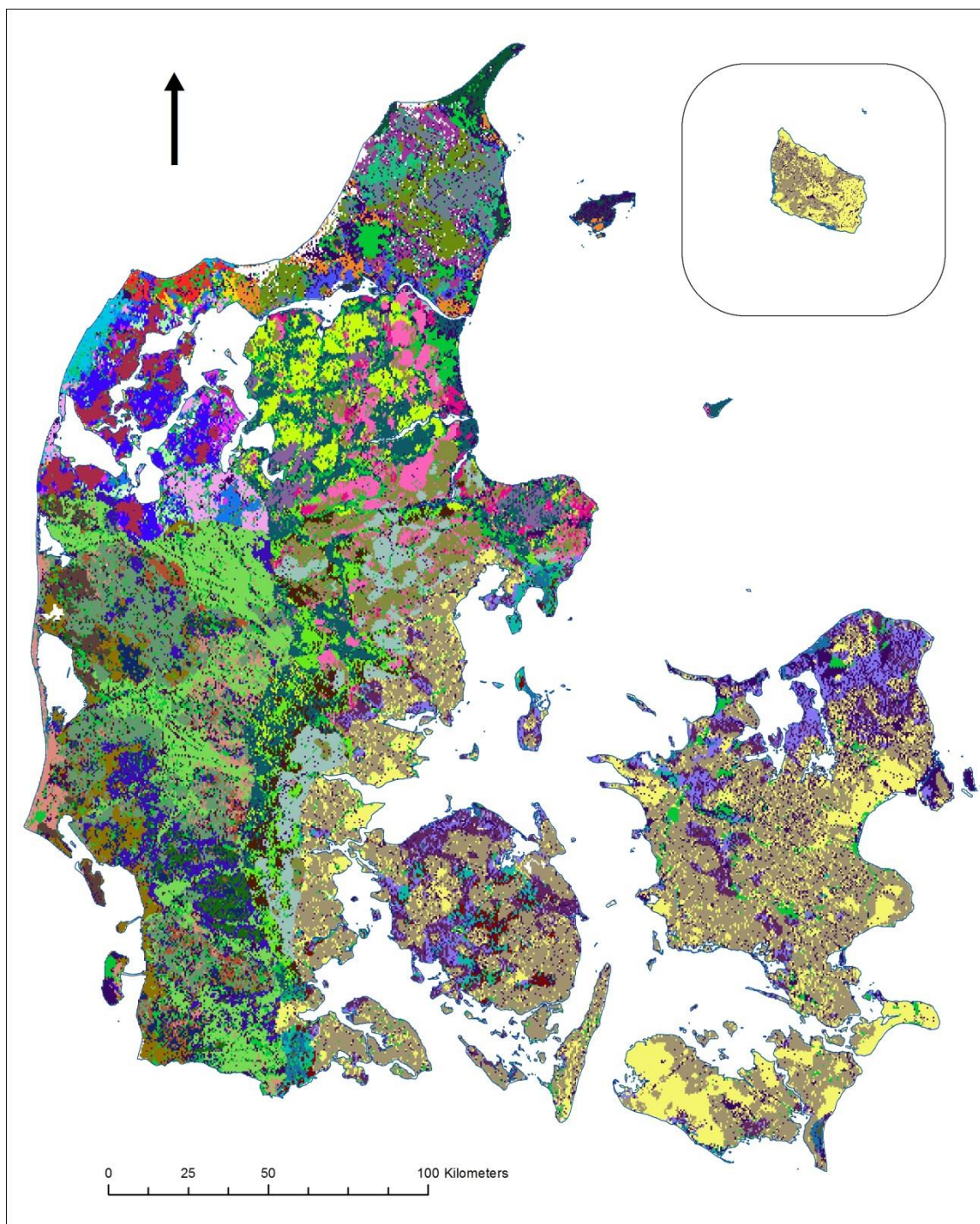
Den drivende variabel for grundvandsdannelsen er nettonedbøren, der beregnes med det integrerede Two-Layer UZ-modul baseret på daglige værdier for nedbør, potentiel fordampning og temperatur. Som input er der anvendt DMI klimagrid i opløsningerne 10 x 10 km for nedbør (Vejen et al, 2014) samt 20 x 20 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 anbefalinger 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, der til kalibrering af modellen var tilgængelig for perioden 1990 – 2010. Desuden er reference fordampningen korrigeret med en faktor 0.95 for arealet Vest for Storebælt, som anbefalet i (Refsgaard et al., 2011). Der er genereret klimafilere dækkende hele landet for hhv. nedbør, reference fordampning samt temperatur.

Nedbør der rammer modeloverfladen vil være tilgængelig for nedsivning til grundvandet. En stor del af den nedbør der falder på bebyggede arealer vil imidlertid bortledes direkte vandløbene via kloakering og således ikke give tilskud til grundvandsdannelsen. Dette er medtaget i modellen ved anvendelse af MIKE SHE optionen "Paved Area", hvor det er muligt at angive et areal indenfor hvilket en specificeret andel af nedbøren ledes direkte til vandløbet eller til modelranden. Bortledningen af vand fra disse arealer følger dræningsætningen, se herunder. Fraktionen af vand der skal bortledes fra hvert grid i modellen er beregnet på basis af et GIS tema (Levin, 2012), der i en 10 x 10 m opløsning angiver hvor impermeabelt griddet er, opdelt i fem kategorier (0, 25, 50, 75, 100). 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 griddet, der er impermeabelt, hvilket er anvendt som fraktionen af vand der bortledes fra paved area. For et grid hvor graden af impermeabel undergrund er 100 % bortledes alt vandet således via paved area funktionen. For de øvrige områder vil den aktuelle nedsivning være betinget af, hvorvidt vandet kan nå at infiltrere indenfor et

tidsskridt, hvilket er styret af de hydrauliske egenskaber for overjorden. Den del af nedbøren der ikke kan nå at infiltrere vil være til rådighed for overfladisk afstrømning.

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 ledningssevne 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 estimeret af DJF (VMP III). 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 B2-8 i Bilag 2.



Figur 28. Georegionskortet resamplet til gridopløsningen i DK-modellen.

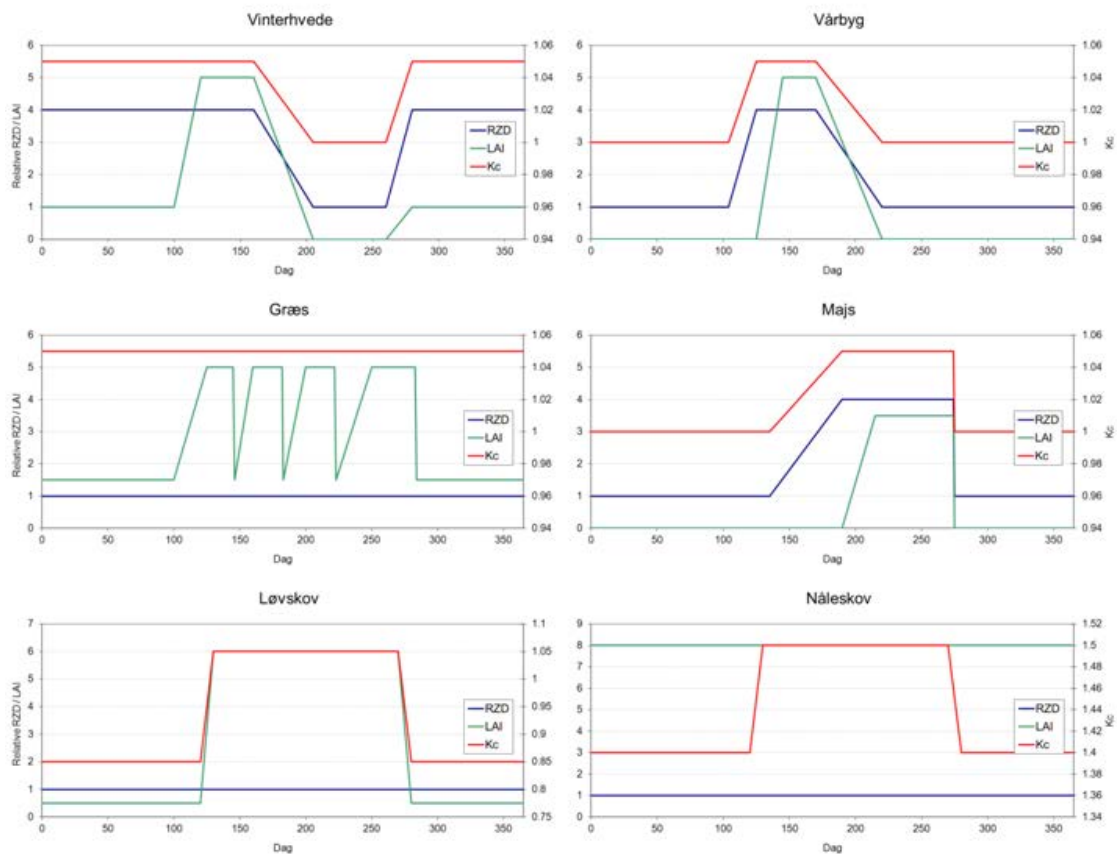
Rodzonedybden (RZD) er en anden væsentlig parameter i Two-layer modulet og afhænger af såvel vegetationstype samt jordbundens beskaffenhed. Rodzonedybden vil således være forskellig for eksempelvis skov og landbrugsarealer, ligesom der vil være forskel på arealer med en permanent afgrøde og arealer, 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 jord-

bundsforholdende, 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 12 mens rodzonedybderne for skov kan aflæses på Figur 29.

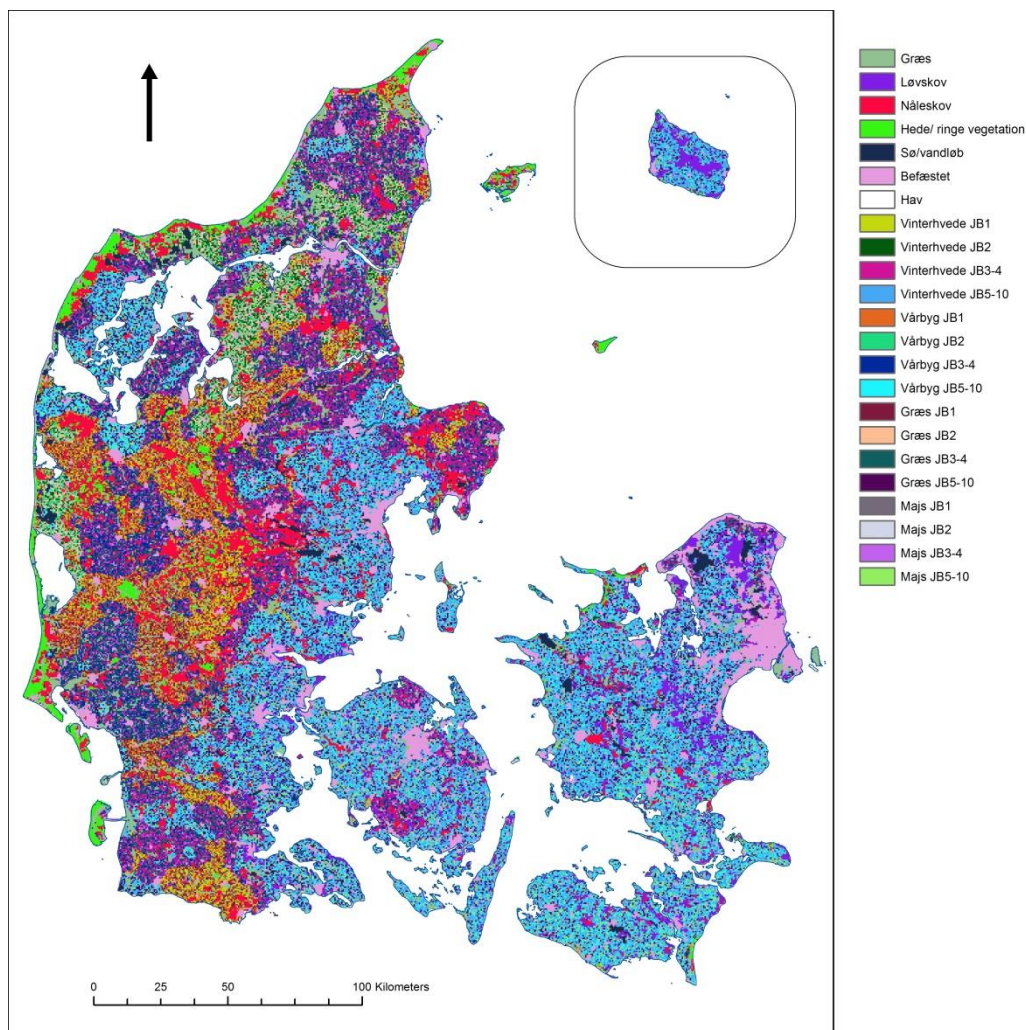
Tabel 12. Maksimale effektive rodzonedybde (mm) for forskellige afgrøder og jordbundstyper (JB), der er anvendt som initialværdier ved kalibrering.

JB	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 indenfor 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 12). For alle vegetationstyper er der specificeret værdier for bladareal indeks (LAI), rodzonedybde (RZD) samt en afgrøde koeficient (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)

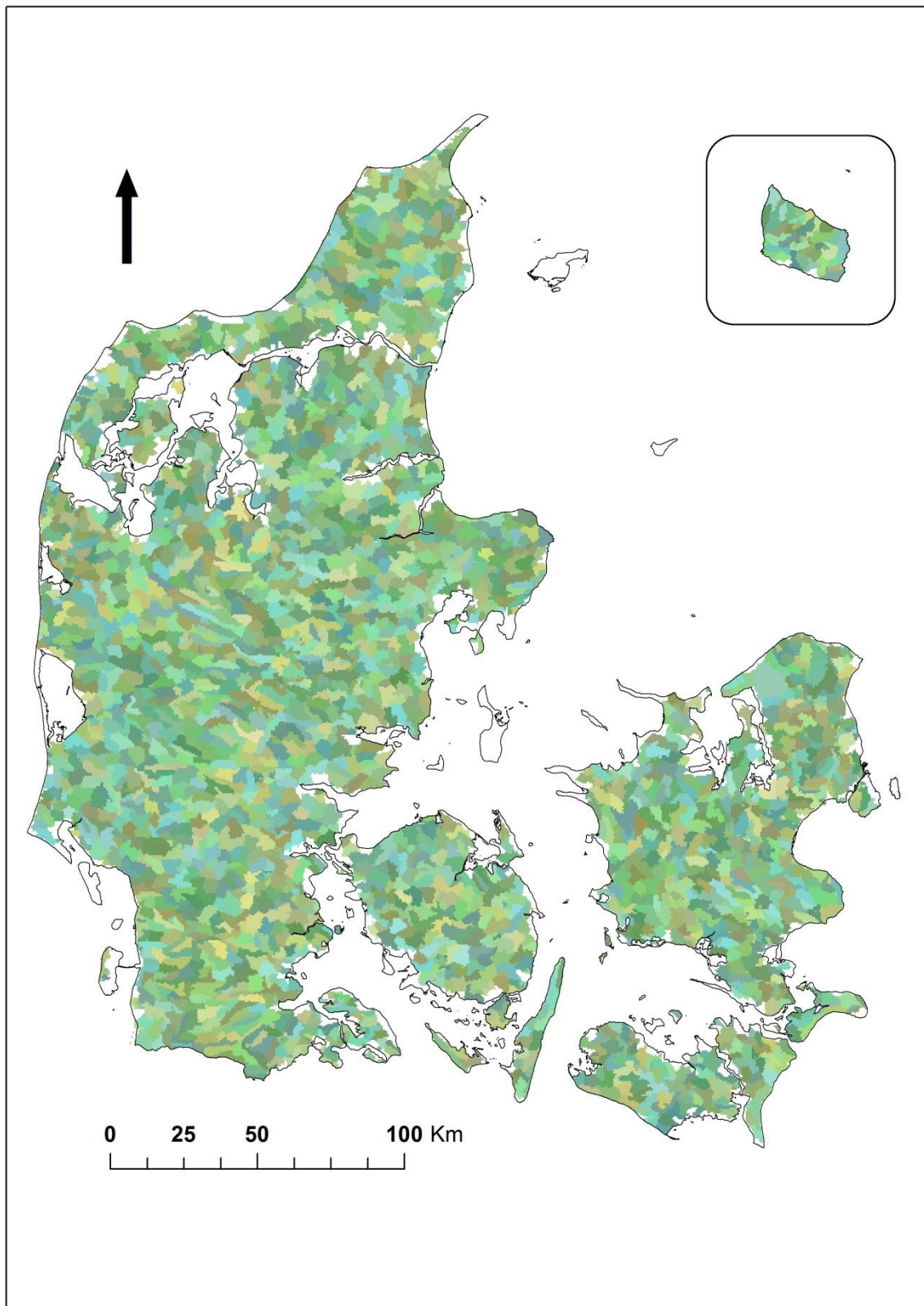


Figur 30. Rumlig fordeling af arealtypekoder

Der er indlagt dræn i alle delmodelområder i en konstant dybde på 0,5 m under terræn. Dræningen sker til nærmeste vandløb ved definition af drænoplande. Oplandene er defineret på basis af et GIS-polygontema, der afgrænser 3134 topografiske oplande med et middel areal på ca. 15 km², de såkaldte "ID15-oplande", der også er anvendt i den nationale kvælstofmodel (Højberg et al., 2015) og ved vurdering af indvindings effekt på vandføringen (Henriksen et al., 2014). Drænoplandene 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 11 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 preprocessing i MIKE SHE er drænoplandene gennemgået, og oplande med dræning til lokal depression er tildelt samme drænkode som nærmeste opland med MIKE 11 vandløb inden for samme vandløbsopland.

