

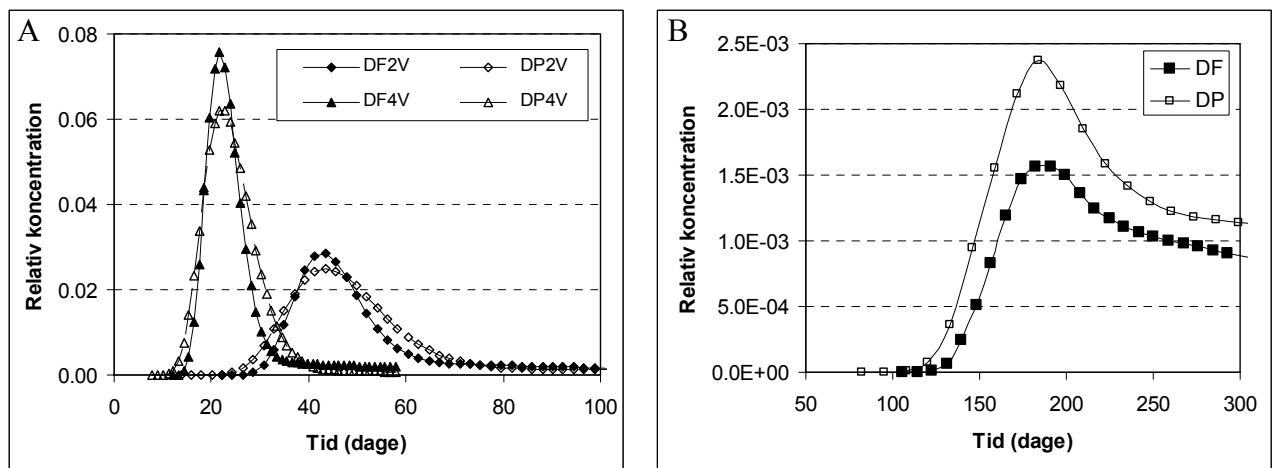
Efterfølgende er randbetingelserne ændret således, at fluksen gennem systemet øges med hhv. en faktor 2 og 4, se figur 5A. Der er desuden foretaget en simulering, hvor strømningsdomænet for både den diskrete sprække model og for den dobbeltporøse model er øget med en faktor 2 (til 16 m), mens de øvrige parametre er fastholdt fra 8 meters opsætningen, se figur 5B. Når flowraten eller transportafstanden ændres afviger DP-modellen fra DF-løsningen.

Tabel 1 Parameterværdier for småskalamodel.

Parameter	Værdi
Bulk hydraulisk ledningsevne, K_b [m/s]	$1 \cdot 10^{-5}$
Sprækkeafstand, $2B$ [m]	2
Sprækkeåpning, $2b$ [m]	$3.25 \cdot 10^{-4}$
Matrix hydraulisk ledningsevne, K_m [m/s]	$1 \cdot 10^{-7}$
Matrix porøsitet, n_m	0.35
Effektiv diffusionskoefficient, D_{eff} [m ² /s]	$3 \cdot 10^{-10}$
Flux rand, venstre side, q_{bc} [m/s]	$2 \cdot 10^{-8}$
Konstant tryk rand, højre side, h_{bc} [m]	0.0

Dette skyldes, at DP modellen er kalibreret mod et system, som den ikke er egnet til at beskrive. For det første er det usikkert om systemet vist på figur 4A udgør et REV, men selv hvis denne betingelse antages at være opfyldt, er det modellerede område ikke meget større end REV, hvilket er en betingelse for at kunne benytte DP metoden. Der vil ved kalibrering af DP-modellen derfor opnås parametre, som ikke repræsenterer de fysiske forhold, og modellen kan ikke benyttes til at simulere andre strømningsforhold, end netop det den er kalibreret til. Værdien af en sådan model er derfor relativt begrænset.

Ved DP-modellering af gennembrudskurver fra søjleforsøg fandt Jørgensen et al. (2004) tilsvarende, at det var nødvendigt at estimere modelparametre specifikt for de anvendte strømningsrater. Resultaterne viser igen, at hvis en DP-model benyttes på en for lille skala, vil modellens parametre kun være gyldige for nøjagtigt den strømningsituation, som der er kalibreret mod, og modellen mister dermed sin prediktive evne.



Figur 5. Til venstre ses gennembrudskurver i 8 m domæne med 2x (2V) og 4x (4V) hastighed. Til højre ses gennembrudskurver for et 16 m langt domæne. DF: Diskret sprække, DP: Dobbeltporøs.

