


# VAND & JORD

## **SÆRNUMMER MAPFIELD**

- NITRATREDUKTION
- GEOFYSISK KORTLÆGNING
- 3D-MODEL AF UNDERGRUNDEN
- GEOSTATISTISK MODELLERING
- KVÆLSTOFUDVASKNING
- GRUNDVANDSRETENTIONS KORT
- INTERESSEENTER OG ØKONOMI
- TEM ANVENDELSE

4





# Vi løser samfundets miljøudfordringer

DTU Sustain er et af de største universitetsinstitutter i Europa med speciale i miljø- og ressource teknologi.

Vi udvikler nye miljøvenlige og bæredygtige teknologier, metoder og løsninger, samt formidler denne viden til samfundet og nye generationer af ingeniører.

## Samarbejd med os

DTU Sustain samarbejder med private virksomheder og offentlige institutioner og yder forskningsbaseret rådgivning til ministerier, styrelser, regioner, kommuner m.v.

Læs mere og kontakt os på [sustain.dtu.dk](https://sustain.dtu.dk)

Vi forsker og underviser i:

- Cirkularitet og miljø
- Vandteknologi og -processer
- Klima og monitorering
- Kvantitative bæredygtighedsanalyser
- Byggematerialer og holdbarhed
- Geoteknik og geologi
- Indeklima i bygninger



# VAND & JORD

Vand & Jord er et dansk fagtidsskrift med artikler og debat om miljøforhold i vore ydre omgivelser. Emnerne omfatter alle forhold i vandets kredsløb, rent eller forurenset. Tidsskriftet formidler ny og aktuel viden til alle, der arbejder med og har interesse i dansk og international miljø- og naturbeskyttelse.

Vand & Jord er uafhængig af organisations- og firma-interesser.

© Selskabet for Vand & Jord  
og Forlaget Nepper & Stagehøj

#### REDAKTION:

Charlotte Kjærgaard, NovaDrain ApS, ansv.  
Claus Hagebro, cand. scient.  
Søren Brandt, Herning Kommune  
Anja Skjoldborg Hansen, Aarhus Universitet  
Astrid Zeuthen Jeppesen, NIRAS  
Poul L. Bjerg, Danmarks Tekniske Universitet - DTU Miljø

#### REDAKTIONSKOMITÉ:

Anders Erichsen, DHI  
Loren Ramsay, VIA UC  
Mogens Flindt, SDU  
Heidi Barlebo Christiansen, GEUS  
Uffe Gangelhof, Vandcenter Syd  
Peter Holm, KU-PLEN

Redaktionskomitéens medlemmer er personligt valgt. De tegner i Vand & Jord-sammenhæng ikke de firmaer eller institutioner, hvor de er ansat.

Mekanisk, fotografisk eller anden gengivelse er kun tilladt i overensstemmelse med overenskomst mellem Undervisningsministeriet og Copy-Dan. Enhver anden udnyttelse er uden selskabets og forlagets skriftlige tilladelse forbudt ifølge gældende dansk lov om ophavsret.  
ISSN 0908-7761

Abonnementspris 2022 – 4 numre pr. år  
Institutionsabonnement: kr. 600,00 inkl. moms  
Privatabonnement: kr. 240,00 inkl. moms.  
Studentabonnement: kr. 150,00 inkl. moms.  
Virksomhedsabonnement kr. 5.000 kr. inkl. moms  
Alle priser er inkl. forsendelse.

Se mere på <http://www.vandogjord.dk/>  
– her findes også forfattervejledning

PRODUKTION: Vand & Jord ApS

LAYOUT: Forlaget Nepper & Stagehøj  
TRYK: P. E. Offset & Reklame A/S, Varde

#### UDGIVER OG ABONNEMENT:

Forlaget Nepper & Stagehøj  
Nojsomhedsvej 19, st.tv.  
2100 København Ø  
Tlf. 35 26 45 31  
e-mail: forlaget@nepperogstagehoej.dk

#### ANNONCER:

Claus Hagebro  
Fuglevænget 10  
3520 Farum  
Tlf. 44 95 07 60  
e-mail: hagebro3@hotmail.com

Forsidefoto: Risø halvø ved Roskilde Fjord.  
Foto af Anja Skjoldborg Hansen

Synspunkt: Ny viden til målrettet kvælstofregulering af landbruget .....	130
<i>Birgitte Hansen</i>	
MapField projektet .....	132
<i>Birgitte Hansen &amp; Anders Vest Christiansen</i>	
Ny viden om nitratreduktion i undergrunden .....	137
<i>Hyojin Kim, Rasmus Jakobsen, Jens Aamand &amp; Birgitte Hansen</i>	
Geoscanner til overfladenær kortlægning .....	142
<i>Jesper B. Pedersen, Anders V. Christiansen, Esben Auken &amp; Peter Sandersen</i>	
Fra geofysik til 3D-modeller .....	145
<i>Anders V. Christiansen &amp; Nikolaj Foged</i>	
Geostatistisk model af geologi og redox .....	148
<i>Rasmus Bødker Madsen, Peter B.E. Sandersen, Ingelise Møller, Thomas Mejer Hansen, Birgitte Hansen, Anders Vest Christiansen &amp; Hyojin Kim</i>	
Nitratudvaskning på markniveau .....	152
<i>Gitte Blicher-Mathiesen, Jian Wienke, Mikkel Boel &amp; Rasmus Rumpb Frederiksen</i>	
Et grundvandsretentionskort på lokal skala .....	156
<i>Rasmus R. Frederiksen, Anders V. Christiansen, Gitte Blicher-Mathiesen, Birgitte Hansen</i>	
Interessenters syn på værdien af kvælstofkortlægning over tid .....	160
<i>Morten Graversgaard, Brian H. Jacobsen, Kenneth Nygaard, Stefan Schaper, Sara Iversen, Mette Vestergaard Odgaard &amp; Tommy Dalgaard</i>	
Økonomisk gevinst ved detaljeret retentionskortlægning .....	166
<i>Brian H. Jacobsen &amp; Jens Erik Ørum</i>	
tTEM i jord- og grundvandsforurening .....	169
<i>Flemming Jørgensen</i>	

Vand & Jord udgives med støtte fra:



ATV JORD OG GRUNDVAND



AARHUS  
UNIVERSITET  
DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI



INSTITUT FOR AGROØKOLOGI  
AARHUS UNIVERSITET



SDU

# Ny viden til målrettet kvælstofregulering af landbruget

Den politiske aftale om grøn omstilling af dansk landbrug fra oktober 2021 inkluderer en betydelig mere målrettet kvælstofregulering af landbruget. Målretningen skal bidrage til at nå målene i EU's vandrammedirektiv på en mere omkostningseffektiv måde, både for landbruget og samfundet, og der er fokus på at mindske kvælstofpåvirkningen af de kystnære områder.

Danmark har en af de største udledninger af kvælstof fra landbrugsjorde i Europa, kun overgået af enkelte andre lande og områder som fx Holland og Po-dalen i Italien. I Danmark skal vi balancere mellem en intensiv landbrugsproduktion og et rent vandmiljø. Der er behov for at beskytte vandløb, søer, havet og grundvandet ved at mindske kvælstofudledningen, både for at sikre en god økologisk tilstand og en god kvalitet af det grundvandsbaserede danske drikkevand.

Det er velkendt, at kvælstof i vandmiljøet langt overvejende stammer fra udvaskningen fra landbrugsmarker. En del af kvælstoffet, som udvaskes fra markerne, når ikke frem til havet på grund af naturlig omsætning (kaldet kvælstofretention) i enten grundvandet, rodzonen, ådale, lavbundsarealer eller i vandløb og søer. I grundvandet foregår kvælstofretentionen under iltfrie forhold. Herved omsættes nitraten naturligt ved denitrifikation til lattergas ( $N_2O$ ) eller helt til inaktivt kvælstofgas ( $N_2$ ). Omfanget af kvælstofretentionen i grundvandet kan variere fra mark til mark på grund af forskelle i vandets strømningsveje i undergrunden og omsætningsgrad af kvælstof.

Lokale forskelle i kvælstofretentionen i grundvandet kan udnyttes i en målrettet kvælstofregulering. Med målrettet regulering menes, at ikke alle marker skal reguleres lige

## Anders Panum Jensen, Miljødirektør i Landbrug & Fødevarer:

*“L&F ser gode perspektiver i de nyudviklede værktøjer, som er leveret i MapField projektet. Værktøjerne kan bruges til at få mere viden om den lokale omsætning af kvælstof i grundvandet på et langt mere detaljeret niveau, end tilfældet er i dag. En øget detaljeringsgrad skal primært anvendes til at nedbringe omkostningerne i den nuværende målrettede regulering. Den nye viden har potentiale til at give landmanden bedre mulighed for at placere frivillige indsatser, der hvor de har størst effekt”.*

hårdt i forhold til at mindske nitratudvaskningen.

Idéen er at marker eller områder med lav kvælstofretention i grundvandet skal have de mest effektive virkemidler til at mindske udvaskningen, mens marker eller områder med høj kvælstofretention kan fortsætte med et højere produktionsniveau. De virkemidler som kan tages i anvendelse, er fx efterafgrøder, mindre kvælstofgødning eller udtagning af landbrugsjord til skov, natur eller permanent græs. Desuden kan etablering af vådområder og minivådområder også reducere udledningen af kvælstof til vandmiljøet.

Nye operationelle teknologier og koncepter er nu udviklet i Innovationsfundsprojektet MapField med fokus på bestemmelse af grundvandets kvælstofretention. Denne viden er vigtig for at kunne vælge og placere virkemidler mere optimalt på markerne og i landskabet af hensyn til både miljøet og økonomien.

Dette særnummer af Vand & Jord indeholder 10 artikler, som omhandler nogle af de vigtigste resultater fra MapField-projektet. I særnummeret introduceres det overordnede koncept for beregning af kvælstofretentionskort for grundvandet på lokal skala i udvalgte hydrologiske oplande. Dernæst præsenteres

den udviklede geofysiske tTEM metode og detaljerede geokemiske undersøgelser fra kerneboringer. Med disse metoder fremskaffes helt ny detaljeret viden om hydrogeologien og geokemien i undergrunden. Det vises, hvordan nitratudvaskningen kan modelleres fra markerne, og hvordan stokastisk modellering bruges til at danne sammenhørende billeder af geologiske lag og nitratom-sætningszoner i undergrunden. Desuden vises, hvordan alle data indbygges i modelleringen af grundvandsstrømninger med tilhørende nitratom-sætning, som i sidste ende resulterer i dannelse af kvælstofretentionskort for grundvandet med tilhørende usikkerheder.

I de sidste artikler i dette nummer af Vand og Jord vises hvordan de detaljerede kort over grundvandets kvælstofretention kan tages i anvendelse. Det er sket ved at diskutere muligheder med inddragelse af landmænd i et af undersøgelsesområderne på Salling. Her er der store krav til kvælstofreduktion til Skive Fjord i Limfjorden i de nye Vandmiljøplaner (III), som pt. er i høring. Dernæst præsenteres en analyse af den mulige økonomiske gevinst ved målrettet kvælstofregulering i undersøgelsesområderne på Salling. I sidste artikel vises, hvordan metoderne fra MapField kan anvendes til løsning af andre problemstillinger, som råstofindvinding og grundvandsbeskyttelse.

## Peter Kaarup, kontorchef i Miljøstyrelsen:

*“Placering af indsatser de steder, hvor de giver størst effekt, er en vigtig forudsætning for en omkostningseffektiv reduktion af kvælstofudledningen, og dermed understøtte opnåelse af god vandkvalitet, særligt i kystområderne. En så detaljeret kortlægning som muligt af omsætningen af kvælstof fra mark til fjord er et vigtigt skridt i retning af at kunne placere virkemidler omkostningseffektivt. De resultater, der er frembragt i MapField, har givet værdifuld viden om anvendelse af teknikker til at foretage en sådan detaljeret kortlægning af kvælstofomsætningen i jorden og grundvandet.”*

*Birgitte Hansen, GEUS, projektleder i MapField-projektet*



### Ekstra særnummer 2022

Grundet den store efterspørgsel på publicering i Vand & Jord, har redaktionen som noget nyt besluttet at udgive et ekstra særnummer, og dermed fem årlige numre i 2022.

Vand & Jord har en lang tradition for at udgive artikler fra danske forskere, rådgivere, virksomheder samt forvaltning. I stigende grad er udgivelsen af temanumre med resultater fra større forskningsprojekter blevet efterspurgt. Vand & Jord nr. 4 er netop et ekstra særnummer med tema omkring landbrugets kvælstofregulering baseret på resultater fra Innovationsfondsprojektet MapField.

Vand & Jord nr. 5-2022 udgives som normalt i december.

### Biodiversitetssymposium

*Land sparing & land sharing: Hvordan skaber vi plads til biodiversitet i et multifunktionelt produktionslandskab?*

Arrangeret af IPBES i Danmark

Sted: Moesgaard Museum, Aarhus Universitet

Dato: 30. november 2022

Hvordan bevarer vi klodens biodiversitet? To tilgange, der har fået stor opmærksomhed i de seneste år er "land sparing", hvor fx landmænd intensiverer landbrugsdriften for at øge produktiviteten, hvilket teoretisk betyder, at ekspansion ind i naturarealer kan begrænses eller arealet med natur ligefrem kan øges. Modsat er der "land sharing", hvor der anvendes miljøvenlige metoder eller tænkes en helt anden struktur i landskabet. Symposiumet her har fokus på biodiversitet indenfor det kontinuum "land sharing – land sparing" udgør i et multifunktionelt landskab specielt med fokus på det åbne land.

Symposiumet vil opdatere dig med den nyeste faglige forskningsmæssige viden. Der gives faglige indlæg til, hvordan vi kan få fremme

biodiversitet og sikre bedre natursammenhæng i det danske landskab bl.a. med inspiration fra udenlandske undersøgelser. Vi har verdens førende forsker Professor Andrew Balmford fra Cambridge til at introducere os til emnet. Herefter tager en række danske topforskere fat inden for to kategorier:

- Hvordan afsætter vi areal til biodiversitet fra det eksisterende produktionsareal?
- Hvordan sikrer vi bedre biodiversitet i fremtidens produktionslandskab?

Med symposiet forventer vi at spille ind til en ny planlægning og forvaltning, der vil være nødvendig for at bidrage til den gennemgribende forandring, der ifølge IPBES er nødvendig for at vende biodiversitetskrisen og skabe plads til biodiversitet.

Arrangør er IPBES i Danmark på en bevilling fra 15. Juni Fonden. Der er kaffe og rundstykker fra kl. 9:15, programmet starter kl. 9:50.

## FERSKVANDS SYMPOSIUM



Ferskvandssymposiet 2023 afholdes 1. - 2. februar på Vingstedcentret. Tilmelding og yderligere oplysninger kan findes på hjemmesiden <https://ferskvands-symposiet.dk/>

# MapField projektet

Nye operationelle teknologier og koncept til brug i en målrettet kvælstofregulering er nu udviklet i Innovationsfondsprojektet MapField. Lokale geofysiske og geokemiske data om undergrundens beskaffenhed giver mulighed for en mere præcis beregning af den lokale kvælstofretention i grundvandet. Denne detaljerede viden kan danne grundlag for en ny målrettet kvælstofregulering af landbruget.

BIRGITTE HANSEN &  
ANDERS VEST CHRISTIANSEN

## Introduktion

MapField er navnet på et stort forskningsprojekt under Innovationsfonden som har løbet fra 2018-2022 og er forkortelse for "Field-scale mapping for targeted N-regulation and management". Tretten institutioner har samarbejdet for at opnå viden til mere målrettet kvælstof(N)-regulering af landbruget (boks 1).

Visionen i MapField har været at udvikle teknologier og koncepter, som kan være med til at sikre en økonomisk og bæredygtig udvikling af den danske landbrugsproduktion samtidig med at Danmark kan leve op til kravene i EU's miljødirektiver. Det nye koncept er udviklet for at danne grundlag for en mere målrettet N-regulering af landbruget på markniveau, hvor indsatser for at nedbringe udvaskningen af kvælstof til miljøet bl.a. tilpasses den lokale N-omsætning i undergrunden.

Konceptet er baseret på indsamling af data, der giver detaljeret viden om transporten og omsætningen af kvælstof i grundvandet. På dette grundlag kan der fremstilles kort over N-retentionen i grundvandet. N-retention er betegnelsen for den naturlige omsætning i



Foto: Peter Klaus Warna-Moors

vandmiljøet af reaktivt kvælstof (fx nitrat,  $\text{NO}_3^-$ ) til lattergas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) eller helt til inaktivt kvælstof ( $\text{N}_2$ ) i atmosfæren.

Den totale N-retention i et opland er forskellen mellem udvaskningen af kvælstof fra markernes rodzone og udledningen af kvælstof i vandløbet ved udløbet fra oplandet. På

landsplan er N-retentionen i vandmiljøet opgjort til 64% (udvaskning fra rodzonen = 191,6 ton N og samlet N-tilførsel til kystvande er 68,6 ton N) for perioden 1990 – 2010 /1/.

I et opland kan der både foregå N-omsætning i A) grundvandet, B) den umættede zone inkl. rodzonen, C) ådale og lavbundsområder og D) vandløb og søer (figur 1). Den samlede N-retention for et opland er således et resultat af den totale omsætning af N i zone A-D. I MapField har der været fokus på N-retention i grundvandet altså zone A (figur 1), hvor den største del af N-retentionen foregår. På landsplan er det estimeret, at N-retentionen i grundvandet og ved terrænnære processer (A+B) udgør 88 %, og i ådale, lavbund, vandløb og søer 12 % af den totale N-retention for

## Boks 1: Samarbejdspartnere i MapField projektet

Forskningsinstitutioner:

- De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS)
- Aarhus Universitet: Institut for Geoscience, Ecoscience, Agroøkologi, Ingeniørvidenskab og Virksomhedsledelse
- Københavns Universitet, Institut for Fødevarer- og Ressourceøkonomi

Øvrige partnere:

- Miljøstyrelsen, SEGES, Aarhus Geosoft, NIRAS, Region Midtjylland og Foreningen af Rådgivende Ingeniører.

perioden 1990 – 2010 /1/.

## Udvikling af undersøgelsesmetoder og et samlet koncept

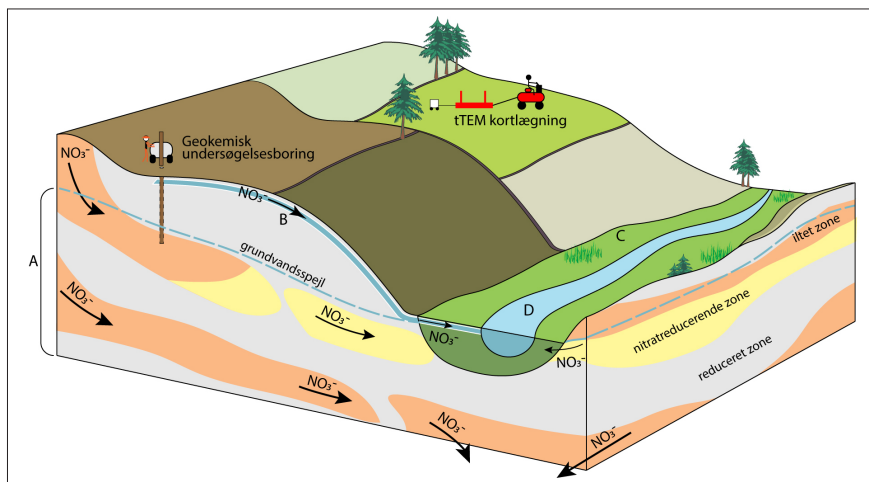
Teknologier og konceptet fra MapField beskrives i dette særnummer af Vand & Jord i 10 artikler.

Konceptet for kortlægning af N-retentionen i grundvandet har fået navnet N-MAP. N-MAP-konceptet består af fem overordnede trin (boks 2) som beskriver processen med fremstilling og implementering af N-retentionskort for grundvandet i et opland.

Trin 1: Indsamling af eksisterende viden over de agronomiske samt de hydrogeologiske og geokemiske forhold i undergrunden. Trin 2: Kortlægning af geologien med et nyudviklet geofysisk tTEM instrument til N-retentionskortlægning /2/. tTEM instrumentet har også andre anvendelsesmuligheder i jord- og grundvandsforureningssager /3/. Trin 3: Geokemiske undersøgelser af kvælstofomsætningen i grundvandet fra borer. Placering af borer tager udgangspunkt i tTEM kortlægningen /4/. Trin 4: Modellering hvor geologien, N-omsætningen, N-udvaskningen og grundvandstrømningen bliver integreret for hele oplandet. Heraf fremstilles N-retentionskort, som beregner udledningen af kvælstof til vandløbene gennem grundvandet i forhold til udvaskningen fra rodzonen /5,6,7,8/. Trin 5: Anvendelse af N-retentionskortet for oplandet i en mere målrettet N-regulering. I MapField er N-retentionskortet for to oplande ved Skive Fjord brugt til at illustrere, hvordan en mere målrettet N-regulering kan udformes. Ved Skive Fjord er der store krav til reduktion af N-udledningen i de nye Vandmiljø III planer, som er i udkast (Vandområdeplanerne 2021-2027 (mst.dk)). Der har været dialog med landmænd i områderne om økonomi og mulige ændringer af gødningsplaner og sædskifter samt valg af nye tiltag og virkemidler, som kan reducere N-udvaskningen og -udledningen til vandløb /9, 10/.

## N-retentionskort for grundvandet

I MapField er der undersøgt seks oplande, som enten indgår som validerings- eller demonstrationsområder (figur 2). Valideringsområder er udvalgt for at teste de udviklede metoder mod lange tidsserier af måledata i fire LOOP-områder, som indgår i det Nationale Overvågningsprogram for Vandmiljø og Natur, NOVANA. LOOP-områderne repræsenterer forskellige jordtyper, udvaskning, landskaber, geologi og landbrugspraksis. Kvaliteten af det øvre grundvand, drænvand og overfladevand overvåges med en høj prøvetagningsfrekvens.



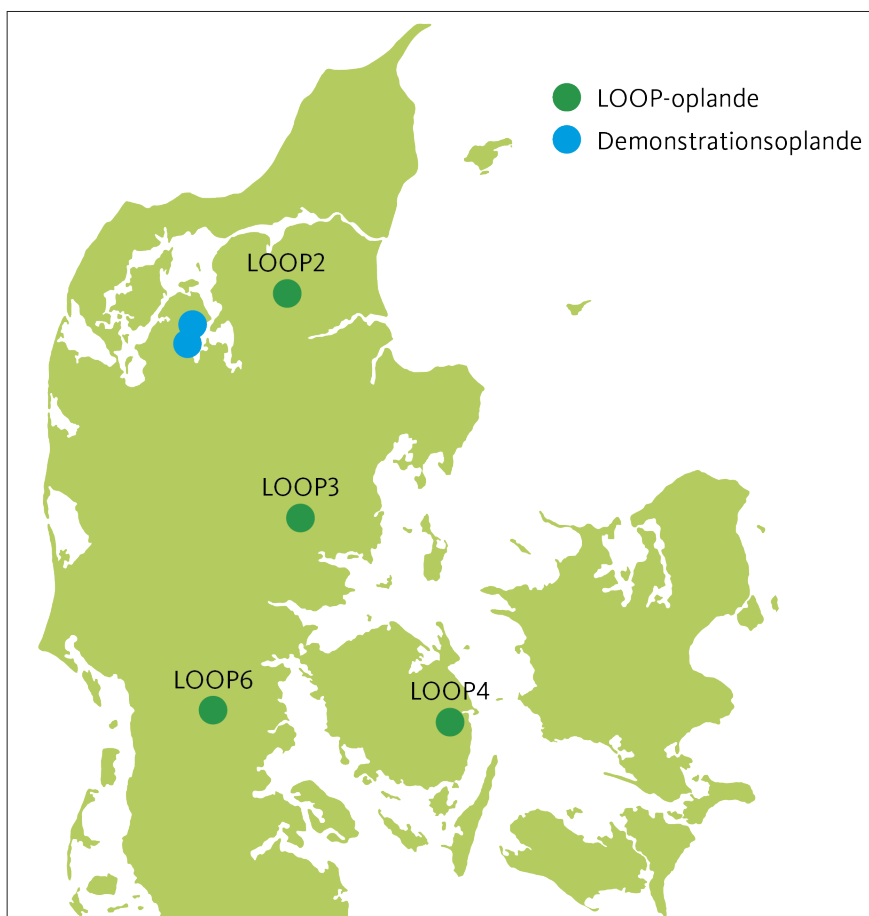
Figur 1. Konceptuel blokmodel af de vigtigste strømningsveje og processer for N-retention i landskabet og undergrunden. N-retention foregår i A) grundvandszonen, B) den umættede zone inkl. rodzonen, C) ådale og lavbundsområder og D) vandløb og søer /2/.

Demonstrationsområderne skal vise potentialet i MapField metoderne til at udvælge og placere virkemidler optimalt i landskabet, så N-udvaskningen til vandmiljøet kan reduceres omkostningseffektivt. På baggrund af viden fra valideringsområderne er N-MAP-konceptet afprøvet i disse områder samtidig med, at lokale landmænd og andre interessenter er inddraget. De to demonstrationsområder (Hagens Møllebæk og Hulebro Bæk) er beliggende ved siden af hinanden og afvander til Skive Fjord

på Østsalling nord for Skive.

Med N-MAP-konceptet udarbejdes der N-retentionskort for grundvandszonen målrettet ID15-oplande, der i dag er den mindste skala for N-regulering på ca. 15 km<sup>2</sup> i gennemsnit. I 2020 er der ved hjælp af den nationale kvælstofmodel /1/ udarbejdet N-retentionskort for alle 3351 ID15-oplande i Danmark med én værdi for hvert opland.

