
Økologisk flow kræver dynamisk grundvands-overfladevandsmodel

Undersøgelsen dokumenterer, at modelsimulering af økologisk flow og vurdering af grundvandsindvindingers effekter på økologisk flow, kræver dynamisk grundvands-overfladevandsmodel. DK model kan udgøre det modelmæssige grundlag for kommunernes screening af nye vandindvindingstilladelser i forhold til økologisk flow, samt DCEs opstilling af nye indikatorer for ørred og smådyr i små, type 1 vandløb (< 10 km²).

HANS JØRGEN HENRIKSEN

Introduktion

I forbindelse med konsolidering af ny viden om sammenhæng mellem hydrologisk regime variable og biologiske kvalitetselementer for planter, smådyr og fisk, har GEUS og DCE i et forprojekt for SVANA foretaget en nærmere vurdering af modelgrundlaget (DK model) til brug for et nationalt screeningsværktøj, hvor der i GEUS's del bl.a. har indgået spørge-skema-undersøgelse i kommuner, interviews og valideringstest for 17 små, type 1 vandløb (< 10 km²), i forhold til nøjagtighed når det gælder simulering af empiriske formeludtryk for økologiske indikatorer for ørreder og smådyr (Henriksen et al., 2016).

De i forbindelse med Vandområdeplaner opstillede empiriske formeludtryk for sammenhænge mellem indikatorer og hydrologiske regime variable (Graeber et al., 2014) for større vandløb (type 2-3; > 2 m brede og > 10 km²) for planter, smådyr og fisk, har, sammen med klassiske performancekriterier for afstrømning (NSE, R2 og Fbal), udgjort grundlaget for valideringstesten i de 17 små vandløb, og for sammenligningen af indikator resultater ud fra empiriske formler, med modelbereg-nede resultater for SWAT (Andersen & Lu, 2016) og DK model (Henriksen et al. 2016), og sammenlignet med tilsvarende resultater

ud fra målte vandføringer.

I Figur 1 er de opstillede empiriske formler vist (Graeber et al., 2014). Figuren illustrerer beregning af hydrologiske regime variable og EQR værdier for økologisk flow for en station i et tilløb til Storåen hhv. med og uden indvinding. Screening i forhold til effekt af vandindvinding er baseret på acceptable grænser for EQR ændringer (Henriksen et al. 2014). Mean-dringsgrad (Sin) er udeladt fra beregning på figuren, da det ikke er de absolutte tilstande der regnes på.

Begge modeller er kalibreret i forhold til Nash-Sutcliffe (NSE) og vandbalance fejlen (Fbal). SWAT er kalibreret (autokalibrering med globale søgerutine) for udvalgte stationer med god performance, hvorefter forskellige modelparametre er overført til umålte oplande, mens andre parametre er baseret på en regionalisering (Andersen & Lu, 2016). DK model er ikke kalibreret for de små vandløb, men for større vandløb (Højberg et al., 2015). Udover NSE og Fbal har indgået trykniveau (RMSE trykniveau) og vandbalance for perioden 1/7-31/8 (FbalSommer) i objektivfunktionen (invers modellering, gradientbaseret vha. PEST).

