

Kortlægning af risiko for makroporeafstrømning

Makroporestrømning er et delement i det danske fosforindeks. Vand, der strømmer via jordens makroporer til dræn eller grundvand, kan transportere fosfor i opløst form eller bundet til små jordpartikler. Fosfortab via jordens makroporer forudsætter, at der er makroporer i jorden, og at disse makroporer bidrager til en nedadgående vandtransport. Denne artikel beskriver en metode til at udpege områder i Danmark, hvor der eksisterer en høj risiko for vandtransport i jordens makroporer.

BO VANGSØ IVERSEN, CHRISTEN DUUS
BØRGESSEN, METTE LÆGDSMAND,
MOGENS HUMLEKROG GREVE, GOSWIN
HECKRATH, CHARLOTTE KJÆRGAARD

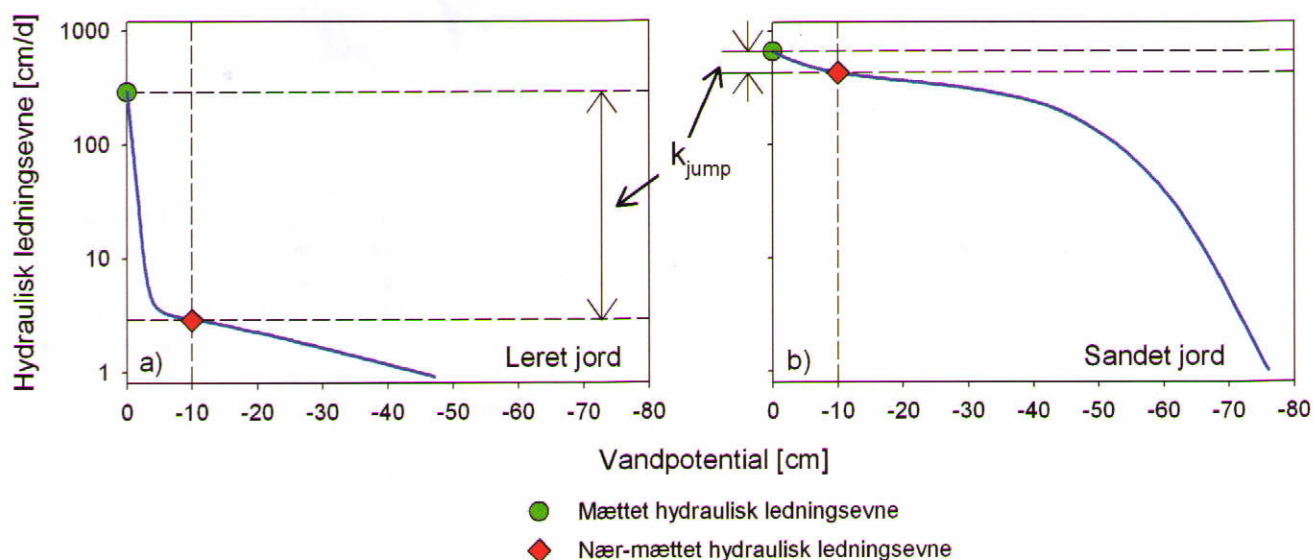
Jordens hydrauliske egenskaber

Transport af fosfor i jordens største porer (makroporer) enten i opløst form eller bundet til jordpartikler er en vigtig transportvej, når man ser på fosfortransport i jorden. Når fosfor transporteres opløst i makroporer, vil