Det resulterende drænkodekort er illustreret i Figur 31.

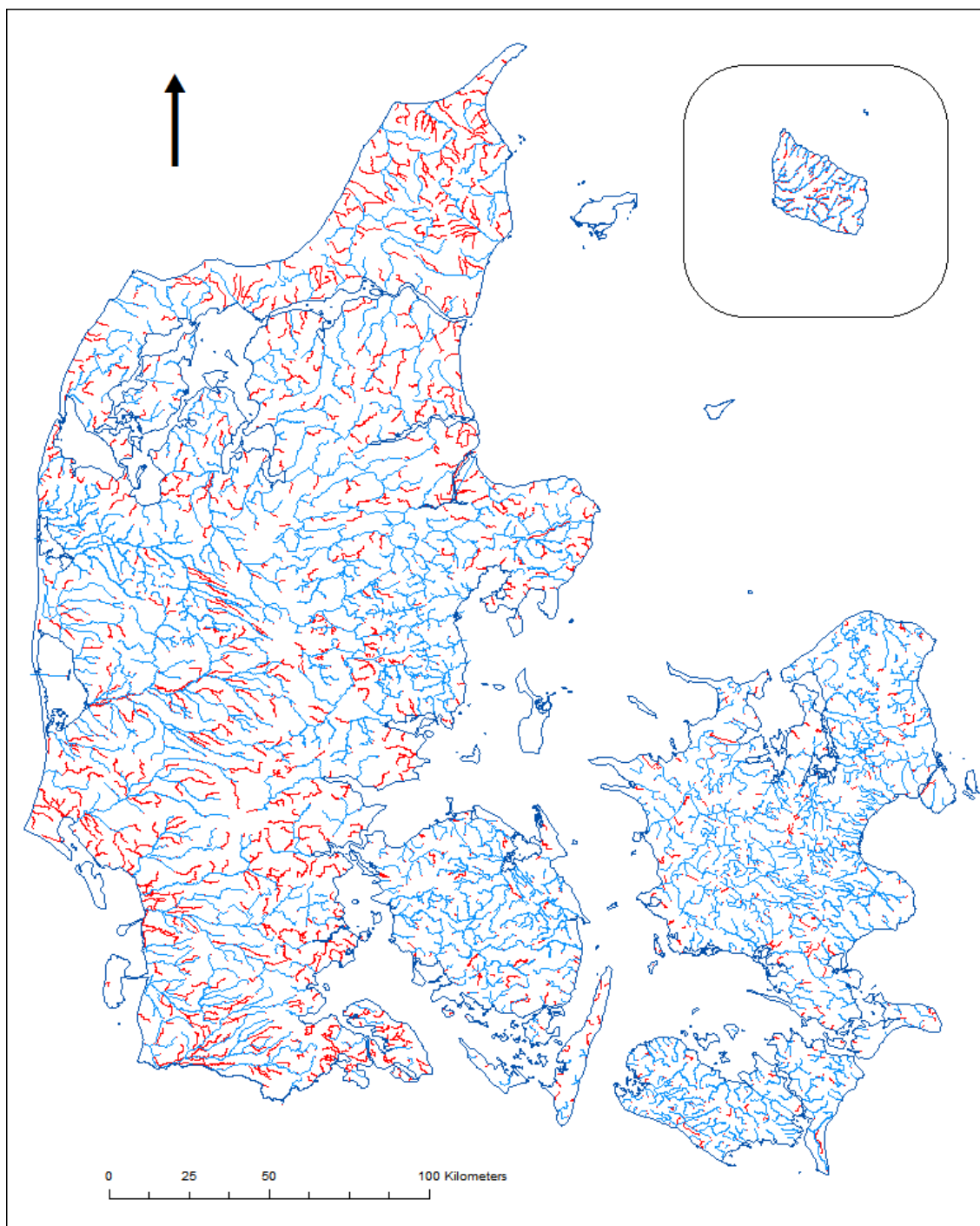


Figur 31. Drænkoder til bestemmelse af drænstrømningen. Indenfor hver drænkodes polygon drænes der til nærmeste vandløb. De hvide områder er kystnære 1. ordens vandløbsoplande uden MIKE11 vandløb, fra disse arealer drænes der direkte til havet.

5.3 Vandløb og Søer

5.3.1 Vandløbsnetværk

Vandløbsnetværket er blevet opdateret to gange siden DK-model version 2009. I 2011 blev der tilføjet omkring 130 vandløbsstrækninger for at opnå en mere homogen rumlig repræsentation af vandløbene. Et vigtigt element ved opdatering af DK-modellen til version 2014, har været en udbygning af vandløbsnetværket for at sikre, at hver af de 3134 ID15-oplande indeholder mindst et vandløb. Undtaget herfra er dog kystnære oplande, hvor der ikke eksisterer velafgrænsede topografiske oplande, men hvor afvandingen til hav sker via flere mindre grøfter og/eller ved diffus udstrømning. I DK-model2014 er vandløbsnetværket udbygget med yderligere 950 vandløbsstrækninger. Samlet indeholder DK-model2014 i alt 2731 vandløbsstrækninger, med en samlet længde på knap 16.000 km, Figur 32, med en fordeling for de enkelte delområder som vist i Tabel 13. 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 11 filer (netværks-, tværsnits- og randbetingelsesfiler), som er tilføjet den eksisterende MIKE 11 opsætning.



Figur 32. Oversigt over vandløbsstrækninger medtaget i MIKE 11. Strækninger angivet med blåt stammer fra DK-model2009, mens strækninger tilføjet ved opdateringen (DK-model2014) er angivet med rødt.

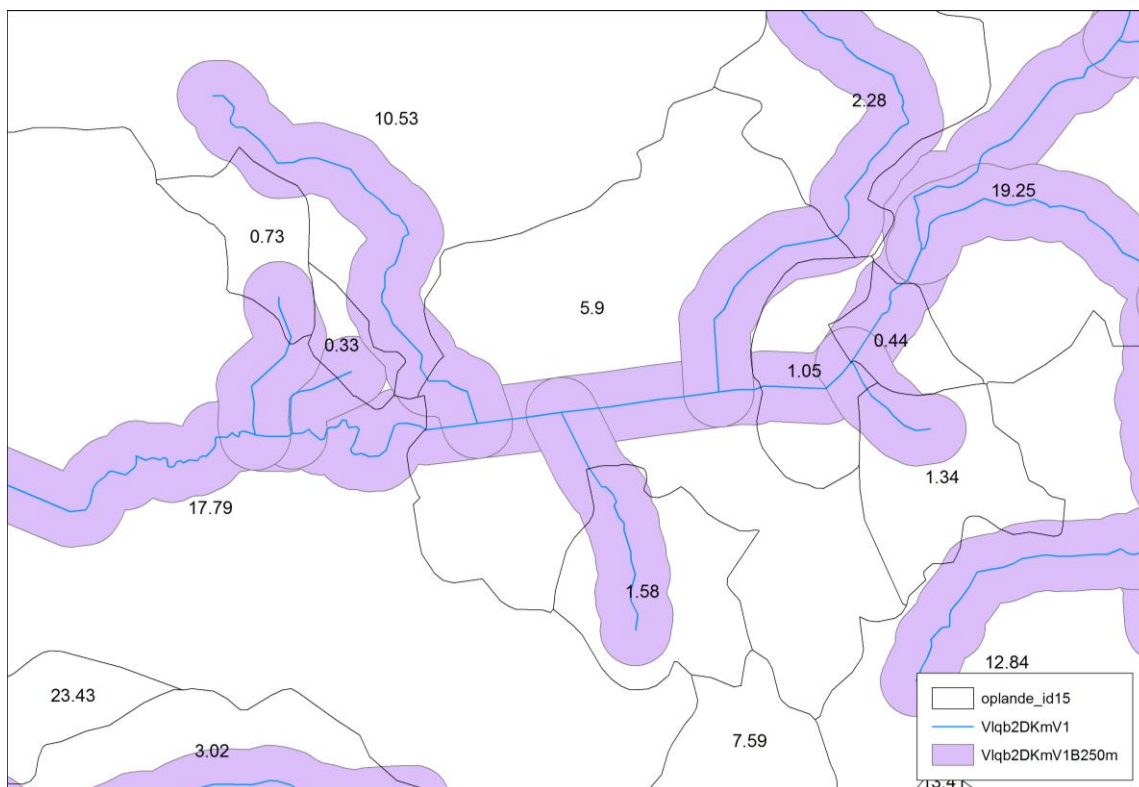
Tabel 13. Vandløbsstrækninger og samlet antal km i hvert modelområde. Tal i parentes angiver opdateringen fra DK-model version 2009 til 2014.

<i>Modelområde</i>	<i>Antal</i>	<i>Km</i>
1	644 (132)	2789 (266)
2	190 (39)	809 (72)
3	245 (64)	1278 (164)
4	438 (298)	3011 (1433)
5	723 (252)	4596 (1019)
6	436 (293)	3107 (1425)
7	54 (9)	253 (16)
Total	2730 (1087)	15843 (4395)

Det nye vandløbsnetværk for DK-model2014 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-model2014 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 indenfor 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 33, 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 11 har det derfor i nogle tilfælde været nødvendigt at foretage mindre justeringer i vandløbsnetværksfilen, så der på nogle strækninger ikke er udveksling mellem MIKE 11 og MIKE SHE. Det har ingen betydning for vandløbsberegningerne i MIKE 11, da alle vandløb er beholdt med deres korrekte længde. Ved kobling mellem MIKE 11 og MIKE SHE vil der dog 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 33. Meget små ID15 oplände (0,33 km² og 0,73 km²) hvor indbyrdes afstand mellem vandløbsstrækninger er mindre end 500 m.

5.3.2 Vandløbstværsnit

I MIKE 11 angives tværsnittenes udformning ved en række x-z punkter, Figur 34, hvor z-koordinaten enten kan angive en absolut kote eller en relativ kote, hvor sidstnævnte kombineres med et 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.

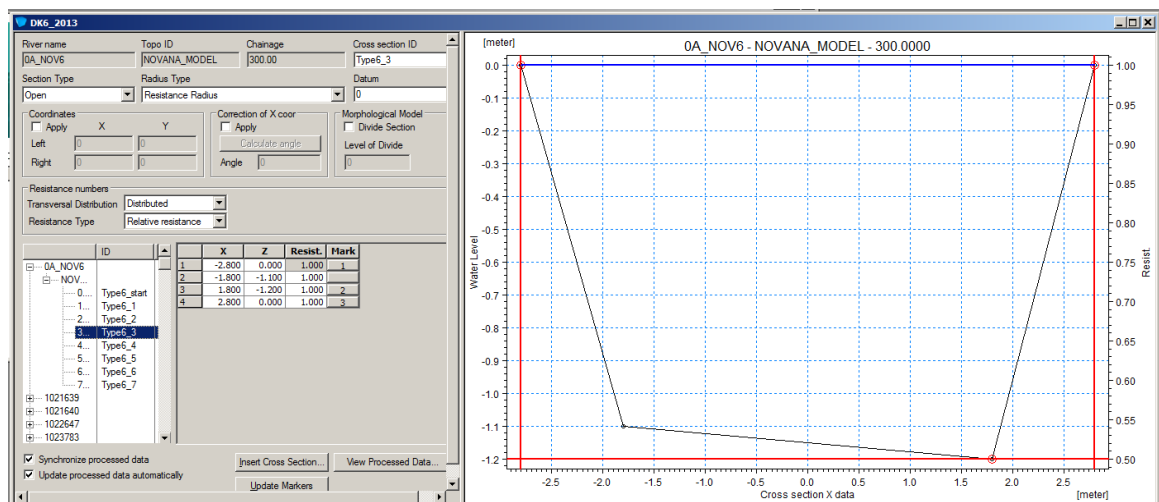
For de nye vandløbsstrækninger, der er tilføjet til DK-model2014, er vandløbstværsnittene beskrevet ved typetværsnit da der ikke er tilgængelige opmålinger for disse vandløb. Dimensioneringen af disse typetværsnit er foretaget som beskrevet i (Olsen og Højberg, 2011). Metoden bygger på en analyse af 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 14 kan der de enkelte delop-

lande således aflæses en dimension for vandløbets start samt slutpunkt, hvor størrelsen ved slutpunktet afhænger af oplandets areal.

Tabel 14. 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-model2014 er udformet som simple trapezoider, Figur 34, hvis størrelse vokser i nedstrøms retning (Olsen og Højbjerg 2011). Der er kun ét udvekslingspunkt mellem MIKE SHE og MIKE 11 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. En stor del af den oprindelige MIKE 11 vandløbsopsætning er dog overtaget fra DK-model2003, hvor gridcellestørrelsen var 1000 m og hvor afstand mellem vandløbstværsnit er maksimum 1000 m.



Figur 34. Eksempel på vandløbstypetværsnit i MIKE 11 fra delområde 6 med et oplandsareal på 20-30 km² (Olsen og Højbjerg 2011).

Kote (datum) for vandløbstværsnit i DK-model2014 er justeret i forhold til topografien efter den Danske Højdemodel (1.6 m DEM) fra KMS og ved hjælp af programmet CrossSectionHeights (HydroInform 2014). Efterfølgende er CrossSectionHeights anvendt til at sikre et

kontinuerligt fald i alle vandløbsstrækninger, der ikke indeholder opmålte tværsnit, søer eller andre tydelige opdæmninger, ved at justere koten på de enkelte tværsnit. Desuden er CrossSectionHeights anvendt til at kontrollere bundkoterne ved sammenløb af vandløb. 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.

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 11 specificeret en konstant minimumsvandføring opstrøms på 1 l/s, så vandløbene ikke løber tør. 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 11). Inden for hvert delmodelområde er der ikke foretaget en distribuering af den hydrauliske ledningsevne for vandløbsbunden, og variationen i lækagekoefficienten er således alene bestemt af variationen i den omkringliggende geologi.

Der anvendes en simpel beskrivelse af søer, hvor disse indlægges i modellen som brede MIKE 11 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 MIKE 11 strækninger, der repræsenterer søer, dog med den begrænsning at der kun kan angives én strækning med 'user-defined' Q-h relation per MIKE 11 strækning. 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 udveksling 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 MIKE 11 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 gridet. Det betyder, at modellen ikke er egnet til en detaljeret beskrivelse af dynamikken i og tæt ved søerne samt udvekslingen mellem søer og grundvand.