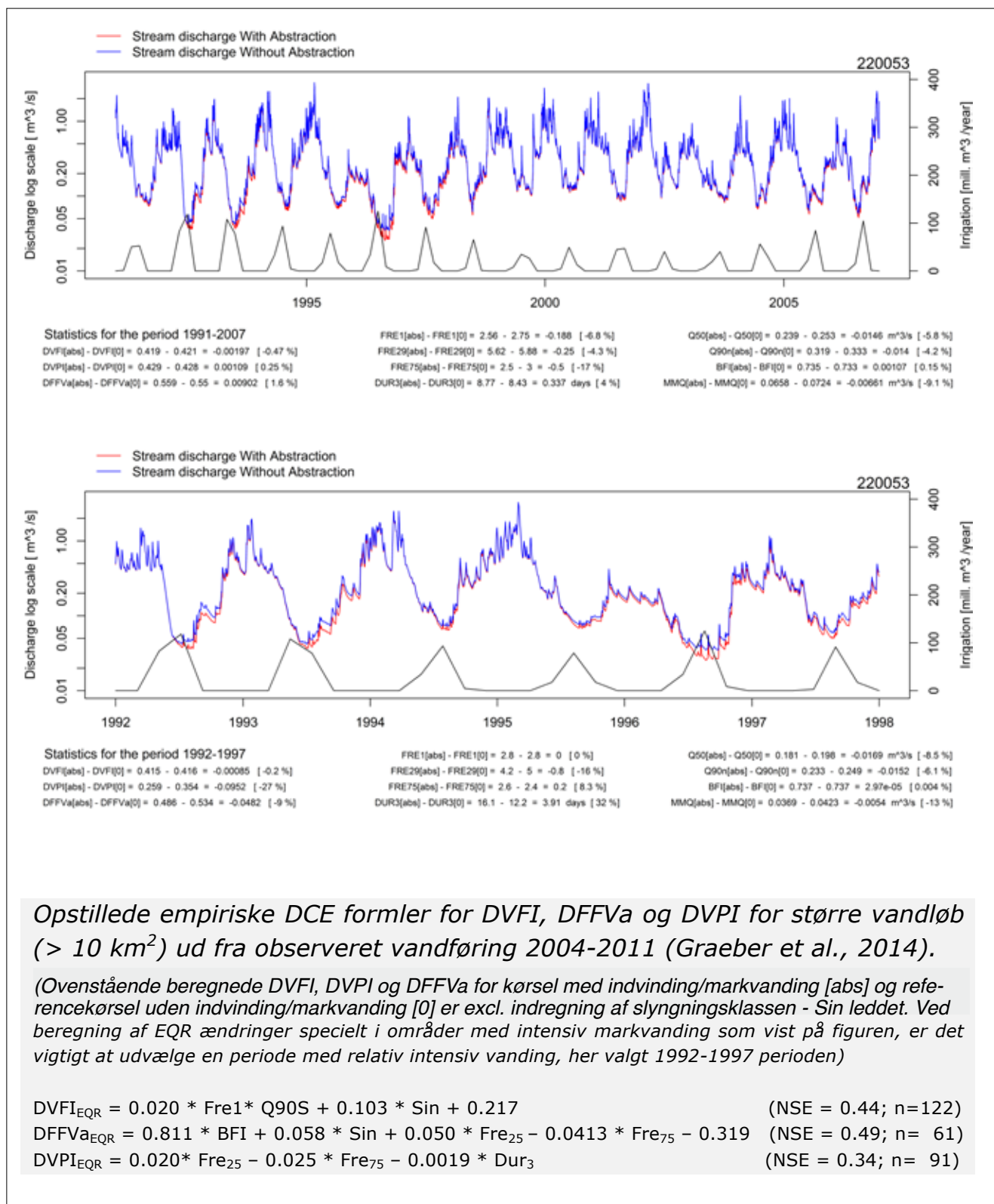
Ingen af de to modeltyper er dermed kalibreret i forhold til hydrologisk regime variable og empiriske formler der indgår i økologiske flow indikatorer. Analysen er derfor en "ægte" valideringstest.

Metodik for valideringstest for 17 små vandløb

DCE har identificeret i alt 34 vandføringsstationer fra små vandløb, hvoraf 17 har komplette daglige data for perioden 1990-2010 og samtidig er repræsenteret i DK model med indbygget vandløb med mulighed for udtræk fra nærmeste MIKE 11 Q punkter (hvorved det giver mening at anvende stationen i en test af performance i forhold til både DK model og SWAT). Af de 17 stationer tilhører 10 stationer kategorien type 1 vandløb, dvs. små vandløb med oplandsareal mindre end 10 km² (Se Figur 2 hvor placeringen fremgår). Det er disse 17 stationer der fokuseres på i det følgende, når nøjagtighed i forhold til økologisk flow indikatorer, sammenlignes med beregning af indikatorer med anvendelse af målte vandføringstidsserier, for hhv. SWAT (Andersen & Lu, 2016) og DK model (Henriksen et al., 2016).

I Figur 3 er resultater for SWAT og DK model for de to perioder 2000-2005 og 2006-2010 af beregninger af middel absolut fejl ud fra samtlige 17 små vandløb der indgår i testen i søjlediagram form.