Transportsimulering med dobbeltporøs og EPM model

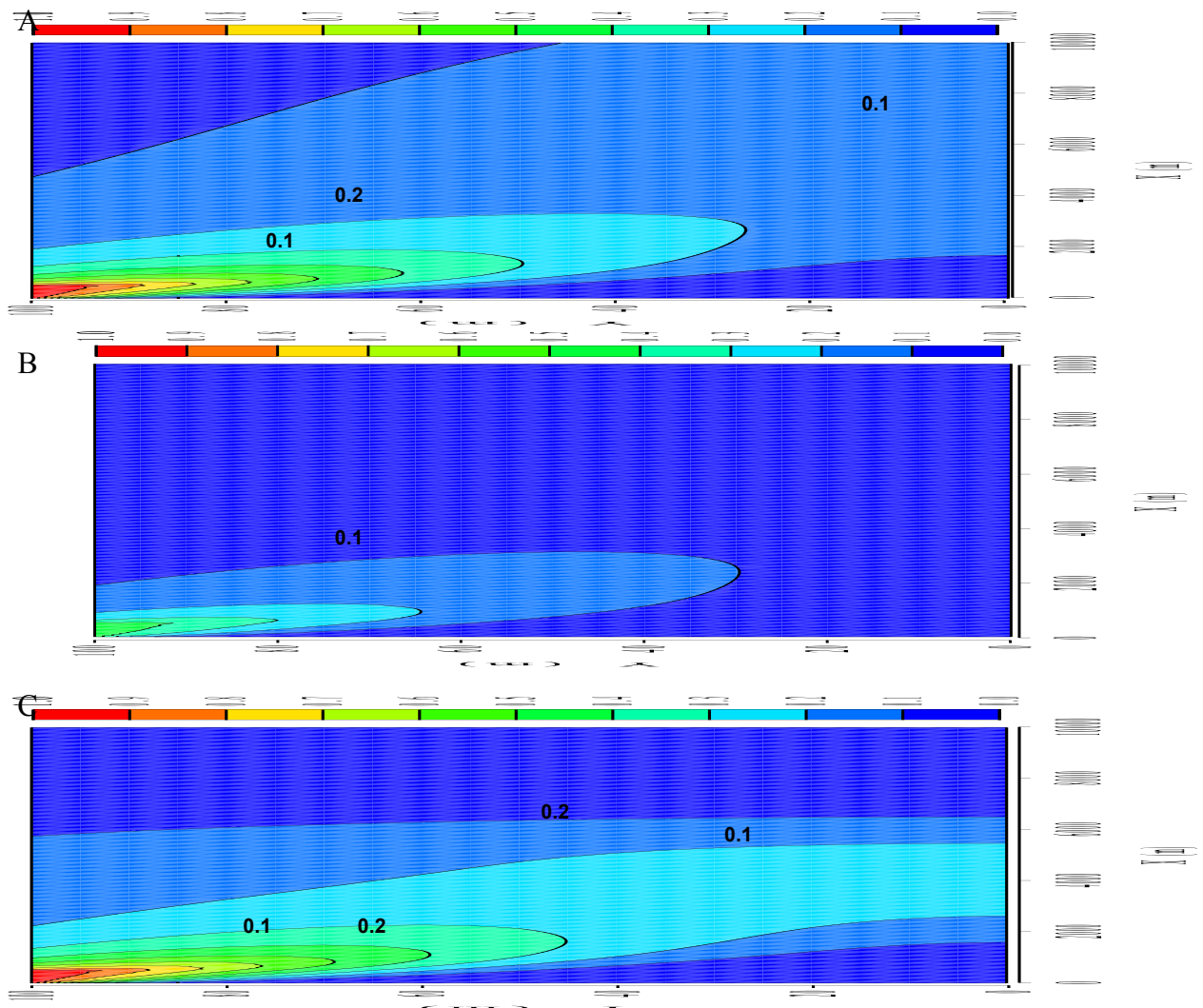
For at illustrere problemet med at benytte en EPM model på et system, hvor der ikke er transportligevægt mellem sprække- og matrix-domænet, er der opstillet både en DP- og en EPM-model for et middelstort modelområde. Området, som repræsenterer et vertikalt tværsnit langs en strømlinie, er 10 km langt og 100 m tykt. Bunden er impermeabel, langs højre rand er trykniveauet fastholdt, mens der på venstre rand er påsat en fluks på $q_{bc} = 2 \cdot 10^{-7}$ m/s (svarende til en horisontal gradient på 2 ‰). Langs øvre rand er der specificeret en infiltration på 250 mm/år. På et 500 meter langt interval længst til venstre (opstrøms ende) antages det infiltrerende vand at have en koncentration på 1, mens de øvrige tilstrømninger har en koncentration på 0. Det modellerede område er homogent med parametre angivet i tabel 2.