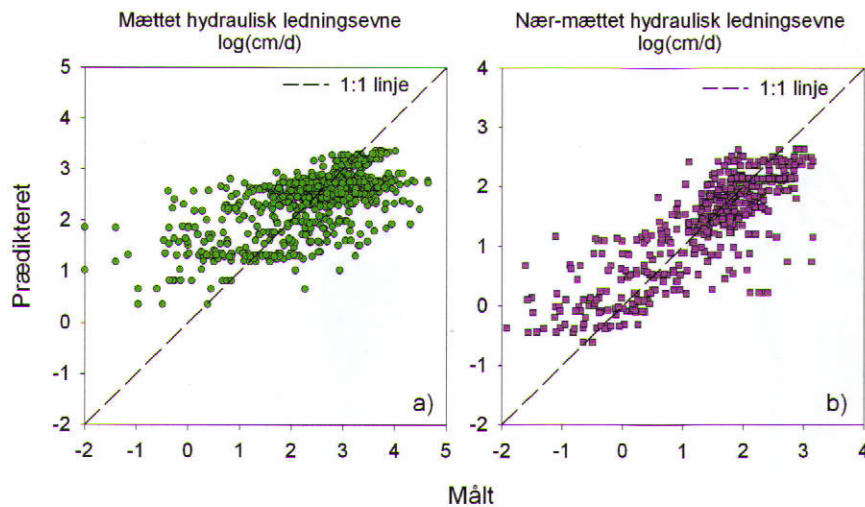
der være en begrænset kontakt med jordens bindingspladser, og potentialet for transport er derfor større end ved transport i mindre porer. Små jordpartikler (kolloider) kan via jordens makroporer transporteres til drænrør eller grundvandet og herfra videre ud i vandmiljøet. Jordens makroporer kan derfor fungere som en hurtig transportvej for opløste og partikulære fosforformer fra pløjelaget til vandmiljøet. Et estimat for risiko for makroporeafstrømning er et af delementerne i det danske fosforindeks. Vandtransport i jordens makroporer er en vigtig proces i lerede jorde,

hvorimod transporten i sandede jorde er domineret af vandstrømning i jordmatricen. Transport i jordens makroporer benævnes også præferentiel transport. Denne transportform er en bærende proces i relation til fosfortransport, transport af pesticider samt patogen transport. Makroporer dannes især af regnorme eller planterødder, men kan også være dannet i forbindelse med udtørring eller ved tektoniske spændinger i jorden.

Potentialet for makroporetransport i jorden er kontrolleret af to faktorer, nemlig forekomsten af makroporer i jorden og jordmatri-



Figur 1. Eksempel på relationen mellem hydraulisk ledningsevne og vandpotential for henholdsvis en lerjord og en sandjord. På kurveforløbet er den mættede og den nær-mættede hydrauliske ledningsevne markeret. Differensen mellem disse to værdier (k_{jump}) udtrykker potentialet for præferentiel vandtransport gennem jordens makroporer.



Figur 2. Resultatet af prædiktionen af a) den mættede hydrauliske ledningsevne og b) den nær-mættede hydrauliske ledningsevne (log-værdier). Figureerne viser den målte værdi plottet mod den af det neurale netværks prædikerede værdi.

cens evne til at lede vand. En jords evne til at lede vand defineres som jordens hydrauliske ledningsevne og har enheden længde per tidsenhed (eks. cm/d). Den hydrauliske ledningsevne ændrer sig med ændring af jordens vandindhold. Jorden har sin maksimale hydrauliske ledningsevne, når den er fuldt vandmættet. Dette betegnes som den mættede hydrauliske ledningsevne. Ved et faldende vandindhold falder den hydrauliske ledningsevne brat og ikke-lineært. Dette bratte fald skal først og fremmest forklares ved, at strømningsraten af en væske i en væskefyldt kontinuert pore afhænger af porens radius opløftet til fjerde potens (Poiseuilles lov). Dette betyder, at det ved fuld vandmætning er de store porer i jorden, der står for den største del af vandtransporten. Figur 1 viser relationen mellem hydraulisk ledningsevne og jordens vandindhold udtrykt ved et vandpotential (cm vandsøjle) for henholdsvis en lerjord og en sandjord. Den lerede jords hydrauliske ledningsevne (Fig. 1a) viser i eksemplet et kraftigt fald i den hydrauliske ledningsevne fra fuld vandmætning ($h = 0$ cm) til et vandpotential på omkring -5 cm vandsøjle, hvorefter ledningsevnen holder sig på et lavt og svagt faldende niveau. Dette markante fald er en direkte indikation af, at jorden består af en langsomt gennemtrængelig jordmatrice med en lav hydraulisk ledningsevne og et makroporesystem, der ved vandmætning bidrager til en høj hydraulisk ledningsevne. I eksemplet for den sandede jord (Fig. 1b) er jordmatricen mere porøs og den hydrauliske ledningsevne i denne derfor højere. Samtidig er porestørrelsesfordelingen mere ensartet, hvilket betyder, at den hydrauliske ledningsevne stiger mere gradvist

fra umættet til mættet tilstand.

I forbindelse med en nedbørsbegivenhed vil vandtransport i jordens makroporer først finde sted, når jordens evne til at lede vand i jordmatricen bliver overskredet. Initieringen af makroporetransporten er derfor i høj grad afhængig af jordmatrixens hydrauliske ledningsevne tæt på mætning. For at forudsige risikoen for makroporeafstrømning er det derfor nødvendigt at udpege jorde, der har makroporer, og hvor vandledningsevnen i jordmatricen i perioder overskrides.