Det fremgår entydigt af Figur 3, at DK model har bedre performance end SWAT på de samlede indikatorer. Det samme gælder frekvenser (Fre1, Fre75, Fre25) og varigheder (Dur3). De to modeller er omtrent lige gode til median afstrømning (Q50) og baseflow index (BFI). SWAT er bedst til low flow



Opstillede empiriske DCE formler for DVFI, DFFVa og DVPI for større vandløb (> 10 km²) ud fra observeret vandføring 2004-2011 (Graeber et al., 2014).

(Ovenstående beregnede DVFI, DVPI og DFFVa for kørsel med indvinding/markvanding [abs] og referencekørsel uden indvinding/markvanding [0] er excl. indregning af slyngningsklassen - Sin leddet. Ved beregning af EQR ændringer specielt i områder med intensiv markvanding som vist på figuren, er det vigtigt at udvælge en periode med relativ intensiv vanding, her valgt 1992-1997 perioden)

$$DVFI_{EQR} = 0.020 * Fre1 * Q90S + 0.103 * Sin + 0.217 \quad (NSE = 0.44; n=122)$$

$$DFFVa_{EQR} = 0.811 * BFI + 0.058 * Sin + 0.050 * Fre_{25} - 0.0413 * Fre_{75} - 0.319 \quad (NSE = 0.49; n= 61)$$

$$DVPI_{EQR} = 0.020 * Fre_{25} - 0.025 * Fre_{75} - 0.0019 * Dur_3 \quad (NSE = 0.34; n= 91)$$

Figur 1 Eksempel på beregning af hydrologiske regime variable og økologisk flow (EQR værdier) for vandløbslokaltitet i Storå systemet på basis af DK model (Henriksen et al. 2016). Eksempel på beregnede hydrologiske regime variable med og uden indvinding for to perioder. På figuren er vist de tre empiriske formler opstillet af DCE (Graeber et al., 2014) for større, type 2-3 vandløb.

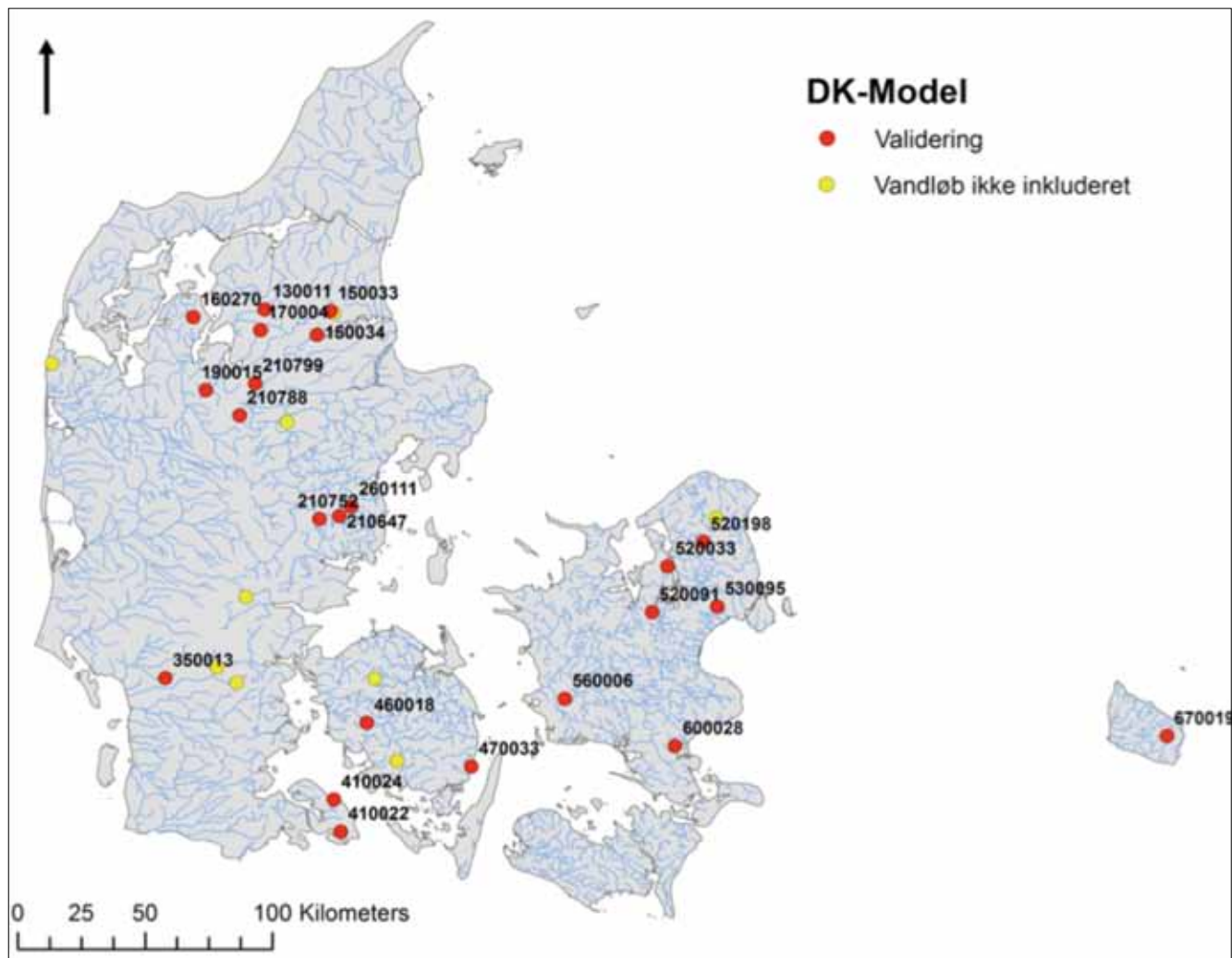
ekstremitet Q90S (=Q90/Q50). Samlet set er DK model imidlertid væsentlig bedre end SWAT på økologisk flow (DVFI_{EQR}, DVPI_{EQR} og DFFVa_{EQR}).