Formålet med MapField er at udarbejde mere detaljerede N-retentionskort indenfor et



Figur 2. Placeringen af de seks undersøgte oplande i MapField.

## Boks 2: De fem trin i N-MAP-konceptet for kortlægning af N-retentionen i grundvandet i et opland

### Trin 1:

#### Eksisterende viden bliver gennemgået i undersøgelsesområdet

Landbrugsdriften i oplandet og kravet til reduktion af kvælstofudledningen undersøges både i forhold til grundvand, overfladevand og det marine miljø. Der skabes et foreløbigt overblik over undergrunden og overfladevandssystemet samt behovet for nye data.

### Trin 2:

#### Undergrunden bliver scannet

Et nyudviklet scanningsinstrument kaldet tTEM danner meget detaljerede billeder i 3D af undergrundens strukturer ned til 100 meters dybde, som afgør, hvordan vandet strømmer i jorden.

### Trin 3:

#### Centrale steder bliver undersøgt nærmere

Vand- og jordprøver fra dybe borer indsamles og analyseres. Resultaterne afgør, hvor og hvordan kvælstof omsættes i undergrunden.

### Trin 4:

#### Kort over kvælstofretention bliver fremstillet

De indsamlede data indbygges i en 3D strømning- og kvælstofomsætningsmodel, og der fremstilles kort over kvælstofretentionen på markniveau.

### Trin 5:

#### Valg af virkemidler bliver analyseret

De nye kort over kvælstofretentionen tages i anvendelse, og der bliver arbejdet med nye arbejdsgange til gødningsplaner og valg af virkemidler i et samarbejde mellem landmænd, rådgivere og ansvarlige myndigheder ift. gældende og kommende planlægning og lovgivning.

der). Det betyder fx, at virkemidler som efterafgrøder eller udtagning af landbrugsjord kan målrettes områderne med lav retention. Variationen i N-retentionen i grundvandet mellem markerne skyldes, at de geologiske lag og N-omsætningen i undergrunden varierer meget indenfor oplandet. N-MAP-konceptet er dermed specielt relevant i oplande, hvor der kan forventes en stor variation i N-retentionen i grundvandet mellem marker på grund af en heterogen geologi og en varieret omsætning af kvælstof. N-MAP-konceptet vil selvfølgelig også være meget relevant at anvende i oplande, hvor der er et behov for flere data end der eksisterer i dag for at øge sikkerheden på estimeringen af N-retentionen.

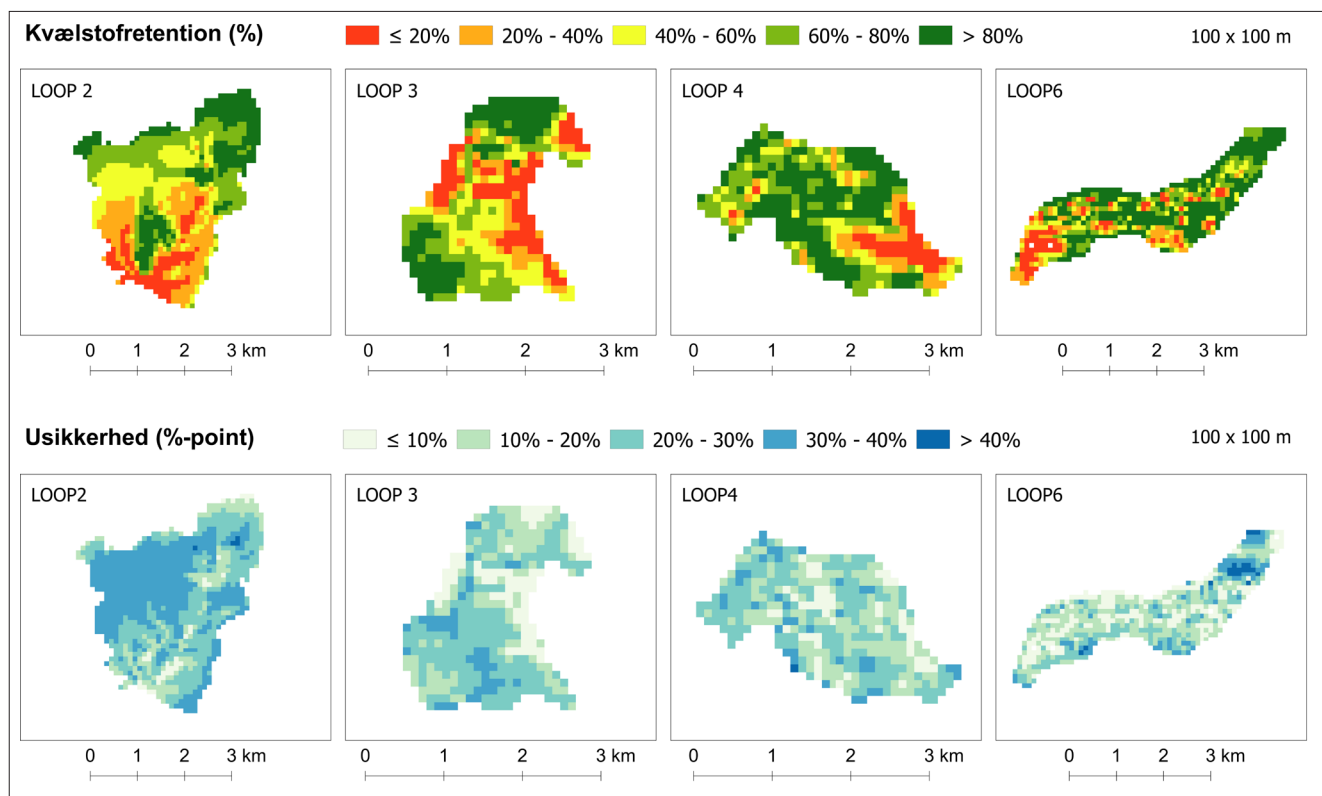
### Detaljeringsgrad og usikkerhed

Bestemmelse af usikkerheden på grundvandets N-retention er en central del af modelleringen med N-MAP-konceptet. Der er fokus på både nøjagtighed og præcision. Præcisionen angiver, hvor godt en række lige sandsynlige modelresultater, kan ramme det samme resultat. Præcisionen er med andre ord den variation, man har på sine resultater, når man sammenligner resultaterne indbyrdes. Nøjagtigheden eller korrektheden angiver derimod, hvor godt et givet modelresultat kan ramme den "sande" værdi, hvilket kan være en måleværdi af fx grundvandspotentialet eller N-transporten i vandløb.

ID15-opland og dermed på mindre skala end de kort der anvendes i administrationen af N-reguleringen i dag. Figur 3 viser N-retentionskort for de fire LOOP-områder på 100 m × 100 m skala, som hver består af tre mindre ID15-oplande. Sammen med N-retentionskortene er også vist tilhørende kort over usikker-

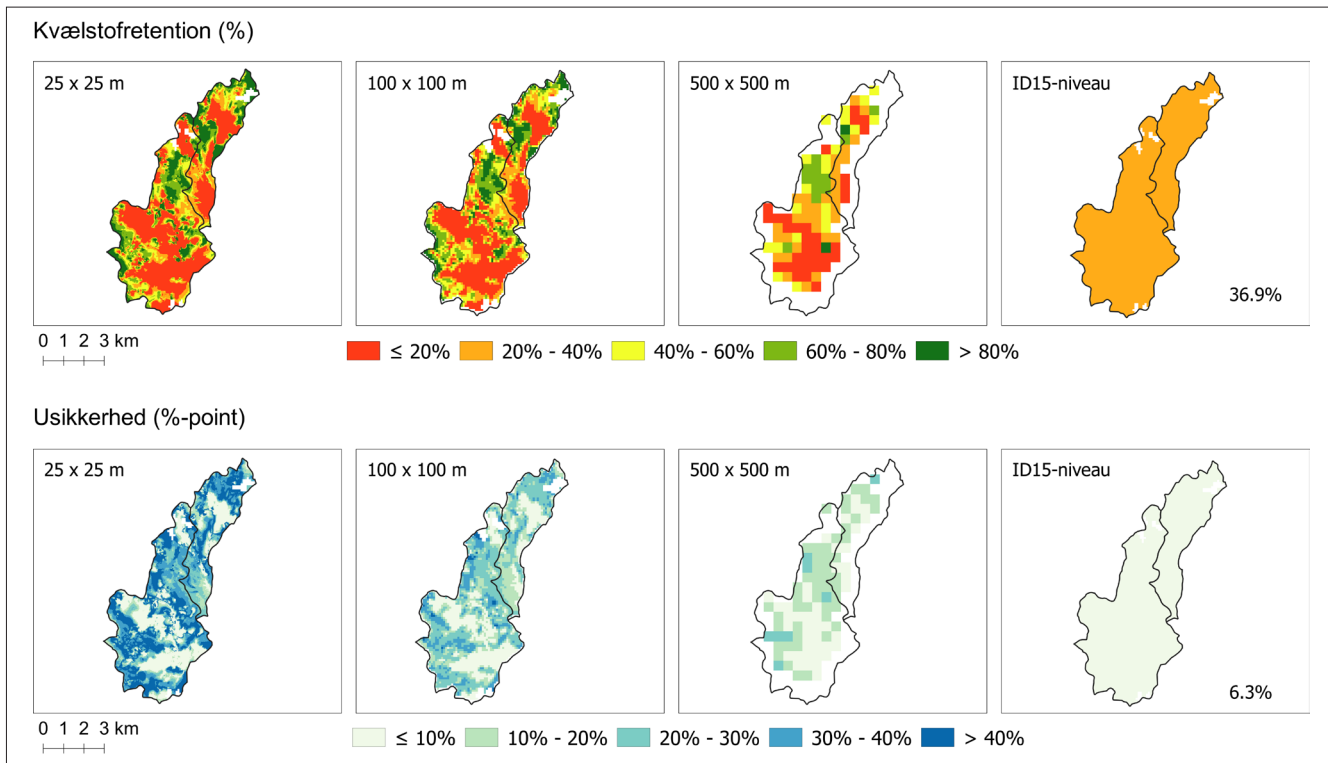
heder.

De detaljerede kort over N-retentionen i de fire LOOP-områder viser alle et potentiale for mere målrettet N-regulering indenfor oplandene, da der fx både forekommer områder med høj N-retention > 80% (grønne områder) og lav N-retention ≤ 20% (røde områder).



Figur 3. N-retentionskort (øverst) med tilhørende usikkerheder (nederst) for fire LOOP-områder udarbejdet med N-MAP-konceptet på 100 m × 100 m skala. I beregningen af usikkerheden indgår variationen på de hydrologiske, geologiske og geokemiske inputparametre mens fx usikkerheden på N-udvaskningen endnu ikke indgår.





Figur 4. N-retentionskort for grundvandet fra demoområderne Hagens Møllebæk og Hulebro Bæk ved Skive Fjord. Der ses stor variation i N-retentionen for grundvandet indenfor områderne og dermed potentiale for målrettet N-regulering. Det ses, at usikkerheden stiger (præcisionen falder) ved større detaljeringsgrad. I beregningen af usikkerheden indgår variationen på de hydrologiske, geologiske og geokemiske inputparametre mens fx usikkerheden på N-udvaskningen endnu ikke er indgået.

Nøjagtigheden er der arbejdet med i MapField i strømningsmodellen for grundvandet, hvor trykniveau, vandløbsafstrømning og vandløbstransport kalibreres mod målte værdier. Præcisionen på N-retentionen er bestemt ved hjælp af geostatistisk modellering og ved at udregne variationen. Variationen på grundvandets N-retention bestemmes således på 500 lige sandsynlige modeller. Disse bygger på udfaldsrummet for de inputvariable, der indgår i modellen fx relateret til undergrundens strukturer, redoxforhold og N-omsætningsrater /8/.

N-retentionskort for grundvandet for demoområderne Hagens Møllebæk og Hulebro Bæk ved Skive Fjord er vist i figur 4. Detaljeringsgraden på 25 m × 25 m svarer til diskretiseringen i grundvandsmodellen. Både en detaljeringsgrad på 100 × 100 m (1 ha) og 500 × 500 m (25 ha) viser en stor rumlig variation fra ≤ 20% til >80% mellem delområder, og dermed et stort potentiale for målrettet N-regulering. Den samlede N-retention i grundvandet for oplandene har en værdi på ca. 37%. Det ses, at usikkerheden falder ved større detaljeringsgrad og når ca. 6% på oplandsniveau. I beregningen af usikkerheden indgår variationen på de hydrologiske, geologiske og geokemiske (omsætningsrater) inputparametre. Udvasningen fra rodzonen varierer ikke.

### Anvendelse af N-MAP-konceptet

I 2017 skrev det Økonomiske Råd, at der nationalt set kan spares 20-30% ved at målrette N-reguleringen af landbruget for at nå målene i EU's Vandrammedirektiv. Dette blev beregnet til at udgøre en årlig besparelse på 120-200 mio. DKK for Danmark /11/. Den økonomiske gevinst opnås ved at øge målretningen af tiltag på markerne til at reducere N-udvaskningen. Herved fokuseres indsatsen af fx efterafgrøder til et mindre areal og til arealer, hvor der opnås størst miljøeffekt. Dette kan reducere omkostningerne for landmanden som illustreret i demoområderne /9, 10/.

Det vil kræve en investering at implementere N-MAP i flere oplande eller i hele landet. Når der tages udgangspunkt i omkostningerne i MapField for aktiviteterne (boks 1) så kan der beregnes en hektarpris på ca. 1.175 DKK for et typisk ID15 opland på ca. 1500 ha. Implementering af N-MAP på alle marker i Danmark giver et overslag på ca. 3,5 mia. DKK, hvis estimater fra MapField anvendes. Det vil være oplagt at målrette implementeringen til marker, hvor der er krav til målrettet N-regulering. Dette vil reducere udgiften betydeligt. Det må ligeledes antages at en indsats i større skala vil bringe de estimerede priser ned ved effektivisering.

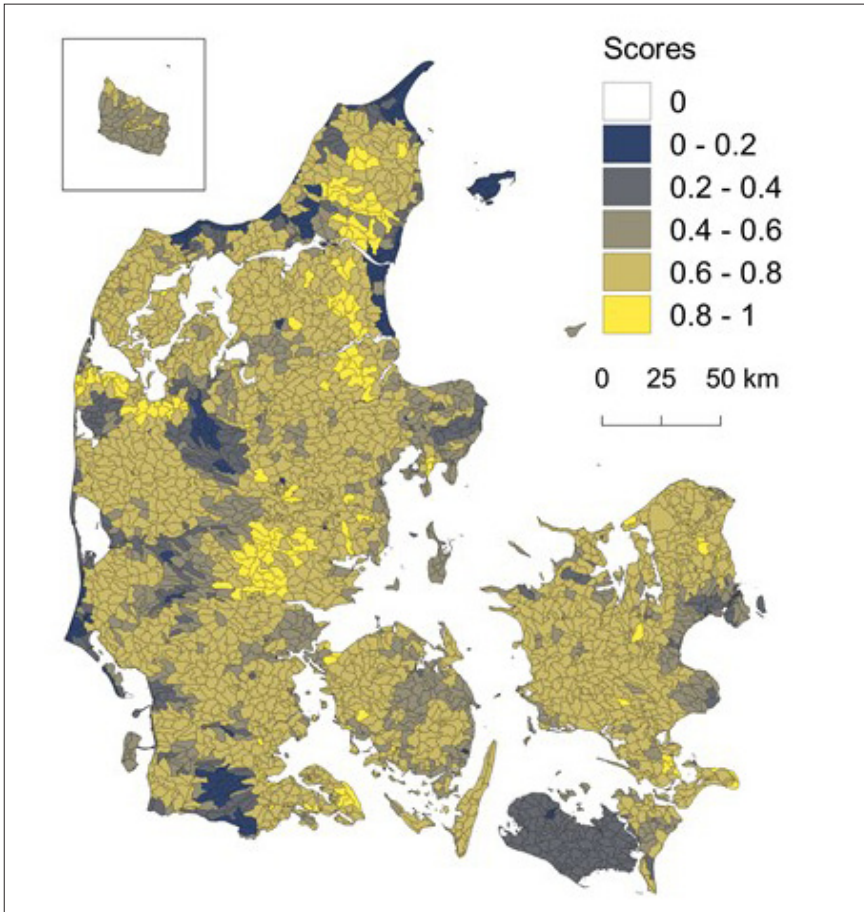
En anden mulighed vil være at implementere N-MAP i oplande med den største geolo-

giske og geokemiske kompleksitet og dermed det største potentiale for målrettet N-regulering på mindre skala. I MapField er der udviklet et sådant prioriteringsværktøj, hvor områder med høj geologisk og redox kompleksitet i undergrunden gives den højeste prioritet /12/. Disse højt prioriterede oplande er vist med den højeste score (lyse områder) i figur 5 /12/. Der kan foretages en yderligere prioritering ved at fravælge oplande, hvor dræntransporten er styrende for en lav N-retention eller hvor N-retentionen hovedsageligt foregår i overfladevandssystemet.

### Konklusion og perspektiver

Med MapField er der opnået flere vigtige overordnede resultater, som kan blive til gavn for den fremtidige målrettede N-regulering af landbruget:

1. Der er udviklet teknologier og koncepter (kaldet N-MAP) til en mere præcis bestemmelse og forståelse af grundvandets N-retention
2. N-retentionskort for grundvandet i de seks undersøgte områder viser et stort potentiale for målrettet N-regulering indenfor et opland på grund af stor rumlig variation i N-retentionen.
3. Jo større detaljeringsgrad på N-retentionskortene, jo større usikkerhed. Fokus på bestemmelse af usikkerheden ved forskellig



Figur 5. Prioriteringen af ID15-område for implementering af N-MAP-konceptet i forhold til den geologiske og geokemiske kompleksitet af undergrunden. Område med højeste prioritet er vist med højeste score (lyse farver). /12/

detaljeringsgrad af N-retentionskortene i et opland giver mulighed for at træffe et valg om detaljeringsgrad i den fremtidige mere målrettede N-regulering.

4. N-retentionskort for grundvandet i demonstrationsområderne ved Skive Fjord viser, at virkemidler kan placeres mere omkostningseffektivt i landskabet.
5. Implementering af N-MAP konceptet på alle marker i Danmark vil kræve en betydelig investering over en længere årrække. Prioriteringsværktøjet giver mulighed for at udvælge områder hvor der er størst potentiale for målrettet N-regulering. Dette kan gøres ved at fokusere på områder med stor geologisk og geokemisk kompleksitet i undergrunden.

6. MapField-metoderne kan også anvendes i andre sammenhænge fx i forbindelse med jordforurening, råstofindvinding og grundvandsbeskyttelse.

#### Referencer

- /1/ Højberg, A. L., Thodsen, H., Børgesen, C.D., Tornbjerg, H., Nordstrøm, B.O., Troldborg, L., Hoffmann, C.C., Kjeldgaard, A., Holm, H., Audet, J., Ellermann, T., Christensen, J.H., Bach, E.O. og Pedersen, B.F. 2021. National kvælstofmodel – version 2020. Metode rapport. GEUS Specialrapport. [https://www.geus.dk/Media/637576521860083405/NKM2020\\_Rapport\\_18maj2021\\_web.pdf](https://www.geus.dk/Media/637576521860083405/NKM2020_Rapport_18maj2021_web.pdf)
- /2/ Pedersen, J.B., Christiansen, A.V., Auken, E. & Sandersen, P. 2022. Geoscanner til overfladenær kortlægning. Vand & Jord, nr. 4, s. 142-144

- /3/ Jørgensen, F. 2022. tTEM i jord- og grundvandsforureningssager. Vand & Jord, nr. 4, s. 169-172
- /4/ Kim, H., Jakobsen, R., Aamand, J. & Hansen, B. 2022. Ny viden om nitratreduktion i undergrunden. Vand & Jord, nr. 4, s. 137-140
- /5/ Christiansen, A.V. & Foged, N. 2022. Fra geofysik til 3D-modeller. Vand & Jord, nr.4, s. 145-147
- /6/ Madsen, R.B., Sandersen, P.B.E., Møller, I., Hansen, T.M., Hansen, B., Christiansen, A.V. & Kim, H. 2022. Geostatisk model af geologi og redox. Vand & Jord, nr. 4, s. 148-151
- /7/ Blicher-Mathiesen, G., Wienke, J., Boel, M. & Frederiksen, R.R. 2022. Nitratudvaskning på markniveau. Vand & Jord, nr. 4, s. 152-154
- /8/ Frederiksen, R.R., Christiansen, A.V., Blicher-Mathiesen, G. & Hansen, B. 2022. Et grundvandsretentionskort på lokal skala. Vand & Jord, nr. 4, s. 156-159
- /9/ Graversgaard, M., Jacobsen, B.H., Nygaard, K., Schaper, S., Iversen, S., Odgaard, M.V. & Dalgaard, T. 2022. Vand & Jord, nr. 4, s. 160-162
- /10/ Jacobsen, B.H. & Ørum J. E. 2022. Økonomisk gevinst ved detaljeret retentionskortlægning. Vand og Jord, nr. 4, s. 166-168
- /11/ De Økonomiske Råd. Økonomi og Miljø. 2017. Regulering af landbrugs kvælstofudledning. Grønne afgifter og effektiv miljøregulering. Ægte opsparring. <https://dors.dk/vismandsrapporter/oekonomi-miljoe-2017>
- /12/ Voutchkova, D.D., Christiansen, A.V., Højberg, A.L., Iversen, B.V., Jacobsen, B.H., Willerslev, E., Blicher-Mathiesen, G., Holm, H.W., Møller, I., Koch, J., Nygaard, K., Nørgaard, L.B., Thorling, L., Sandersen, P.B.E., Schaper, S., Hvid, S.K., Dalgaard T. & Hansen, B. 2021. Prioritization tool for implementing the N-MAP concept. Eds.: Voutchkova, D.D. & Hansen, B. Geological Survey of Denmark and Greenland. GEUS report 2021/67. <https://data.geus.dk/gpub-landingpage/?id=34627>

BIRGITTE HANSEN (bgh@geus.dk) er seniorforsker ved De Nationale Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS) og ANDERS VEST CHRISTIANSEN er professor ved Institut for Geoscience, Aarhus Universitet.

MapField projektet er finansieret af Innovationsfonden (885000025B) med medfinansiering fra Miljø- og Landbrugsstyrelsen.

Særlig tak til Rasmus Rumph Frederiksen, Denitza Voutchkova, Hyojin Kim og Jacob Lind Bendtsen for udarbejdelse af figurer.

# Ny viden om nitratreduktion i undergrunden

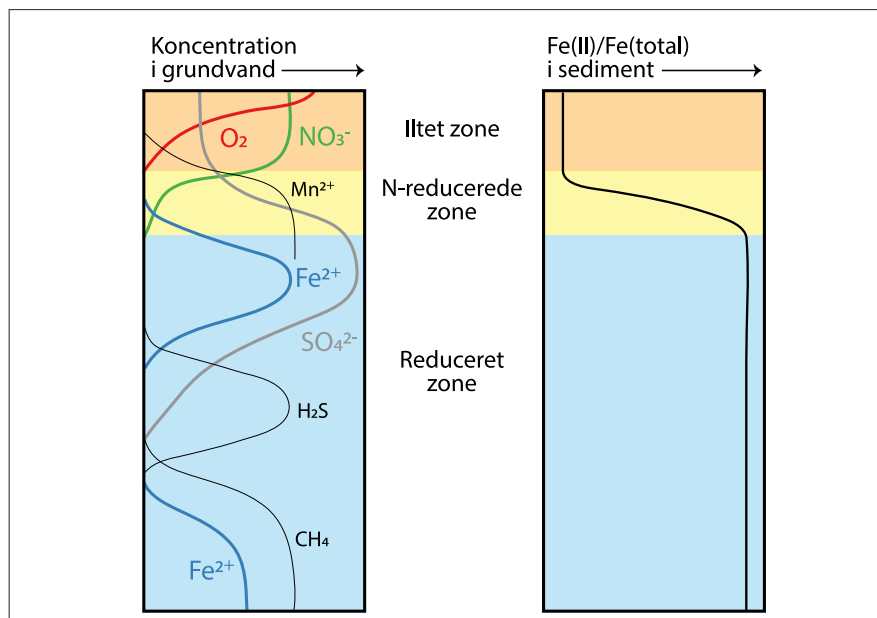
Den naturlige reduktion af nitrat i undergrunden kan variere fra mark til mark. Den er helt fraværende i iltede zoner og kan foregå med en hurtig eller langsommere omsætningsrate under iltfrie forhold i grundvandet. I MapField er det erfaret at en 3D forståelse af disse processer kræver integration af geologisk, hydrogeologisk og geokemisk viden og data.

HYOJIN KIM, RASMUS JAKOBSEN,  
JENS AAMAND & BIRGITTE HANSEN

## Redoxzoner i undergrunden

Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) der udvaskes fra rodzonen til grundvandet kan reduceres til enten  $\text{N}_2\text{O}$  eller  $\text{N}_2$  gasser afhængig af redoxforholdene i undergrunden. Redoxforholdene i grundvandet kan inddeles i tre zoner med forskellig grad af nitratreduktion /1/: 1) iltet zone; 2) nitratreducerende zone; og 3) reduceret zone. I den iltede zone, omsættes ilten ( $\text{O}_2$ ) og nitratkoncentrationen ændres ikke (orange zone i figur 1). Når ilten er helt opbrugt, begynder omsætningen af nitrat. Denne zone kaldes den nitratreducerende zone (gul zone i figur 1). I den reducerede zone, er nitraten helt væk og jern (Fe-oxider) og sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) undergår reduktion og der sker methandannelse (blå zone i figur 1).