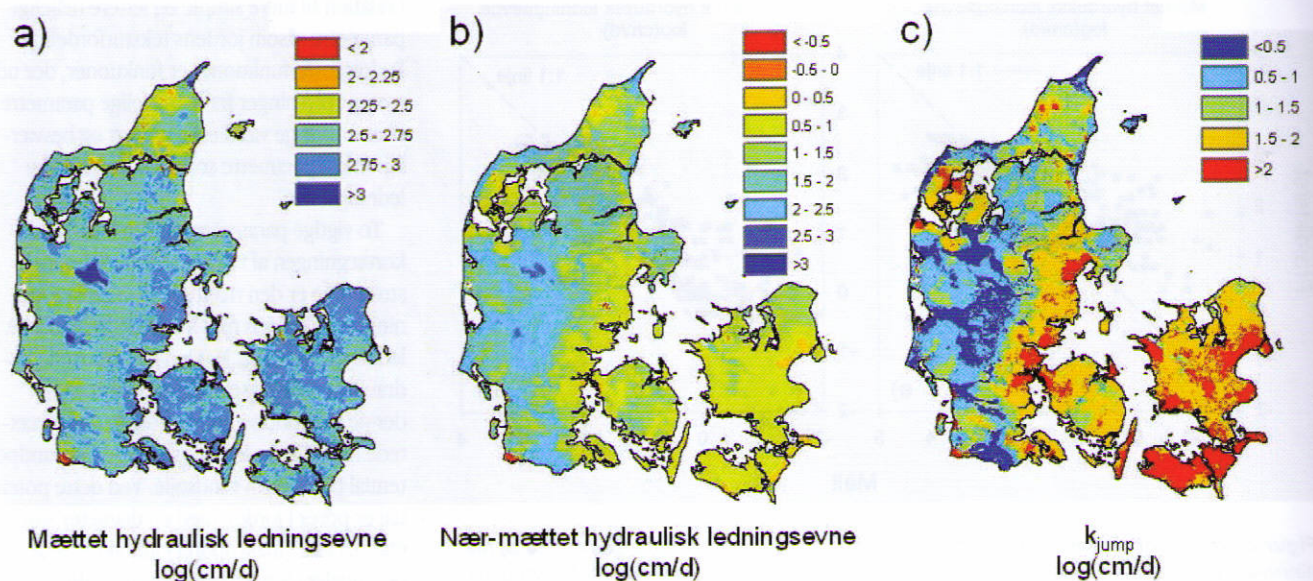
Udvikling af pedotransferfunktioner

For at kunne forudsige risikoen for transport i jordens makroporer er det vigtigt at have kendskab til jordens hydrauliske parametre. Ved det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet er der gennem en årrække udført målinger af den mættede og umættede hydrauliske ledningsevne i forbindelse med en række forskellige forskningsprojekter. Målingerne er foretaget i laboratoriet på uforstyrrede jordkolonner (6280 cm^3) udtaget i feltet i forskellige pedologisk definerede horisonter. Ved prøveudtagningen er der udgravet profiler, der er blevet beskrevet pedologisk. Samtidig er der udtaget prøver til bestemmelse af teksturfordelingen, vandretentionsegenskaber, volumenvægt samt indhold af organisk stof. Alt i alt er der udtaget kolonner fra mere end 200 horisonter fra mere end 70 forskellige profiler fordelt på forskellige jordtyper. I laboratoriet er der udført målinger af den umættede hydrauliske ledningsevne på næsten 500 prøver. Den mættede hydrauliske ledningsevne er målt på næsten 800 prøver. Dette giver et unikt datasæt, der indeholder information omkring hydrauliske parametre

i relation til mere simple og lettere målelige parametre såsom jordens teksturfordeling. Pedotransferfunktioner er funktioner, der udnytter oplysninger fra let målelige parametre til at forudsige værdierne på dyrt og besværligt målte parametre som den hydrauliske ledningsevne.

To vigtige parametre i forbindelse med kortlægningen af risikoen for makroporestrømning er den mættede hydrauliske ledningsevne og den nær-mættede hydrauliske ledningsevne (Fig. 1). Den nær-mættede hydrauliske ledningsevne i jordmatricen er i denne forbindelse defineret som den umættede hydrauliske ledningsevne ved et vandpotential på -10 cm vandsøjle. Ved dette potential er porer i jorden med en diameter større end $0,3$ mm (makroporer) luftfyldte. Stiger potentialet i jorden op til dette punkt vil jordens makroporer begynde at bidrage til vandtransporten.