Selvom indikatorer er relativt godt bestemt med DK model, er modellen for de små vand-

løb relativ dårlig til simulering af median minimums afstrømning (SWAT giver usikkerheder på 100-200 % i gennemsnit, mens DK model har noget større usikkerheder på op mod 400 %). Det skal nævnes, at DK model udtræk er foretaget fra nærmeste MIKE 11 Q-punkt, og

det er ikke alle steder at disse punkter passer præcist med placeringen af vandføringsstationen. Det kan derfor give noget støj på resultaterne, specielt for størrelsen af median minimumsafstrømningen.

Samtidig er sammenligning af % afvigelse



Figur 2 Placering af små vandløb der udgør grundlag for DK model/SWAT sammenligning. Med rødt er vist stationer hvor der indgår vandløb i DK model setup. Med gult er vist stationer, hvor der ikke er et vandløb indbygget og derfor ikke mulighed for udtræk af vandføring med DK model. Af de 24 røde stationer har 17 data for hele perioden 2000-2010, og kan dermed anvendes i valideringstest for økologisk flow.

på median minimumsafstrømningen problematisk i små vandløb hvor median minimum vandføringen "går mod nul". Det giver stor %-vis fejl, selvom fejlen opgjort i l/s kan være acceptabel. Eksempelvis er der tre stationer for 2000-2006 hvor DK model simulere store %-vise fejl, hvor SWAT rammer bedre. Der er tale om stationer, hvor den observerede median minimumsafstrømning er hhv. 0 l/s, 1 l/s og 1 l/s (Henriksen et al. 2016 - Appendix C, side 145). Her simulerer DK model hhv. 7 l/s, 24 l/s og 12 l/s, mens DCEs SWAT model giver hhv. 2 l/s, 3 l/s og 1 l/s for de tre type 1 lokaliteter. DK modellen giver opgjort i l/s en afvigelse på ca. 10 l/s mod SWATs ca. 3 l/s for disse tre stationer.

Afvigelse peger på at SWAT er mere nøjagtig end DK model til absolut flow for små vandløb, men forskellen er mindre markant udtryk i l/s end udtrykt i %-vis afvigelse. Vurdering af effekter som %-vis afvigelse giver derfor absurde resultater i små vandløb, og man bør i stedet fokusere på, hvor store afvi-

gelser der er i absolut flow (fx l/s), hvor minimumsvandføring er lille (under 50-100 l/s).