5.3.3 Punktkilder

Der er ikke en direkte offentlig adgang til et nationalt kvalitet sikret datasæt for udledning fra punktkilder. Baseret på data fra Fagdatacentret for punktkilder (tidligere Miljøstyrelsen, nu under Naturstyrelsen) har DCE imidlertid opbygget en base til intern brug, og har gennem deres anvendelse foretaget en fejlretning. Dette datasæt vurderes 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.

I Tabel 15 er der givet en sammenligning af datasættene for spildevandsudledning som indlagt i DK-model2009 og som modtaget af DCE. Som det fremgår heraf er DCE's spildevandsdatasættet langt mere omfattende end det der blev anvendt i DK-model2009.

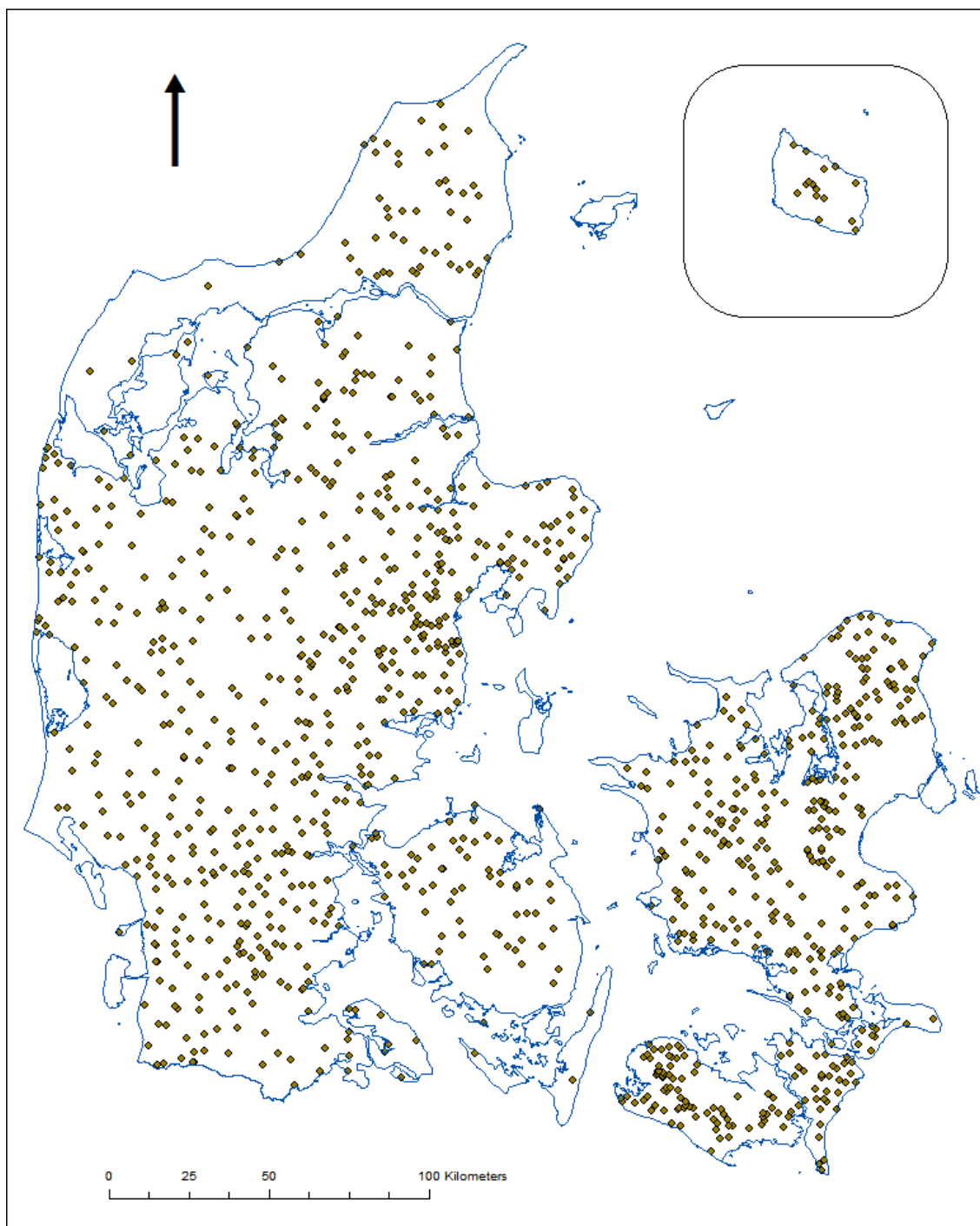
Tabel 15. Sammenligning af spildevandsdata i DK-model2009 og data modtaget fra DCE.

<i>Udvælgelseskriterier</i>	<i>DK-model2009</i>	<i>DCE</i>
Samlet	1208	2336
På land og >100m fra kyst	1199	1936
Data i perioden efter 2000	771	1140

Spildevandsdatasættet til DK-model2009 udgøres af 1208 udledninger, men en del af disse har kun ringe hydrologisk betydning pga. en meget lille spildevandsudledning, kun ældre data (før kalibrerings og valideringsperiode i DK-modellen) eller kun data fra et enkelt år. I spildevandsdatasættet til DK-model2014 er det valgt at medtage alle spildevandsudledninger med udledningsdata efter 2000, Tabel 15 (1140), samt alle stationer der i perioden før år 2000 har haft en gennemsnitlig udledning på mere end $0,005 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (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 MIKE 11 vandløbsopsætningen ved i ARCGIS at koble udledningen til det vandløb der ligger tættest på og inden for samme ID15-opland. Placeringen af de indlagte spildevandsudledninger fremgår af Figur 35.



Figur 35. Punktkildeudledning medtaget i DK-model2014.

Tabel 16. Antal spildevandsudledninger der er inkluderet i MIKE 11 vandløbsopsætning for de forskellige delmodeller i DK-model2014.

<i>Delmodel</i>	<i>Spildevandsudledninger</i>
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 udledningensvolumen angivet som årsudledninger (mio. m³ per år), der er distribueret til daglige værdier i MIKE 11 vandløbsopsætningen ved at antage, at udledningen er ligelig fordelt over året dvs. dividere den årlige udledningensvolumen med 365.

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 indvindingerens størrelse og betydning for vurdering af den overordnede vandbalance. Samtlige indvindinger er endvidere fordelt jævnt ud på de enkelte indtag indenfor et anlæg.

Data er udtrukket som en række Access filer fra Jupiter med data fra januar 1990 til august 2013. Data er processeret vha. programmet "WellViewer" udviklet af HydroInform (2014) specifikt til dette formål. I WellViewer er indtag tilhørende anlæg med en årlig indvinding under 1 m³/år frasortet, 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 17. Findes der ingen oplysning om boreddybde, top/bund eller forerør, vil boringen ikke blive anvendt i modelberegningerne. Det samme gør sig gældende, hvis der ikke er oplysninger om boringens placering (XY-koordinater), derfor vil indvindingen fra et anlæg kun blive fordelt ligeligt på de tilknyttede boringer, der kan indplaceres både vertikalt og horisontalt. Nedenfor er der flere oplysninger om, hvor mange boringer, anlæg og hvor store tilknyttede indvindingsmængder, der pga. mangelfulde informationer ikke kan placeres og derfor ikke anvendes i modelberegningerne.

Tabel 17. 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

For delmodellerne DK1, DK2 og DK3, 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 lerenhed 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 500x500 m grids er for grov til at opløse mindre variationer, hvorved et indtag kommer til at falde udenfor 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 koteangivelse ikke falder indenfor en magasinenhed, er følgelig blevet henført til en sådan, 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. Dette er angivet for hele landet i Tabel 18, mens tallene for de enkelte delmodeller er vist i Bilag 1.

Tabel 18. Oversigt over middelindvinding (mio. m³/år) samt størrelsen af ikke stedfæstet indvinding for hele DK.

År	Grundvand	Ikke stedfæstet	Overfladevand	% ikke stedfæstet
1990	828	17	6	2,4
1991	806	17	5	2,5
1992	929	18	5	2,6
1993	859	15	5	2,4
1994	756	8	4	1,4
1995	803	15	5	2,4
1996	798	14	5	2,4
1997	780	13	5	2,3
1998	652	11	4	2,1
1999	593	11	4	2,2
2000	638	12	4	2,3
2001	611	14	5	2,7
2002	593	13	4	2,5
2003	617	13	5	2,4
2004	673	15	4	2,7
2005	644	12	3	2,2
2006	671	6	0	1,2
2007	563	5	1	1,1
2008	715	6	0	1,2
2009	697	8	15	1,6
2010	695	8	0	1,6
2011	732	7	0	1,4

Det endelige resultat af databehandlingen er gengivet i Tabel 18, hvor den årlige middelindvinding (minus markvanding) er beregnet på basis af perioden 1990 – 2011 (se i øvrigt Figur 24). Af tabellen fremgår det desuden, hvor stor en del af indvindingen, der ikke indgår i beregningerne pga. manglende stedfæstning, på landsplan mellem 0,9 % og 2,6 %. Der er imidlertid stor forskel mellem de forskellige områder, se Tabel 19, idet al indvinding i DK7 er stedfæstet, mens DK2, DK3 og DK5 alle år ligger under 1 %. I den lidt tungere ende ligger DK1, DK4 og DK6, der ofte ligger mellem 3 % og 4 % og enkelte år når op over 4 % af den samlede årlige indvindingsmængde. Tabeller for de enkelte modelområder kan ses i Bilag 1.

Tabel 19. Oversigt over hvor stor en procentdel af indvindingen (markvanding undtaget), der ikke indgår i modelberegningerne pga. manglende indplacering.

År	DK1	DK2	DK3	DK4	DK5	DK6	DK7
1990	3,6	0,3	0,5	2,7	0,5	2,3	0
1991	3,9	0,3	0,5	2,3	0,6	2,3	0
1992	3,9	0,3	0,4	2,4	0,7	2,3	0
1993	3,5	0,3	0,4	2,3	0,6	2,1	0
1994	0,5	0,3	0,5	3,1	0,7	1,6	0
1995	3,8	0,3	0,5	2,6	0,6	1,6	0
1996	3,4	0,4	0,5	2,6	0,6	2,2	0
1997	3,7	0,5	0,5	2,7	0,5	1,8	0
1998	3,1	0,5	0,2	2,7	0,3	2,4	0

1999	3,3	0,5	0,3	3,4	0,2	2,4	0
2000	3,8	0,5	0,4	2,6	0,3	2,4	0
2001	3,8	0,5	0,5	3,9	0,3	3,5	0
2002	3,9	0,5	0,5	4,1	0,2	2,3	0
2003	3,8	0,5	0,6	3,9	0,3	1,9	0
2004	4,2	0,6	0,7	3,8	0,3	2,6	0
2005	4,1	0,7	0,6	1,1	0,3	2,2	0
2006	0,9	0,3	0,4	1,1	0,1	2,6	0
2007	1,2	0,3	0,6	0,8	0,2	1,9	0
2008	1,4	0,2	0,1	0,7	0,2	1,6	0
2009	1,4	0,2	0,1	1,7	0,3	3,0	0
2010	2,0	0,2	0,2	0,5	0,3	3,1	0
2011	1,5	0,4	0,2	0,5	0,1	3,4	0

Den manglende indplacering skyldes i nogen grad mangelfulde informationer om indtagenes, XY-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 20. 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 18.

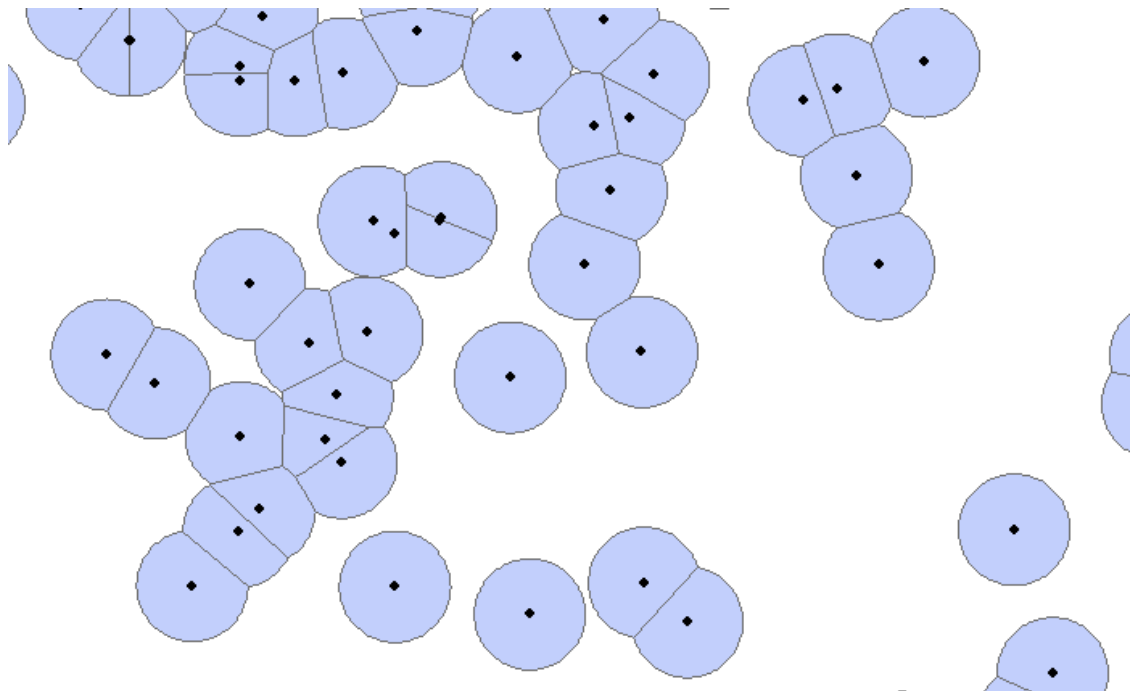
Tabel 20. Anlæg uden tilknyttede boringer, og boringer med manglende informationer.

	Antal anlæg	Heraf anlæg uden tilknyttede boringer	Antal boringer	Boringer med manglende oplysninger
DK1	2.017	151	6.907	119
DK2	191	15	910	16
DK3	1.005	45	3.274	107
DK4	1.324	120	3.906	134
DK5	2.062	121	5.175	135
DK6	1.582	168	4.212	292
DK7	63	0	281	3
Hele DK	8.244	620	24.665	806

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 buf-

ferzone omkring hver boring. Det medfører, at det vandede areal per boring vil variere i størrelse alt efter, hvor tæt borerne står, se Figur 36.



Figur 36. 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 Jysk modelområde indtil der er opnået bedst mulig overensstemmelse med de årlige markvandingsmængder afrapporteret i grumo rapporter 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 preprocesseringsfasen 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	0,05 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 720 timer svarende til hver 30. dag.

6. Kalibreringsstrategi og data

De enkelte delmodeller er kalibreret inverst ved anvendelse af en dynamisk version af modellen. Den inverse kalibrering blev gennemført ved anvendelse af det modelafhængige optimeringsprogram PEST ver. 13 (PEST). PEST er ikke inkluderet i MIKE SHE's brugerflade, hvorfor koblingen er sket "bagom" MIKE SHE brugerfladen. Modellen er opstillet for perioden 1990 – 2010. 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 opvarmingsperiode for modellen. Der er anvendt en split-sampling test, hvor den 4-årige periode: 1. jan. 2000 – 31. dec. 2006 anvendes til kalibrering, mens to perioder er anvendt til validering. De to valideringsperioder er dels den efterfølgende 4-årige periode: 1. jan. 2007 – 31. dec. 2010 samt den foregående 4-årige periode: 1. jan. 1996 – 31. dec. 1999.