Ved Det Jordbrugsvidenskabelige Fakultet er der udviklet et nyt jordbundskort over Danmark (Bornholm mangler dog fortsat), der baserer sig på den danske jordklassificering. Jordens indhold af ler (partikeldiameter $< 2 \mu\text{m}$), silt ($2-20 \mu\text{m}$), finsand ($20-200 \mu\text{m}$), grovsand ($200-2000 \mu\text{m}$), samt indholdet af organisk stof ligger til grund for jordklassificeringen. Jordbundskortet indeholder oplysning for jordens A- ($0-30$ cm), B- ($30-70$ cm) og C-horison ($70-100$ cm). I A-horisonten har kortet en opløsning på 250 m. I B- og C-horisonten er opløsningen på 500 m. Foruden data, der relaterer sig til jordklassificeringen, er der også udarbejdet et kort over Danmark, der beskriver jordens volumenvægt. For at omsætte disse informationer til hydrauliske parametre er der udarbejdet pedotransferfunktioner, der baserer sig på de anvendelige data fra de landsdækkende kort. Pedotransferfunktionerne er udviklet ved anvendelsen af neurale netværk. Fordelen ved at anvende en neural netværksmetode sammenlignet med mere konventionelle regressionsmodeller er, at metoden ikke kræver et forhåndskendskab til modelkonceptet (eksempelvis om der skal anvendes et lineært, eksponentielt eller andet funktionsudtryk). Neurale netværk er derfor fleksible set i forhold til andre metoder. Som prædiktorer i netværket er anvendt de fire teksturklasser fra jordklassificeringen, organisk stof, volumenvægt og prøveudtagningsdybde. Resultatet af prædiktionen af den mættede og den nær-mættede hydrauliske ledningsevne er vist på Figur 2. Som det fremgår af figuren, er nøjagtigheden på prædiktionen af den mættede hydrauliske ledningsevne knap så god (Figur 2a), hvorimod prædiktionen af den nær-mæt-



Figur 3. Landsdækkende kort (eksklusiv Bornholm) med log-værdier for a) den mættede hydrauliske ledningsevne, b) den nær-mættede hydrauliske ledningsevne og c) differensen mellem a) og b) (k_{jump}).

tede hydrauliske ledningsevne (Figur 2b) er mere nøjagtig. Denne forskel skal først og fremmest forklares ved den høje variation på målingerne af den mættede hydrauliske ledningsevne. Som tidligere nævnt er værdien af den mættede hydrauliske ledningsevne styret af jordens indhold af makroporer. På grund af udtagningskolonnens relative lille volumen er det ikke altid sikkert, at prøven indeholder et repræsentativt udsnit af jordens indhold af makroporer. Derfor vil der være en høj variation i den hydrauliske ledningsevne mellem prøver med og uden makroporer. For den nær-mættede hydrauliske ledningsevne, hvor vandtransporten udelukkende forgår i porer med en diameter på 0,3 mm eller mindre, er prøvevolumenet mere repræsentativt.

Ved hjælp af de udviklede pedotransferfunktioner er det muligt at konstruere et landsdækkende kort over den mættede og den nær-mættede hydrauliske ledningsevne i de tre horisonter. Figur 3a viser værdierne af den mættede hydrauliske ledningsevne i A-horisonten. Som det fremgår af kortet findes de højeste værdier i den centrale del af Jylland, hvor jorden er ekstrem sandet og grovkornet. Meget lave værdier ses i de meget lerede marskområder i den sydvestlige del af Danmark. Desuden findes der også store områder med lave værdier på de finsandede Yoldia-flader i Vendsyssel. For den nær-mættede hydrauliske ledningsevnes vedkommende er der en markant forskel mellem den vestlige og østlige del af Danmark (Fig. 3b). Her træder den rumlige variation i teksturfordelingen i Danmark tydeligere igennem, hvorved de lerede morænejorde på Sjælland og de

østlige dele af Jylland viser lavere værdier end de grovsandede vestjyske hedesletter og de sandede morænejorde i Himmerland og på Djursland. Figur 3c viser differensen mellem de to første kort (k_{jump} , Fig. 1). Høje værdier på dette kort er områder, hvor der eksisterer et højt potentiale for præferentiel vandtransport gennem jordens makroporer. Områder af den type træder tydeligst frem på Lolland-Falster, store dele af Sjælland samt i enkelte områder i det østlige Jylland.