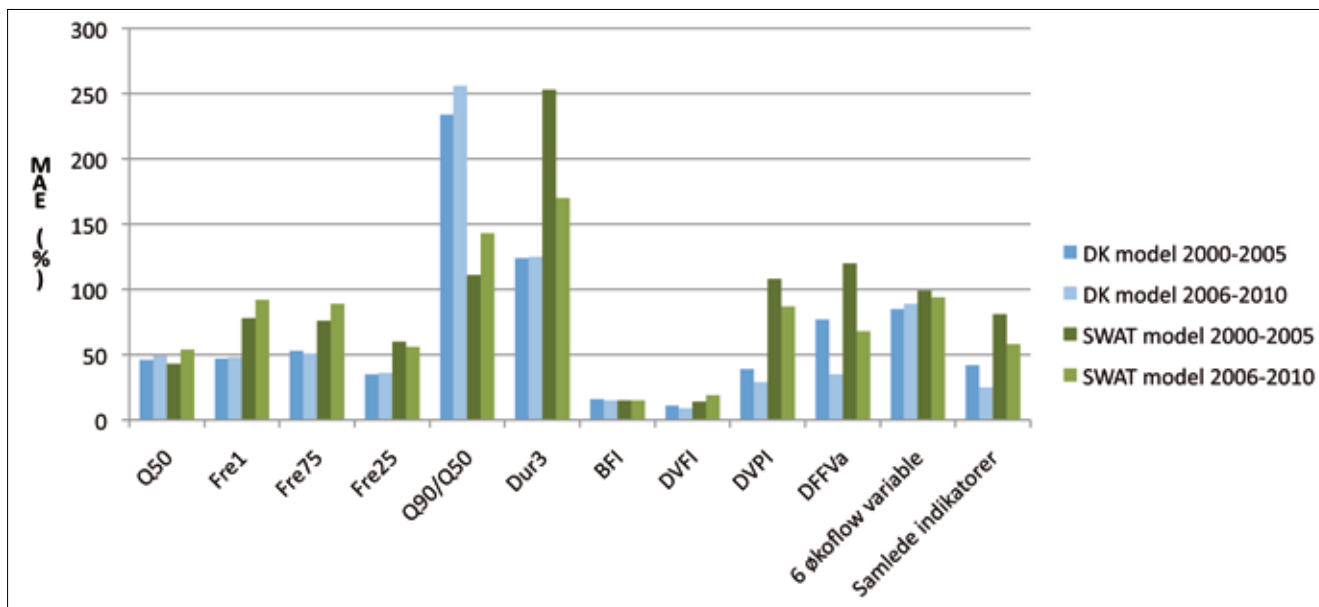
De nye formeludtryk er derfor på trods af store % vise afvigelser på minimumsafstrømning rimeligt nøjagtigt simuleret med DK model (for både $DVFI_{EQR}$, $DVPI_{EQR}$ og $DFFVa_{EQR}$), og derfor er robuste i forhold til vandføringer der går mod nul, eller vandløb der tørrer ud. Indikatorer og DK model grundlag er anvendelige også for vandløb, der har naturlig udtørring, og beregning af indikatorer vil kunne håndteres også for små vandføringer. Indikatorer for planter er gældende også i små, type 1 vandløb, og DVPI er rimeligt sensitiv i forhold til vandindvinding. Der er behov for at opstille nye indikatorer for ørred og smådyr til brug for små type 1 vandløb (< 10 km²), og det vil der blive kigget nærmere på af DCE i hovedprojekt.

En ting er at DK model er bedre end SWAT, men er den god nok til simulering af økologiske flow indikatorer, og opstilling af nye indikatorer?

Det er undersøgt, ved at sammenligne performance, og optælle, hvor stor en andel af vandførings-stationerne, der opfylder kriterier for nøjagtighed jf. geovejledninger fra grundvandskortlægningen. Der er således anvendt kriterier for nøjagtighed for økologisk flow der tager udgangspunkt i tilsvarende kriterier for Fbal for en screeningsmodel, der anvendes i hydrologisk geovejledning.

Nøjagtighedskriterier for Fbal afhænger af størrelsen på middelvandføringen, hhv. max 40 % afvigelse for Fbal for vandløb med middelvandføring < 100 l/s og max 25 % afvigelse for Fbal for vandløb med middelvandføring 100-500 l/s. Jf. hydrologisk geovejledning skal 3 ud af 4 stationer opfylde disse kravværdier. I valideringstesten sammenlignes hvilken %-del af de 17 små eller 10 små, type 1 vandløb, der opfylder disse krav til max afvigelse med hhv. SWAT og DK model, i forhold til beregning ud fra målt vandføring.