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 være 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 foretaget en fejlscreening for manglende x,y-kordinater 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. For øerne Sjælland, Sydhavsøerne og Fyn, er den hydrostratigrafiske og den numeriske model opbygget af vekslende sand og lerlag. 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 overensstemmelse 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 borer, 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 maksimalt +/- 15 m. Disse indtag får specificeret nye indtagsbund-, midt- og topkoter svarende til det vandførende lag de flyttes til.
3. For de resterende 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 Jylland og Bornholm vil de enkelte lag i den hydrostratigrafiske model og derved også den numeriske model indeholde såvel sand og ler pixler, med undtagelse af områder hvor der indbygget tidligere amtsmodeller. 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.

Efter indplacering af indtagene i modellen er der foretaget en gennemgang og kvalitetssikring af peyledata, 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 indenfor perioden 1990 – 2010 og hvor der samtidigt er data efter 1999. I gennemgangen er outlier i tidsserier frasortet 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 frasortet.
- Vurderet at være indvindingspåvirket. Observationer fra borer placeret tættere end 250 m på en indvinding med en indvinding på mere end 50.000 m³/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 indvindings-tragt, 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.
- Meanpejl 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. De øvrige pejlinger er derfor medtaget i kalibrering ved anvendelse af programmet "Layerstatistics" (HydroInform, 2014). 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 resultat-filen. 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 21

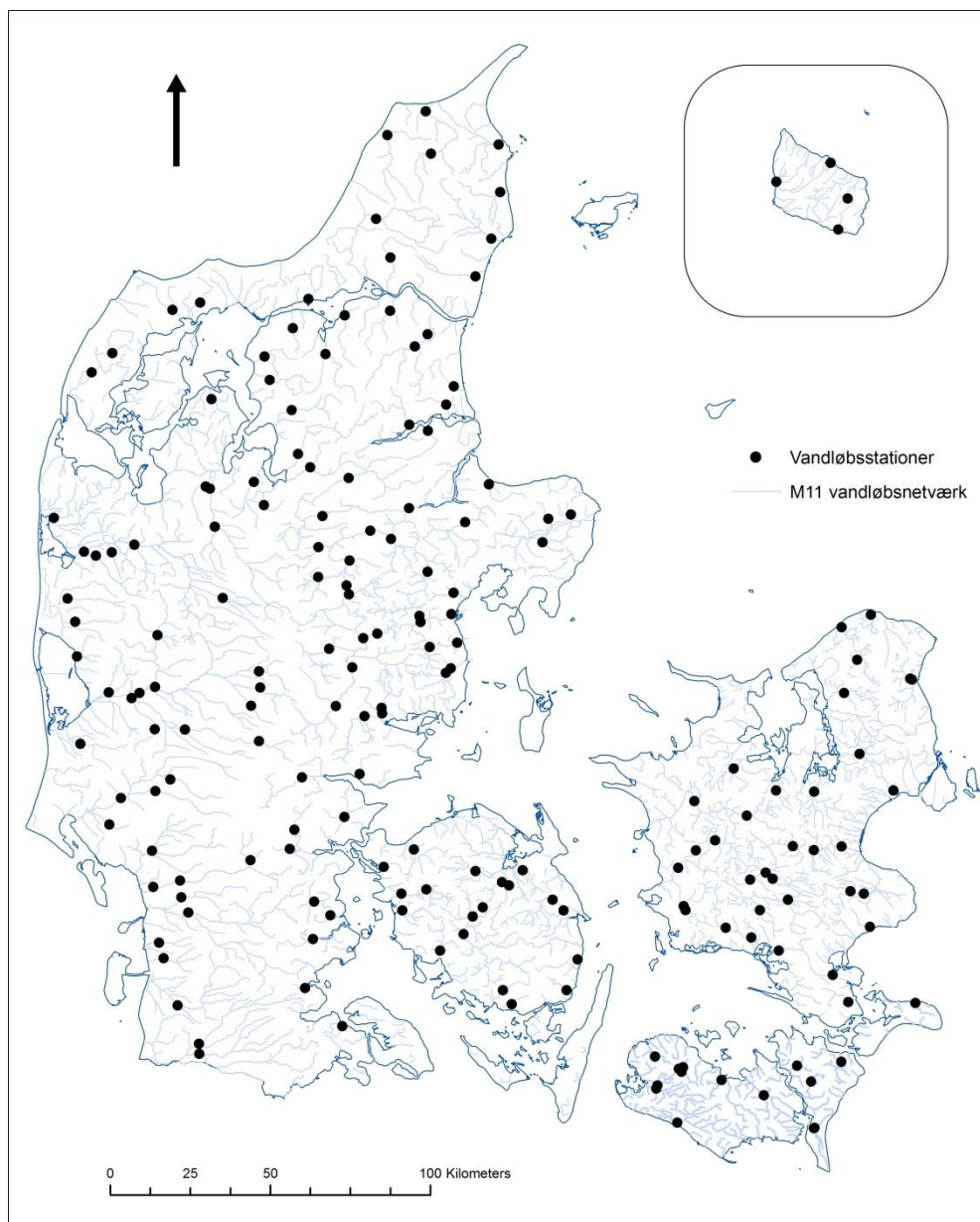
Tabel 21. Fordeling af indtag pr. beregningslag fordelt på delområder

Bereg- ningslag	DK1	DK2	DK3	DK4	DK5	DK6	DK7
1	194	31	165	194	218	433	0
2	332	39	571	194	503	466	32
3	189	24	105	377	1027	653	312
4	588	85	355	502	584	438	77
5	1144	39	436	1374	1513	1428	39
6	457	47	227	107	314	362	16
7	664	70	61	88	993	142	
8	246	46	133	352	396	146	
9	261	4	6	87	168	125	
10	183	3	105	20	276	754	
11	171	4		138	284		
12	2657	289		54			
i alt	7086	681	2164	3487	6276	4947	476

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 indenfor 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. Som udgangspunkt er det derfor valgt kun at medtage data fra stationer med et oplandsareal på mere end 25 km². I tilfælde hvor der ikke opnås en tilstrækkelig rumlig dækning med stationer > 25 km² er nogle få mindre stationer medtaget med oplande ned til 10 km². Effekten af en eventuel regulering af et vandløb er 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.

Af de tilbageværende stationer har en del stationer kun observationer i få år indenfor enten kalibrerings- eller valideringsperioden. Samlet er der udvalgt 185 stationer til kalibrering (med en fordeling på de enkelte delmodeller som vist i Tabel 22 og hhv. 182 (1996-99) og 136 (2007-10) stationer til de to valideringsperioder. Udvælgelsen af afstrømningsstationer er baseret på oplandsstørrelse, driftsperiode samt eventuel påvirkning af reguleringer i vandløbet. Placeringen af de 185 stationer inkluderet i kalibreringen fremgår af Figur 37.



Figur 37. Placering af vandføringsstationer anvendt til kalibrering af DK-model.

Tabel 22. Oversigt over antal af vandføringsstationer anvendt til kalibrering og validering for de syv delmodeller

Modelområde	Kalibrering	Validering(1996-99)	Validering(2007-10)
DK1	34	34	26
DK2	15	15	9
DK3	19	19	14
DK4	25	25	23
DK5	55	54	34
DK6	33	31	26
DK7	4	4	4

6.2 Opstilling af kalibreringsmål og -kriterier

Til modelkalibrering er der opstillet nogle kvantitative kriterier til beskrivelse af hvor godt modellen er i stand til at simulere de observerede data. Disse kriterier gennemgås nedenfor for hhv. potentiale data samt afstrømningsdata. 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.
- Residualerne skal være fordelt fornuftigt arealmæssigt.
- For vandløbene skal den rigtige dynamik afspejles. Dvs. en hændelse giver den rigtige respons både i tid og sted.

6.2.1 Kalibreringsmål og performance kriterier - potentialer

Typisk udtrykkes en models evne til at reproducere potentialet ved en middelfejl (ME) og middelværdien af kvadratafvigelsessummen ('Root mean squared', RMS). Disse performance kriterier er givet ved

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{obs,i} - H_{sim,i})$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{obs,i} - H_{sim,i})^2}$$

hvor

- $H_{obs,i}$: er det observerede potentiale for observation i (m)
 $H_{sim,i}$: 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 mindre end det observerede, mens en negativ ME angiver, at modellen i middel simulerer et potentiale, der er for højt. Den optimale værdi for middelfejlen er således 0 (nul).

RMS er et mål for spredningen på residualerne, dvs. forskellen mellem observerede og simulerede værdier.

Den inverse optimering sker ved minimering af et kalibreringsmål (benævnt objektiv funktion). I PEST er denne objektivfunktion udformet som kvadratafvigelsessummen mellem de observerede og simulerede størrelser. Den inverse kalibrering er således baseret på kvadratafvigelsessummen, mens middelfejlen ikke indgår som kalibreringsmål, men beregnes på basis af den optimerede model og vurderes i forhold til kriteriet opsat for denne.

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 normer og/eller forskellige observationstyper. Ved at inddrage forskellige variabler og normer 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 normer i objektivfunktionen vil kalibreringen endvidere bidrage med et kvantitativt mål for, hvor god modellen er til at repræsentere de forskellige størrelser.

I nærværende kalibrering opstillet to kalibreringsmål for pejlinger, der er inkluderet i den samlede objektivfunktion:

1. *Hobs_dyn*: Beregnes på basis af de enkelte observationer. I tilfælde hvor et indtag indeholder flere pejlinger til forskellige tidspunkter, beregnes både residualen for hver enkelt observation samt middelfejlen for samtlige observationer tilhørende indtaget. Under kalibrering medtages alene middelfejlen for indtaget, og indtaget indgår således som en enkelt observationsværdi uanset antallet af observationer i indtaget. Middelfejlen beregnes under optimering vha. programmet Layerstatistics.
2. *Hobs_dyn_lay*: Er middelfejlen opgjort pr. beregningslag.

Observationsgruppe 1 med alle observationer er med til at sikre, at der ikke sker en systematisk fejl indenfor et lag, eksempelvis at potentialet systematisk overestimeres i én del af modellen, men at dette opvejes ved en underestimering i en anden del af modellen. Da der anvendes kvadratafvigelsessum som kalibreringsmål vil enkeltobservationer med meget store residualer få en meget stor betydning under kalibreringen. Dette kan være uhenigtsmæssigt, da meget store residualer ofte skyldes enten fejl i observationen, eller at observationen reflekterer heterogenitet på en mindre skala, der ikke opløses i modellen. I disse tilfælde vil optimeringen således forsøge at ramme fejlagtige observationer eller småskala heterogenitet, som modellen ikke inkluderer, hvilket vil resultere i et dårligt overordnet fit. Ved at medtage en samlet middelfejl pr. lag kan dette i nogen grad modvirkes, idet enkeltobservationer med stort residual vil have en mindre signifikant betydning her.

Ved kalibrering af DK-model2009, var der defineret 3 ekstra observationsgrupper for pejlingerne; *Hob_mean* og *Hobs_mean_lay* hvilket var middelværdi af pejlinger for boringer uden observationer indenfor kalibreringsperioden, der var medtaget for at opnå bedst mulig rumlig dækning; og *HTS_ME*, der var udtrykt for amplituden for udvalgte tidsserier. Erfaringer opnået med kalibrering siden 2009 versionen har vidst, at inddragelsen af disse tre observationsgrupper kun har begrænset effekt ved national kalibrering og de tre grupper er følgelig udeladt fra DK-model2014 kalibreringen.

I Geovejledning 7 (Refsgaard et al., 2010) er der givet et bud på en acceptabel størrelse for middelfejlen:

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

hvor Δh_{max} er forskellen mellem maksimum og minimum hydraulisk trykniveau i området, og β_1 afhænger af nøjagtighedskriteriet for modellen. Da formålet med nærværende model er en vurdering af vandbalancen på overordnet niveau, stiles der mod et nøjagtighedskriterium, der er defineret som "overslagsberegninger", hvilket betyder, at β_1 antager værdien 0,025. I Tabel 26 er den maksimale variation i observeret trykniveau samt nøjagtighedskriteriet til ME for de enkelte delmodeller givet.

I geovejledning 7 er der endvidere opstillet forskellige kriterier for vurdering af acceptabel størrelse for RMS. Ét af disse 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. Sidstnævnte bidrag afhænger af heterogeniteten i den hydrauliske ledningsevne for det betragtede område, den overordnede gradient af grundvandspotentialet og gridcelle størrelsen. For stationære modeller indgår endvidere et udtryk der tager højde for, at en stationær model kun beskriver en middel situation men ikke den sæsonmæssige variation. Med sigte på en overslagsberegning antager β_2 værdien 2.

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. Et alternativt kriterium for RMS 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 "out-liers". Blot en enkelt out-lier, 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 out-liers i datasættet vil det derfor være forholdsvist let 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-modellen. Jævnfør geovejledning 7 er et passende kriterium for overslagsberegninger, at RMS er 5 % af den samlede variation i potentialet ($\beta_3 = 0,05$). Dette er anvendt til beregning af nøjagtighedskriteriet til de 7 delmodeller, som er gengivet i Tabel 23.

Tabel 23. Nøjagtighedskriterier for potentialer

	DK1	DK2	DK3	DK4	DK5	DK6	DK7
dHmax (m)	116.9	37.3	118.5	110.5	212.9	101.5	129.5
Kriterium - ME (m)	2.9	0.9	3.0	2.8	5.3	2.5	3.2
Kriterium - RMS (m)	5.8	1.9	5.9	5.5	10.6	5.1	6.5

6.2.2 Kalibreringsmål og performance kriterier - afstrømningsdata

Til kvantificering af modellens evne til at reproducere den målte afstrømning i vandløbene er det valgt at fokusere på NSE (Nash-Sutcliff "model efficiency") og vandbalancefejlen WBE. De to størrelser er givet ved

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

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

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 kvadratafgivelsen 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 tre observationsgrupper under kalibreringen, hvoraf den ene er specifikt rettet mod opnåelse af en god simulering af low-flow situationerne (sommervandføringen). Disse observationsgrupper er:

1. q_{obs_NSE} : Nash-sutcliffe NSE-værdi beregnet på basis af samtlige observationer inden for kalibreringsperioden.
2. WBE : Vandbalancefejl beregnet på basis af samtlige observationer inden for kalibreringsperioden.
3. WBE_summer : Vandbalancefejl beregnet på basis af observerede og simulerede vandføringer for sommermånederne juni, juli og august alene.

I geovejledning 7 er der for de tre kalibreringsmål foreslået forskellige nøjagtighedskriterier (kriterium 6, 7 og 8) afhængig af vandløbets dynamik, udtrykt ved fraktionen Q_{10}/Q_{90} , samt middel og minimumsvandføringen. De numeriske mål for nøjagtighedskriterierne er gengivet i Tabel 24.

Tabel 24. Numeriske mål for nøjagtighedskriterier til vurdering af den simulerede vandføring.

	Screening	Overlagsberegninger	Detailmodellering
Kriterium 5 (80 % af stationerne skal overholde kravværdien) 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 (80 % af stationerne skal overholde kravværdien) β_5 (WBE, 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 (80 % af stationerne skal overholde kravværdien) β_6 (WBE, sommer)			
Type 1 $Q_{min} < 10$ l/s	120	80	50
Type 2 10 l/s $< Q_{min} < 50$ l/s	80	50	30
Type 3 50 l/s $< Q_{min} < 200$ l/s	50	30	15
Type 4 200 l/s $< Q_{min}$	30	15	10

6.2.3 Samlet kalibreringsmål

Den inverse kalibrering blev gennemført i PEST ver. 13 (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 residualen 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, 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 indenfor 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 parameterverdier (baseret på erfaringer fra de øvrige delmodeller), og beregne en vægtning mellem de enkelte observationsgrupper der sikrede en balanceret vægtning mellem potentialer og afstrømningsdata for dette startgæt.

Inden for de enkelte observationsgrupper er der foretaget en simpel vægtning. For pejllinjerne er observationerne i det øverste lag vægtet med 1/3 af de øvrige observationer. Dette er begrundet i, at de terrænnære observationer i høj grad er styret af den topografiske variation, der pga. grid størrelsen på 500 x 500 m ikke opløses detaljeret i modellen, hvorfor modellen i mindre grad kan forventes at simulere variationen i potentialet i de øverste lag.