Viden om undergrundens redoxzoner og strukturer er afgørende for at kunne vurdere hvor og hvor hurtig omsætningen af nitrat foregår i grundvandet inden vandet strømmer ud i vandløb. I den nationale kvælstofmodel som pt. bruges i forvaltningen til at beregne kvælstofretentionen (N-retentionen) for ID15-område (ca. 1500 ha) er redoxforholdene og omsætningen af nitrat meget simpelt beskrevet. Her opereres kun med en iltet zone og en reduceret zone adskilt af en redoxflade hvor der i modellen sker en momentan omsætning af nitrat. I MapField har vi arbejdet med en mere detaljeret og virkelighedstro beskrivelse af redoxzoner og omsætningsrater for nitrat ved at detailkortlægge og kombinere geofysiske, geokemiske og geologiske oplysninger.



Figur 1. Definition af redoxzoner. Redoxforholdene er karakteriseret ved forskellige koncentrationer af de redoxaktive stoffer som oxygen ( $\text{O}_2$ ), nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), jern ( $\text{Fe}^{2+}$ ), sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) og metan ( $\text{CH}_4$ ) samt sedimentets indhold af  $\text{Fe(II)/Fe(total)}$  (1/).

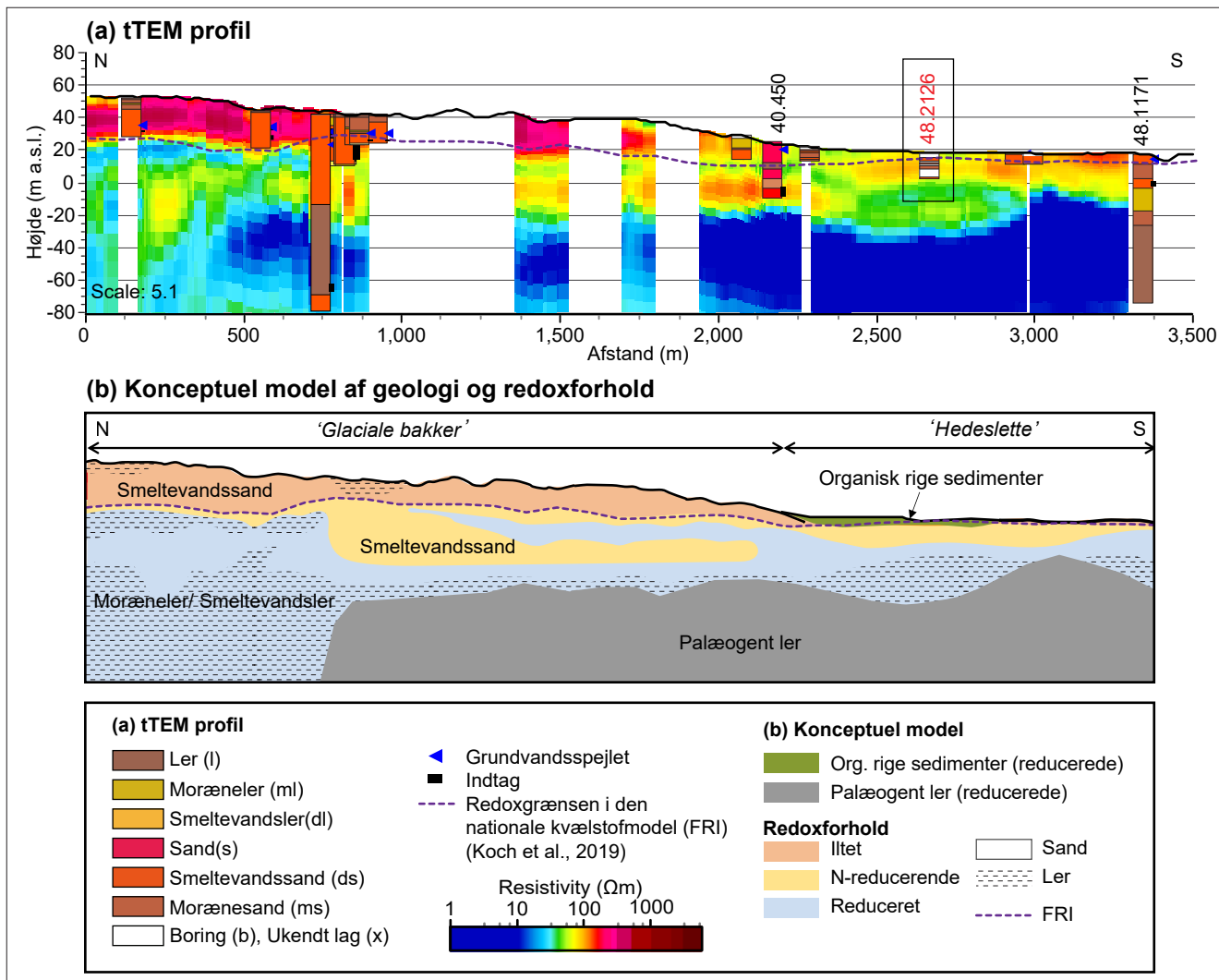
## Redoxforholdene er komplekse i undergrunden

Den detaljerede kortlægning af hydrogeologi og geokemi i MapField har vist at undergrunden er sammensat af komplekse 3D redoxzoner hvor nitraten ikke forsvinder momentant, men over dybdeintervaller af varierende mægtighed (figur 1 & 2). Mange steder er der desuden fundet nitratholdigt grundvand under overliggende reducerede jordlag, et resultat af komplekse redoxforhold og strømningsmønstre /2/ (figur 2). Denne kompleksitet kan bl.a. tilskrives den hydrogeologiske heterogene opbygning af de kvartære istidsaflejringer i undergrunden. Heterogeniteten skaber komplekse strøm-

ningsveje for vand og nitrat igennem undergrunden inden vandet løber ud i vandløb eller havet. Det er derfor vigtigt med en detaljeret geokemisk kortlægning.

Gennem detaljerede geokemiske undersøgelser i 8 hydrologiske oplande (ca. 1500 ha) fandt vi tre typer redoxarkitekturer: a) homogene arkitekturer med vertikal nedsivning; b) komplekse arkitekturer med geologiske vinduer; og c) komplekse arkitekturer med skråstillede opskudte lag (figur 3) /3/. I den homogene type er den hydrogeologiske struktur homogen og lagdelt. Vand og nitrat infiltrerer derfor vertikalt fra overfladen og der udvikles kun én redoxgrænse.

Den komplekse type har et eller flere geo-



Figur 2. Eksempel på komplekse redoxforhold i et af undersøgelsesområderne (LOOP2) i MapField. Den stiplede linje er redoxgrænsen fra den nationale kvælstofmodel (FRI) /1/.

logiske vinduer med sandede aflejringer, der kan være skabt ved glacialtektoniske processer. Her ledes vand og nitrat dybere ned i undergrunden gennem det geologiske vindue. Herved kan der udvikles iltede redoxzoner under øvre reducerede redoxzoner og der opstår derfor en kompleks redoxarkitektur.

Den komplekse type med opskudte skrå-

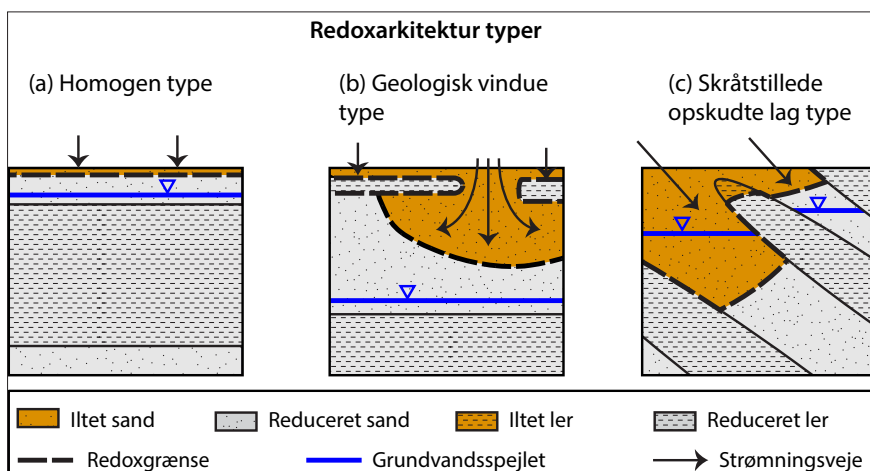
stillede sandede og lerede aflejringer skyldes sandsynligvis også glacialtektoniske processer. Her opstår typisk mange redoxzoner hvor strømningsvejene for vand og nitrat hovedsagelig er i de sandede iltede opskudte aflejringer. Tolkningen af disse komplekse redoxstrukturer bygger dermed både på informationer om geologien, og hydrogeolo-

gien samt viden om grundvandskemi og redoxforhold.

### Geokemiske undersøgelser fra centrale borer

De nye N-retentionskort udviklet i Mapfield bygger på detaljeret viden om fordelingen af reduktionszoner i 3D i undergrunden og målte omsætningsrater for nitrat. Denne viden stammer fra detaljerede geokemiske undersøgelser fra borer i oplandet som udgør en slags punktinformation. Spørgsmålet er hvordan disse data transformeres til oplandsskala i 3D? I MapField er dette gjort ved at integrere geofysisk, geologisk, hydrologisk og geokemisk viden og data i én geostatistisk analyse.

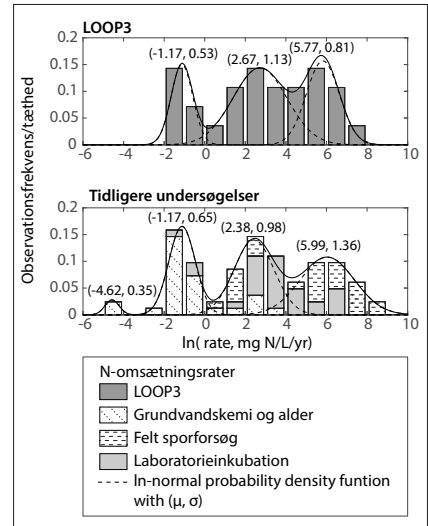
Placeringen af de geokemiske undersøgelsesboringer byggede dels på eksisterende viden fra området dels indledende geofysisk kortlægning (tTEM) og geologisk tolkning. Boringerne blev forsøgt placeret i sandede magasiner hvor risikoen for nedsivning af nitrat til grundvandet var størst.



Figur 3. Konceptuel model af redox-arkitekturtyper (Fra /3/).

I forbindelse med feltundersøgelserne blev der boret 6-10 borer indenfor hvert opland til maksimalt ca. 30 m's dybde. Boringerne blev udført af firmaet Ejliskov med Direct Push metoden med kerneprøvetagning. Prøver blev karakteriseret med hensyn til vandkemi, sedimentkemi, sedimentfarve, og litologi (figur 4; boks 1) for at få information om den rumlige fordeling af redoxzonerne. Desuden målte omsætningsrater for nitrat på sedimentprøver (boks1).

område udtaget 30-70 sedimentprøver fra 6-10 borer. Den øverste figur i figur 5 viser resultaterne fra et af undersøgelsesområderne (LOOP3)/4/. Der er stor variation (4 størrelsesordner) i de målte omsætningsrater som grupperer sig i 2-3 toppe. Den nederste figur i figur 4 viser resultatet af et litteraturstudie med resultater fra 28 forskellige undersøgelser i kvartære aflejringer fra andre steder i verdenen. Det interessante er, at der ses samme variation som i det undersøgte LOOP3 opland.



Figur 4. Øverste figur: N-omsætningsrater fra et af MapField undersøgelsesområderne (LOOP3). Nederste figur: sammenstilling af resultater fra 28 forskellige undersøgelser med brug af tre forskellige metoder. (Fra /4/)

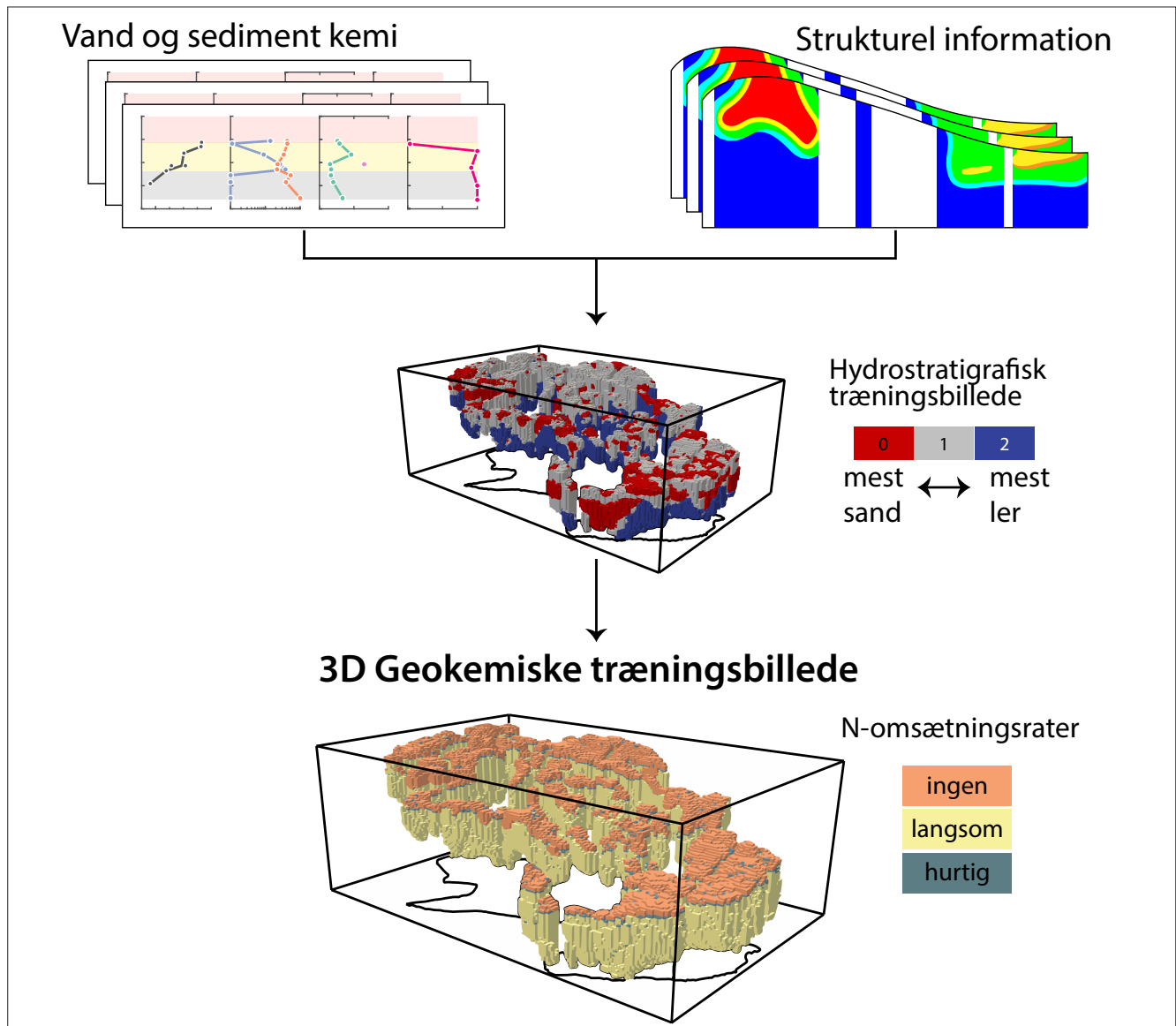
### Meget varierende N- omsætningsrater

Nitratomsætningen (denitrifikationen) i sedimenter fra forskellige redoxzoner blev bestemt ved brug af acetylenblokeringsmetoden, hvor sidste trin i denitrifikation fra lattergas (N<sub>2</sub>O) til frit kvælstof (N<sub>2</sub>) blokeres ved tilsætning af acetylen. Ved at måle koncentrationen af akkumuleret N<sub>2</sub>O over tid fås et mål for denitrifikationsraten eller omsætningsraten. Der blev i hvert undersøgelses-

### 3D model af redoxforhold og N-omsætningszoner

De nye geokemiske data bidrog sammen med eksisterende data til udviklingen af en konceptuel model for udbredelsen af redoxzoner, omsætningszoner og -rater.

Konstruktion af det geokemiske træningsbillede som skal indeholde den konceptuelle forståelse af reduktionszonerne og omsætningsraterne for nitrat blev baseret på de ind-



Figur 5. Konceptuel model for opskalering af geokemisk information til 3D rumlig information (Fra /4/)

**Boks 1. Geokemisk felt og laboratorieundersøgelser i Mapfield.**

Indsamling af geokemiske data er baseret på sedimentprøver fra kontinuerede kerneboringer. Delstykker af kernerne er brugt til a) bestemmelse af vandkemien på porevand centrifugeret fra sedimentprøver, b) bestemmelse af omsætningsrater med acetylenblokeringsmetoden og c) Fe(II)/Fe(tot) på sedimentprøver. Fe(II)/Fe(tot) forholdet måles på prøver ekstraheret i myresyre uden adgang for ilt. Forholdet indikerer om sedimentet er oxideret (ingen Fe(II)) eller reduceret (kun Fe(II)) – eller et sted i mellem som typisk repræsenterer den nitratreducerende zone. Baseret på disse vand- og sedimentkemiske resultater blev redoxforholdene for prøverne fortolket. Nitratomsætningsraterne måles ved at overføre homogeniseret sediment fra et kernestykke til tæt lukkede inkubationsflasker, fjerne ilt, tilsætte en opløsning med ~60 mg/l nitrat, tilsætte acetylen til gasfasen, og derefter følge udviklingen i N<sub>2</sub>O i gasfasen i ca. 10 dage. Herefter udledes omsætningsraten fra stigningen i N<sub>2</sub>O i den sidste lineære fase.

samlede data (figur 5). Det geokemiske træningsbillede blev dannet ved at opstille et sæt regler for det hydrostratigrafiske træningsbillede med hensyn til reduktionszoner og omsætningsrater for nitrat. Reglerne definerede dybden og udstrækningen af hver af reduktionszonerne for de forskellige hydrostratigrafiske enheder. Reglerne kunne variere fra et område til et andet indenfor samme ID15-opland. For eksempel var der brug for to forskellige træningsbilleder i LOOP3 på grund af forskellige dominerende geologiske strukturer mens der i andre områder kun var brug for et.

Træningsbillederne for hydrostratigrafi og geokemi blev koblet sammen (figur 5). Da udbredelse af nitrat i undergrunden afhænger af hydrogeologien og vandets strømningsveje opnås der ved sammenkoblingen mere realistiske realisationer. Derudover indgår variabiliteten af omsætningsraterne for nitrat som en sandsynlighedsfordeling i beregningen af usikkerheden og præcisionen på N-retentionsskortene for grundvandet. Der kan læses mere om træningsbillederne der efterfølgende bliver brugt til geostatistisk modellering af geologi og redox/reduktionszoner i dette nummer af Vand & Jord /5/.

**Konklusioner og perspektiver**

I MapField er der opnået ny viden om den strukturelle kompleksitet af N-reduktionszoner og omsætningsrater i undergrunden. Der er også udviklet en metode hvormed geokemiske informationer fra boringer kan opskaleres til hele oplandet ved integration med geofysisk og geologisk data og viden. Detaljerede geokemiske undersøgelser er særlig vigtige i geokemiske komplekse områder hvor nitratholdigt grundvand er trængt dybt ned i undergrunden. Omsætningen af nitrat foregår ikke altid momentant men ratebestemt og langsommere indenfor en nitratreducerende zone af varierende mægtighed. Omsætningsraterne for nitrat er bestemt som potentielle omsætningsrater og der er behov for mere forskning for at kunne beskrive og måle de langsommere omsætningsrater som udviklingen i nitrat over dybden nogen steder peger på.

I alt er 8 mindre hydrologiske oplande blevet detailundersøgt i MapField, og hvert opland har vist sig at være meget forskelligt opbygget. Resultaterne fremhæver behovet for lignende undersøgelser i andre typer oplande især hvor undergrunden er komplekst opbygget. Detaljeret geokemisk kortlægning med MapField-konceptet er derfor velegnet til at

kvantificere N-retentionen i grundvandet på lokal skala hvilket der er brug for til en målrettet N-regulering af landbruget.

**Referencer**

- /1/ Hansen, B.; Voutchkova, D. D.; Sandersen, P. B. E.; Kallesøe, A.; Thorling, L.; Møller, I.; Madsen, R. B.; Jakobsen, R.; Aamand, J.; Maurya, P.; Kim, H. Assessment of Complex Subsurface Redox Structures for Sustainable Development of Agriculture and the Environment. *Environmental Research Letters* 2021, 16 (2), 025007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abda6d>.
- /2/ Kim, H.; Sandersen, P. B. E.; Jakobsen, R.; Kallesøe, A. J.; Claes, N.; Blicher-Mathiesen, G.; Foged, N.; Aamand, J.; Hansen, B. A 3D Hydrogeochemistry Model of Nitrate Transport and Fate in a Glacial Sediment Catchment: A First Step toward a Numerical Model. *Science of The Total Environment* 2021, 776, 146041. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146041>.
- /3/ Kim, H.; Høyer, A.-S.; Jakobsen, R.; Thorling, L.; Aamand, J.; Maurya, P. K.; Christiansen, A. V.; Hansen, B. 3D Characterization of the Subsurface Redox Architecture in Complex Geological Settings. *Science of The Total Environment* 2019, 693, 133583. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133583>.
- /4/ Kim, H.; Jakobsen, R.; Aamand, J.; Claes, N.; Erlandsen, M.; Hansen, B. Upscaling of Denitrification Rates from Point to Catchment Scales for Modeling of Nitrate Transport and Retention. *Environ Sci Technol* 2021, 55 (23), 15821–15830. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04593>.
- /5/ Madsen, R.B., Sandersen, P.B.E., Møller, I., Hansen, T.M., Hansen, B., Christiansen, A.V. & Kim, H. 2022: Geostatisk model af geologi og redox. *Vand & Jord*, nr. 4, s. 148-151

HYOJIN KIM (hk@geus.dk) og BIRGITTE HANSEN er hhv. forsker og seniorforsker ved Afdeling for Grundvands- og Kvartærgeologisk Kortlægning, GEUS. RASMUS JAKOBSEN og JENS AAMAND er hhv. seniorforsker og professor ved Afdeling for Geokemi, GEUS.

# Det danske fødevareerhverv har en vision om at være klimaneutralt i 2050.

Sammen med vores medlemmer vil vi vise, at der findes en økonomisk bæredygtig vej til en klimaneutral fødevareproduktion.

Vi repræsenterer en værdikæde med tyngde og vilje til at finde løsninger på verdens klimaudfordringer i tæt samspil med resten af Danmark.

Læs mere på [lf.dk/klima](https://lf.dk/klima)



# Geoscanner til overfladenær kortlægning

Præcis modellering af vandets og kvælstoffets kredsløb på hektar-skala stiller høje krav til beskrivelsen af de geologiske strukturer. En nyudviklet geofysisk scanner kan effektivt kortlægge de øverste 80 meter af undergrunden med en hidtil uhørt detaljerigdom. Med metoden er vi nu i stand til at opløse strukturer i mindre skala såsom deformerede lerlag og tynde sandlag indlejret i ler.

JESPER B. PEDERSEN, ANDERS V. CHRISTIANSEN, ESSEN AUKEN & PETER SANDERSEN

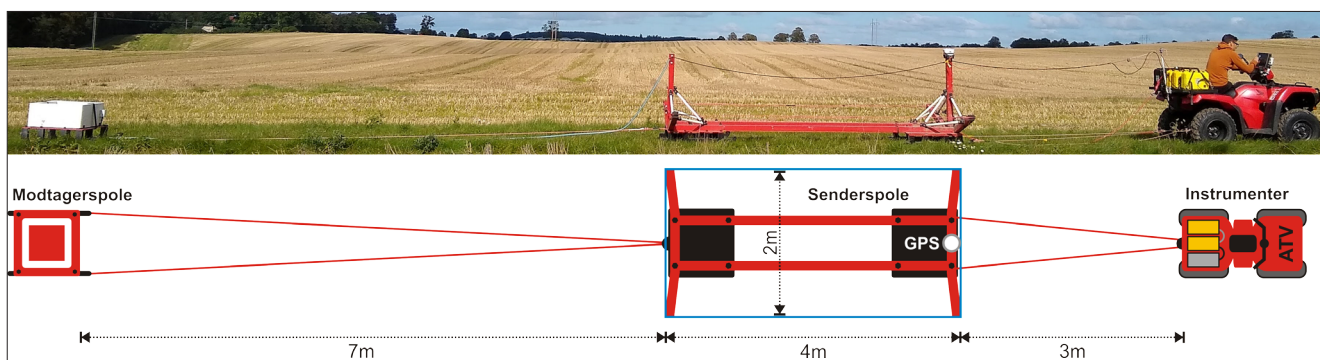
## Behovet for et nyt redskab i den geofysiske værktøjskasse

Detaljeret viden om jordens opbygning i de øverste 100 meter er essentiel, da hovedparten af de humane aktiviteter og påvirkninger sker i denne zone. Det gælder for eksempel råstofindvinding, udvikling af infrastruktur, forurening fra fx landbruget og ikke mindst vandindvinding. I MapField-projektet har fokus været omsætning af nitrat i grundvandszonen, og der skulle derfor indsamles viden om jordlagenes strukturer og opbygning så vandets transportveje kunne fastlægges. Den gængse fremgangsmåde til kortlægning af undergrunden i de relevante dybder har været ved hjælp af borer, Multi-Elektrode-Profil (MEP) og luftbårne, transiente elektromagne-

tiske målinger ved SkyTEM metoden. Metoderne er dog alle kendetegnet ved, at det er omkostningstungt at lave høj-opløselige geologiske kort på hektar-skala. Borer giver præcis og detaljeret information om den geologiske lagfølge, men skal betragtes som en punktmåling. Endvidere er det omkostningstungt at bore til 100 meters dybde. MEP-målinger er veldokumenterede og giver brugbare todimensionelle resultater. MEP er dog begrænset til profiler, og det er kun muligt at indsamle få linje-kilometer data per dag. Luftbårne metoder kan kortlægge store områder hurtigt, men har en lav detaljeringsgrad i de øverste dele af jorden. I MapField-projektet blev det, som direkte konsekvens af manglen på et passende værktøj, besluttet at fortsætte udviklingen af en ny geofysisk metode, som kan producere højopløselige geologiske kort på hektar-skala. Metodikken hedder tTEM, hvilket står for towed Transient ElectroMagnetic Method.