Antager man, at der kan anvendes samme %-vise kravværdier for $DVFI_{EQR}$, $DVPI_{EQR}$ og



Figur 3. Valideringstest for SWAT og DK model (Henriksen et al., 2016) af nøjagtighed (middel absolut fejl –MAE) på model simulering for hydrologiske regime variable (Q50, Fre1, Fre25, Fre75, Q90/Q50, Dur3, BFI) og økologiske indikatorer for planter (DVPI_{EQR}), smådyr (DVFI_{EQR}) og fisk (DFFVa_{EQR}) for 17 små vandløb, sammenlignet med tilsvarende beregning på basis af observeret vandføring. Desuden vist mål for MAE samlet vurderet for de 6 hydrologiske regimevariable og 3 indikatorer.

DFFVa_{EQR} som for Fbal, dvs. hhv. 40 % for middel vandføring < 100 l/s og 25 % for 100 < middel vandføring < 500 l/s, når man frem til de i Figur 4 beregnede resultater af, hvor mange af de små vandløb, hhv. SWAT og DK model, vil kunne leve op til rimelige kravværdier for nøjagtighed for en screeningsmodel i forhold til økologisk flow simulering.

Der er jf. Figur 4 væsentligt flere stationer der opfylder nøjagtighedskriterier for en screeningsmodel for DK model sammenlignet med SWAT. DK model opfylder kriterier for 3 ud af 4 stationer for både DVFI og DFFVa,

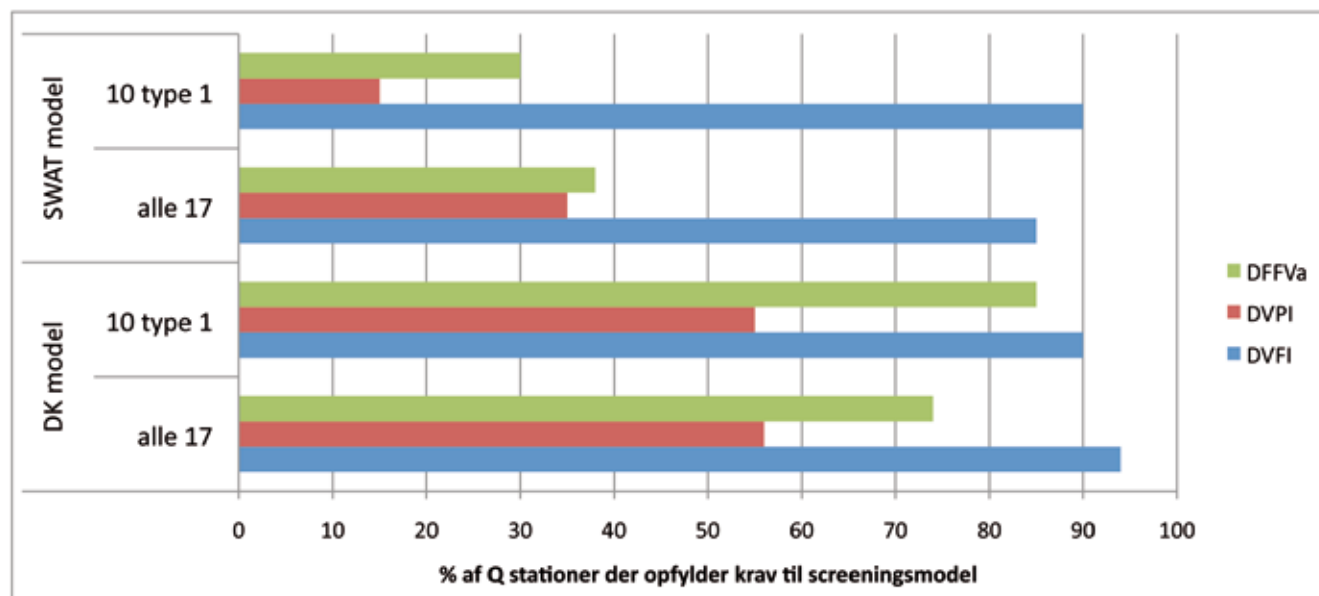
mens SWAT kun kan klare kriteret for DVFI. Resultater for SWAT viser, at kun 20-40 % af stationerne opfylder performancekrav i forhold til DVPI og DFFVa. En sammenligning af NSE, R2 og Fbal for SWAT og DK model (Henriksen et al., 2016) har i øvrigt vist, at DK model er bedre til simulering af afstrømningsdynamik (R2 og NSE) end SWAT, hvorimod SWAT er bedre end DK model, til simulering af vandbalancen (Fbal).