For vandføringen ønskes modellen at kunne reproducere alle de medtagede stationer lige vel uanset den faktiske oplandsstørrelse. På landsplan samt indenfor de enkelte delmodeller i DK-modellen er der imidlertid en overrepræsentation af stationer med et oplandsareal på under 100 km². Anvendes der derfor en ligelige vægtning af alle stationer under kalibreringen, vil der samlet set ske en større vægtning af stationerne under 100 km², mens de større stationer vil vægte mindre. Mens dette ikke har betydning for kalibrering af modellens evne til at reproducere vandløbsdynamikken (NSE), vil det have en betydning i forhold til kalibreringen af vandbalance størrelsen (WBE). Baseret på vandløbsstationernes oplandsstørrelser er der derfor foretaget en opdeling af vandløbsobservationerne i tre oplandsgrupper: *opland1*: < 100 km²; *opland2*: 100 - < 200 km² og *opland3*: > 200 km². Indenfor observationsgrupperne WBE og WBE_summer er der således foretaget en intern vægt-

ning, hvor samtlige observationer er vægtet med den reciprokke værdi af antallet af Q-stationer indenfor den pågældende *opland*-gruppe. Den samlede vægtning for de enkelte observationsgrupper er gengivet i Tabel 25.

Tabel 25. Vægtning indenfor og imellem observationsgrupperne

Obsgruppe	Forklaring	Vægtning mellem obs. - grupper	Intern vægtning i obs.-gruppe
NSE	NSE-værdi for hele kalibreringsperioden	2	ingen
WBE	Vandbalancefejl for hele kalibreringsperioden	2	$1/n_{\text{oplandsgruppe}}^*$
WBE_summer	Vandbalancefejl for juni, juli og august måned	1	$1/n_{\text{oplandsgruppe}}^*$
Hobs_dyn	Alle observationer	2	lag 1: 1/3
Hobs_dyn_lay	Middelfejl pr. beregningslag	1	lag 1: 1/3

* Der er anvendt tre oplandsgrupper 1) $< 100 \text{ km}^2$, 2) $100 - 200 \text{ km}^2$, og 3) $> 200 \text{ km}^2$

6.3 Valg af kalibreringsparametre

I kalibrering af DKmodel2014 er der valgt samme koncept som i 2009 versionen, dvs. anvendelse af færrest mulige "frie" parametre. Dette er valgt, da det primære formål med opdatereingen til version 2014 har været en udbygning af vandløbsnetværket, mens der ikke er sket væsentlig opdatering den hydrogeologiske tolkning.

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 3 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 12).
 - 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)
- Hydrauliske ledningsevner (horisontale og vertikale) samt frie og spændte magasin tal for:
 - ler (øvre 3 m)

- tørv/andet (øvre 3 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)
- Vandløb
 - Manningtal
 - lækage koefficient

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 beskedent forskel på de anvendte værdier for vandmætningsgraderne mellem de forskellige georegions jordtyper, hvorimod der er betydelig forskel på den maksimale rodzonedybde (afsnit 5.2). 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. For rodzonedybderne er der kalibreret på en enkelt kombination af afgrøde og jordtype, mens rodzonedybderne for de resterende vegetationstyper er fastholdt på samme forhold som initialværdierne angivet i Tabel 12.
- *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 tidligere 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. Baseret på erfaringer fra optimering af en delmodel for Ringkøbing Fjord, der er trukket ud af den nuværende DK-model og kalibreret under forskningsprojektet HOBE (Stisen et al., 2011), blev det valgt at binde de hydrauliske ledningsevner for de tre prækvartære aflejringer til hinanden, så deres relative forskel er fastholdt under kalibreringen. Den relative variation mellem de prækvartære aflejringer blev overført fra den optimerede model for Ringkøbing Fjord HOBE (Stisen et al., 2011).
- *Anisotropi.* Det er antaget, at der er en anisotropi faktor på 10 mellem den horisontale og vertikale ledningsevne ($K_x/K_z=10$) 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 overfor 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 pejetidsserierne.
- *Dræn.* Vandløbsdynamikken blev fundet følsom overfor såvel dræntidskonstanten samt hvilken dybde drænene blev placeret i. Disse to parametre blev ved en manuel følsomhedsanalyse fundet at være delvist korrelerede, så en ændring i simuleret afstrømning pga. en justering af dybden delvist kunne opvejes af en ændring i tidskonstanten. Da topografien udjævnes ved anvendelse af store gridceller, vil den optimale placering af drænene til opnåelse af en korrekt drænafstrømning ikke nødvendigvis være lig deres korrekte fysiske placering. Endvidere beskriver drænene i det anvendte model koncept ikke kun kunstige dræn men også naturlige drænsystemer, der ikke er beskrevet eksplicit i modellen, såsom grøfter og mindre vandløb. En optimal drændybde til beskrivelse af disse systemer er ligeledes skalaafhængig, og bestemmelse af den optimale drændybde vil kræve nogle detaljerede numeriske analyser og feltstudier. I nærværende model er det derfor valgt at anvende en drændybde på 0,5 m, som også blev anvendt i DK-model2009, og der kalibreres således kun på tidskonstanten.
- *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 26 og Tabel 27 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 26. Oversigt over kalibrerings parametre for delmodellerne 1-6.

	Betegnelse	DK1	DK2	DK3	DK4	DK5	DK6
Hydrogeologi	Opsprækket ler	X	X	X	X	X	X
	Kvartær Ler	X	X		X	X	X
	Kvartær Sand	X	X	X	X	X	X
	Glimmer ler/silt				X	X	X
	Kvartæssand				X	X	X
	Glimmersand				X		
	Prækvartær Ler/mergel	X	X	X			
	Kalk	X		X			X
Vandløb	Dræn tidskonstant	X	X	X	X	X	X
	Vandløbs lækage	X	X	X	X	X	X
	Rodzone dybde	X	X	X	X	X	X

Tabel 27. 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 modellen er opsummeret herunder med udvalgte plots til illustration. Ekstra tabeller over modelperformance og plots for alle vandføringsstationer er vedlagt i Bilag 2.

Alle delmodeller 1-7 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. Forud for kalibrering af hvert delområde 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 kalibreringsopsætningene mellem delområderne.

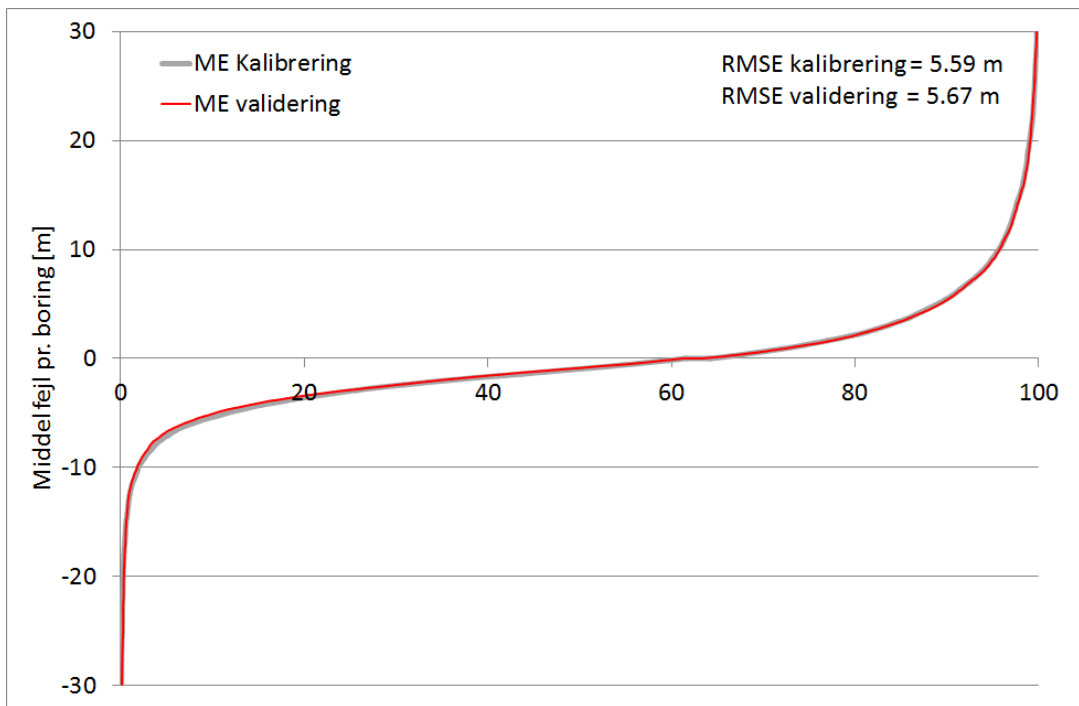
7.1 Kvantitativ vurdering af kalibrerings og validerings resultater

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

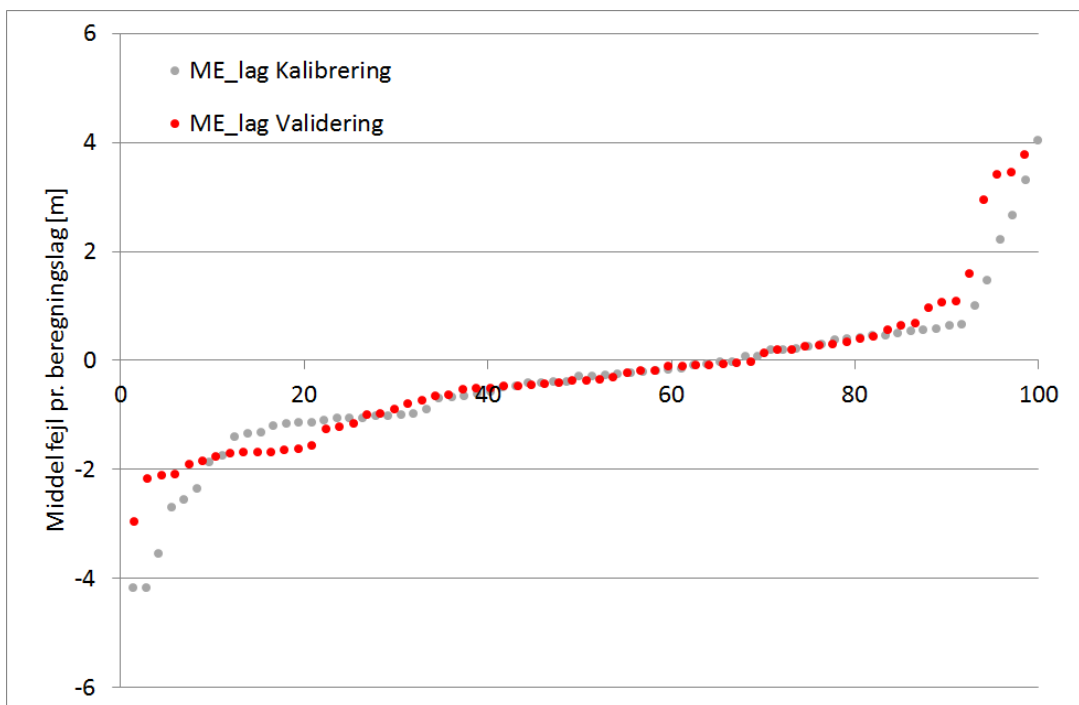
7.1.1 Kvantitativ vurdering af trykniveau simuleringer

Fordelingskurven for middelfejl samt RMSE for de 25.861 pejleboringer medtaget i kalibreringen er plottet med gråt i Figur 38. Kurven skærer x-aksen ved 60 % af observationerne og for alle delmodeller samlet er der således en mindre bias, hvor det simulerede potentiale simuleres lidt for højt. RMSE for kalibrerings perioden er 5,59 m på tværs af alle modellag og delområder. Enkelte pejleboringer simuleres med meget store fejl $> \pm 20$ m hvilket primært tilskrives ikke repræsentative målinger eller boringer påvirket af meget lokale forhold som ikke er opløst af modelgrid eller den geologiske model. Den tilsvarende fordelingskurve for valideringsperioden (2007-2010) ligner meget kurven for kalibreringsperioden med en RMSE på 5,67 m. Fordelingskurverne for middelfejl pr. model lag for kalibrering og validering er angivet i Figur 39. Her ses en lidt bedre performance for kalibreringsperioden, hvor ca. 85 % af modellagene har en ME under ± 2 m.

Kalibrerings og validerings statistik for trykniveauer for alle delmodeller er opgjort i Tabel 28. Sammenholdes den opnåede performance med de opstillede kriterier, ses det at alle modelområder opfylder kriterierne for ME mens alle med undtagelse af DK2 og DK7 overholder kriteriet for RMSE. For valideringsperioden (2007-2010) er billedet det samme, dog overholder DK6 ikke kriteriet for RMSE, og DK7 er ikke medtaget i valideringen.



Figur 38. Middelfejl pr. observationsboring for hhv. kalibrering og validering. X-aksen angiver procenten af de boringer som er anvendt i hhv. model kalibreringen (25.861) og valideringen (14.677). Denne middelfejl svarer til Hobs_dyn i Tabel 25.



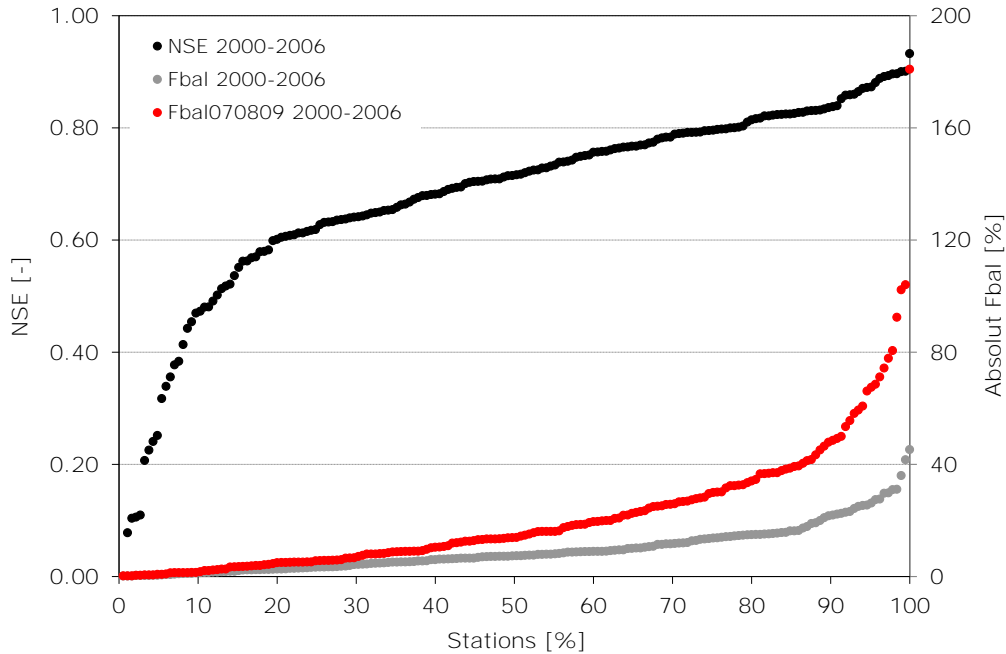
Figur 39. Middelfejl pr. beregningslag for hhv. kalibrering og validering. X-aksen angiver procenten af beregningslag. Denne middelfejl svarer til Hobs_dyn_lay i Tabel 25.

Tabel 28. Kalibrerings og validerings statistik for trykniveauer for alle delmodeller.