Tabel 2 Parameterværdier for storskalamodel.

Parameter	Værdi
Bulk hydraulisk ledningsevne, K_b [m/s]	$1 \cdot 10^{-4}$
Matrix porøsitet, n_m	0.35
Effektiv diffusionskoefficient, D_{eff} [m ² /s]	$3 \cdot 10^{-10}$
Udvekslingsparameter, β [s ⁻¹]	$4.2 \cdot 10^{-11}$
Sprækkeporøsitet, n_f [1]	$2 \cdot 10^{-4}$

På figur 6 ses modelresultater fra den dobbeltporøse models sprække- og matrix-domæner samt fra EPM modellen efter en simuleringstid på 160 år. Der er relativt stor forskel på koncentrationerne i DP-modellens sprække- og matrix-domæner, hvilket viser, at der ikke er koncentrationsligevægt mellem de to domæner. EPM-modellens resultater afviger derfor også markant fra DP-modellens sprækkedomæne i store dele af modelområdet. Eksempelvis simuleres der med EPM-modellen en for langsom udbredelse af stoffet, som i DP-modellen er nået til den nedstrøms rand, mens den i EPM-modellen kun er nået til den centrale del af området. Omvendt viser EPM-modellen for høje koncentrationer i området $3 < x < 6$ km. Benyttes udtryk (7) findes F_s til 380 efter en transportafstand på 1000 m, hvilket betyder, at transportafstanden er for lille til, at en EPM-model kan anvendes.

I figur 7 ses transportresultater efter 1270 år, hvor der er tæt på at indstille sig en stationær transportsituation. Koncentrationerne i de to DP-domæner er næsten ens, og betingelsen om transportligevægt mellem sprække- og matrix-domænerne kan derfor antages at være opfyldt. EPM-modellen producerer derfor også et resultat, som ligger meget tæt på DP-modellens. I dette tilfælde har der været tilstrækkelig tid til rådighed for udvekslingen mellem sprækker og matrix, således at koncentrationen i de to domæner er tilnærmelsesvis ens. I dette tilfælde vil EPM-modellen være et lige så godt værktøj til bestemmelse af transportprocesserne i det opsprækkede medium som en DP-model.