DK modellens styrke ligger dermed i en bedre beskrivelse af afstrømningshydrografens dynamik hvor parametre som Nash-Sut-

cliffe (NSE) og korrelationskoefficienten (R2) har væsentlig bedre performance med DK model sammenlignet med SWAT.

Økologisk flow og vurdering af akkumulerede effekter af vandindvinding i små og store vandløb kræver en dynamisk, grundvands-overfladevandsmodel

DK modellen er en fysisk baseret dynamisk, grundvands-overfladevandsmodel. Markvandinger er beskrevet med såvel år til år som sæsonvariationer, hvilket bevirker at påvirknings-



Figur 4 Afbildning af % af de små vandløb der simuleres med acceptabel nøjagtighed på DVFI_{EQR}, DVPI_{EQR} og DFFVa_{EQR} for SWAT model og DK model for 17 små vandløb og 10 små type 1 vandløb (kravværdier: max 40 % afvigelse for vandløb med middel vandføring < 100 l/s og max 25 % afvigelse med vandløb med middel vandføring på 100-500 l/s).

beregning er mere detaljeret og formentlig mere nøjagtig end med brug af stationære grundvandsmodeller og/eller konceptuelle, nedbør-afstrømningsmodeller såsom SWAT.

Danmark har sammenhængende grundvandsforekomster, relativ stor grundvandsdannelse 100-300 mm/år eller mere. Indvinding er 100 % grundvandsbaseret. Til sammenligning beskriver SWAT grundvandsafstrømning meget forsimplet som lineære magasiner. SWAT kan derfor ikke gøre rede for udbredelsen af sænkningstragten, til nabo vandløb eller nedstrøms strækninger, på samme måde som DK model kan, hvor geologi og hydrogeologi er indbygget i en 3D model bestående af ca. 10 lag, og hvor trykniveau og grundvandsstand er eksplicit modelleret i tid og rum.

Undersøgelsen har vist at mange kommuner anvender stationære grundvandsmodeller med en argumentation om, at der ikke er data til en dynamisk grundvands-overfladevandsmodel. De stationære grundvandsmodeller kan imidlertid ikke beskrive hverken hydrograf eller 'capture', som er helt afgørende for en korrekt vurdering af vandløbspåvirkningen. Ej heller kan de beskrive påvirkningsgradens tidlige variationer i forhold til afstrømningshydrografen og dermed effekter på økologiske flow karakteristika. Det de kan beskrive er imidlertid effekter på grundvandspejlet og et bud på hvor meget middelvandføringen ændres fx i l/s under forudsætning af den stationære model.

Kommunerne mangler derfor en kvalificeret vurdering af effekter på afstrømningshydrograf og økologisk flow. Da påvirkningen af hydrografen er alt andet end simpel, kan man heller ikke vurdere hvordan EQR værdier vil blive ændret hverken med en stationær grundvandsmodel eller en konceptuel nedbør-afstrømningsmodel. Dermed kan man ikke screene i forhold til den nye økologiske viden. Det er her DK model kan bidrage, og endog bidrage med rimeligt nøjagtige data også for de små vandløb og type 1 vandløb (< 10 km²), selvom DK model egentlig ikke er designet til denne anvendelse, og selvom DK model som nævnt giver ret store usikkerheder på minimums-afstrømningen.

Der er derfor fortsat behov for forbedringer af DK model, såfremt man skal simulere minimumsvandføringen bedre end man gør jf. valideringstesten, og benytte modellen som en del af grundlaget for opstilling af nye indikatorer for ørred og smådyr i små vandløb. Kunne man så ikke forbedre SWAT i stedet? Det kunne man sikkert, men GEUS synes, det er svært at få øje på tilsvarende forbedringsmuligheder i SWAT model tilgangen, fordi modelkonceptet ikke har grundvandet rigtigt med.