	DK1	DK2	DK3	DK4	DK5	DK6	DK7
dHmax (m)	116,9	37,3	118,5	110,5	212,9	101,5	129,5
Kriterium - ME (m)	2,9	0,9	3,0	2,8	5,3	2,5	3,2
Kriterium - RMSE (m)	5,8	1,9	5,9	5,5	10,6	5,1	6,5
Kalibrering							
ME (m)	-0,7	-0,2	0,3	-0,4	-0,5	-0,1	0,4
RMSE (m)	4,6	2,7	5,2	5,5	7,0	4,9	7,9
Validering							
ME (m)	-0,3	0,1	0,4	-0,6	-0,7	0,1	-
RMSE (m)	5,4	3,7	5,4	5,1	7,1	6,1	-

7.1.2 Kvantitativ vurdering af vandførings simuleringer

Modellens evne til simulering af vandføringer er kvantificeret ved de tre objektive funktioner, NSE, WBE og WBE_summer. For hver af disse statistiske størrelser er fordelingskurven for alle 185 vandføringsstationer illustreret i Figur 40. For NSE er median værdien 0,72 mens 25 % af stationerne ligger under en NSE på 0,62. For WBE er median værdien 7,4 % mens 25 % af stationerne har en vandbalance fejl større end 13,7 %. For WBE_summer er median værdien 14,0 % mens 25 % af stationerne har en vandbalance fejl større end 30,0 %. For NSE og WBE overholder den samlede DK-model derfor de opsatte kriterier for kalibreringsperioden. Dog er der variationer i performance imellem deloplande. Dette fremgår af Tabel B2-1 i Bilag 2 som angiver statistikken for hver enkelt station samt en detaljeret flow-specifik vurdering af hvilket kriterie hver station overholder.



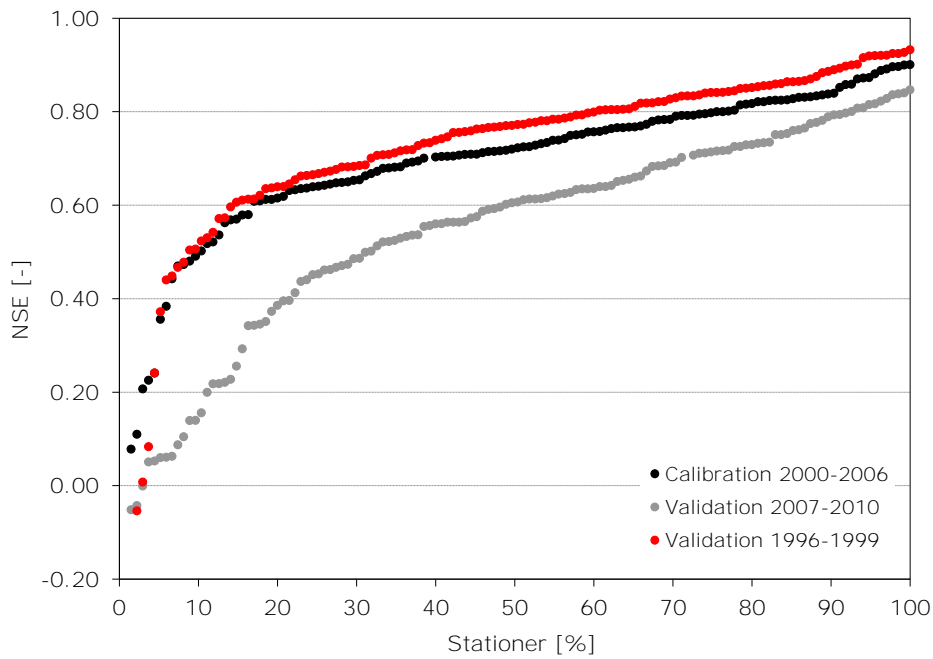
Figur 40. Kalibreringsstatistik for de 185 vandføringsstationer anvendt i kalibrering af de syv modelområder.

Til model validering af vandføringssimuleringerne er anvendt to perioder, 1996-1999 samt 2007-2010. Dette har været nødvendigt for separere modelvalideringen fra en test af de anvendte klimadata. For perioden 2007-2010 er antallet af nedbørsstationer som indgår i DMI's 10 km grid nedbørsprodukt reduceret voldsomt (ca. til en tredjedel), som det vil fremgå af den følgende validering er dette tab af datadækning sammenfaldende med et voldsomt fald i model performance. Da antallet af vandføringsstationer ligeledes har været faldende, er valideringensresultaterne givet for de 135 vandføringsstationer som forefindes i alle tre perioder.

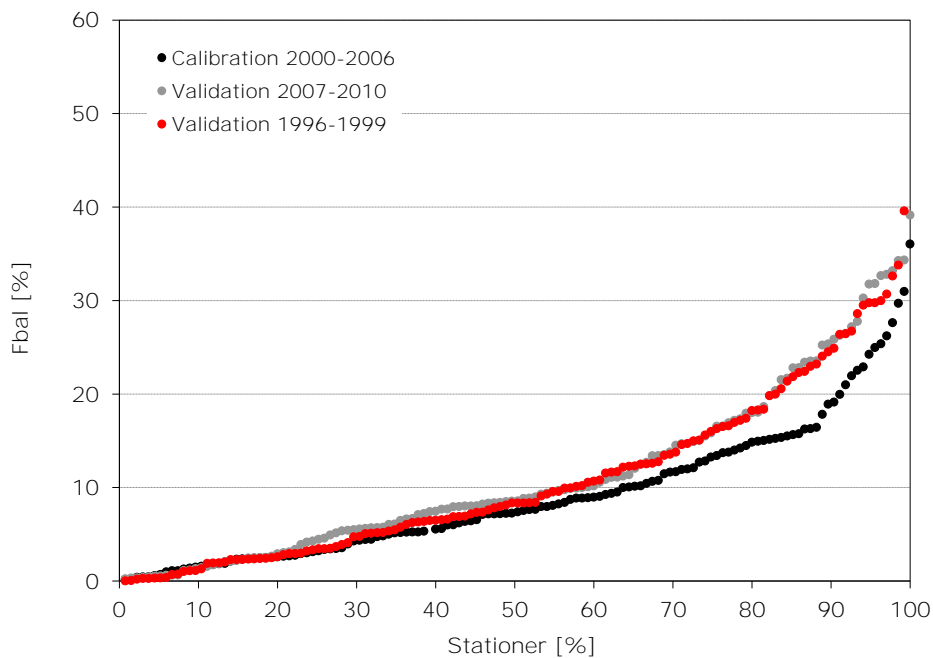
For valideringsperioden 1996-1999 er median værdien af NSE 0,77 mens 25 % af stationerne ligger under en NSE på 0,67 (Figur 41). For WBE er median værdien 8,4 % mens 25 % af stationerne har en vandbalance fejl større end 16,3 % (Figur 42). For WBE_summer er median værdien 15,1 % mens 25 % af stationerne har en vandbalance fejl større end 33,4 % (Figur 43). Dermed overholder valideringen i denne periode samme kriterier som opstillet for kalibreringsperioden. For valideringsperioden 2007-2010 er median værdien af NSE 0,61 mens 25 % af stationerne ligger under en NSE på 0,45 (Figur 41). For WBE er median værdien 8,6 % mens 25 % af stationerne har en vandbalance fejl større end 16,2 % (Figur 42). For WBE_summer er median værdien 16,6 % mens 25 % af stationerne har en vandbalance fejl større end 29,6 % (Figur 43). Dermed overholder valideringen i denne periode (2007-2010) kun kriteriet opstillet for WBE men langt fra kriteriet opstillet for NSE.

Statistik for samtlige vandføringsstationer for alle tre perioder er angivet i Bilag 2, 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 væsentli-

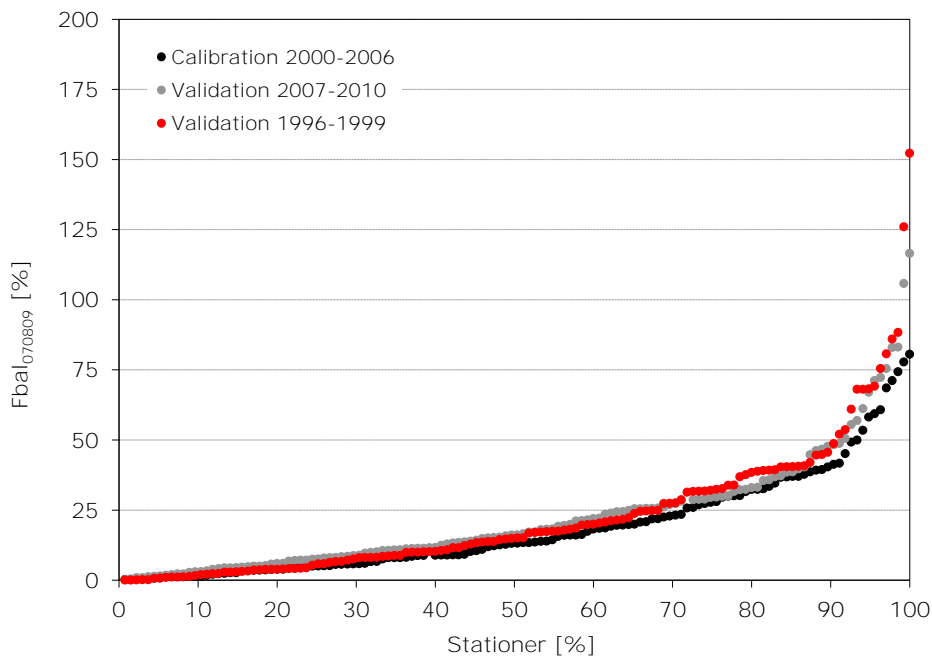
ge regionale forskelle på modellens performance, hvilket også vil blive illustreret under en kvalitative del af modevalueringen.



Figur 41. Valideringsstatistik for NSE for de 135 vandføringsstationer anvendt i valideringen for de to valideringsperioder.

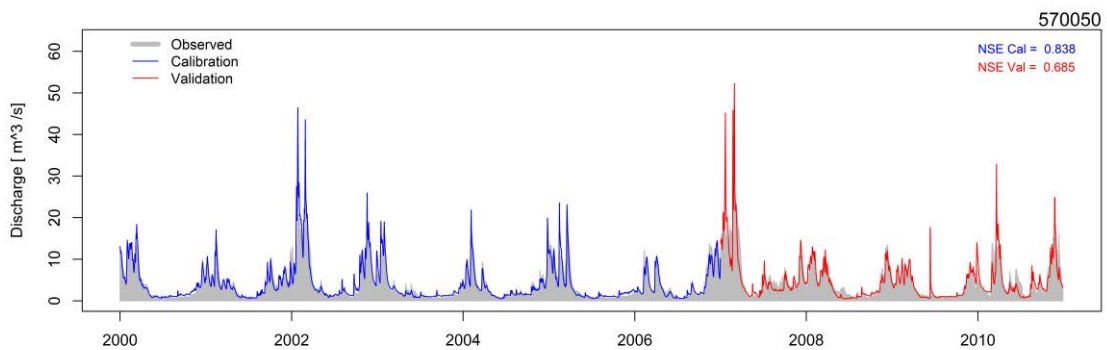


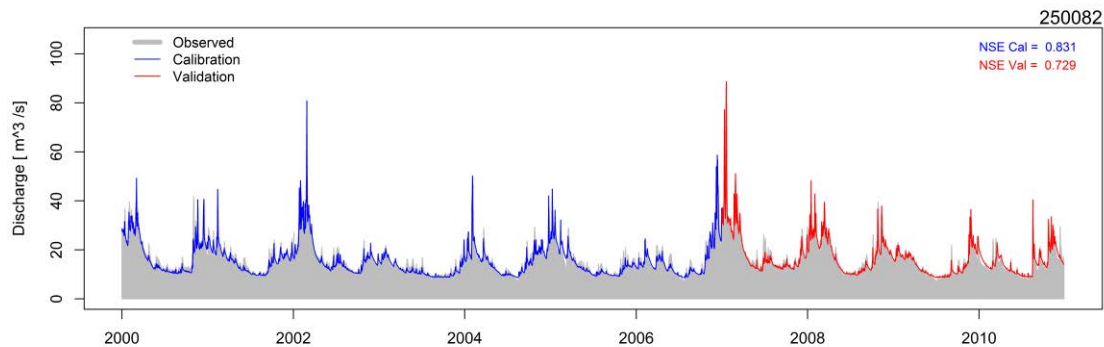
Figur 42. Valideringsstatistik for absolut WBE for de 135 vandføringsstationer anvendt i valideringen for de to valideringsperioder.



Figur 43. Valideringsstatistik for absolut WBE_summer for de 135 vandføringsstationer anvendt i valideringen for de to valideringsperioder.

Til illustration vises hydrograferne for to vandføringsstationer for hhv. Øst (Susåen, 570050) og Vest (Skjern Å, 250082) Danmark (Figur 44). De to hydrografer illustrerer bl.a. variationen i baseflow for jorde med hhv. højt ler-indhold og højt sand-indhold. Bilag 2 indeholder desuden hydrografer for samtlige Q stationer for kalibrerings- og validerings-perioden 2000-2010.





Figur 44. Observerede og simulerede hydrografer for to udvalgte vandføringsstationer i hhv. Øst og Vest Danmark.

7.2 Kvalitativ vurdering af kalibreringsresultat

Foruden de kvantitative kriterier skal modellen opfylde de kvalitative kriterier opsat i afsnit 6.2:

- De estimerede parametre skal have realistiske værdier
- Residualerne skal være fordelt fornuftigt arealmæssigt.
- 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 parameter værdier for hver delmodel samt deres estimerede 95 % konfidensinterval er angivet i Tabel 29 til Tabel 35. Det skal bemærkes, at pga. den simple vægtning af de indgående observationer (afsnit 6.2.3), kan de estimerede 95 % konfidensintervaller ikke tages som udtryk for parametrenes absolutte usikkerhed. Konfidensintervallerne giver derimod information om den relative sikkerhed hvormed en parameter er bestemt, hvor små konfidensintervaller indikerer en godt bestemt parameter, mens vide intervaller indikerer en dårligt bestemt parameter. Det fremgår af resultatet, at de fleste parametre er godt bestemt, med undtagelse af vandløbslækagen for delmodel 4-7 samt visse af de hydrauliske ledningsevner for delmodel 7. Værdierne af de optimerede parametre ligger generelt i de forventede intervaller med undtagelse af opsprækket ler for DK1 og DK3, hvor værdierne ligger i den høje ende. Ligeledes er den dårligt bestemte lækagekoefficient for DK 7 lavere end forventet.

Table 29. Optimized parameter values and confidence intervals for DK1.

DK1	Designation	ID	Unit	Estimated value	95 % Confidence interval	
Hydrogeology	Opstrøket clay	kx_topler	m/s	1.20E-04	1.13E-04	1.28E-04
	Quarterly Clay	kz_ler	m/s	2.38E-09	2.29E-09	2.48E-09
	Quarterly Sand	kx_sandl1	m/s	1.75E-04	1.62E-04	1.88E-04
	Pre-quarterly Clay/mergel	kz_kmergel	m/s	4.93E-08	4.73E-08	5.14E-08
	Lime	multk_kalk	m/s	1.20	1.09	1.33
Flow	Drainage time constant	drain	m/s	9.48E-08	8.40E-08	1.07E-07
	Flow leakage	leak1	s-1	3.30E-09	2.91E-09	3.75E-09
	Rodzone depth	rd_ww_jb1	mm	427	418	437

Table 30. Optimized parameter values and confidence intervals for DK2.

DK2	Designation	ID	Unit	Estimated value	95 % Confidence interval	
Hydrogeology	Opstrøket clay	kx_topler	m/s	8.49E-05	7.13E-05	1.01E-04
	Quarterly Clay	kz_ler	m/s	3.15E-09	2.76E-09	3.60E-09
	Quarterly Sand	kx_sandl1	m/s	1.13E-04	8.09E-05	1.59E-04
	Pre-quarterly Clay/mergel	kz_kmergel	m/s	4.41E-08	1.56E-08	1.25E-07
Flow	Drainage time constant	drain	m/s	1.23E-07	7.81E-08	1.92E-07
	Flow leakage	leak1	s-1	3.69E-09	1.48E-09	9.23E-09
	Rodzone depth	rd_ww_jb1	mm	662	622	705

Table 31. Optimized parameter values and confidence intervals for DK3.