## Hvordan virker tTEM geoscanneren?

tTEM geoscanneren fremgår af figur 1. Det overordnede formål var at udvikle et system, som hurtigt kunne producere billeder af undergrunden ned til en dybde af 80 meter i høj vertikal og lateral opløsning  $1/1$ . For at opfylde disse mål udviklede vi en  $2 \times 4 \text{ m}^2$ , senderspøle, som er monteret på to ikke-metalliske slæder, der trækkes af en ATV (All Terrain Vehicle). Senderspølen anvendes til at opbygge en strøm, så der dannes et kraftigt magnetfelt. Strømmen slukkes derefter abrupt, så det primære magnetfelt aftager, og der dannes elektriske hvirvelstrømme i jorden. Dette giver anledning til et sekundært magnetfelt, som henfalder over tid. Henfaldsraten af det sekundære magnetfelt måles i en modtagerspøle, som er placeret på en anden slæde syv meter bag senderspølen. På baggrund af henfaldsraten kan man udregne jordens elektriske modstand, som er relateret til den geologiske opbygning af jorden. For eksempel er ler-aflejringer kendetegnet ved at have en lav elek-



Figur 1. tTEM geoscanneren i  $2 \times 4 \text{ m}^2$  opsætning. Der er i dag også fremstillet en  $3 \times 3 \text{ m}^2$  udgave der kun anvender én slæde til senderen.



trisk modstand, og der vil derfor være et langvarigt respons fra disse jordlag, hvorimod der for sand- eller gruslag, som har en høj elektrisk modstand, vil være et kort respons, idet magnetfeltet hurtigt dør ud. Instrumenterne, som styrer al elektronikken, er placeret bagerst på ATV'en, sammen med et batteri, som leverer strøm til systemet. Geoscanneren er konfigureret i et lavt og højt moment, så man både opnår overfladenær og dyb information. I lav-momentet udsendes 2,8 ampere med en slukketid på kun 2,6 mikrosekunder, og i høj-momentet udsendes der 30 ampere. Gentagelsesfrekvensen for målingerne ligger på cirka 0,8 sekunder, hvilket svarer til, at man får en fuld måling for hver 3-4 meter ved en kortlægningshastighed på 15-20 kilometer i timen. Systemet producerer meget varme grundet den hurtige gentagelsesfrekvens, og derfor er der lagt betydelig indsats i at vandkøle senderinstrumenterne, så udstyret ikke brænder af i felten. I fronten af ATV'en er der en tablet med en GIS-visning, så man kan evaluere resultaterne af de indsamlede data øjeblikkeligt, og sikre, at man kører langs de ønskede linjer. Den typiske linjeafstand, når der kortlægges med metoden, er 10-25 meter, hvilket svarer til placeringen af køresporene på markerne. Med denne opstilling kan der typisk kortlægges 100 hektar landbrugsjord om dagen, hvor man opnår helt op til 200 geofysiske målinger per hektar.

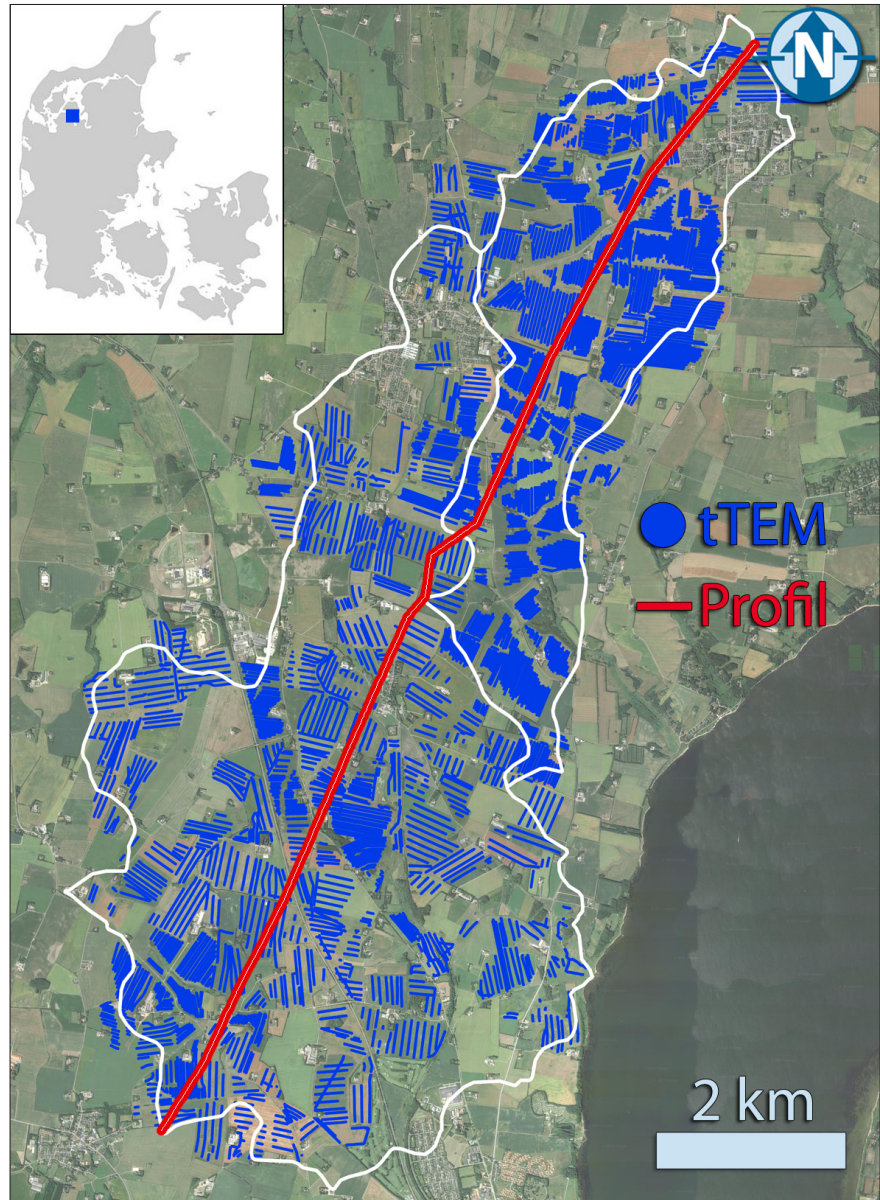
### Den geofysiske kortlægning i demonstrationsområderne

tTEM geoscanneren er anvendt til at kortlægge de geologiske strukturer i de fire LOOP-områder samt demonstrationsområderne Hulebro Bæk og Hagens Møllebæk, som tilsammen udgør 4200 hektar landbrugsjord. De geofysiske målinger og omridset af demonstrationsområderne fremgår af figur 2.

Områderne blev kortlagt på 21 dage, og i alt er der 88.846 målepunkter tilgængelige efter databehandling. I databehandlingen fjernes alle målepunkter, som er påvirket af elektromagnetisk støj fra menneskabte kilder, såsom elektriske kabler, højspændingsledninger eller dyrehegn. Den typiske sikkerhedsafstand til menneskeskabte støjkluder, før der kan opnås brugbare data, er 25-50 meter. Når data er behandlet, udføres der en geofysisk tolkning, så de målte henfaldsrater konverteres til modstandsmodeller for jorden. Resultaterne præsenteres oftest som fladekort i form af middelmodstandskort i koter og dybder og/eller todimensionelle profilsnit igennem jorden.

### Kortlagte geologiske strukturer

Demonstrationsområderne Hulebro Bæk

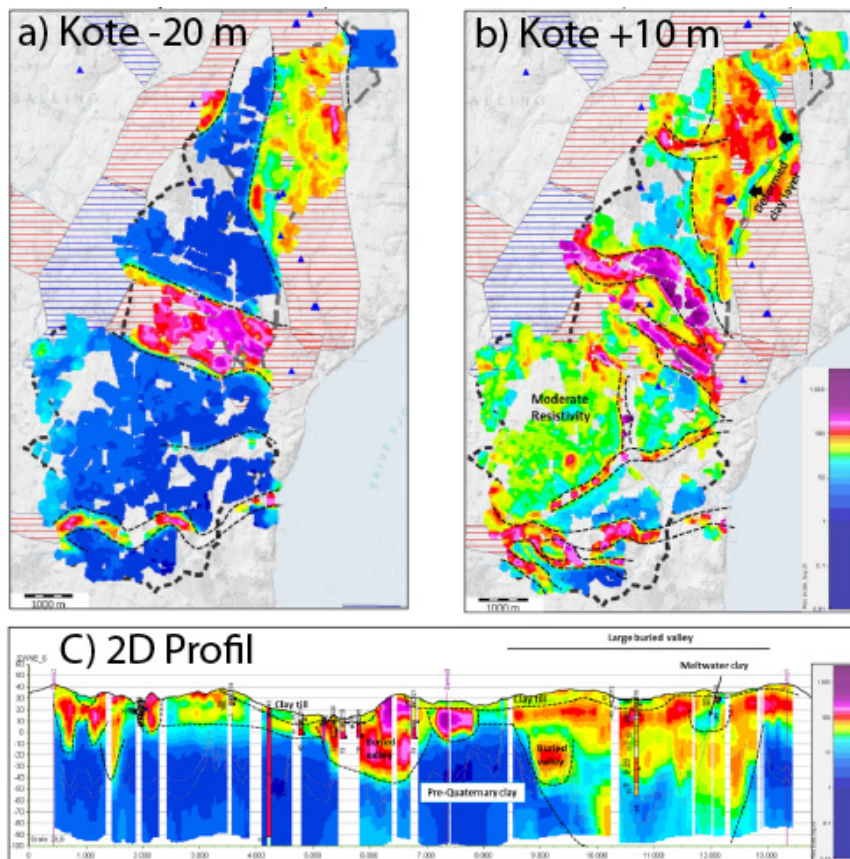


Figur 2. tTEM kortlægningen i demonstrationsområderne Hulebro Bæk og Hagens Møllebæk. De blå cirkler markerer tTEM målepunkter, og den hvide polygon det totale kortlægningsområde. Den røde linje markerer placeringen af 2D profilet, som der vises i figur 3c.

og Hagensmølle Bæk ligger på Salling i den nordvestlige del af Jylland ud mod Skive Fjord i et ler-domineret moræne-landskab fra sidste istid /2/. Figur 3a og 3b viser middelmodstandskort fra henholdsvis kote -20 m og +10 m. De rød og blå skraverede områder uden for demonstrationsområderne markerer allerede kortlagte helt eller delvist begravede dale. Fladekortene giver et indblik i modstandskontrasterne mellem det godt ledende prækvartære ler (blå farver) og de forskellige generationer af nedskårne begravede dalsystemer, som er dannet under istidene. Modstandsvariationerne i dalene relaterer sig til forskellige former for dalfyld. Den nord-sydligt orienterede dal (3a,b) viser høje og moderate modstande (grøngullig-rød farve), som indikerer fyld af sand

og ler. Dette bekræftes af borer i dalen, som beskriver moræneler, smeltevandsler og smeltevandssand /2/. Den mere end en kilometer brede VNV-ØSØ orienterede dal (3a) er domineret af høje modstande, som svarer til sand og grus (lilla farve). To smallere og mindre dybe dale med omtrent samme orientering ses også i området (3a). I middelmodstandskortet i kote +10 meter (3b) ses de samme dalstrukturer, men de er nu helt op til 1,5 kilometer brede, og der ses adskillige små dale internt i dal-strukturerne. I den nord-sydligt orienterede dal ses tilmed en aflang lavmodstandsstruktur af deformeret smeltevandsler.

I figur 3c vises der et 13,5 kilometer lang sydvest-nordøst orienteret, todimensionelt profilsnit. Den geografiske placering af profil-



Figur 3. Middelmodstandskort i a) kote -20 meter b) kote +10 meter. c) 2D profilsnit med geologisk tolkning. Placeringen af profilet fremgår af Figur 2. Middelmodstandskort og profil er fra /2/.

snittet fremgår af figur 2. I profilafstand 9-13 km ses en dyb begravet dal. I den begravede dal ses en intern begravet dal og det skråstilte deformerede smeltvandsler. Snittet giver et godt indblik i, hvor komplekse de begravede dale kan være. I en profilafstand af 5,5-8 kilometer ses en række eksempler på dale med højmodstandslag indikerende grus og sand. Disse dale vil kunne udgøre korridorer for vandtransport og dermed også kvælstof.

### Konklusion og perspektivering

De præsenterede geologiske kort, som er baseret på data fra tTEM geoscanneren, viser en helt ny detaljegråd grundet tTEM-systemets unikke vertikale og laterale opløselighed. Med metoden er vi nu i stand til kosteffektivt at kortlægge de begravede dale, som i høj grad er styrende for vandtransporten og hvor vi finder meget af vores drikkevand i Danmark. Inputtet fra geofysikken er essen-

tielt for at kunne lave en hektar-skala modellering af vandets og kvælstoffets kredsløb. I MapField-projektet skal resultaterne anvendes til at fastlægge vandets transportveje i forbindelse med kvælstofretention, men de opnåede høj-opløselige geologiske kort vil kunne anvendes i adskillige andre sammenhænge, hvor viden om undergrundens strukturer er nødvendig for at træffe beslutninger. Det kunne for eksempel være i forbindelse med råstofindvinding, hvor forekomsten af sand og grus nær terræn er vigtig viden /3/. Metoden vil ligeledes være anvendelig i forbindelse med punktkildeforureninger, hvor mulige strømningsveje skal kortlægges for, at der kan udarbejdes en risikovurdering for vores grundvand /3, 4/. Den geofysiske kortlægning vil også kunne være relevant i forbindelse med geotekniske undersøgelser ved større anlægsprojekter eller jordbundundersøgelser ved etablering af nye veje. Resultaterne kan også anvendes i forbindelse med vurdering af

grundvandsmagasineres sårbarhed og rumlige dimensioner /4/, såvel som udpegning af optimale lokaliteter for kunstig infiltration af regnvand. Metoden vil ligeledes være yderst anvendelig i data-fattige områder med vandmangel, såsom flygtningelejre eller landlige områder i Afrika. I disse regioner er succesraten for vandindvindingsboringer i dag meget lav, da placeringen af borerne ofte finder sted med kun begrænset viden om undergrunden. Ved at inddrage tTEM geoscanneren har et demoprojekt i Sydafrika allerede vist, at succesraten stiger betydeligt når der i stedet bores på et oplyst grundlag. Hele 12 ud af 13 borer, som blev placeret på baggrund af tTEM geoscanneren, har fundet vand i et område hvor det ellers var en mangelvare /5/.

### Referencer

- /1/ Auken, E., N. Foged, J. J. Larsen, K. V. T. Lassen, P. K. Maurya, S. M. Dath and T. T. Eiskjær, 2019, tTEM – A towed transient electromagnetic system for detailed imaging of the top 70 m of the subsurface, *Geophysics*, 84, E13-E22.
- /2/ Sandersen, P.B.E. & Kallesøe, A.J., (2021). Geological mapping in MapField LOOP-areas and demo sites. GEUS Report 2021/36, 76 s.
- /3/ Maurya, P. K., A. V. Christiansen, J. B. Pedersen and E. Auken, 2020, High resolution 3D subsurface mapping using a towed transient electromagnetic system – tTEM: case studies, *Near Surface Geophysics*, 18, 249-259.
- /4/ Sandersen, P.B.E, Kallesøe, A.J., Møller, I, Høyer, A.-S., Jørgensen, F., Pedersen, J.B. & Christiansen, A.V. (2021). Utilizing the towed Transient ElectroMagnetic method (tTEM) for achieving unprecedented near-surface detail in geological mapping. *Engineering Geology*, 288 (2021) 106125.
- /5/ Grombacher, D., Maurya, P., Lind, J. C., Auken, E., Lane, J., Kraghede, R., & Pedersen, J. (2021). Rapid Mapping of Hydrological Systems in Remote Conditions Using the tTEM System. In NSG2021 1st Conference on Hydrogeophysics (Vol. 2021, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.

JESPER B. PEDERSEN (jesper.bjergsted@geo.au.dk) er senior geofysiker, ANDERS V. CHRISTIANSEN (anders.vest@geo.au.dk) og ESBEN AUKEN (esben.auken@geo.au.dk) er professorer. Alle ved HydroGeofysik Gruppen, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet  
PETER SANDERSEN (psa@geus.dk) er seniorforsker ved De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland, GEUS

# Fra geofysik til 3D-modeller

En detaljeret 3D-model af undergrundens strukturer er essentiel for, at man kan forudsige, hvor vandet løber i undergrunden, og dermed også hvordan fx nitratreduktionen foregår. Her beskriver vi hvordan man kombinerer geofysiske data med boringer for at danne 3D modeller af undergrunden.

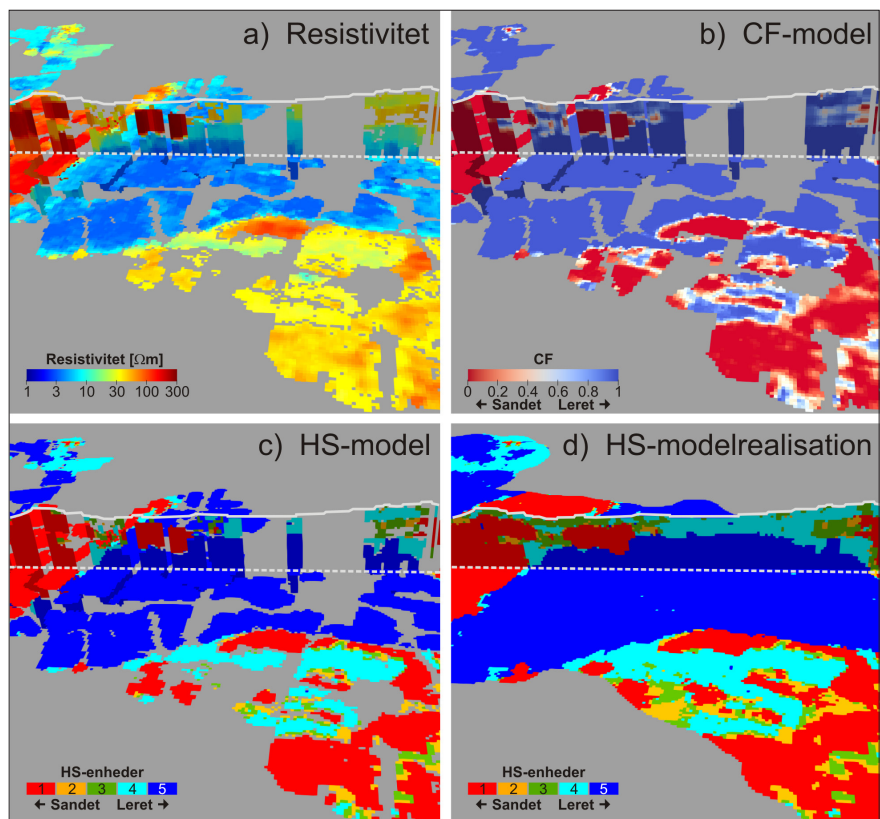
ANDERS V. CHRISTIANSEN &  
NIKOLAJ FOGED

## Oversættelse af den geofysiske kortlægning

Denne artikel beskriver, hvordan vi i MapField-projektet danner en 3D-model over strukturer i undergrunden baseret på en geofysik kortlægning med tTEM-instrumentet og boringsinformation fra området. 3D modellen med undergrundens strukturer er det hydrostratigrafiske input til en grundvandmodel for området. Vi kvantificerer modelusikkerheden ved at generere mange lige sandsynlige hydrostratigrafiske modelrealisationer.

Den geofysiske metode tTEM /1/ er særdeles velegnet til detaljeret kortlægning af de øverste ca. 80 m, og tTEM-kortlægningerne er den altdominerende kilde til information om strukturerne i undergrunden i MapField-projektet. Resultatet fra en tTEM-kortlægning er i første omgang en model, der beskriver den specifikke elektriske modstand (resistiviteten) i undergrunden. Resistiviteten er interessant, da den korrelerer til litologi (sand, ler, kalk, mv.) og derved også til, hvor godt de geologiske materialer kan lede vand (den hydrauliske ledningsevne). Således vil en lav resistivitet normalt svare til finkornede og meget lerede sedimenter, der bremser eller blokerer vandstrømning, mens en høj resistivitet svarer til grovkornede sedimenter (sand og grus), som er de vandførende lag i undergrunden. I Figur 1 er der vist et horisontalt og et vertikalt snit i resistivitetsmodellen fra tTEM-kortlægningen i projektet MapField på de to demonstrationsområder, her kaldet demosites. De to demosites er beliggende på Salling, nord for Skive og dækker et ca. 3000 hektar stort område. tTEM-kortlægningen af demosites er præsenteret i større detalje /1/.

Som det ses i figur 1a, er der masser af strukturer i resistivitetsmodellen, hvor de



Figur 1. 3D-view af modellerne set mod nord, med horisontalsnit i kote -20 m og vertikal sektion (mellem de hvide linje). Den vertikale sektion er ca. 5 km lang og ~40-60 m højt. a) Resistivitetsmodellen, b) CF-modellen, c) HS-modellen, d) en modelrealisation af den komplette HS-model.

røde områder indikerer sandede sedimenter og de blå farver er de lerede sedimenter.

Første skridt i dannelsen af en 3D model af strukturerne er en oversættelse af de geofysiske modeller til en model, der viser andelen af ler i hver modelcelle ved hjælp af boringsinformation /2,3/. Lerandelen angives som clay fraction (CF).

I figur 1b er resistivitetsmodellen oversat til CF-værdier, hvor den blå farve er ler (CF-værdier ~1), og hvor sand/grus har en rød farve (CF-værdier ~0). Oversættelsen er sket ved at sammenholde boringsbeskrivelserne om lersand-fordelingen med de nærliggende resistiv-

vitetsværdier. Dette gøres for alle boringerne i området i en række dybdeintervaller og her ved opnås en række lokalt optimerede grænseværdier for oversættelsen af resistiviteterne til en CF-værdi. Optimeringen af denne rumligt varierende oversættelse af resistiviteterne er automatiseret i en regnekode. Inputtet til regnekoden er andelen af lerlag i dybdeintervaller i boringerne samt resistivitetsmodellerne. Regnekoden finder dernæst de lokale grænseværdier, der giver den bedst mulige overensstemmelse mellem lerandelen (CF) beskrevet i boringerne og lerandelen beregnet fra resistivitetsmodellerne. Den rumlige varia-

**Boks 1 - Clustering**

Clustering er en måde at opdele eller gruppere datasæt således, at datapunkterne i den samme gruppe (kaldet en cluster) er mere ens med hinanden end med datapunkterne i de andre clusters. Vi anvender en såkaldt K-means cluster-algoritme. I K-means clustering tilhører et datapunkt den cluster, hvor afstanden til cluster-centret er kortest. K-means clustering algoritmen finder cluster-centrene ud fra det kriterie, at den kvadrerede afstand fra datapunkterne til nærmeste cluster-centrum skal være mindst mulig for det samlede datasæt. Når vi taler om afstande i clustering, er der således tale om afstande i data-rummet og ikke geografiske afstande. Som i vores tilfælde kan clustering foretages på flere variabler (resistiviteter og CF-værdier). For at variablerne får lige meget vægt i cluster-beregningen, foretages bl.a. en normalisering af variablerne forud for selve clusteringen.

Ved en clustering er det brugeren, der angiver, hvor mange clusters man vil have. Figur 2a viser, hvordan et CF- og resistivitets-datasæt opdeles af K-means cluster-algoritmen i fem clusters (de fem farver i figuren). Figur 2b viser det tilhørende silhuet-indeks. Silhuet-indeks er et mål for, hvor unikt et datapunkt tilhører sit cluster i forhold til de andre cluster. Som det fremgår af Figur 2a-b, har datapunkter nær et clustercentrum et højt silhuet-indeks svarende til et meget unikt tilhørsforhold, mens datapunkter tæt ved cluster-grænserne har et lavt silhuet-indeks svarende til et mindre unikt tilhørsforhold. Silhuet-indeks kan således bruges som en usikkerhedsindikator for cluster-tilhørsforholdet for datapunkterne i cluster-domænet. Silhuet-indeks kan også bruges til at indikere, hvor mange clusters et dataset kan "bære" at opdeles i, således at, hvis en given cluster har meget lave silhuet-indeks-værdier, bør man opdele datasættet i færre clusters.

ble oversættelse af resistivitetsværdier er nødvendig, bl.a. fordi: 1) den elektriske ledningsevne af porevandet i sedimenterne kan ændre sig igennem kortlægningsområdet, og dette påvirker resistiviteten; 2) usikkerheder i resistivitetsmodellen, hvor specielt kortlægning af tynde lag dybt nede er vanskelig og disse lag vil have stor usikkerhed; 3) lag, der er beskrevet som fx Ler i borerne kan spænde over et stort resistivitetinterval alt efter mængden og typen af lerminerale i den pågældende lerede aflejring.