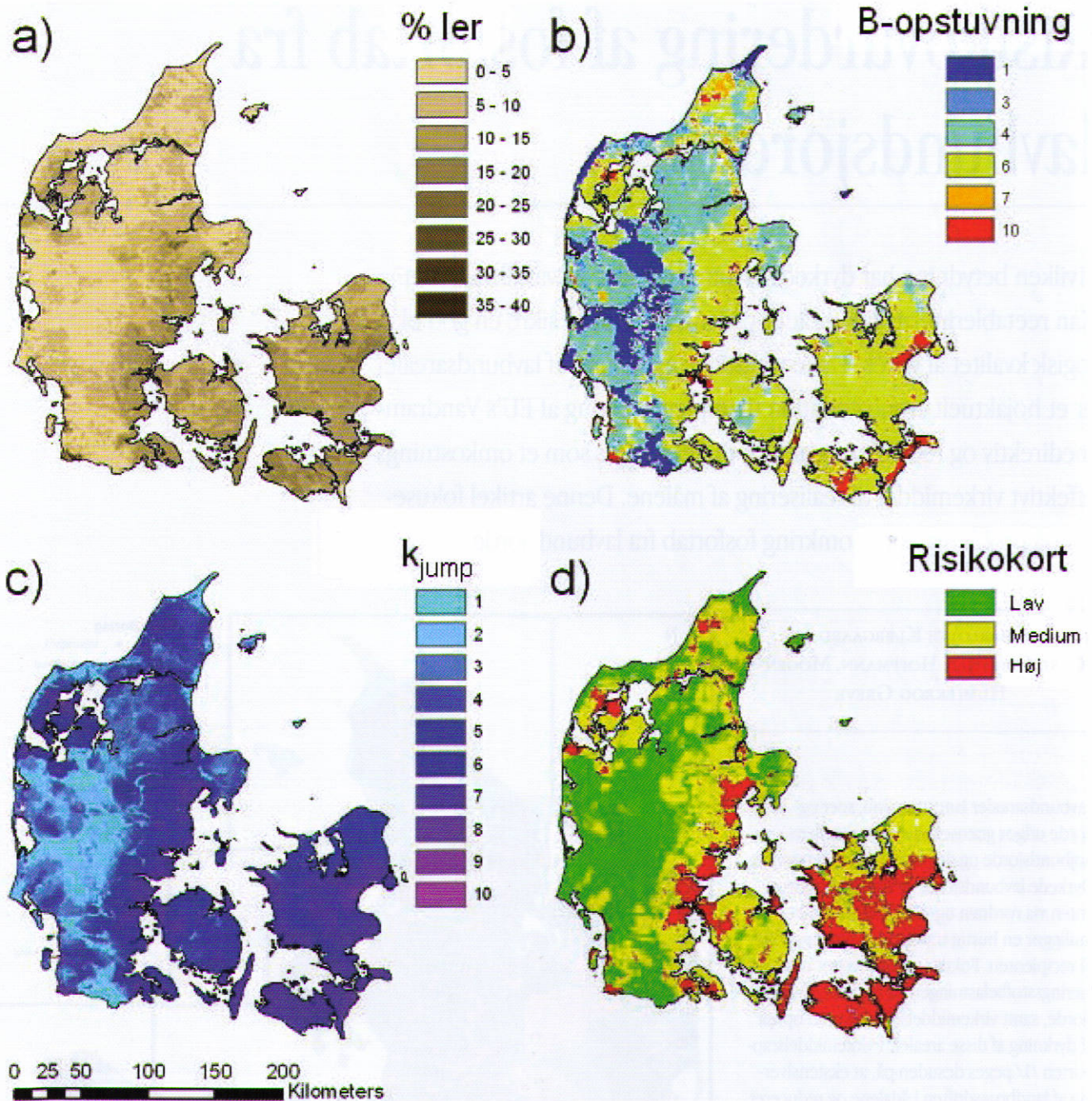
Modellering

En ting er, om der i områder eksisterer et højt eller et lavt potentiale for præferentiel vandtransport gennem jordens makroporer. Noget andet er, om der nogensinde opstår situationer i disse områder, hvor jordmatrixens infiltrationsevne bliver overskredet og makroporerne derved bidrager til den nedadgående vandtransport. For at udpege disse områder er der blevet anvendt en 1-dimensional model (HYDRUS), der kan simulere den vertikale vandtransport i jordens umættede zone. Modelleringen blev foretaget ud fra den hypotese, at initieringen af vandtransport i makroporerne opstår fra toppen af B-horisonten, når jordmatrixens evne til at transportere vandet bliver overskredet. For lerede jorde vil den hydrauliske ledningsevne i underjorden (B-horisonten) oftest være lavere end i A-horisonten, da underjorden oftest vil være mere kompakt. Dette kan skyldes jordkompaktion i forbindelse med landbrugsdriften eller et højere lerindhold forårsaget af lertransport fra A-horisonten. Modellen kan simulere vandtransport

i jorden ved et varierende vandindhold. Den maksimale vandtransportevne i A-horisonten blev i modellen beskrevet ved den mættede hydrauliske ledningsevne, hvortil den i B- og C-horisonten blev udtrykt ved den nær-mættede hydrauliske ledningsevne, da der i disse horisonter udelukkende ses på vandtransporten i jordmatrixen. A- og B-horisonten blev inddelt i 5 forskellige klasser og C-horisonten i 4 forskellige klasser således, at antallet af simuleringer blev minimeret til 100. Som en øvre grænsebetingelse blev der anvendt en repræsentativ 10-årig nedbørssperiode for Danmark med en tidlig opløsning på en time. Vinterhvede blev anvendt som modelafgrøde i hele simuleringens periode. Som nedre randbetingelse blev der anvendt en grundvandsdybde på 2 meter. Resultatet af modelsimuleringerne ses på Figur 4b. Kortet er inddelt i ti kategorier (hvoraf kun seks er repræsenteret) og viser områder, hvor der er størst risiko for opstuvning af vand i B-horisonten og dermed en mulig transport af vand i makroporerne. Den højeste kategori afspejler områder, hvor risikoen for opstuvning er størst. Ikke overraskende findes hovedparten af disse områder i den østlige del af Sjælland, hvor lerindholdet i jorden samtidig er højt (Figur 4a). Områder med lavest risiko for opstuvning af vand i jordmatrixen ses på de mest sandede områder i den centrale del af Jylland.