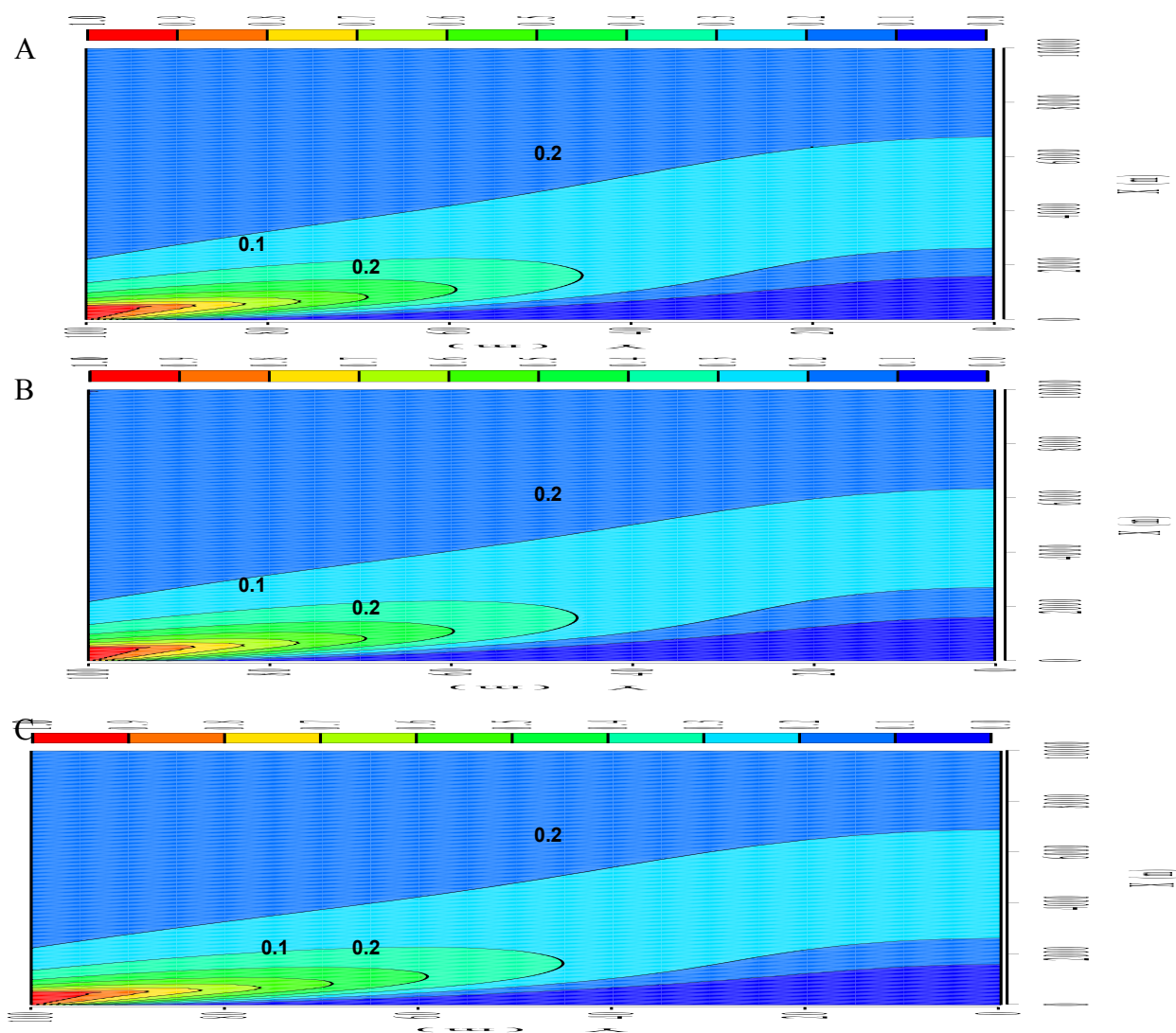
Figur 6. Relative koncentrationer efter 160 år for hhv. A: Mobilt domæne i dobbeltporøs model, B: Immobil domæne i dobbeltporøs model, og C: EPM-model.

DISKUSSION

Transportmodeller kan benyttes på både punktforureningsskala (størrelsesorden 10^2 m), indsatsplanskala (størrelsesorden 10^3 m) og regional skala (størrelsesorden 10^4 m). Det bør imidlertid overvejes, hvilken modeltype der er bedst egnet til de forskellige formål og skalaer.

På punktforureningsskala vil både diskret sprække og dobbeltporøse modeller kunne anvendes, mens det er tvivlsomt om EPM-modeller vil kunne opnå generel gyldighed pga. den relativt lille transportskala og den deraf følgende ringe tid til udveksling mellem sprækker og matrix. I tilfælde, hvor sprækkeafstanden, 2B, er stor i forhold til størrelsen af det modellerede område, vil kun en diskret sprække model kunne repræsentere det opsprækkede magasin tilfredsstillende.

På indsatsplanskala vil det være mest praktisk at benytte dobbeltporøse og EPM modeller. For at undersøge, hvordan de opsprækkede magasiner håndteres i praksis, er der gennemført telefoninterview med de fem amter på Sjælland og Lolland-Falster (Frederiksborg, København, Roskilde, Vestsjælland og Storstrøm), som administrerer indsatsplanlægning i områder med kalkmagasiner.



figur 7. Relative koncentrationer efter 1270 år for hhv. A: Mobilt domæne i dobbeltporøs model, B: Immobilt domæne i dobbeltporøs model, og C: EPM-model.

Generelt beskrives Danienkalk og Skrivekridt, i de områder hvor de to enheder begge optræder, som separate formationer med forskellige hydrauliske parametre. De øverste 10-20 m under Kvartæret antages at være opsprækket, men kun undtagelsesvist foretages der en opdeling af den opsprækkede del i flere enheder f.eks. svarende til stærkt opsprækket og svagt opsprækket. I alle tilfælde er de opsprækkede kalkmagasiner modelleret med EPM-metoden, typisk ved anvendelse af MODFLOW eller MIKE SHE modelopsætninger. Som det er illustreret ovenfor er der risiko for, at EPM-metoden ikke kan beskrive transportmekanismerne i de opsprækkede formationer korrekt, og der er derfor også risiko for, at transporttider (fundet

vha. partikelbanemodeller) og koncentrationsniveauer (fundet vha. traditionelle transportmodeller) vil være fejlbehæftede.