DK3	Designation	ID	Unit	Estimated value	95 % Confidence interval	
Hydrogeology	Opstrøket clay	j25l_hc	m/s	5.45E-04	4.52E-04	6.58E-04
	Quarterly Sand	ks_hc	m/s	1.05E-04	9.47E-05	1.17E-04
	Pre-quarterly Clay/mergel	pl_hc	m/s	1.00E-10	2.15E-11	4.66E-10
	Lime	pk_hc	m/s	5.05E-03	3.75E-03	6.80E-03
Flow	Drainage time constant	drain	m/s	1.11E-07	1.00E-07	1.22E-07
	Flow leakage	leak1	s-1	1.24E-07	9.93E-08	1.55E-07
	Rodzone depth	rd_ww_jb1	mm	343	331	355

Tabel 32. Optimerede parameterværdier samt konfidensinterval for DK4.

DK4	Betegnelse	ID	Enhed	Estimeret værdi	95 % Konfidens interval	
Hydrogeologi	Opsprækket ler	kz12_topl	m/s	1.74E-07	1.20E-07	2.52E-07
	Kvartær Ler	kx2_ler	m/s	1.97E-07	1.90E-07	2.04E-07
	Kvartær Sand	kx1_ss	m/s	2.60E-04	2.48E-04	2.71E-04
	Glimmer ler/silt	kx5_gl	m/s	8.94E-07	6.33E-07	1.26E-06
	Kvartæssand	kx3_kvartss	m/s	7.50E-05	6.89E-05	8.17E-05
	Glimmersand	kx4_gs	m/s	6.24E-05	4.17E-05	9.34E-05
Vandløb	Dræn tidskonstant	drain	m/s	1.34E-07	1.01E-07	1.79E-07
	Vandløbs lækage	leak1	s-1	1.34E-05	5.99E-07	3.00E-04
	Rodzone dybde	rd_ww_jb1	mm	368	353	383

Tabel 33. Optimerede parameterværdier samt konfidensinterval for DK5.

DK5	Betegnelse	ID	Enhed	Estimeret værdi	95 % Konfidens interval	
Hydrogeologi	Opsprækket ler	kz12_topl	m/s	1.96E-07	1.34E-07	2.85E-07
	Kvartær Ler	kx2_ler	m/s	1.71E-07	1.59E-07	1.82E-07
	Kvartær Sand	kx1_ss	m/s	1.77E-04	1.68E-04	1.87E-04
	Glimmer ler/silt	kx5_gl	m/s	1.56E-07	1.39E-07	1.75E-07
	Kvartæssand	kx3_kvartss	m/s	6.38E-04	6.04E-04	6.74E-04
Vandløb	Dræn tidskonstant Øst	drain_east	m/s	8.08E-08	6.53E-08	9.99E-08
	Dræn tidskonstant Vest	drain_west	m/s	7.20E-08	5.72E-08	9.06E-08
	Vandløbs lækage Øst	leak_east	s-1	8.96E-06	1.15E-06	6.96E-05
	Vandløbs lækage Vest	Leak_west	s-1	1.49E-05	1.92E-06	1.16E-04
	Rodzone dybde	rd_ww_jb1	mm	469	451	488

Tabel 34. Optimerede parameterværdier samt konfidensinterval for DK6.

DK6	Betegnelse	ID	Enhed	Estimeret værdi	95 % Konfidens interval	
Hydrogeologi	Opsprækket ler	kz12_topl	m/s	3.33E-08	2.50E-08	4.42E-08
	Kvartær Ler	kx2_ler	m/s	2.76E-07	2.65E-07	2.88E-07
	Kvartær Sand	kx1_ss	m/s	1.47E-04	1.41E-04	1.53E-04
	Glimmer ler/silt	kx5_gl	m/s	1.87E-05	1.43E-05	2.43E-05
	Kvartæssand	kx3_kvartss	m/s	1.03E-03	8.31E-04	1.28E-03
	Kalk	kx6_kalk	m/s	1.53E-04	1.46E-04	1.61E-04
Vandløb	Dræn tidskonstant	drain	m/s	3.79E-07	3.20E-07	4.50E-07
	Vandløbs lækage	leak1	s-1	1.35E-05	3.74E-07	4.84E-04
	Rodzone dybde	rd_ww_jb1	mm	404	391	418

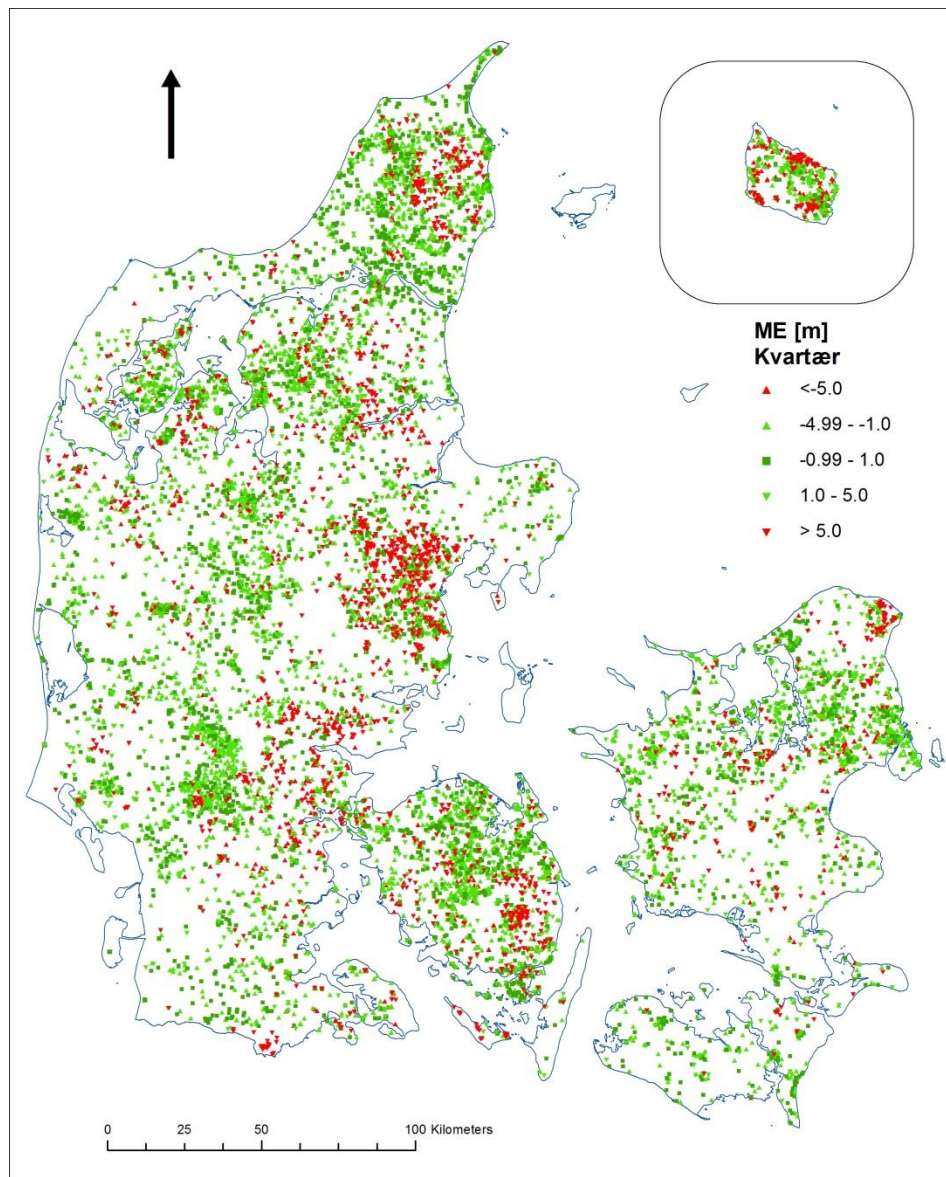
Tabel 35. Optimerede parameterværdier samt konfidensinterval for DK7.

DK7		ID	Enhed	Estimeret værdi	95 % Konfidens interval	
Hydrogeologi	Opsprækket ler	j25l_hc	m/s	1.98E-04	1.36E-04	2.88E-04
	Kvartær sand og grus	ks_hc	m/s	2.55E-04	7.62E-05	8.53E-04
	Kvartært ler og silt	kl_hc	m/s	9.82E-08	4.80E-08	2.01E-07
	Prækvartær sand	ps_hc	m/s	2.83E-04	1.15E-04	6.97E-04
	Prækvartær ler	pl_hc	m/s	4.57E-08	7.84E-09	2.67E-07
	Grundfjeld	grfj_hc	m/s	9.64E-10	2.24E-10	4.14E-09
	Sandsten og kvartsit	ss_hc	m/s	2.27E-06	3.36E-07	1.53E-05
	Skifre	sk_hc	m/s	5.95E-08	3.62E-09	9.76E-07
	Grønne skifre	grsk_hc	m/s	1.55E-05	1.39E-05	1.72E-05
	Forkastning	fkst_hc	m/s	2.55E-07	2.30E-07	2.82E-07
	Vandløb	Dræn tidskonstant	drain	m/s	3.68E-07	1.35E-07
Vandløbs lækage		leak1	s-1	1.54E-10	2.24E-16	1.05E-04
Rodzone dybde		rd_ww_jb1	mm	324	302	349

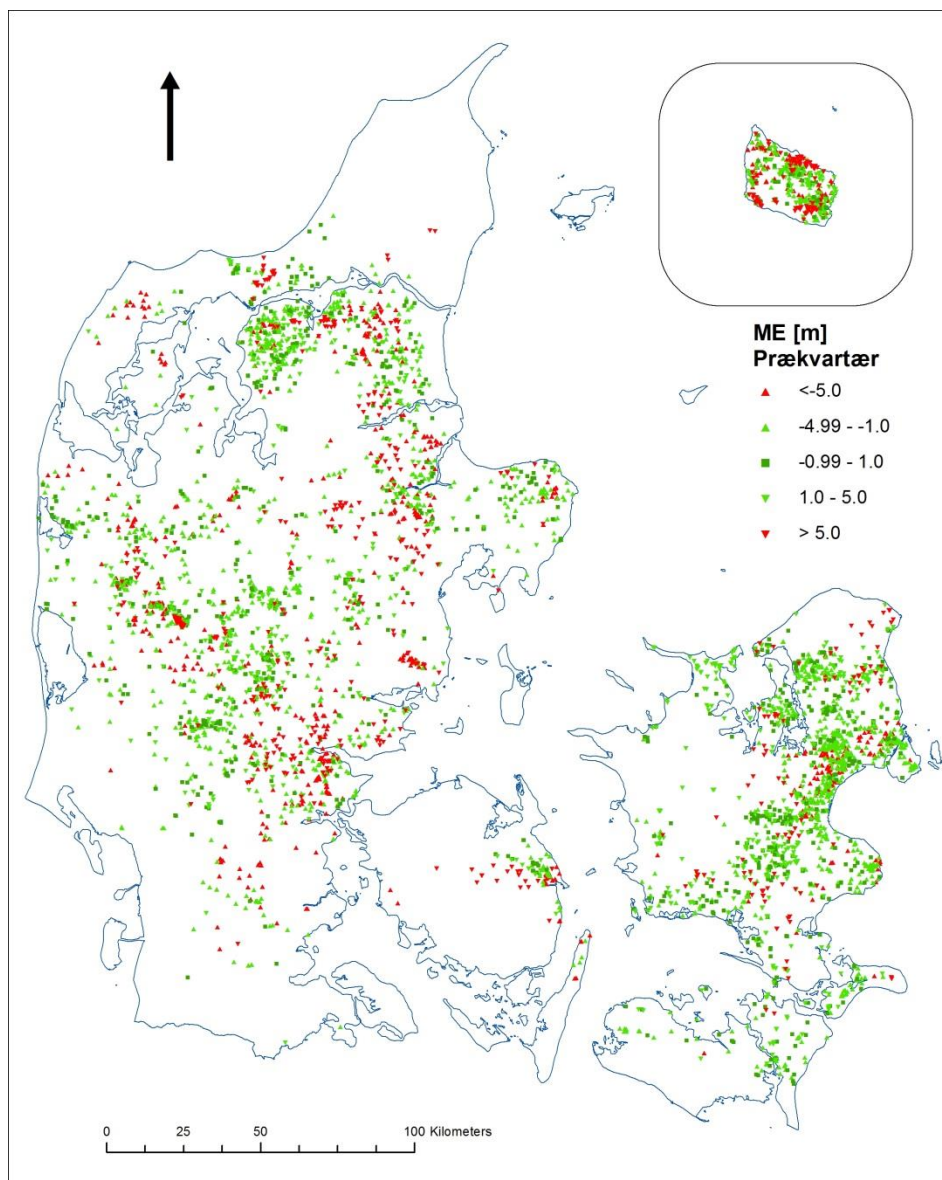
7.2.2 Kvalitativ vurdering af den rumlige fordeling af residualer

Den rumlige fordeling af middelfejl på potentialer er illustreret i Figur 45 og Figur 46, som inkluderer alle delmodeller og beregningslag for hhv. kvartære og prækvartære aflejringer. For kvartæret (Figur 45) 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 Frederikshavn og Helsingør, samt Nord for Århus, på Østfyn og Bornholm. Andre steder, som i Østjylland, Syd for Århus, ved

Mariager og Vejle fjord er billedet mere uensartet med store fejl med både positivt og negativt fortegn. I de prækvartære lag (Figur 46) er der flest pejlemålinger i kalken på Sjælland og i Nordjylland, og her er fejlene typisk relativt små ($< \pm 5$ m). Dog ses der større fejl i Østjylland mellem Ålborg og Randers samt omkring Vejle Fjord. I disse områder er der ikke en entydig positiv eller negativ bias i de større fejl.

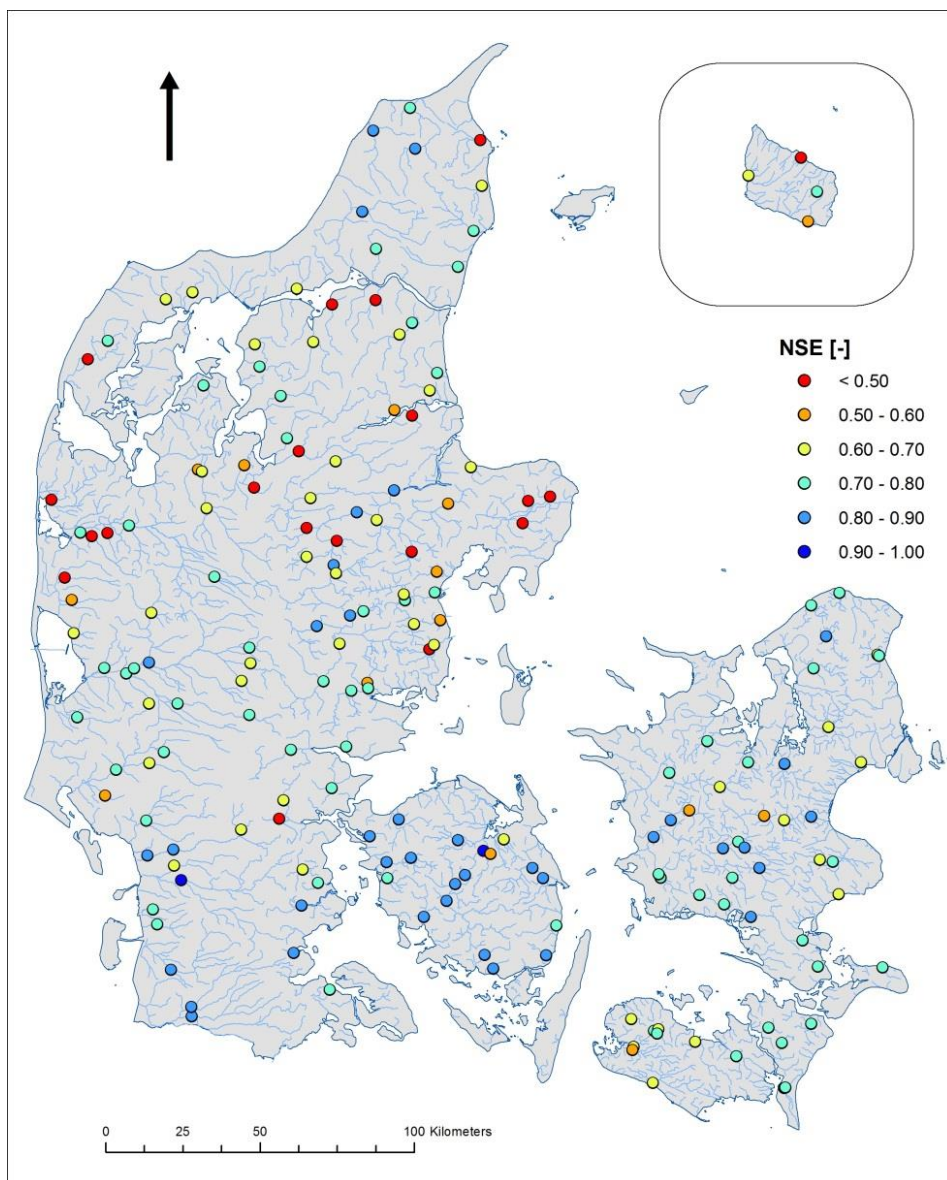


Figur 45. Rumlig fordeling og størrelse af middelfejl for potentialer i alle kvartære lag. Middelfejlen er beregnet for observationsgruppen Hobs_dyn.