Udpegning af områder med risiko for vandtransport i makroporer

For endeligt at udpege områder med størst risiko for vandtransport i jordens makroporer



Figur 4. Landsdækkende kort (eksklusiv Bornholm) for a) lerprocent i A-horisonten, b) risiko for opstuvning af vand i B-horisonten (skala fra 1 til 10), c) potentiale for præferentiel makroporeafstrømning (k_{jump} , skala fra 1 til 10) og d) klasseinddelt kort for risikoen for vandtransport i jordens makroporer.

er temaet med risiko for opstuvning af vand i B-horisonten (Fig. 4b) kombineret med kortet over, hvor potentialet for vandtransport i jordens makroporer er størst (k_{jump} , Fig 3c). Dette kort er i stil med opstuvningskortet ligeledes blevet inddelt i 10 klasser (Fig. 4c), hvoraf den højeste værdi repræsenterer områder, hvor potentialet for vandtransport i jordens makroporer er størst. De to klasseinddelte risikokort er derefter kombineret ved at multiplicere de to temaer. De resulterende kort ses på Figur 4d, hvor klasseind-

delingen er foretaget ved at opdele de resulterende værdier efter 1. og 3. kvartil således, at Danmark er blevet inddelt i områder med henholdsvis lav, middel og høj risiko for vandtransport i jordens makroporer. Som det fremgår af kortet, findes de mest risikobetonede områder i store dele af Sjælland samt i den østlige del af Jylland. Det skal pointeres, at kortet udelukkende udpeger områder med størst risiko for transport af vand i jordens makroporer. Om der i disse områder udvaskes fosfor eller andre stoffer afhænger

af, hvorvidt disse stoffer frigives fra jorden og ender i makroporenes vandstrøm. Risikokortet indgår som et tema i fosforindekset, hvor det indgår sammen med andre deltemaer, der tilsammen angiver risikoen for makroporeudvaskning af fosfor til dræen og grundvand.

Bo VANGSØ IVERSEN, cand.scient. i geologi, 1995 fra Aarhus Universitet og ph.d. som miljøingeniør, 2001 fra Aalborg Universitet. Ansat ved Aarhus Universitet, Institut for Jordbrugsproduktion og Miljø. Arbejder primært med jordfysik og hydrologi.