GEUS anbefaler derfor på baggrund af undersøgelsen, at man satser på en forbedret DK model som grundlag for et landsdækkende screeningsværktøj, og at modellen i de kommende år yderligere forbedres, ved detaljering af maskevidden (fra 500 m til 100 m), og ved indbygning af mere viden fra kortlægningsmodeller, der endnu ikke er indarbejdet. Derudover har undersøgelsen vist at DK modellens nøjagtighed vil kunne forbedres ved fx invers modellering, hvor baseflow index (BFI) indarbejdes i objektivfunktionen, der i forvejen har NSE, Fbal, FbalSommer og RMSE (trykniveau) indbygget. Det har også vist sig muligt at inddrage RMSE (vanding) i objektivfunktionen. Derved er opnået en reduktion af usikkerheder på DVPI, DFFVa og DVFI på yderligere 50 % (Henriksen et al. 2016).

Konklusion

Undersøgelsen har vist, at en dynamisk grundvands-overfladevandsmodel (DK model) giver markant bedre performance end en nedbør-afstrømningsmodel (SWAT opstillet af DCE), når det gælder simulering af økologisk flow ud fra empiriske formeludtryk sammenlignet med brug af observeret vandføring. Resultaterne er bemærkelsesværdige, idet DK model giver større usikkerhed på simuleret minimumsvandføring end SWAT i de 17 små vandløb, men entydigt er bedre end SWAT til simulering af hydrologiske regimevariable fx frekvenser (Fre 1, Fre25, Fre75), varigheder (Dur3), og samlede empiriske formeludtryk for planter, smådyr og fisk. De to sammenlignede modeltyper giver omtrent samme usikkerhed i simuleret median afstrømning (Q50) og baseflow index (BFI).

Samlet vurderer GEUS på baggrund af undersøgelsen, at der vil være meget store samfundsmæssige gevinster ved et landsdækkende Vand-Web baseret på tilgængelig DK model, der giver mulighed for screening i forhold til tidsserier/hydrograf og økologisk flow, idet kommunerne ikke i øjeblikket har modelværktøjer der er gearret til en sådan screening. Systemet vil samtidig kunne forbedre grundlaget for identifikation og opstilling af indikatorer for små type 1 vandløb (ørred og smådyr).

Referencer

- Andersen, HE og Lu, S. 2016. Test af metode til simulering af daglig vandføring i umålte type 1- vandløb. Notat fra DCE. August 2016. 51 pp.
- Gräber, D, Wiberg-Larsen, P, Bøgestrand J og Baattrup-Pedersen, A. 2014. Vurdering af vandindvinding på vandløbs økologiske tilstand Implementering af retningslinjer for effekten af vandindvinding i forbindelse med vandplanlægning og administration af vandforsyningsloven. Notat fra DCE. Nationalt center for miljø og energi. 27. august 2014.
- Henriksen, HJ, Rasmussen, J, Olsen, M, He, X, Jørgensen, LF og Troldborg, L. 2014. Effekt af vandindvinding. Implementering af modeller til brug for vandforvaltning. GEUS rapport 2014/74.
- Henriksen, HJ, Stisen, S, van der Keur, P, Danapour, M, He, X og Troldborg, L. 2016. Operationalisering af ny viden til administration af indvindingstilladelser. Forprojekt: Spørgeskemaundersøgelse og interviews i kommunerne, samt usikkerhed på modelberegning af vandindvindingseffekter på vandløbenes økologiske forhold. GEUS rapport 2016/46. 145 pp. <http://www.geus.dk/DK/water-soil/water-management/reports/Sider/default.aspx>
- Henriksen, HJ and Refsgaard, JC 2013: Sustainable groundwater abstraction. GEUS Report 30/2013. http://www.geus.dk/program-areas/water/denmark/rapporter/geus_rap_2013_30-uk.htm
- Højberg, AL, Stisen, S, Olsen, M, Troldborg, L, Uglebjerg, TB & Jørgensen, LF (2015) DK-model 2014 - Model opdatering og kalibrering. GEUS rapport 2015/8, København. <http://vandmodel.dk/vm/publikationer/index.html>

HANS JØRGEN HENRIKSEN, GEUS, hjh@geus.dk