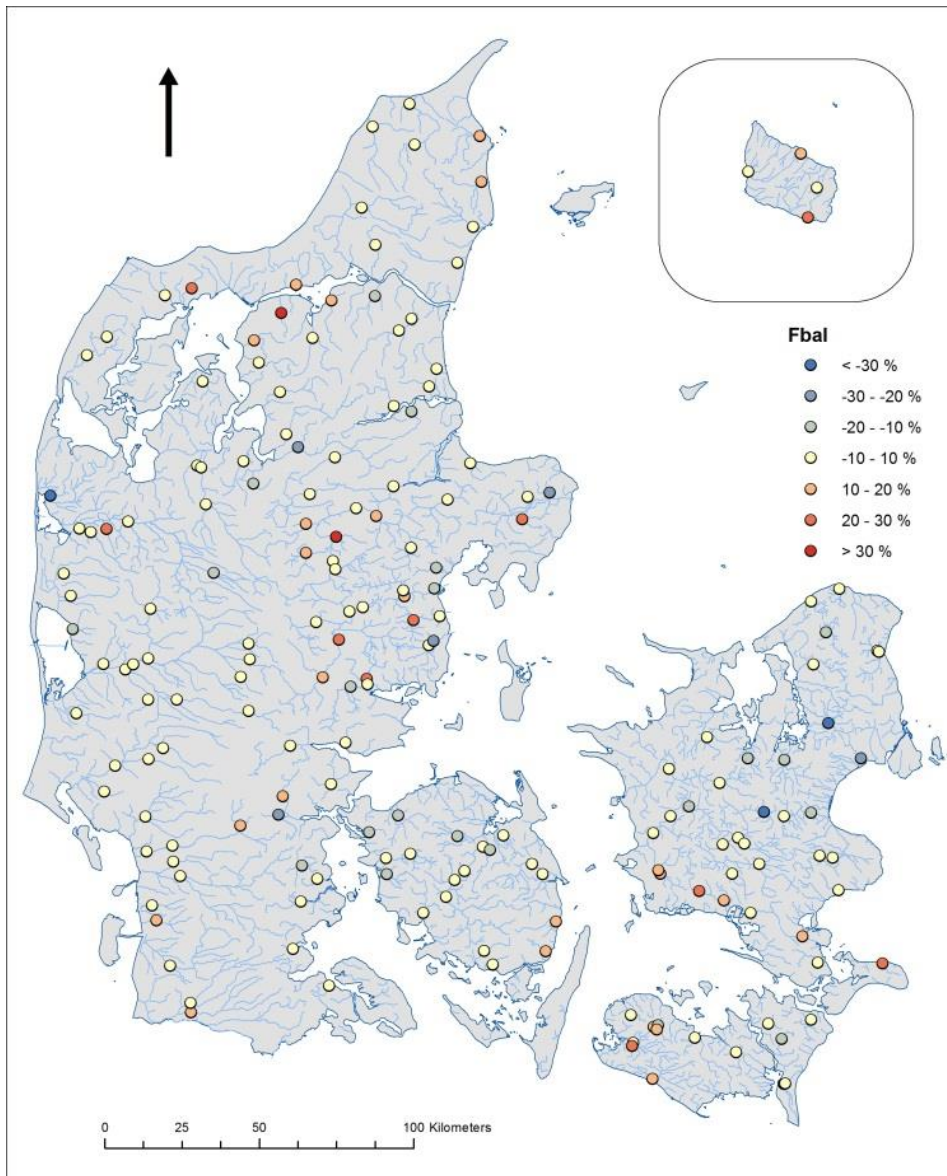
Figur 46. Rumlig fordeling og størrelse af middelfejl for potentialer i alle prækvartære lag. Middelfejlen er beregnet for observationsgruppen Hobs_dyn.

Den rumlige fordeling af NSE på tværs af alle deloplande er illustreret i Figur 47. For Sjælland, Fyn og Sønderjylland opnås fine simuleringresultater for NSE med flest værdier omkring 0,8-0,9. Andre steder er performance mere varierende og særligt svag på tværs af Midtjylland fra Nissum Fjord til Djursland. Der er derfor ikke opnået en ensartet performance på NSE på tværs af landet, hvilket sandsynligvis skyldes de store variationer i kompleksiteten af geologien, som særligt kan spille en rolle i Midtjylland samt på Djursland og Bornholm.

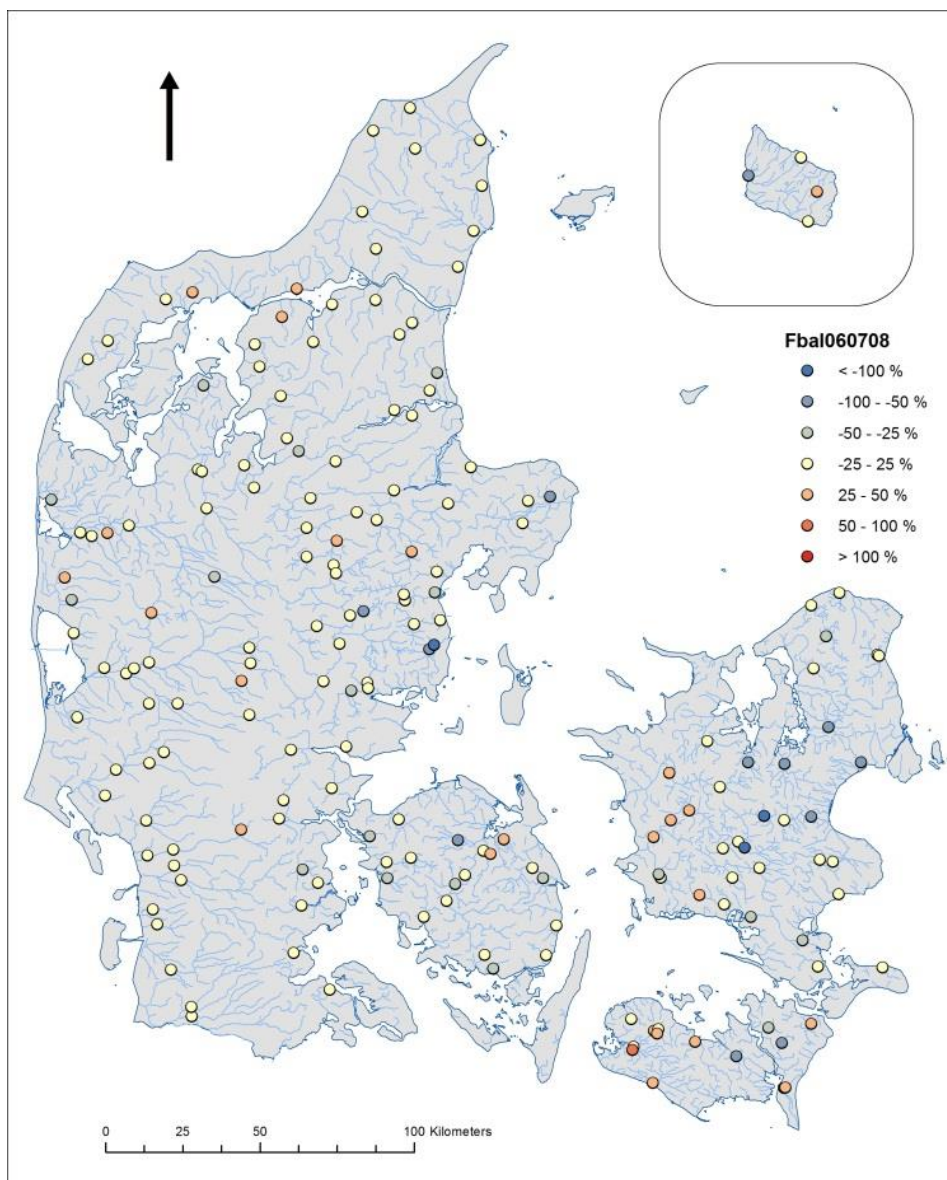


Figur 47. Rumlig fordeling af NSE for alle vandføringsstationer i kalibreringsperioden.

Hvad angår vandbalancefejlen i modelsimuleringerne opnås fine resultater på tværs af hele landet (Figur 48), som domineres af værdier på mindre end 10 % afvigelse. Det samme gør sig gældende for sommer vandbalancen (Figur 49) som generelt ligger på fejl mindre end 25%, dog med undtagelser for Sjælland, Lolland og Falster.



Figur 48. Rumlig fordeling af vandbalancefejlen (WBE) for alle vandføringsstationer i kalibreringsperioden.



Figur 49. Rumlig fordeling af vandbalancefejlen i sommermånederne (WBE_summer) for alle vandføringsstationer i kalibreringsperioden.

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 det er målet at modellen kan anvendes i forvaltningsøjemed til en screening. Nedenfor er nogle generelle vurderinger i forhold til modellens anvendelighed, men ved enhver konkret anvendelse af modellen bør der foretages en særskilt vurdering heraf.

Middelfejlen på potentialerne ligger væsentligt under de opstillede kriterier for alle delmodeller, med en maksimal fejl på -0,7 m for Sjælland. Den generelle grundvandsniveau reproduceres således tilfredsstillende af modellen, og er også væsentligt bedre end det der blev opnået i DK-model2009. RMSE er ligeledes opfyldt for de fleste delmodeller, undtagelserne er DK2 og DK7, men den opnåede performance er dårligere end DK-model2009 og med værdier på op til 7 m for DK5, er det tydeligt, at der nogle steder er meget store afvigelser. For den Præ-Kvartære lagpakke er der ikke en rumlig bias i afvigelserne og store og små afvigelser optræder indenfor korte afstande. I den Kvartære lagpakke er der en mere udpræget gruppering af områder med store misfit.

Afvigelserne mellem observeret og simuleret grundvandspotentialer kan bl.a. skyldes: 1) fejl i den geologiske/hydrostratigrafiske model, 2) at potentialerne er udtryk for lokale forhold der ikke repræsenteres i modellen, såsom lokale sandmagasiner eller hængende vandspejl, eller 3) at der er væsentlige forskelle i de hydrauliske ledningsevner indenfor en geologisk enhed, hvorfor det anvendte princip med én hydraulisk ledningsevne for hhv. sand og ler ikke er tilstrækkelig, eller 4) fejl i 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.

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 overfladevandsystemet, kan modellen ikke forventes at kunne beskrive de specifikke lokale transportveje, eksempelvis til brug for udpegnings af indvindingsoplade, eller til en specifik mindre vandløbsstrækning.

En af de væsentligste opgaver i forbindelse med opdatering af modellen til version 2014 har været en udvidelse af vandløbsnetværket, så modellen nu indeholder ca. 16.000 km vandløb. Dette giver en forbedret beskrivelse af grundvands- overfladevandsinteraktionen, og forbedrer modellens anvendelighed væsentligt i forbindelse med vurdering af vandføringen i mindre vandløb og indvindings påvirkning af vandføringen.

For vandløbene er nøjagtighedskriterierne opstillet jf. Geovejledning 7, hvor kriterierne varierer afhængigt af vandløbsdynamikken (Q10/Q90, Tabel 24). For den dynamiske beskrivelse af vandføringen, var det kun muligt at opnå en performance på screeningsniveau

eller bedre for DK1, 3 og 4, mens vandbalancer (WBE og WBE_sommer) er opfyldt på screeningsniveau eller bedre for alle modeller, Bilag 2. Beregnes en simpelt middelværdi på tværs af alle stationer indenfor en delmodel kan dette sammenlignes med den aggregerede performance for DK-model2009 (Højberg et al., 2010). Denne sammenligning viser en markant forbedring fra DK-model2009 til version 2014 for såvel NSE og vandbalancen, hvor eksempelvis middelværdien af NSE for Fyn og Midtjylland er øget fra 0,39 og 0,30 til 0,82 og 0,62. Til trods for den markante forbedring, er dynamikken ikke beskrevet til et screeningsniveau for alle delmodeller, hvilket kan være problematisk, hvis modellen skal anvendes til estimering af forskellige flow variable, såsom kvartiler og overskridelser (Henriksen et al., 2014).

Validering af modellen for perioden 1996-1999 gav resultater der er sammenlignelig med kalibreringsperioden, mens der blev opnået en væsentlig dårligere beskrivelse af vandløbsdynamikken mellem 2007 og 2010. Efter 2007 er der sket en drastisk reduktion i antallet af nedbørsstationer, og det kan være nærliggende at slutte, at den dårligere performance skyldes et input datasættet af dårligere kvalitet, det har dog ikke kunnet eftervises. Baseret på analyserne gennemført i forbindelse med kalibrering og validering af modellen er der imidlertid heller ikke noget der indikerer, at der skulle være andre forhold, der gør modellen generelt dårligere til at beskrive perioden efter 2007.

Vandbalancen for hele perioden 1996 – 2010 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 European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and Philosophy of a 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 European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: Structure of a 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 undersøkningsmetodik. Byggeforskningsrådet, Chalmers Tekniske Högskola, Göteborg. R41:1984.
- DHI (2008a). MIKE 11 – A modelling system for rivers and channels, user guide, pp. 454
- DHI (2014b). MIKE SHE User manual, volume 1: User guide, pp. 372
- 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., 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 (2014). MikeSheTools og wellviewer
- 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., Windolf, J., Børgesen, C.D., Troldborg, L., Tornbjerg, H., Blicher-Mathiesen, G., Kronvang B., Thodsen, H. og Ernstsen, V. (2015) National kvælstofmodel, Op-

- landsmodel 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. <http://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 Planteavlsvforsøg, Tidsskrift for Planteavls Specialserie, Beretning nr. S 2157.
- 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.
- Refsgaard, J.C., Troldborg, L., Henriksen, H.J., Højberg, A.L., Møller, R.R. & Nielsen, A.M. (2010) God praksis i hydrologisk modellering. Geo-Vejledning 7 (Særudgivelse). GEUS. København, 56 s.
- 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, 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.

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

9.1 Internetsider

[/www.vandmodel.dk/](http://www.vandmodel.dk/)

[/www.grundvandsovervaagningen.dk/](http://www.grundvandsovervaagningen.dk/)

Teknisk anvisning for hydrologisk modellering i NOVANA,
http://www.geus.dk/publications/grundvandsovervaagning/ta_hydrologisk_modellering_marts2006.pdf

Grundvand. Status og udvikling 1989-2006
http://www.geus.dk/publications/grundvandsovervaagning/1989_2006.htm

Areal informationsdata
<http://arealinformation.miljoportal.dk/distribution/>

Corine database
http://www.dmu.dk/Udgivelser/Kort_og_Geodata/CLC2000/