Som det fremgår af figur 1b, er CF-modellen næsten binær med CF-værdier ~1 for ler og CF-værdier ~0 for sand/grus. CF-værdier mellem 0 og 1 opstår dels, hvor man har resistivitetsværdier, der ikke entydigt kan oversættes til ler eller sand, dels når borerne har både ler og sand beskrevet for et givet re-

sistivitetslag.

Vi har nu en CF-model, som inkluderer information fra borerne, men som det fremgår af figur 1a-b, er en forsimpning af strukturerne i resistivitetsmodellen.

**Opdeling i hydrostratigrafiske enheder – Clustering**

Næste skridt i dannelse af en 3D model over strukturer er integration af de detaljerede strukturer i resistivitetsmodellen med CF-modellen til dannelse af den hydrostratigrafiske model /4/.

Den hydrostratigrafiske model danner grundlaget for beregning af vandstrømningerne i undergrunden i grundvandsmodellen. Den hydrostratigrafiske model består af enheder (HS-enheder), hvor de enkelte enheder tilskrives hydrologiske egenskaber (fx hydraul-

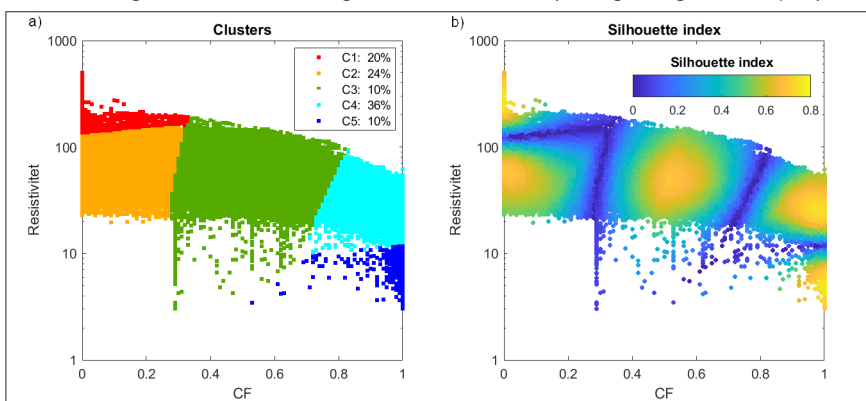
isk ledningsevne), når de indgår i en grundvandsmodel. CF-modellen kunne let transformeres til en hydrostratigrafisk model med to HS-enheder (ler og sand), men dette ville være en overforsimpling af de faktiske forhold. Tilgangen her er derfor at danne HS-enheder ud fra både CF-modellen og resistivitetsmodellen. Til gruppering af vores CF- og resistivitetsmodel til HS-enheder anvender vi en Cluster-algoritme (boks 1).

I Ffigur 2a ses gruppering af CF- og resistivitets-modellerne i 5 HS-enheder. HS-enhederne 1 og 2 (blå/lyseblå) er de mest lerede enheder med lav hydraulisk ledningsevne, mens HS-enhederne 4 og 5 er de mest sandede enheder med høj hydraulisk ledningsevne (vandførende). Antallet af HS-enheder i modellen bestemmes dels ved at vurdere, hvor mange enheder datasættet kan bære, dels med input fra den hydrologiske side om, hvor mange HS-enheder der er nødvendige for, at modellen har kompleksitet nok til at forudsige de hydrologiske data (typisk trykniveauer i borer og afstrømning i vandløb).

**Udfyldning af huller i 3D modellen**

Næste skridt i processen er dannelsen af en komplet 3D hydrostratigrafisk model, som også har estimerede HS-værdier, hvor der ikke er indsamlet data.

Som det fremgår figur 1a-c er der "huller" i modellerne. Huller forekommer, hvor der ikke er resistivitets-modeller. Dette skyldes, at der i kortlægningsområdet fx er byområder, skov og vådområder, hvor man ikke har kunne indsamle geofysiske data, eller at man ikke har kunnet få adgang til arealerne. Også forstyrrelser i de geofysiske data fra højspændingsledninger, gasledninger, elhegn m.m. bevirker, at TEM-dataene i mindre områder må kasseres. For at kunne anvende modellen i det videre forløb, skal hullerne udfyldes, dvs. at HS-enheder skal tilskrives i hele modelvolumenet. Hvis man anvender interpolation til at lukke hullerne, vil man få udglattede strukturer, som ikke har samme kompleksitet som i områderne, hvor man har data. Vi bruger derfor multi-punkts geostatistik til denne udfyldning af hullerne /5/. Specifikt anvender vi en metode kaldet Direct Sampling til at udfyldelse af hullerne i HS-modellen. Direct Sampling genererer strukturer med samme udseende og statistik som i det træningsbillede, der er en del af inputtet til Direct Sampling. I vores tilfælde kan vi bruge HS-modellen i figur 1c som 3D-træningsbillede. I en Direct Sampling skal man også definere såkaldte hårde data (eng: hard data), som er ankerpunkter i modellen, der ikke kan ændres ved generering af en model realisationen. I vores tilfælde



Figur 2. a) Opdelingen af et CF- og resistivitets-datasæt i 5 clusters. Hver prik er et datapar med en CF-værdi og en resistivitet (X- og Y-akserne), og farven angiver, hvilken cluster dette datapar tilhører. Legenden angiver, hvor mange procent af datapunkterne der er i hver af de 5 clusters. b) Det tilhørende silhuet-indeks.

udvælges de hårde data som de datapunkter med høj Silhuet-indeks (boks1), dvs. de mest sikre datapunkter fra HS-modellen i figur 1a. I figur 1c er vist én modelrealisation med Direct Sampling.

### Model usikkerhed

Da Direct Sampling er en statistisk proces, kan vi generere mange lige sandsynlige HS-modeller, der alle opfylder statistikken i træningsbilledet og i de udvalgte hårde data. For at kvantificere modelusikkerheden genererer vi derfor mange HS-modeller (i MapField 500) med Direct Sampling-metoden. Variationen i disse mange, lige sandsynlige modelrealisationer fortæller os om usikkerheden i vores HS-model. Et område med store variationer i de mange modelrealisationer er således mere usikkert end et område med få eller ingen variationer.

I figur 3b-c er vist 2 modelrealisationer med tilhørende hårde data i figur 3a. Eksempler på væsentlige forskelle i modelrealisationerne ses bl.a. ved de stiplede linjer ved A og B markeringerne. I figur 3b er det vandførende røde sandlag ved markering A ikke forbundet, mens dette er tilfældet i figur 3c. Området ved B-markeringen er datafattigt, hvilket resulterer i meget forskellige strukturer i de to modelrealisationer.

Den HS-model, hydrologerne arbejder videre med, er således ikke én HS-model, men flere hundrede, lige sandsynlige HS-modeller (se hvordan dette håndteres i det videre forløb i /6/).

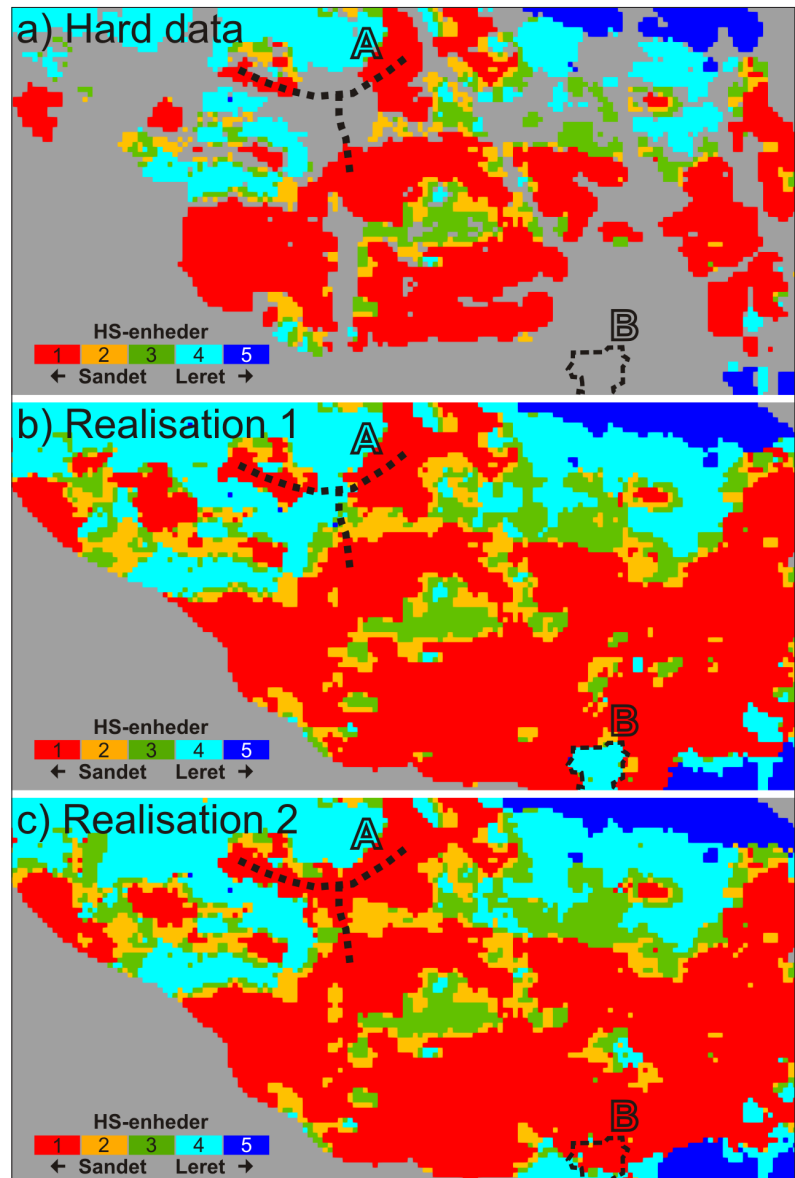
### Konklusion

Det beskrevne modelleringskoncept forudsætter en geofysisk kortlægning med høj detaljeringsgrad både vertikalt og horisontalt, da strukturerne i HS-modelrealisationerne i høj grad styres af strukturerne kortlagt af geofysikken. Boringer spiller dog også en vigtig rolle, da de understøtter oversættelsen af den geofysiske kortlægning. I dansk sammenhæng vil man ofte opleve, at boringstætheden i et modelområde umiddelbart er ganske god, men når man ser på boringstætheder i dybden, fx dybere end 30 m, er boringsinformationen ofte væsentligt begrænset. Dette resulterer i en mindre sikker oversættelse af geofysikken i dybden. Den aftagende boringsinformation med dybden er dog ikke anderledes end ved en traditionel manuel fortolkning af de geofysiske resultater i samspil med boringerne. HS-modelleringskonceptet er automatiseret, baserer sig så vidt muligt på objektive kriterier og er derved reproducerbar. Antallet af HS-enheder i modellen er dog til dels subjektiv beslutning, og træffes bedst i

samråd med hydrologen, der kan inddrage de hydrologiske data i denne beslutning. De mange lige sandsynlige modelrealisationer muliggør, at modelusikkerheden kan kvantificeres.

### Referencer

- /1/ Pedersen J. B., Christiansen A. V., Auken E., Sandersen P. 2022, Geoscanner til overfladenær kortlægning, Vand & Jord, nr. 4, s. 142-144
- /2/ Christiansen, A. V., N. Foged, and E. Auken, 2014, A concept for calculating accumulated clay thickness from borehole lithological logs and resistivity models for nitrate vulnerability assessment, Journal of Applied Geophysics, 108, 69-77.
- /3/ Foged, N., P. A. Marker, A. V. Christiansen, P. Bauer-Gottwein, F. Jørgensen, A.-S. Høyer, and E. Auken, 2014, Large scale 3D-modeling by integration of resistivity models and borehole data through inversion, Hydrology and Earth System Sciences, 18,4349-4362.



Figur 3. a) Hårde data, b-c) 2 HS-modelrealisationer. Horisontalt snit i kote -20 m. (~50-60m dybde), udsnit af modelområde på ca. 4 x 2 km.

- /4/ Marker, P. A., N. Foged, X. He, A. V. Christiansen, A. Refsgaard, E. Auken, and P. Bauer-Gottwein, 2015, Performance evaluation of groundwater model hydrostratigraphy from airborne electromagnetic data and lithological borehole logs, HESS, 19,3875-3890.
- /5/ Vilhelmsen, T. N., E. Auken, A. V. Christiansen, A. S. Barfod, P. A. Marker, and P. Bauer-Gottwein, 2019, Combining Clustering Methods With MPS to Estimate Structural Uncertainty for Hydrological Models, Frontiers in Earth Science.
- /6/ Frederiksen R. R., Christiansen A. V., Blicher-Mathiesen G., Hansen B., 2022, Et grundvandsretentionskort på lokal skala, Vand & Jord, nr. 4, s. 156-159.

ANDERS V. CHRISTIANSEN (anders.vest@geo.au.dk) er professor og NIKOLAJ FOGED (nikolaj.foged@geo.au.dk) er geofysiker PhD ved HydroGeofysik Gruppen, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet

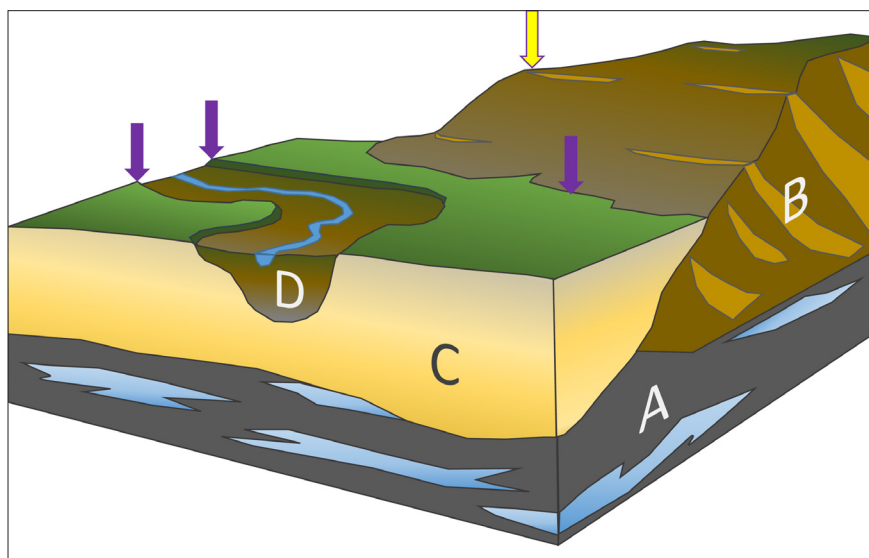
# Geostatistisk model af geologi og redox

Geostatistisk modellering inddrager relevant viden og data i en samlet model, der er anvendt ved udarbejdelsen af detaljerede retentionskort for nitrat. Ved at indbygge variationen på inputdata kan usikkerheden på den geologiske model og redoxstrukturerne estimeres. Dette bruges i beregning af usikkerheden på detaljerede N-retentionskort.

RASMUS BØDKER MADSEN, PETER B.E. SANDERSEN, INGELISE MØLLER, THOMAS MEJER HANSEN, BIRGITTE HANSEN, ANDERS VEST CHRISTIANSEN & HYOJIN KIM

Geofysiske metoder til dataindsamling har været under rivende udvikling de seneste år. Det er nu muligt at kortlægge geofysiske strukturer i overfladenære dele af undergrunden i høj detaljegrade ned til omkring 80 m under terræn. Dette er gjort med tTEM-metoden, som er videreudviklet i Mapfield-projektet */1/*. Den store udfordring ved disse data er, hvordan den geofysiske information oversættes til information om geologi og redoxforhold. Dette er vigtigt i forbindelse med fx. kortlægning af vandressourcer, forurening eller N-retentionskortlægning. Hvis disse data skal tolkes manuelt, er opgaven tidskrævende, idet geofysisk information skal samles og integreres med fx. geokemisk og hydrogeologisk information. Samtidig kan alle data, inklusive de geofysiske data, være tvetydige. Dermed må en vis usikkerhed forventes på den endelige model. Denne usikkerhed er typisk svær at kvantificere og gøre brugbar for det videre modelleringsarbejde eller for beslutningstagere.

Anvendelse af geostatistiske metoder, der laver en mere direkte og automatiseret numerisk modellering, gør det typisk nemmere at håndtere store datamængder, da modelleringsarbejdet bliver mindre "håndholdt". Ulempen er, at der kan ske et tab af ekspertviden, som bliver brugt i stor udstrækning un-



Figur 1. Skitse af geologiske elementer fra */3/*.

der manuel tolkning. Derudover findes der flere geostatistiske metoder på markedet, som ikke giver helt samme resultater, da forskellige beregningsmetoder anvendes – altså skal der træffes et metodevalg. Hvis en mindre egnet metode vælges, vil den estimerede usikkerhed ikke være troværdig. I tilfælde hvor usikkerheden er underestimeret, kan det sågar give en falsk tryghed for modellens rimelighed.

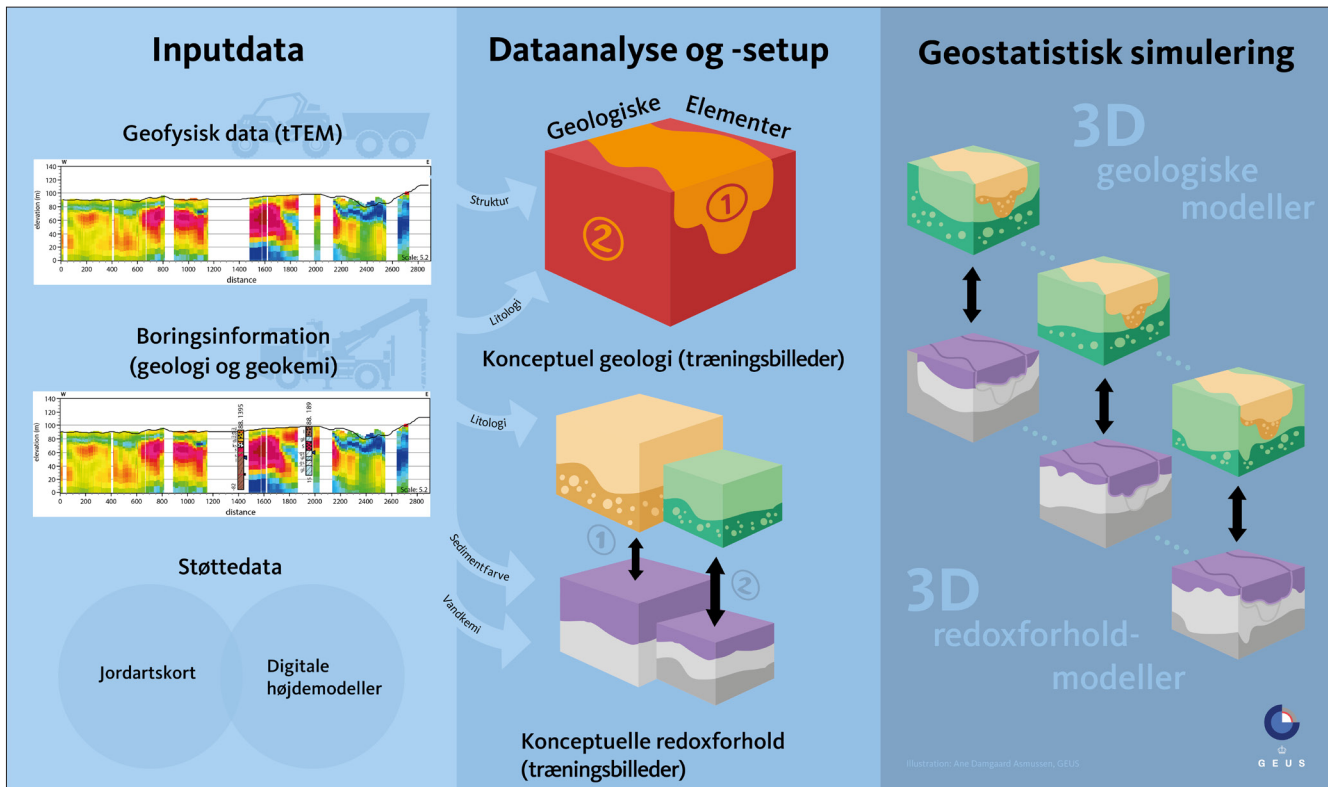
I det følgende præsenteres et bud på et modelleringskoncept, baseret på geostatistisk simulering, hvor det er muligt at integrere tilgængelig strukturel information om geologi og redoxforhold. Metoden er semi-automatisk således at selve kombinationen af data gøres numerisk, mens dataklargøring og tolkning foregår manuelt. Dette sikrer et nødvendigt kompromis mellem en tidsbesparende numerisk dataintegration og inddragelse af relevant

ekspertviden. Metoden giver desuden mulighed for at vurdere usikkerheden i modellen kvantitativt. I praksis er hvert punkt i modellen behæftet med en usikkerhed, der dels beror på dataenes usikkerhed og dels på usikkerheden af den geologiske og geokemiske viden. Simuleringsmetoden er tidligere publiceret i et internationalt tidsskrift */2/* og det overordnede modelleringskoncept er rapporteret */3/*. I denne artikel vil metoden blive kort beskrevet og generelle perspektiver blive præsenteret.

## Geostatistisk modellering med geologiske elementer

Det udviklede modelleringskoncept hviler på tre hjørner:

1. Modsat manuel tolkning, foretages dataintegrationen gennem geostatistisk simulering baseret på "Multiple-Point geoStatistics"



Figur 2. Overordnet workflow i modelleringskonceptet fra /2/ og /3/.

(MPS) /4/. Geologen og geokemikeren bidrager med den overordnede forståelse af området gennem såkaldte træningsbilleder. Træningsbilleder er eksempler på hvordan geologi og redoxforhold kan se ud, og som skal være konsistent med geologisk og geokemisk viden. Disse billeder rummer dermed de dele af den konceptuelle forståelsesmodel, der skal beskrives geostatistisk. Desuden bidrager eksperterne med justering af MPS-algoritmen og dataanalyse, før den endelige geostatistiske modellering påbegyndes og derefter med kvalitetskontrol af resultaterne.

2. Undergrunden i området inddeles i geologiske elementer (figur 1), der repræsenterer grupper af lag, der kan relateres til specifikke dele af den geologiske historie i området og betragtes som statistisk uafhængige /3/. På denne måde sikres, at lokal variation kan håndteres over hele modelområdet. Samtidigt mindsker det behovet for store træningsbilleder, fx. ét samlet træningsbillede for hele området. Da det er tidskrævende at danne statistik for store træningsbilleder, har opdelingen i de geologiske elementer derfor en markant positiv indvirkning på den tid, det tager at simulere. Det medfører også en væsentlig tidsbesparelse for geologen, da opgaven med 3D inddeling af området i overordnede geologiske elementer er nemmere end at konstruere en detaljeret manuel model.

3. Geologi og redoxforhold simuleres samtidigt så modellerne bliver koblet på tværs af de to domæner. Dette sikrer, at der er overensstemmelse mellem geologi og redoxforhold, når der senere skal opstilles grundvandsmodeller på de enkelte realisationer. Hvis geologien indikerer, at vandet løber en bestemt vej, skal redoxforholdene også passe til den geologi, der findes langs vandets løbebaner.

Figur 2 viser hvordan de indsamlede data dels kan bruges til at adskille området i geologiske elementer dels til at hjælpe med at konstruere en konceptuel forståelse af geologi og redox for hvert element. De sorte pile mellem træningsbilleder af geologi og redox henviser til billedernes koblede natur. Af den geostatistiske modellering kommer der flere mulige realisationer af undergrunden, der alle rummer variationen på inputdata og som alle er koblede ligesom træningsbillederne (igen indikeret med sorte pile). I det præsenterede modelleringskoncept består inputdata primært af data fra tTEM kortlægning og boringsinformation om litologi og sedimentfarver, samt grundvandskemiske analyser.

### Træningsbilleder af geologi og redoxforhold

Træningsbillederne af både geologi og redoxforhold spiller en central rolle i modelleringskonceptet. Et geologisk træningsbil-

lede konstrueres manuelt ved brug af den geofysiske model, boringsinformationer og karakteristika for den forventede geologi i området. Denne proces sikrer, at træningsbilledet indeholder den ekspertviden som geologen besidder, samtidig med at der sikres en sammenhørighed med de geofysiske data og boringsinformationer.

Geokemikeren konstruerer derefter manuelt et træningsbillede af redoxforholdene på baggrund af det geologiske træningsbillede og geokemiske data (sedimentfarver og grundvandskemi). Ved at konstruere træningsbillederne sekventielt, kan viden om den geologiske opbygning tages med i betragtning, når træningsbilledet af redoxforholdene konstrueres. Det er også i dette skridt, at den vigtige relation mellem de to domæner oprettes.

Når begge træningsbilleder er konstrueret, er det muligt at simulere realisationer kun baseret på information fra træningsbillederne. Disse realisationer kan inspiceres af eksperterne for at afgøre, om den valgte MPS-algoritme er i stand til at gengive strukturerne i træningsbillederne i tilfredsstillende grad. Hvis ikke dette er tilfældet kan simuleringsparametrene i den geostatistiske metode justeres og nye realisationer konstrueres og vurderes. Denne proces fortsættes indtil eksperterne er tilfredse med de simuleringer, der genereres. Disse accepterede realisationer repræsenterer den strukturelle viden om geologien og redoxforholdene i undergrunden.



Figur 3. Skitse af statistisk forhold mellem litologi og resistivitet.