Den regionale skala er repræsenteret f.eks. i den nationale vandressourcemodel (DK-modellen). Her beskrives alle kalkformationerne som ét magasin, der har varierende hydrauliske parametre som funktion af område. Modellen har hidtil kun været anvendt til beregning af vandbalancer og vandflukse, og det resulterer derfor ikke i problemer at benytte en sådan beskrivelse til disse formål.

Specielt i forbindelse med indsatsplanlægning i opsprækkede kalkformationer vil det være ønskeligt at få kvantificeret, hvor store forskelle der er på at benytte dobbeltporøse modeller frem for EPM-modeller. Anvendelse af DP-modeller stiller krav til information om andre typer parametre, end der kræves i EPM-modellerne, men der er specielt i forbindelse med boringsundersøgelser mulighed for at opnå dele af denne information. I Københavns Amt stilles der nu krav om, at prøvepumpningstest i de opsprækkede formationer udføres således, at de indsamlede data giver information om kalkens dobbeltporøse natur, samt at data tolkes vha. dobbeltporøse modelværktøjer. Denne udvikling er interessant i forbindelse med transportmodellering, da de herved udledte parametre for hhv. sprækker og matrix sandsynligvis vil kunne bidrage væsentligt til at fastlægge parametrene i f.eks. en dobbeltporøs transportmodel. Desuden vil flow-logs og viewlogs i borerer vil kunne bidrage med information om indstrømningshorisonter og sprækkedensitet.

KONKLUSION

Det er i ovenstående gennemgang vist at:

- transportmodellering af opsprækkede kalkmagasiner ikke altid kan håndteres med en ækvivalent porøs medium (EPM) model, men at der afhængig af rumlig og tidlig skala kan være behov for at anvende både diskret sprække (DF) og dobbeltporøse (DP) modeller
- der er behov for at teste, hvor godt EPM-modeller simulerer transporttider og stoftransport specielt i forbindelse med indsatsplanlægningen

REFERENCER

Arnold, B.W., Zhang, H. & Parsons, A.M. (2000), Effective-porosity and dual-porosity approaches to solute transport in the saturated zone at Yucca Mountain: Implications for repository performance assessment. In: Faybishenko, B., Witherspoon, P.A. & Benson, S.M. (Eds.): Dynamics of Fluids in Fractured Rock. Washington: American Geophysical Union, pp. 313-322.

Bear, J. (1993), Modeling flow and contaminant transport in fractured media. In: Bear, J., Tsang, C.F. & Marsily, G. (Eds.): Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock. London: Academic Press, pp. 1-37.

Jakobsen, R., K.H. Jensen, & K.L. Brettmann (1993), Tracer test in fractured chalk, 1. Experimental design and results, Nordic Hydrology, 24, 263-274.

Jørgensen, P.R., T. Helstrup, J. Urup & D. Seifert (2004), Modeling of non-reactive solute transport in fractured clayey till during variable flow rate and time, J. Contam. Hydrol., 68, 193-216.

Miljøstyrelsen (2001), Miljøstyrelsens hjemmeside om drikkevand. Tilgængelig: <http://www.mst.dk/default.asp?Sub=http://www.mst.dk/vand/02000000.htm> (14. november 2001).

Rausch, R., Schäfer, W., Therrien, R., & Wagner, C. (2005), Solute Transport Modelling: An Introduction to Models and Solution Strategies, Gebr. Borntraeger, 2005, VI, 205 p., ISBN 3-443-01055-5.

Sudicky, E.A. (1990), The Laplace transform Galerkin technique for efficient time-continuous solution of solute transport in double-porosity media, Geoderma, 46, 209-232.

Sudicky, E.A. & R.G. McLaren (1998), FRACTRAN User's Guide, An Efficient Simulator for Two-dimensional, Saturated Groundwater Flow and Solute Transport in Porous or Discretely-fractured Porous Formations, Groundwater Simulations Group, Waterloo Centre for Groundwater Research, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada.

van der Kamp, G. (1992), Evaluating the Effects of Fractures on Solute Transport through Fractured Clayey Aquitards. In: Proceeding of the 1992 Conference of the International Association of Hydrogeologists – Canadian National Chapter, Hamilton, Ontario, Canada, May 11-13, pp. 468- 476.