### Udvælgelse af inputdata til modellerne

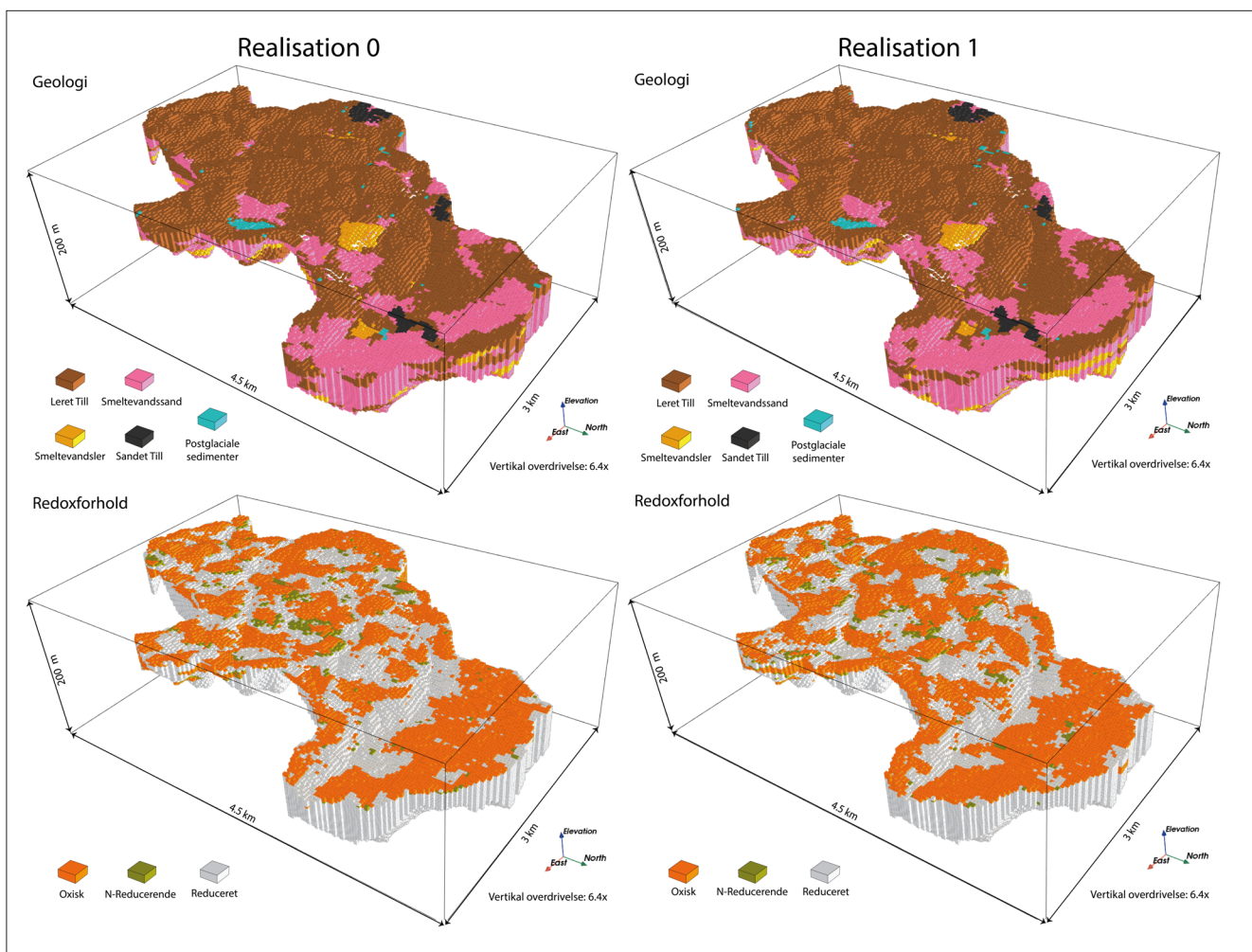
De koblede realisationer af geologi og redoxforhold bygger primært på boringsdata og de mere fladedækkende geofysiske data. Beskrivelse af litologi i borerer giver sammen med jordartskortet direkte information om geologien. Da boringsdata typisk er meget

sikre, kan denne information bruges som "hårde" data i modelleringen. Ved at placere denne information direkte i modellen vil realisationerne altid være i overensstemmelse med disse data. Derfor kaldes de "hårde" data. Farvebeskrivelser og grundvandskemiske analyser i borerer konverteres til et redoxforhold, hvor fx. en rød sedimentfarve indikerer

oxiske forhold og grå/blå sedimentfarver indikerer reducerede forhold. Disse boringsdata med kendte redoxforhold benyttes ligeledes som "hårde" data.

De geofysiske data giver indirekte information om geologien, da elektromagnetiske metoder måler resistiviteten, altså jordens modstand mod at lede elektricitet. Resistiviteten skal derfor konverteres til litologisk information. Der findes ikke en én til én korrelation mellem resistivitet og litologi /5/. For mange resistivitetsværdier vil flere mulige litologier kunne forklare den observerede resistivitetsværdi. Som vist i figur 3 vil der groft sagt ved meget lave elektriske modstande være overvejende sandsynlighed for ler og omvendt meget lave sandsynligheder for sand (medmindre det indeholder salt porevand). Ved højere elektriske modstande vil dette billede gradvist overgå til, at sand bliver mest sandsynligt. Der er således et spænd af resistivitetsværdier, hvor der er tvetydighed i hvilken litologi, der skal tilskrives.

I et givet undersøgelsesområde starter opgaven derfor med at beskrive forholdet mellem resistivitet og litologi statistisk. Det vil sige, at hver resistivitetsværdi skal kunne over-



To eksempler på koblede realisationer fra MPS-simulering af geologi og redoxforhold modificeret fra /1/.



sættes til en sandsynlighed for bestemte litologier frem for en direkte konvertering. I modeleringskonceptet etableres dette forhold ud fra træningsbilledet og de geofysiske data, der er til rådighed inden for træningsbilledets udbredelse. Dette bevirker, at forholdet bestemmes lokalt. Fordelen herved er, at der vil være overvejende overensstemmelse mellem de geofysiske data og træningsbillederne. Ved at konvertere alle geofysiske data til sandsynligheder for bestemte litologier kan tvetydigheden i de geofysiske data håndteres lokalt.

## Perspektiver

I sidste ende kan der med den valgte geostatistiske metode genereres realisationer, som er koblede mellem geologi og redoxforhold, og som bygger på boringsinformationer inkl. grundvandskemi og geofysiske data (figur 4). Med den numeriske dataintegration er det muligt at inkorporere meget forskellige informationer i de endelige modeller, også ud over de datakilder, der er brugt her. Disse informationskilder skal blot kunne konverteres til information om geologi eller redoxforhold, så den tilhørende usikkerhed kan beskrives.

Den semi-automatiserede modeleringsprocedure sikrer, at opgaven med at skabe træningsbilleder og inddeling i geologiske elementer er veldefineret af eksperter. Metoden åbner dermed op for at kunne håndtere usikkerheder, der er mere "lige til" at kvantificere for folk uden baggrund i statistisk. Ydermere giver denne tilgang mulighed for en mere intuitiv videregivelse af undergrundens beskaffenhed, herunder usikkerheder i modellen, til fx. grundvandsmodellører eller interessenter.

Overordnet har MPS-modelleringen af geologi og redoxforhold vist, at det er afgørende, at disse simuleres samtidigt og ikke separat, da dette sikrer, at modellerne ikke er i modstrid. Arbejdet har også vist vigtigheden i at

skabe modeller, der er konsistente med geologisk, geofysisk og geokemisk viden. Med andre ord er det vigtigt, at ekspertviden også medtages. Dette giver de mest robuste modeller i den sidste ende. Det svære består i at oversætte ekspertviden til en statistisk form og sikre, at hver ekspert ikke antager for meget om systemet. Ellers vil resultaterne have risiko for at blive "farvede" af en bestemt type data eller information fra én bestemt kilde.

Selvom det ikke er et problem, der knytter sig specifikt til MPS-modellering, er arbejdet med at skabe et robust forhold mellem resistivitet og litologi meget vigtigt for, hvordan de geofysiske data bliver integreret og væggtet i modellen. Herunder er det også vigtigt at vurdere, hvor lokalt dette forhold skal være, da der kan være stor forskel på, hvordan geologien relaterer sig til resistiviteten på landsplan /5/.

Da den udviklede metode er ny, er der heller ikke megen præcedens og eksempler på, hvordan træningsbilleder skal konstrueres. Denne mangel på praktisk erfaring gør sig især gældende for redoxforholdene /6/. En fordel ved brugen af geologiske elementer i denne forbindelse er, at der på længere sigt vil kunne opstilles et katalog af træningsbilleder for forskellige typer af geologiske elementer. Disse træningsbilleder kan genbruges enten i deres rene form eller justeres til at passe til det bestemte område, der arbejdes i. Dette vil medføre en markant tidsbesparelse for den enkelte geolog og geokemiker.

Der er dog ikke nogen tvivl om, at den geostatistiske tilgang til modellering af både geologi og redoxforhold i undergrunden vil være nyttig i fremtiden i takt med at datamængderne stiger i de detaljerede kortlægninger fx. i forbindelse med målrettet N-regulering eller ved lokale risikovurderinger af punktkildeforureninger.

## Referencer

- /1/ Auken, E., Foged, N., Larsen, J.J., Lassen, K.V.T., Maurya, P.K., Dath, S.M. og Eiskjær, T.T. 2019: tTEM - A towed transient electromagnetic system for detailed 3D imaging of the top 70 m of the subsurface. *Geophysics* 84, E13–E22. <https://doi.org/10.1190/geo2018-0355.1>
- /2/ Madsen, R.B., Kim, H., Kallesøe, A.J., Sandersen, P.B.E., Vilhelmsen, T.N., Hansen, T.M., Christiansen, A.V., Møller, I. og Hansen, B. 2021: 3D multiple-point geostatistical simulation of joint subsurface redox and geological architectures. *Hydrology and Earth System Sciences* 25, 2759–2787.
- /3/ Sandersen, P.B.E., Kallesøe, A.J., Madsen, R.B., Kim, H., Jakobsen, R. og Hansen, B. 2022: GEUS RAPPORT 2022/6. The Geological Elements approach of MapField: Detailed mapping and modelling of integrated geological and redox structures of the subsurface.
- /4/ Mariethoz, G. og Caers, J., 2015: Multiple-point geostatistics: Stochastic modeling with training images, 1. udgave. John Wiley & Sons.
- /5/ Barfod, A.S., Møller, I. og Christiansen, A.V. 2016: Compiling a national resistivity atlas of Denmark based on airborne and ground-based transient electromagnetic data. *Journal of Applied Geophysics* 134, 199–209.
- /6/ Kim, H., Jakobsen, R., Aamand, J., Claes, N., Erlandsen, M. og Hansen, B. 2021: Upscaling of Denitrification Rates from Point to Catchment Scales for Modeling of Nitrate Transport and Retention. *Environ. Sci. Technol.* 55, 15821–15830.

RASMUS BØDKER MADSEN (rbm@geus.dk) og HYOJIN KIM (hk@geus.dk) er forskere, PETER B.E. SANDERSEN (psa@geus.dk), INGELISE MØLLER (ilm@geus.dk) og BIRGITTE HANSEN (bgh@geus.dk) er seniorforskere. Alle ved GEUS, Universitetsbyen, Århus C.

THOMAS MEJER HANSEN (tmeha@geo.au.dk) er lektor og ANDERS VEST CHRISTIANSEN (anders.vest@geo.au.dk) er professor begge ved Institut for Geoscience, Aarhus Universitet

# Nitratudvaskning på markniveau

Udvaskning af nitrat fra rodzonen skal i MapField gives som input til en grundvands- og oplandsmodel. Denne model skal på forskellig skala beregne nitratreduktion under vand og nitrats transport fra marker til vandløbet i fire LOOP oplande. Til beregning af nitratudvaskning og usikkerhed anvendes NLES5 modellen for hver dyrket mark i perioden 1991-2016.

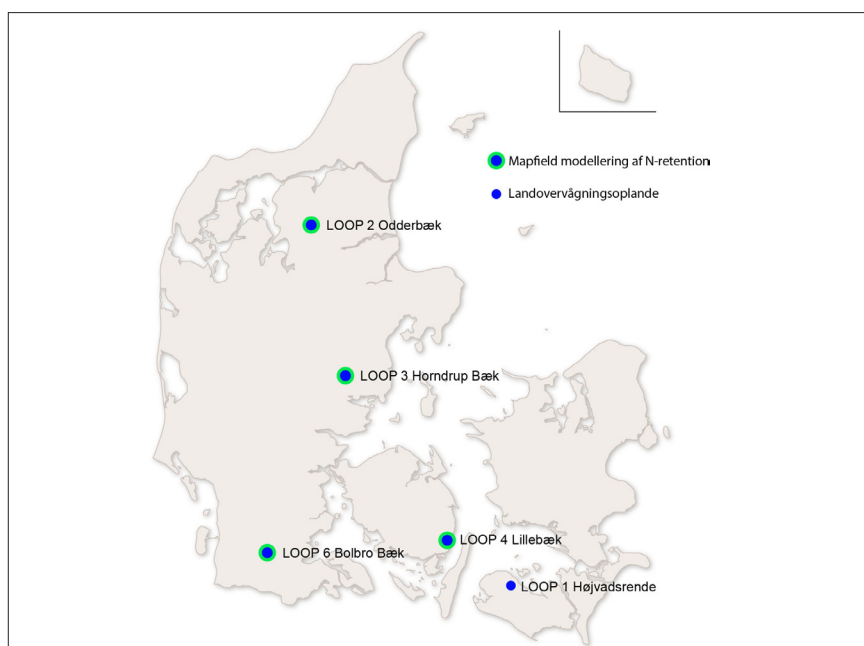
GITTE BLICHER-MATHIESEN, JIAN WIENKE, MIKKEL BOEL & RASMUS RUMPH FREDERIKSEN

Under vandets og nitrats strømningsvej gennem mættede grundvandsmagasiner sker der en nitratomsætning i iltfrie miljøer. For at kunne beregne nitratomsætning skal en grundvandsmodel have input for hvor meget nitrat der udvaskes fra hver enkelt mark, skov og andet natur. Til beregning af nitratudvaskning for hver mark i fire LOOP oplande, blev NLES5 modellen anvendt for det dyrkede areal. For skov, tør natur såsom heder og overdrev anvendtes middeltal for danske målinger af nitratudvaskning. For hver marker er der desuden gennemført en usikkerhedsberegning af nitratudvaskningen med 1.000 realisationer, der kombinerer usikkerheder på input parametrene for gødning, afgrøder, perkolation og jordparameter samt parameterestimaterne der indgår i NLES5 modellen.

## LOOP overvågning

Landovervågningen er en del af det nationale NOVANA overvågningsprogram, som startede i 1990 /1/. Heri gennemføres intensive målinger af nitratkoncentrationer i jordvand, drænvand, grundvand og vandløb i fem små landbrugsdominerede oplandet fordelt i landet. Desuden indhentes detaljerede dyrkningsdata for tilførsel af gødning og afgrødedække for hver enkelt mark i hvert opland.

De indsamlede dyrkningsdata gør det muligt at modelberegne den årlige nitratudvaskningen for hver mark i oplandene for perioden 1991-2016. I MapField modelberegnes nitratreduktion i grundvand i fire af de fem LOOP oplande (figur 1) /2/. Den årlige nitratudvaskning beregnes med NLES5 modellen,



Figur 1. Placering af fem LOOP oplande.

som er en empirisk funderet model se boks 1.

Den gennemsnitlige NLES5 beregnede nitratudvaskning for perioden 1991-2014 er sammenholdt med tilsvarende gennemsnit for målte udvaskning i de fem LOOP oplande. Både gennemsnitlig NLES5 og målt nitratudvaskning og afstrømningsvægtet nitratkoncentration er højest for de to sandjordsoplande i Himmerland, LOOP 2 og Sønderjylland, LOOP 6 og mindre for de lerjordsdominerede oplande i Østjylland, LOOP 3 og Sydfyn, LOOP 4 lavest for Højvads Rende, LOOP 1 (figur 2). NLES5 modellen rammer rimelig godt den gennemsnitlige målte nitratudvaskning og de målte afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer for årene 1991-2014 i hver af de fem landovervågningsoplande med en  $R^2$  på henholdsvis 0,98 og på 0,78 (figur 2). Af figuren ses at afvigelsen mellem NLES5 og den målte udvaskning og koncentration er lille for

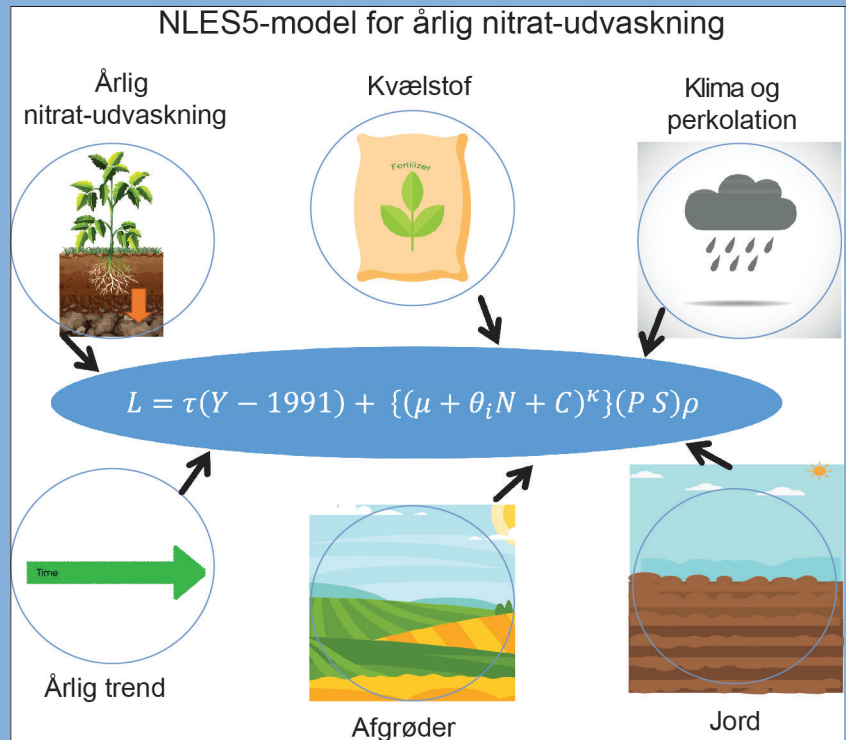
LOOP 2, 3 og 4 og lidt højere for LOOP 1 og 6. Generelt synes NLES5 modellen nogenlunde at kunne prædikere regionale forskelle i nitratudvaskning og afstrømningsvægtede nitratkoncentrationer, når disse som her evalueres over en periode på 23 år. De her viste måledata indgår som en del af kalibreringsdatasættet for NLES5 modellen og er derfor ikke en uafhængig validering af modellen. Validering af NLES5 modellen på uafhængige data er omtalt i boks 1.

## Nitratudvaskning for hver mark

NLES5 modelleret nitratudvaskning og CV% er vist for de fire LOOP oplande med modellering af nitratreduktion i Mapfield for 1991 og 2016 i Figur 3. Af figuren ses at nitratudvaskningen er størst for de to sandjordsdominerede oplande i Himmerland, LOOP 2 og Sønderjylland, LOOP 6 og gradvis mindre for

**Boks 1: NLES5 modellen**

NLES5 modellen er en empirisk funderet model, der beregner den årlige nitratudvaskning. Modellen har en række parametre for tilført kvælstofgødning opdelt på uorganisk og organisk gødning samt afsat gødning under afgræsning, N-fiksering. Desuden er udvaskningen afhængig af en række af afgrødekombinationer, af vandafstrømning ud af rodzonen benævnt perkolation og jordens indhold af total N og humus /3/. NLES5 modellen er kalibreret på 2.053 observationer, hvor udvaskning er opgjort ud fra målte nitratkoncentrationer i jordvand og en modelberegnet perkolation. Af disse observationer indgår 629 observationer fra LOOP oplandene, hvor dyrkningspraksis er fra landmænd og de resterende observationer er fra forskningsforsøg. Modellen rammer den gennemsnitlige målte nitratudvaskning på 47 kg N/ha med en Root Mean Square Error (RMSE) på 30 kg N/ha og dækker variationen i kalibreringsdataene med en  $R^2$  på 0,53. Modellens parameterestimater er krydsvalideret og selve modellen er valideret på 856 uafhængige data med en lidt lavere  $R^2$  på 0,40 og en RMSE på 31 kg N/ha.



de lerjordsdominerede oplande i Østjylland, LOOP 3 og Sydfyn, LOOP 4. Desuden er de viste koncentrationer som forventet størst i 1991 og lavest i 2016. Den lavere nitratudvaskning er sket som følge af implementeret virkemidler som bedre opbevaringskapacitet af gødning, bedre udnyttelse af kvælstof i husdyrgødningen og flere efterafgrøder mv.

Usikkerhed opgjort som CV i % varierer fra 8-120 for marker med høj CV% ses for brak og afgrøder efterfulgt af ompløjet græs. For tør natur og skov udgjorde de CV% henholdsvis 70 og 202.

**Trend i nitratkoncentration**

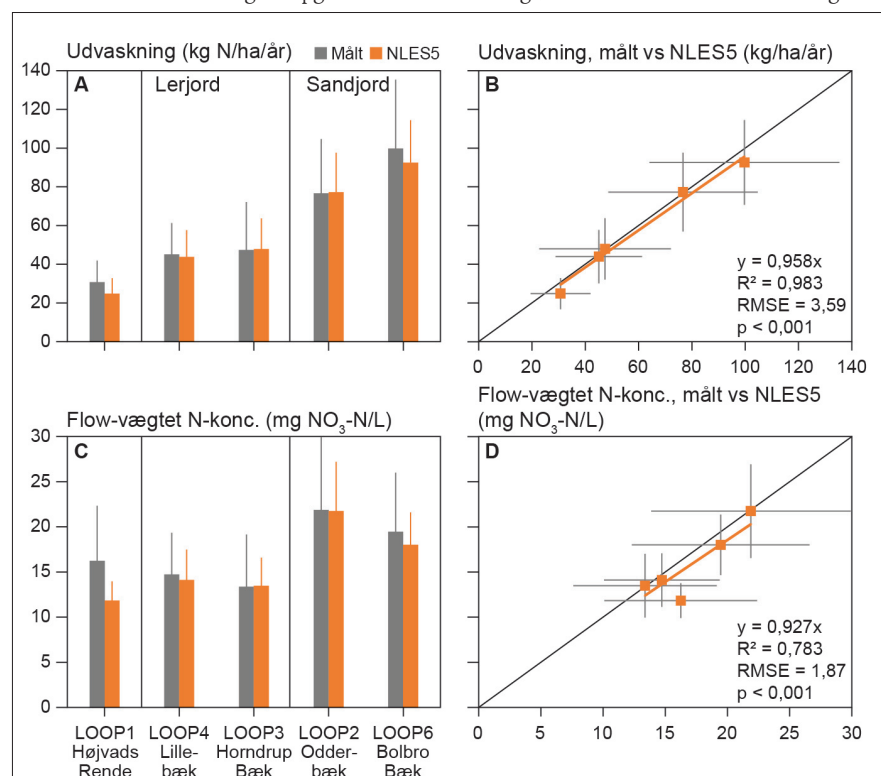
Årsmiddel og stdv. for NLES5 afstrømningsvægtet nitratkoncentration i rodzone og middel for målt afstrømningsvægtet total N i vandløb er vist i Figur 4. Årsmiddel er opgjort for agrohydrologiske år 1. april-31. marts for perioden 1991/92-2016/17 for hver af de fire LOOP oplande, der indgår i MapField. Stor forskel i årsmiddel nitratkoncentration for rodzone og total N i vandløb ses i de to sandjordsoplande og relativ mindre forskel i de to lerjordsoplande. Dette indikerer en større nitratomsætning i de to sandjordsoplande end i de to lerjordsoplande.

**Konklusion**

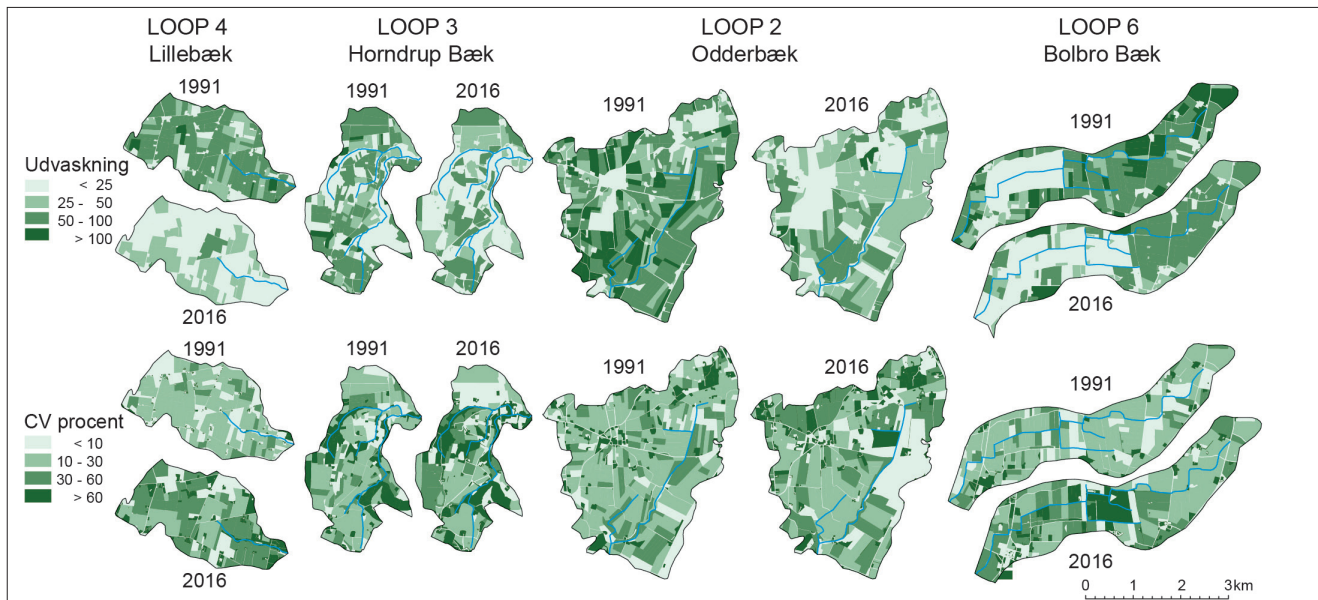
De modelberegne udvaskningsdata for hver enkelt mark i LOOP oplandene gør det muligt

at gennemføre en detaljeret beregning af vand og nitratens strømningsveje og omsætning fra mark til vandløb. Tilsvarende data findes ikke i de landsdækkende landbrugsdatasæt. Med markdata er det muligt at opgøre

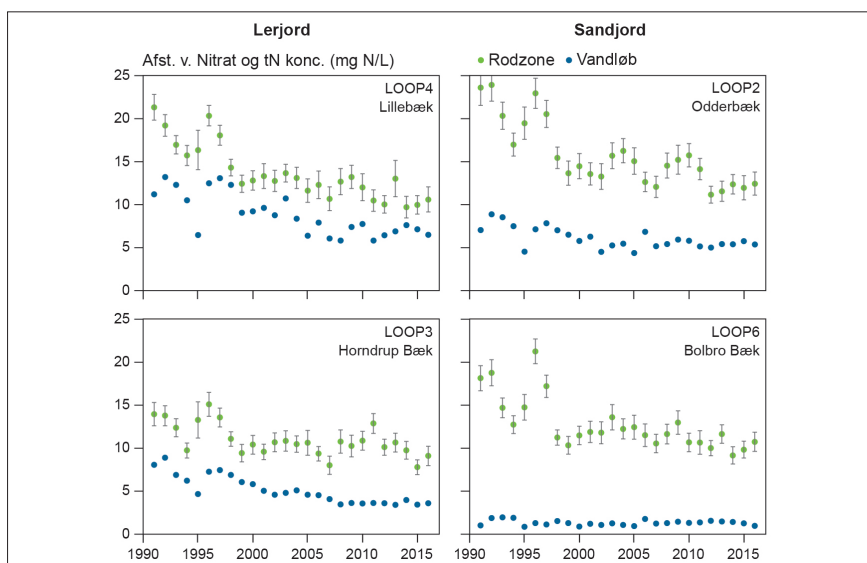
nitratudvaskningen med god præcision på markskala og herved styrke grundlaget for N-retentions beregninger på fin skala. Ved placering af mark N virkemidler som f.eks. efterafgrøder er lokale N retentions beregnin-



Figur 2. Middel og stdv. for målt og NLES5 beregnet nitratudvaskning opgjort for fem LOOP oplande (A) og relation imellem disse (B). Afstrømningsvægtet nitratkoncentration (C) og relation mellem disse (D). Data er for perioden 1991-2014.



Figur 3. Markspecifik NLES5 modelleret nitratudvaskning (kg N/ha) og CV% for fire LOOP oplande i de to år 1991 og 2016.



Figur 4. Årsmiddel og stdv. For NLES5 afstrømningsvægtet nitratkoncentration i rodzone og middel for målt afstrømningsvægtet total N i vandløb opgjort for agrohydrologiske år 1991/92-2016/17 for fire LOOP oplande.

### Boks 2: Usikkerhed på NLES5 estimeret udvaskning

Markov Chain Monte Carlo blev anvendt til at beregne usikkerhed på NLES5 beregnet nitratudvaskning. Hertil anvendes standardafvigelse, samt en kovariansmatrice for NLES5-modellens modelparameter, som blev estimeret ved kalibrering af modellen. Herudover er der tilføjet variation på selve NLES5modellens inputparametre. Variation på gødningsinput, jordens total N indhold i pløjelaget samt perkolations parametrene indgik med en variationskoefficient (CV) på 10%, som blev omregnet til standardafvigelse. N-fiksering og jordens lerindhold indgik med en CV% på henholdsvis 30 og 45. Kovariansmatricen og den optimerede parameter værdi blev brugt til tilfældigt at generere 1.000 parametersæt og udregne 1.000 NLES5 estimater for nitratudvaskning for hver enkelt mark. Parametersættene blev samlet fra en trunkeket multivariat-normalfordeling, med det nedre og øvre trunkeeringspunkt sat til 3 gange standardafvigelsen fra den estimerede parameter værdi. Dette giver en fordeling for nitratudvaskning, der tilnærmelsesvis følger en normalfordeling og dækker hele parameter rummet, mens korrelationen mellem parametrene opretholdes. Standard afvigelsen af de 1.000 estimater, er brugt som et mål for usikkerheden for den estimerede nitratudvaskning. Analyserne blev udført i Python 3.8.10 med link til R-softwaren v.4.2.1 (R Development Core Team, R Foundation for Statistical Computing 2018), ved hjælp af tmvtnorm-pakken /4/. Den anvendte CV for perkolations på 10% svarer til CV% for perkolations beregnet for forskellige typejord for hver LOOP opland.

ger med tilhørende usikkerheds beregninger en af flere faktorer til en optimering af virkemidlets effekt på tabet til vandmiljøet. Hvis efterafgrøder etableres på marker med lav frem for høj N-retention vil der være større reduktion af nitrattransporten frem til vandløbet.

### Referencer

- /1/ Blicher-Mathiesen, G., Holm, H., Houlborg, T., Rolighed, J., Carstensen, M.V., Jensen, P. G., Wienke, J., Hansen, B., og Thorling, L., 2019: Landovervågningsoplande 2017. NOVANA.
- /2/ Frederiksen, R.R., Christiansen, A.V., Blicher-Mathiesen, G., og Hansen, G. 2022. Et grundvandsretentionskort på lokal skala. Vand & Jord, nr 4, s. 156-159
- /3/ Børgesen C.D., Pullens J. W, Zhao, J., Sørensen P., Blicher-Mathiesen G. og Olesen J.E. 2022: NLES5 - An empirical model for estimating nitrate leaching from the root zone of agricultural land. European Journal of Agronomy 134, 126465.
- /4/ Wilhelm, S., Manjunath, B.G. 2015. tmvtnorm: Truncated Multivariate Normal and Student t Distribution. R package version 1.4-10.

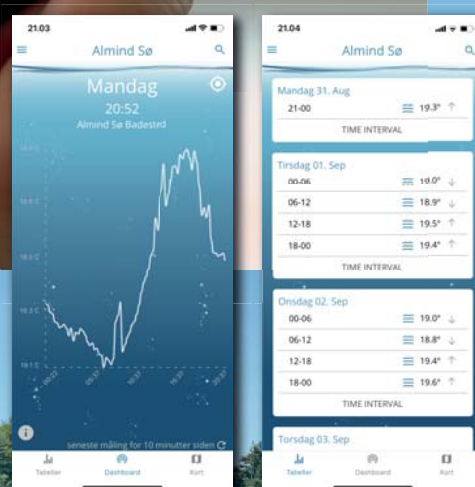
GITTE BLICHER-MATHIESEN (Gbm@ecos.au.dk) er seniorrådgiver, JIANLIAN WIENKE (Jw@ecos.au.dk) ingeniør, MIKKEL BOELS (Mibo@ecos.au.dk) biolog og RASMUS RUMPH FREDERIKSEN (Rumph@ecos.au.dk) geolog. Alle ved Aarhus Universitet, Institut for EcoScience

# DCE giver indblik i naturen

Almind Sø er en velbesøgt badesø ved Silkeborg. Her blev der i juni 2020 udlagt en bøje med sensorer, som gør det muligt at få livemålinger af bl.a. vandtemperatur.

Derudover indsamles data, der anvendes til modellering af søens vandkvalitet, og som gør det muligt at lave prognoser. Projektet er blandt de første til at udnytte kombinationen af en fastinstalleret bøje og modelprognoser med fokus på badevandsøer.

Borgere og besøgende kan følge de aktuelle data fra søen og badevandsudsigten via WaterWebTools.com - en spinoutvirksomhed, som er undervejs fra Aarhus Universitet i regi af InnoExplorer. Den digitale badevandsudsigt kan bruges til at planlægge den næste svømmetur eller holde øje med vandtemperaturen time for time



AARHUS  
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi ved Aarhus Universitet yder forskningsbaseret rådgivning af myndigheder, virksomheder og organisationer og er desuden ansvarlig for Danmarks rapporter til EU og FN på natur- og klimaområdet.

# Et grundvandsretentionskort på lokal skala

En del af den nitrat, der strømmer med vandet ud af rodzonen på dyrkede marker og naturarealer bliver omsat og fjernet i grundvands reducerende zoner, inden grundvandet når frem til vandløbskanten. Forskningsprojektet MapField har udviklet og afprøvet et koncept til at estimere størrelsen af nitratreduktionen i grundvandet og der er etableret kort over den lokale kvælstofretention i grundvandet (grundvandsretention) i seks små oplande.

RASMUS R. FREDERIKSEN, ANDERS V. CHRISTIANSEN, GITTE BLICHER-MATHIESEN & BIRGITTE HANSEN

## Baggrund

Kvælstofretention (N-retention) er omsætningen og fjernelsen af det udvaskede nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) fra rodzonen på dyrkede marker og naturarealer, som sker under transporten via grundvand og overfladevandssystem (dvs. vandløb, søer og vådområder) til de åbne kyster og fjorde. Den nuværende skala for N-retention er ID15-skala (ca. 1500 ha) beregnet med den nationale kvælstofmodel (1/). Det er dog nødvendigt med en mere detaljeret beregning af N-retention, hvis målrettet regulering skal give en større kvælstofreduktion. Forskningsprojektet MapField beskæftiger sig med den omsætning og fjernelse af nitrat,

som sker under transport i grundvandet, på lokal skala.

## Nitratreduktion og N-retention i grundvandet

Nitrat transporteres med det strømmende grundvand gennem reduktionszoner med forskellige omsætningsrater. Hvor og hvor meget nitrat, der reduceres i grundvandet, afhænger af den fysiske placering af reduktionszonerne, hastigheden hvormed nitraten reduceres i zonerne (omsætningsraten) og hvor længe den udvaskede nitrat opholder sig i zonerne.

Størrelsen af den samlede reduktion af det udvaskede nitrat gennem de mættede sedimentter (reduktionspotentialet) angives i mg/L N. Reduktionspotentialet fremkommer ved at multiplicere den beregnede opholdstid i reduktionszonen med den tilhørende omsætningsrate for nitrat (figur 1).

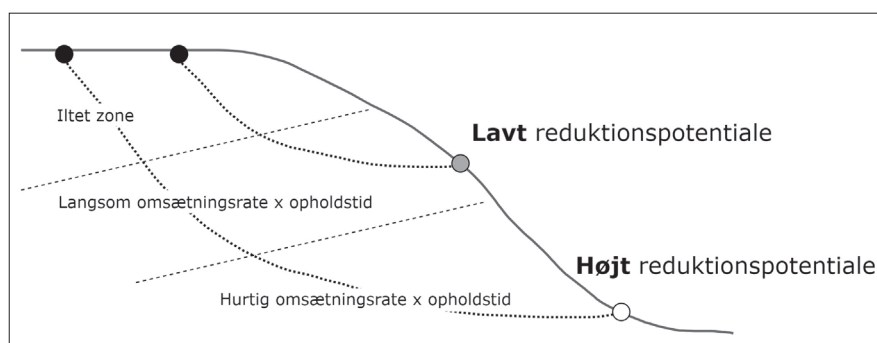
Reduktionspotentialet i grundvandet er ikke det samme som N-retention i grundvan-

det (grundvandsretention). Grundvandsretentionen fremkommer ved at dividere reduktionspotentialet i grundvandet med nitratkoncentrationen angivet i mg/L N, der strømmer med vand ud af rodzonen på dyrkede marker og naturarealer. Grundvandsretentionen angives i %.

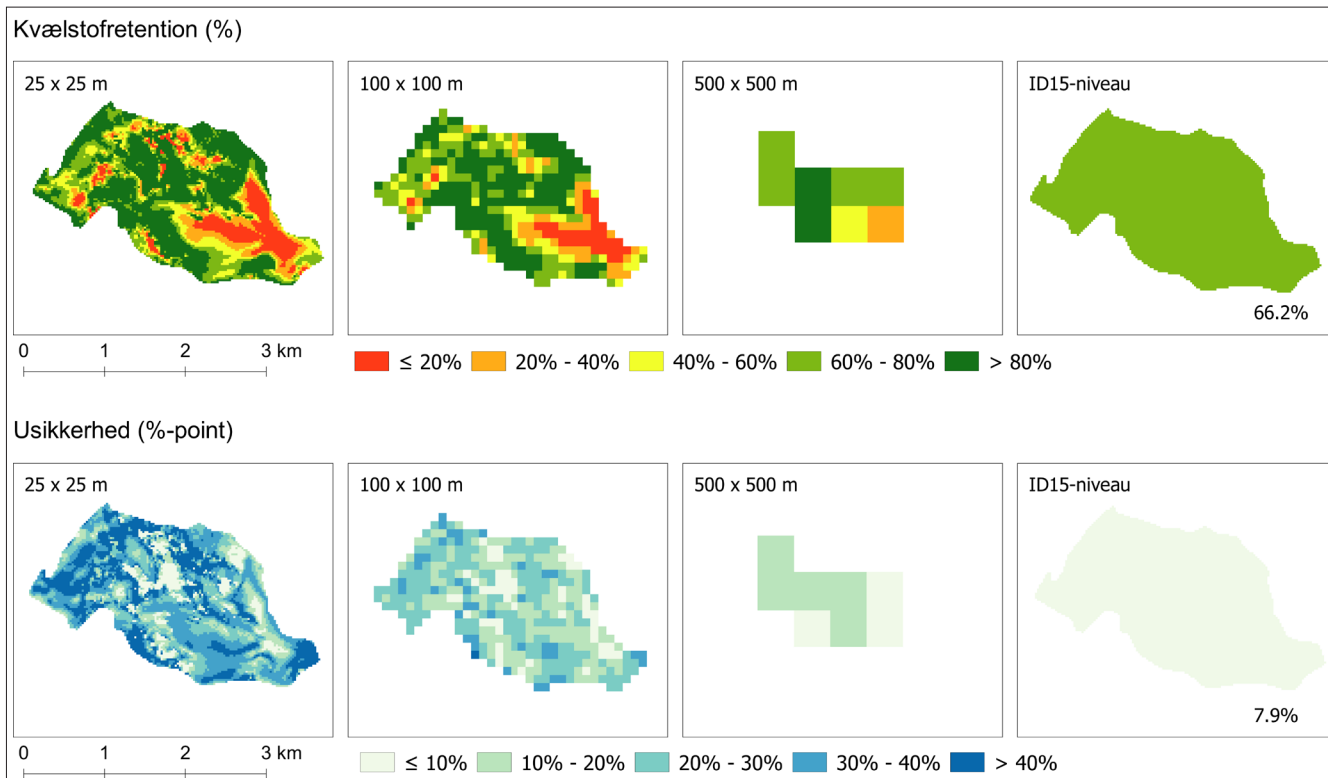
## Kortlægning og modellering i MapField

I MapField projektet er omsætningsraten for nitrat i grundvandet blevet målt med acetylenblok-metoden på forskellige sedimenttyper fra centrale borer i hvert af de seks undersøgelsesområder som beskrevet i 2/. Og ved hjælp af geostatistisk modellering er der blevet bygget en tredimensionel model inddelt i zoner med forskellige omsætningsrater for nitrat i grundvandet, og som dækker hele undersøgelsesområdet som beskrevet i 3/.

Opholdstiderne for den udvaskede nitrat i reduktionszonerne i grundvandet er modsat omsætningsraterne ikke blevet målt direkte. Opholdstiden i reduktionszonerne afhænger af vandvolumens strømningsbane og hastighed. Disse er styret af henholdsvis fordelingen af ler, silt og sand i undergrunden og hvor godt eller dårligt et vandvolumen kan strømme i disse aflejringer. Undergrundens opbygning er blevet kortlagt med TEM-målinger som beskrevet i 4/ og ved hjælp af geostatistisk modellering er der blevet bygget en tredimensionel model inddelt i zoner med forskellige hydrauliske ledningsevner som beskrevet i 5/.



Figur 1. Skitse af reduktionspotentiale i grundvandet.



Figur 2. Eksempel på grundvandsretentionskort fra Lillebæk oplandet på Fyn, som viser at usikkerheden stiger (præcisionen falder) ved større detaljeringsgrad. Usikkerheden af perkolation og nitratudvaskning indgår ikke i modelberegningen af præcisionen.

I hvert af de seks oplande, som er undersøgt i MapField, er der foretaget en MapField kortlægning og modellering som beskrevet i /6/. I denne artikel viser vi resultater fra Lillebæk oplandet på Fyn.

### Beregning af opholdstider i det reducerede grundvand

Det er muligt at estimere vandets – og dermed nitratens – opholdstid i grundvandsmættede sedimenters reduktionszoner ved hjælp af en hydrologisk model for vandstrømningen i grundvandsmagasinet. Dette gøres ved at foretage såkaldte partikelbanesimuleringer. I en sådan model indgår fordelingen af ler, silt og sand i undergrunden og hvor godt eller dårligt vandvolumen strømmer i disse aflejringer. I modellen indgår også informationer om dannelse og fjernelse af grundvand. Med disse data kan modellen simulere henholdsvis de baner grundvandet følger i undergrunden fra et givent sted under terrænet frem til vandløbskanten og hvor lang tid rejsen langs hver af disse baner tager. Flere detaljer om den numeriske strømningsmodel er givet i boks 1.

### Beregning af reduktionspotentiale i grundvandet

Reduktionspotentialet i grundvandet er angivet som mg/L N og fremkommet ved at multiplicere den beregnede opholdstid i reduktionszoner i grundvandet med den tilhørende omsætningshastighed for nitrat

(figur 1). I Lillebæk oplandet er der blevet målt og modelleret tre typer af reduktionszoner i grundvandet. Den første reduktionszone indeholder iltet grundvand hvor omsætningsraten er 0. Den anden reduktionszone har en langsom omsætningsrate for nitrat mens den tredje reduktionszone har en hurtig omsætningsrate for nitrat. Dette tages der højde for i beregningen af det samlede reduktionspotentiale i grundvandet langs en partikelbane ved at summere reduktionspo-

tentialet for hver zone som vandvolumenet gennemstrømmer.

### Beregning af nitratudvaskning fra dyrkede marker og andre arealer

Til beregning af nitratudvaskningen fra rodzonen i oplandet er NLES5 modellen blevet anvendt for dyrkede arealer /8/ og for andre arealer er der blevet anvendt et middeltal for målt nitratudvaskning fra skov, tør natur som heder og overdrev. For hver mark er der desu-

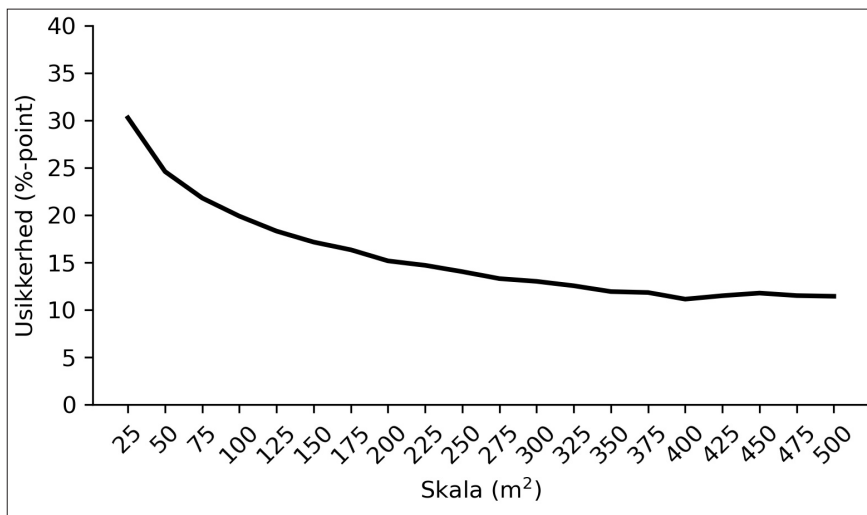
#### Boks 1. Numerisk strømningsmodel

Den hydrologiske model for vandstrømning i grundvandsmagasinet er bygget med MODFLOW6 (7/). Strømningsmodellen er stationær for perioden 1990/91-2009/10. Den horisontale opløsning er 25 x 25 m og den vertikale opløsning er 2 m for modellag 1-5 og 10 m for modellag 6-10. Den hydrogeologiske model er baseret på tTEM data og borerer som beskrevet i /5/.

Strømningsmodellen håndterer udelukkende strømning i grundvandssystemet og har en række randbetingelser. Vand kommer ind i modellen som grundvandsdannelse og er beregnet uafhængigt af strømningsmodellen som netto-nedbør med Daisy-modellen. Vand forlader strømningsmodellen som afstrømning via dræn- og vandløbsceller. Begge celletyper er såkaldte "head-dependent flux" randbetingelser, og de bliver modelleret som et lineært reservoir, som er aktivt, hvis grundvandet står over henholdsvis drænybde eller vandløbsbund. Der er et lineært reservoir i alle modelceller i modellag 1. Vand kan ikke strømme på tværs af det topografiske opland, da det er en "no-flow" randbetingelse.

Det sikres, at strømningsmodellen kan simulere værdier for trykniveau i grundvandet og vandløbsafstrømning, som er magen til de tilsvarende målte værdier.

I partikelbanesimuleringen frigives vandpartiklerne i modellag 2 (dvs. under eventuelle markdræn) og følges frem til det sted hvor de forlader grundvandssystemet og udstrømmer til vandløb eller markdræn.



Figur 3. Usikkerheden udtrykt som præcision på grundvandsretentionen i Lillebæk oplandet på Fyn som funktion af aggregeringsniveau med MapField-konceptet. Det skal bemærkes, at usikkerheden på nitratudvaskningen fra rodzonen på dyrkede marker og øvrige naturarealer endnu ikke indgår i beregningen af den samlede usikkerhed.

den gennemført en usikkerhedsberegning af nitratudvaskningen med 1.000 realisationer, der kombinerer usikkerheder på inputparametrene for gødning, afgrøder, perkolation og jordparameter samt for modelparametrene i NLES5 modellen. Flere detaljer om beregning af nitratudvaskning er beskrevet i /9/.

### Usikkerhed på grundvandsretention

En række processer har betydning for den beregnede grundvandsretention hvoraf de væsentligste indgår i modelleringen som variable med tilknyttede usikkerheder. Følgende modelvariable indgår:

- Nettonedbør
- Strukturvariable såsom hydrogeologi og reduktionszoner
- Hydrogeologiske parametervariable såsom hydraulisk ledningsevne og porøsitet
- Hydrogeokemiske parametervariable såsom omsætningsrater for nitrat

Der er foretaget 500 simuleringer af grundvandsretention i en Monte-Carlo analyse for hver modelcelle i det horisontale grid som hver har en størrelse på 25 x 25 m. Det valgte antal af simuleringer (500) har vist sig at være tilstrækkeligt for at kunne beskrive usikkerheden på modelvariablene, holde beregningstiden nede, og samtidig udføre en følsomhedsanalyse.

Grundvandsretentionen beregnes på 25 x 25 m niveau, som er cellerne i grundvandsmodellen. Da variationen i modelvariablene forplanter sig til variationer i grundvandsretentionen, er resultatet en fordeling af mulige modelforudsigelser og kort over grundvandsretentionen. Ud fra denne fordeling kan præcisionen (usikkerheden) for grundvandsreten-

tionskortene beregnes på det ønskede niveau fra 25 x 25 m og ethvert større areal som er et mangefold af 25 x 25 m. Gennemsnitsværdien af de 500 simuleringer er anvendt som udtryk for "middelværdien" og standardafvigelsen for de 500 simuleringer er anvendt som udtryk for den tilknyttede "usikkerhed".

I figur 2 ses et eksempel på grundvandsretentionskort fra Lillebæk oplandet i den oprindelige opløsning på 25 x 25 m og aggregeret til 100 x 100 m (1 ha) og 500 x 500 m (25 ha) samt til hele oplandet (ca. 400 ha i dette tilfælde). Både middelværdier og usikkerhedsværdier er vist for de fire forskellige niveauer.

Den rumlige variation i grundvandsretention, som ses på kortet med den oprindelige opløsning på 25 x 25 m, er bevaret på 1 ha niveau, næsten forsvundet på 25 ha niveau og fuldstændig væk på ID15-oplandsniveau. En detaljeringsgrad på 25 x 25 m giver en gennemsnitlig usikkerhed på 30 %-point, mens præcisionen falder til 20, 11 og 8 %-point ved en detaljeringsgrad på henholdsvis 1 ha, 25 ha og ID15-oplandsniveau. Med andre ord giver en større skala en større modelpræcisionen på den ene side men på den anden side en mindre rumlig variation i grundvandsretentionen. En mindre rumlig variation giver en dårligere mulighed for at placere virkemidler mere optimalt i oplandet i en målrettet N-regulering. Usikkerhed som funktion af skala i Lillebæk oplandet er vist i figur 3.

Nogle processer og modelvariable indgår ikke i beregningen af nitratretention i grundvandet og den tilhørende usikkerhed for de viste kort i figur 2. De viste usikkerheder er derfor sandsynligvis underestimerede. For eksempel arbejdes der på at få indbygget usikkerhed på nitratudvaskning fra dyrkede mar-

ker og andre arealer (/9/) i konceptet.

Det er afgørende, at grundvandsmodelleringen kan forudsige målte værdier såsom trykniveau i grundvandet og vandløbsafstrømning, og der er her fokus på nøjagtighed. Hvis modellen ikke kan forudsige målingerne med en vis sandsynlighed, bliver modellen falsificeret. Hvis modellen falsificeres, ændres modelvariabelværdierne og/eller øges modelkompleksiteten ved at øge antallet af modelvariable. Dette gentages indtil modellen ikke længere kan falsificeres.

### Konklusion

Dataindsamling og modellering med MapField-konceptet giver mulighed for at udarbejde et detaljeret grundvandsretentionskort. Grundvandsretentionskortet giver mulighed for at placere virkemidler som for eksempel efterafgrøder mere optimalt i lokale områder med lav grundvandsretention. Dette kræver vel at mærke, at alle indgående data kan indhentes og at opholdstiderne kan beregnes med en rimelig sikkerhed.

Monte-Carlo simulering blev brugt til at estimere præcisionen for grundvandsretentionskortet angivet som standardafvigelsen for 500 simuleringer. Vi fandt, at jo højere opløsning af grundvandsretentionskortet, des bedre opløsning af den rumlige variation men des dårligere modelpræcision. Netop den rumlige variation i N-retentionen i et opland er en forudsætning for at målrettet N-regulering i landbruget kan tages i anvendelse for at reducere N-tab til vandløb og fjorde. De angivne retentioner er ikke evalueret på faktiske N-målinger i vandløbet, da overfladevandsretentionen ikke indgår. Fremtidigt arbejde bør styrke denne del, så N-retentionen kan evalueres direkte.

Resultaterne fra MapField viser, at der kan være meget store variationer i N-retentionen i grundvandet inden for et opland. De store forskelle i grundvandsretentionen betyder, at der er stor forskel på effekten af virkemidler til at reducere nitratudvaskningen på dyrkningsfladen mellem de enkelte deloplande og bedrifter. Dermed vil dataindsamlingen og modelleringen foretaget i MapField kunne understøtte en mere differentieret N-retentionsberegning, og implementeringen af virkemidler som for eksempel efterafgrøder og minivådområder kan ske hvor effekten er størst.

### Referencer

- /1/ Højberg, A.L., Thodsen, H., Børgesen, C.D., Tornbjerg, H., Nordstrøm, B.O., Troldborg, L., Hoffmann, C.C., Kjeldgaard, A., Holm, H., Audet, J., Ellermann, T., Christensen, J.H., Bach, E.O. & Pedersen, B.F. 2021.



- National kvælstofmodel – version 2020, Metode rapport. De Nationale Geologiske Undersøgelser for Danmark og Grønland. GEUS Specialrapport.
- /2/ Kim, H., Jakobsen, R., Aamand, J. & Hansen, B. 2022: Ny viden om nitratreduktion i undergrunden. Vand & Jord, nr. 4, s. 137-140
- /3/ Madsen, R.B., Sandersen, P.B.E., Møller, I., Hansen, T.M., Hansen, B., Christiansen, A.V. & Kim, H. 2022: Geostatisk model af geologi og redox. Vand & Jord, nr. 4, s. 148-151
- /4/ Pedersen, J.B., Christiansen, A.V., Auken, E. & Sandersen, P. 2022: Geoscaner til overfladenær kortlægning. Vand & Jord, nr. 4, s. 142-144
- /5/ Christiansen, A.V. & Foged, N. 2022: Fra geofysik til 3D-modeller. Vand & Jord, nr.4, s. 145-147
- /6/ Hansen, B. & Christiansen, A.V. 2022: MapField projektet. Vand & Jord, nr. 4, s. 132-136
- /7/ Langevin, C. D., Hughes, J. D., Banta, E. R., Niswonger, R. G., Panday, S., & Provost, A. M. (2017). Documentation for the MODFLOW 6 groundwater flow model (No. 6-A55). US Geological Survey.
- /8/ Borgesen, C.D. et al., 2022: NLES5 - An empirical model for estimating nitrate leaching from the root zone of agricultural land. European Journal of Agronomy 134, 126465
- /9/ Blicher-Mathiesen, G., Wienke, J., Boel, M. & Frederiksen, R.R. 2022: Nitratudvaskning på markniveau. Vand & Jord, nr. 4, s. 152-154
- RASMUS RUMPH FREDERIKSEN (rasmus.rumph@ecos.au.dk) er akademisk medarbejder ved Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet.
- ANDERS VEST CHRISTIANSEN (anders.vest@geo.au.dk) er professor ved Institut for Geoscience, Aarhus Universitet.
- GITTE BUCHER-MATHIESEN (gbm@ecos.au.dk) er senierrådgiver ved Institut for Ecoscience, Aarhus Universitet.
- BIRGITTE HANSEN (bgh@geus.dk) er seniorforsker ved De Nationale Undersøgelser for Danmark og Grønland (GEUS).



## 17th Annual DWF Water Research Conference, 8 February 2023

### Second Announcement:

17th Annual Water Research Meeting at Grundfos Academy, 8. February 2023  
Venue: Poul Due Jensen Academy, Grundfos, Poul Due Jensens Vej 21, 8850 Bjerringbro

You are invited to join the water day, where the latest results and achievements from the Danish water sector is presented.

**Abstract guideline:** [HERE](#) **Deadline for Abstracts 01. December 2022.** Send abstract to [dwf@danishwaterforum.dk](mailto:dwf@danishwaterforum.dk) with a copy to [jda@dhigroup.com](mailto:jda@dhigroup.com). Subject Title: **ABSTRACT**

#### **KEY NOTE: Coping with water shortage across Europe**

The extreme water shortage in both North and South Europe during the spring and summer 2022 has shown the vulnerability of water supply for citizens and agriculture and certainly also for the electricity production from hydropower.

The key-note will dive into the challenges and will also look into the future to search for potential solutions such as pump-storage, groundwater recharge and other solutions

**Pre-registered Sessions:**  
To be announced



Two awards of 10.000 DKK, sponsored by NIRAS and Grundfos, will be given to two young scientists, who present new innovative solutions in the water sector.

**Members of the Scientific Committee are:** Peter Englund Holm, PLEN, University of Copenhagen, Bjørn K. Jensen, GEUS; Hans Jørgen Albrechtsen, DTU Environment; Peter Henriksen, WATEC, Aarhus University; Jesper Goodley Dannisøe, DHI; Torben Lund Skovhus, VIA University College, Ole Mark, Krüger; Hans-Martin Friis Møller, KALFOR; Anders Refsgaard, COWI, Ines Breda, YWP, Ida Holm Olesen, Region Syd and Christian Schou, Aarhus Vand.

#### **The Secretariat:**

Danish Water Forum, Agern Allé 5, 2970 Hørsholm  
E-mail: [dwf@danishwaterforum.dk](mailto:dwf@danishwaterforum.dk) Web: [www.danishwaterforum.dk](http://www.danishwaterforum.dk)

# Interessenters syn på værdien af retentions-kortlægning

Udviklingen af et retentionskort var oprindeligt et forskningsprojekt for at tilbyde landmænd et prioriteringsværktøj i kvælstofindsatsen. Fra starten var det ikke synligt hvilken økonomisk gevinst dette ville give, men over tid er landmænd blevet vant til målrettet regulering, og vil gerne bruge nye retentionskort. Større politisk fokus på målrettet regulering har øget interessen hos myndighederne.

MORTEN GRAVERSGAARD, BRIAN H. JACOBSEN, KENNETH NYGAARD, STEFAN SCHAPER, SARA IVERSEN, METTE VESTERGAARD ODGAARD & TOMMY DALGAARD

Historisk har vi i Danmark haft en generel tilgang til kvælstofregulering, hvor krav om implementering af virkemidler og indsatser var lige for alle landmænd på tværs af landet (gødningsnormer, krav om udbringningstidspunkt osv.). Der har dog i årtier været et ønske om at komme "tættere" på kilderne til udledningen, og et produkt heraf er den målrettede regulering, som har etableret sig som et nyt koncept over tid. På samme vis har forskningsprojektet MapField over tid udviklet sig fra primært at være drevet af forskningsinteresser til også at omfatte interesser og behov hos de to primært berørte interessenter, nemlig landmænd og myndigheder, i samskabelsen af et værktøj som både er brugbart for bedrifter og i en potentiel reguleringsammenhæng /1/.

Tanken var at landmanden ville knytte en værdi – i form af mindskede omkostninger – til at leve op til skærpede kvælstofkrav i kortlægningen. Men det viste sig fra starten, at denne gevinst opfattedes som usikker. Hvis samfundet påskønner værdien, er det mere logisk, at det indgår i reguleringen og ad den vej bliver et integreret værktøj, som landmændene også vil bruge og potentielt drage fordel af.

I dette indlæg har vi undersøgt, hvordan målrettet regulering som koncept har udviklet sig fra to vinkler: 1) Hvordan konceptet har udviklet sig over tid, herunder hvilke interessenter der har været de vigtigste i forhold til at se en værdi ved yderligere kortlægning. 2) Hvordan berørte landmænd forholder sig til og anvender detaljerede kvælstofretentionskort, som nu er koblet til de nye rammevilkår, der følger af en målrettet regulering.

## Målrettet regulering og værdiskabelse af MapField

Implementeringen af det udviklede koncept i MapField projektet kan potentielt støtte landmænd i bedre at planlægge og målrette deres brug af gødning på markniveau eller i forhold til udtagning af arealer og derved sikre at virkemidler anvendes, hvor effekten i forhold til reduceret tab af kvælstof til vandmiljøet er størst. Dette vil bidrage til både en mere omkostningseffektiv drift og til at imødekomme reduktionskravene i vandplanerne. Der er dog, som analyser har påvist, nogle underliggende problemer i den værdiskabelse der er knyttet til kommerialiseringen af MapField /2/. Ønsket om detaljeret kortlægning var først et ønske om vidensgenerering med brug af nye teknologier drevet af forskere. Landbruget og myndigheder kunne ikke se den store direkte gevinst. Teknologien skal etableres for at gevinsten kan understøtte konceptet, men implementeringen var ikke klar og spørgsmålet er stadig: Skal implementeringen drives af de enkelte landmænd, der

ønsker yderligere afklaring og kortlægning i forhold til deres marker? Eller er det i højere grad et værktøj, der anvendes delvist subsidiært af reguleringsmyndigheder? Denne dobbelthed skaber dilemmaer for udviklingen af et implementeringsgrundlag og værktøj, der accepteres af alle.

Landmænd er over de seneste 10 år blevet præsenteret for kortlægninger, der har ændret sig meget i karakter og betydning. For forskningen er dette nyttigt da koncepter og modeller bliver forbedret, men for interessenterne kan ændringer have stor indvirkning på fremtidig drift, og skabe et miljø præget af (planlægnings)usikkerhed. Hvis arealer skal udtages, skal man være sikker på, at man opnår en effekt det pågældende sted. Landmænds tilbageholdenhed er ikke nødvendigvis et udtryk for et push-back mod nye kortlægninger, men derimod mere et forsigtighedsprincip rettet mod kortenes præcision og hvordan de anvendes.

Dertil er det svært at vide, hvad kortet giver af værdi, og det er kollektivt svært for landbruget at italesætte, at nogle bedrifter må og skal reducere deres tab af kvælstof, medens andre kan have uændret drift. Mere detaljeret kortlægning kan påføre nogle jordejere økonomisk tab, men det kan være til samlet gevinst (eller mindsket omkostning) for et område at udpege de områder, hvor kvælstoftabet er størst, og tiltagene derfor med økonomisk fordel kan målrettes. Dette kan dog give udfordringer i forhold til mulig implementering og accept af kortlægningen blandt lodsejerne.

Hvis der skal et stort krav om kvælstofreduktion til, for at man ønsker en kortlægning, er det ikke det bedste incitament, og der er ingen garanti for at den enkelte bedrift vil opleve en variation i retentionen og en gevinst ved kortlægningen.

Generelt viser vores analyse at disse hindringer, og mangel på klare fordele, reducerer landbrugets lyst og interesse for at medfinansierer eventuelle kortlægninger /2/. En anden og mere praktisk problematik er, at den udviklede kortlægningsmodel kræver et datagrundlag fra et større opland/område for at kunne estimere retentionen optimalt. En national kortlægning som det nuværende ID15 retentionskort, vil være dyrt med MapField konceptet. Kortlægningen er estimeret til at koste ca. 1.175 kr. pr. ha, hvilket svarer til 100 kr. pr. ha pr. år set over 20 år /3/. Det er således relevant at rette kortlægningen mod oplande med stort reduktionsbehov og retentionsvariation samt mindre omfang af dræn (da dræn ofte betyder lavere retention). Der skal fortsat og samtidig ske en forbedring af kortlægningen af fx overfladeretentionen ligesom samspil med dræn bør kortlægges bedre.

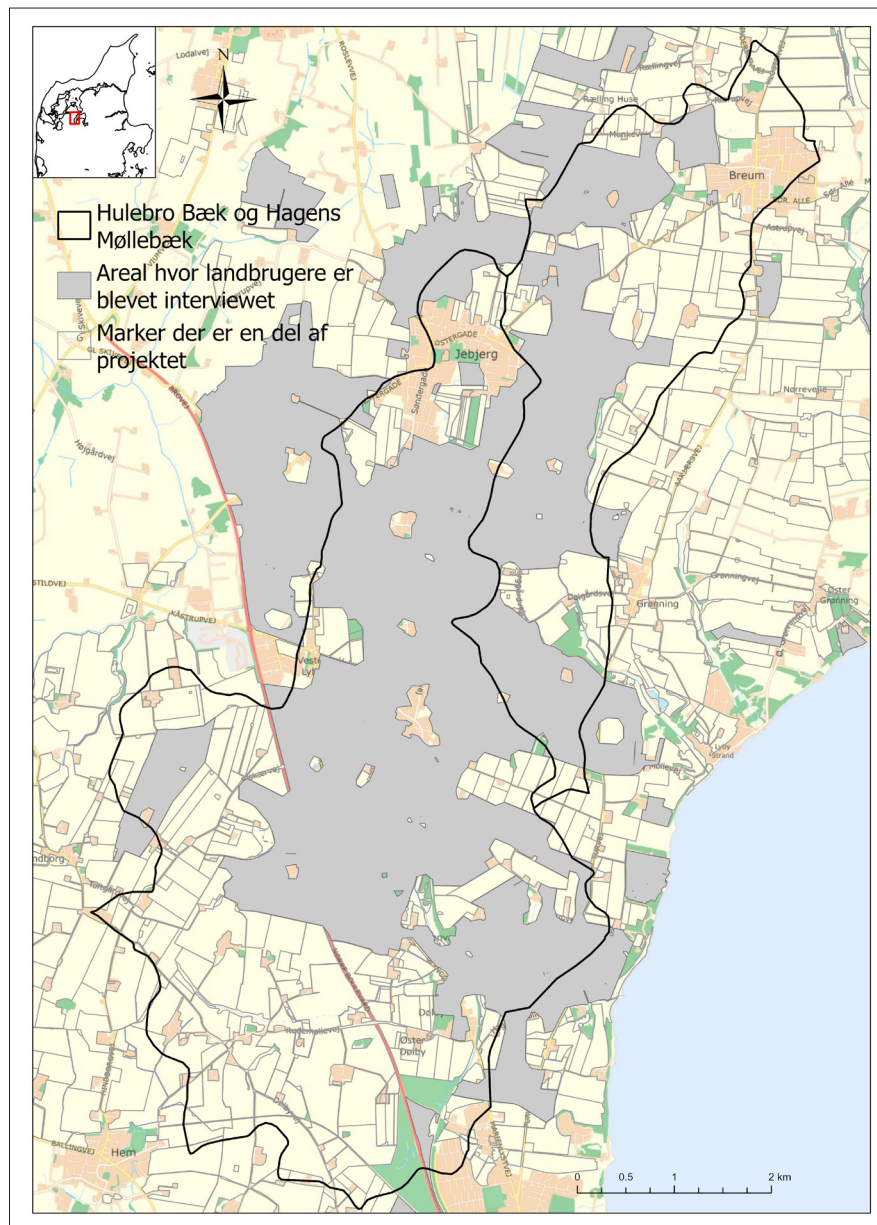
### Involvering af interessenter – legitimitet og handel med kvælstof

Igennem dialog med interessenterne, er der blevet formuleret muligheder for, hvordan medfinansiering og forskellige forretningsmodeller kan blive en del af konceptet, såfremt at reguleringen kan imødekomme muligheder for reduktion af kvælstof på visse marker. Dette vil give bedrifter med både sårbare og robuste jorde (dvs. variation) et incitament til at deltage samt give adgang til markerne (som er centralt for retentionsmodelleringen).

Udviklingen af bæredygtige forretningsmodeller kræver, at der er fleksibilitet i de rammer der reguleres efter. Hvis dette ikke er tilfældet, vil landbruget ikke vælge innovative tiltag. Der skal derfor være sammenhæng mellem den implementeringstilgang med brug af nye kort, og reguleringsmodel som myndighederne vælger /2/.

En væsentlig læring fra projektet er vigtigheden af også at have fokus på interessenter i analyser af koncept- og projektudvikling. En central konklusion er at projektets ledende forskere fokuserer deres indsats (mere eller mindre ubevidst) mod de interessenter, som viser en øget interesse. Det er derfor vigtigt at inddrage alle interessenter, der søger indflydelse for derigennem at bibeholde deres opmærksomhed /1/.

I projekterne er der også bemærket en gradvis øget interesse fra myndighedernes side. Det var helt centralt, at Miljø- og Føde-



Figur 1. Kortet viser de to ID15 oplande og placeringen af marker i området, for de landbrug der deltog i interviews (ifølge tilgængelige registeroplysninger).

vareministeriet blev en partner i MapField. Ministeriets positive tilgang kan også kobles til positive interaktioner med forskellige interessenter /1/. Den tættere kontakt til projektet betyder, at man i ministeriet har opnået mere viden om projektets resultater; og har præciseret at man ikke ønsker kort med større usikkerhed.

### Landmænds tilgang til målrettet regulering har ændret sig over tid

Sideløbende har der i MapField projektet været interaktioner med lokale landmænd i de to ID15 oplande Hagensmølle Bæk (2762 ha) og Hulebro Bæk (1129 ha), beliggende i Skive Fjord oplandet, (figur 1), hvor ca. 88% af arealet er landbrug. I MapField, har 13 ud af i alt 80 jordbrugere fra området deltaget i

interviews, svarende til lidt under 50% af landbrugsarealet i oplandet. Det er altså de største bedrifter, der har deltaget i interviewrunden. Landmændene er blevet interviewet om deres viden om oplandet, og hvordan en målretning af virkemidler ville kunne lade sig gøre på deres bedrift med et opdateret retentionskortgrundlag /3/. Endvidere har der været afholdt møder med lokale landbrugskonsulenter, og der har været afholdt en åben workshop for alle interesserede aktører i Skive, hvor landmændene i området var særligt inviteret. Med introduktionen af målrettet regulering og krav om stillingtagen til placering af efterafgrøder i forhold til retentionen er holdningen til detaljeret kortlægning nu en helt anden end for 3 år siden.



Figur 2. Billede fra workshop afholdt som en del af MapField projektet.

## Placering af virkemidler – behov for en fælles plan for oplandet

Baseret på interviews og diskussionerne ved workshops kom det frem, at et overvejende flertal af lodsejerne i de to projektområder allerede forsøger at placere virkemidler og efterafgrøder strategisk på de individuelle bedrifter /3/. Langt hovedparten af husdyrgødningen benyttes til biogas, hvorved en betydelig omfordeling og optimering af husdyrgødningsanvendelsen allerede finder sted. Men for at imødekomme en yderligere strategisk placering af efterafgrøder og andre virkemidler, kræver det i stor grad at der bliver udarbejdet en samlet plan for hele oplandet. En sådan fælles løsning ville betyde at lodsejerne i oplandet, ville skulle løfte i flok, da nogen få skal have udtaget næsten alt deres jord til græs eller efterafgrøder, mens andre kun vil blive påvirket i begrænset omfang. I områderne blev der udtalt interesse for løsninger der dækker bredere end én bedrift, såfremt der kan skaffes suppleringsjord og gives kompensation. Der er altså interesse, hvis de rette rammebetingelser er på plads. Derfor kan en fælles løsning kun opnås, hvis der er villighed til samarbejde.

Et åbent spørgsmål var, om det er en farbar mulighed, at de lokale jordejere satte sig sammen og placerede de nødvendige efterafgrøder og kollektive virkemidler sammen. Altså, at de var medspillere til at udarbejde en samlet områdeplan som forpligtede jordejere over for hinanden. Der fremkom ikke noget konkret svar på ovenstående spørgsmål, men det blev diskuteret og ikke afvist.

## Landbruget som medspiller, men brug for gode eksempler på hvordan det kan lykkedes

I interviews og til workshopdiskussionerne kom det frem, at der blandt landbruget er et ønske og et behov for, at landbruget selv skal komme med forslag til, hvordan udfordringerne skal løses, men at der pt. er mangel på

de gode eksempler, som viser at dette kan lade sig gøre. Desuden er der et stort fokus på de mange barrierer, som opleves i landbruget. Der blev stillet spørgsmål til, hvorvidt projektgruppen mener, at MapField resultaterne kan benyttes i forbindelse med planlægningen af det åbne land i forhold til energi og biodiversitet m.m. Her er man i området meget opmærksom på, at græsproduktion kan fungere både for reduktion af kvælstof (og sikre drikkevandsområder) og til produktion af plantebaserede proteiner. Planlægningen kan også omfatte placeringen af solceller og vindmøller, da en kortlægning af undergrunden kan sikre at disse ikke placeres på jordarealer som f.eks. er særlig egnede til landbrugsproduktion på grund af en høj grundvandsretention. Derudover kan metoden benyttes i forbindelse med grundvandsbeskyttelse og lokalisering af råstoffer, som er en fordel for samfundet. Derfor kan man også stille spørgsmål til, hvorvidt det er landbrugets opgave eller en samfundsopgave, at vi får en bedre kortlægning af vores undergrund.

## Konklusion

Projektet viser hvordan man går fra et forskningsfokuseret projekt til udvikling af et koncept, der ikke direkte kan afsættes på et marked, men kan være et værktøj, samfundet kan anvende i reguleringen, og som derigennem skaber sin værdi. Værdien er i højere grad knyttet til myndighederne, men landmænd accepterer anvendelsen, da de også har fået øget interesse for og forståelse af implementeringen af målrettet regulering. Det betyder også at myndighedernes krav til værktøjet får større vægt.

Behovet for at finde nye løsninger til en ny regulering af landbruget er stort. Blandt interviews og workshopdeltagere er der stor interesse for, at det lokale landbrug er kritisk interesseret, medspiller og aktiv i dette arbejde. Overordnet set giver interviewene og stormødet et indtryk af, at landbruget er indstillet på

at være en aktiv spiller i miljøindsatsen, så længe de kan arbejde under klare rammevilkår, hvor der er sikkerhed for effekten af indsatserne og en grad af økonomisk rygdækning, da miljøudfordringen betragtes som en samfundsproblemstilling og ikke blot en landbrugsmæssig udfordring.

## Perspektivering

Limfjordsoplandet og herunder Skive Fjord står over for nogle høje kvælstofreduktionskrav. I 2022 oprettes kystvandråd bestående af både landbrugere, myndigheder og andre interessenter. Denne nytænkning i planlægningen og placeringen af virkemidler i en række pilotoplunde kan vise sig at være det eksempel, som blandt andet landbruget efterspørger, for at en mere målrettet regulering kan lade sig gøre og vise sig som en ny farbar vej. Mange har ønsker om at tilpasningen sker indenfor et lokalområde. For at kunne efterleve de nye indsatskrav, bliver det ikke bare vigtigt, men en bunden opgave at forstå lodsejeres holdning og interesse i brugen og placering af de målrettede og kollektive virkemidler. Større ejerskab for implementering af virkemidler og indsatser er altafgørende for succes /4/. Det er klart at anbefale, at de berørte interessenter og myndigheder italesætter og udsøger den anvendte reguleringsmodel, som der skal reguleres efter givet den nye viden MapField har genereret.

## Referencer

- /1/ Nygaard, K. et al. (2021). The Role of Stakeholder Engagement in Developing New Technologies and Innovation for Nitrogen Reduction in Waters: A Longitudinal Study. *Water*, 13(22), 3313
- /2/ Nygaard, K. et al. (2022). Sustainable value propositions of a new technology for targeted nitrogen regulation. *Journal of Cleaner production*, 337, 130496
- /3/ Jacobsen, B.H. & Ørum, J.E. (2022). Økonomisk gevinst ved detaljeret retentionskortlægning. *Vand og Jord* nr. 4, s. 166-168
- /4/ Madsen, M. L., et al. (2021). Ejerskab og involvering i vandplanlægning. *Vand & Jord*, 28(4):163-166

MORTEN GRAVERSGAARD (morten.graversgaard@agro.au.dk) og SARA IVERSEN er postdoc, METTE ODGAARD er akademisk medarbejder og TOMMY DALGAARD er professor alle ved Inst. for Agroøkologi, Aarhus Universitet  
 BRIAN H. JACOBSEN er seniorforsker ved Inst. for Fødevarer og Ressourceøkonomi, Københavns Universitet  
 KENNETH NYGAARD er adjunkt ved Business School, Aalborg Universitet  
 STEFAN SCHAPER er lektor ved Inst. for Virksomhedsledelse, Aarhus Universitet



## Analyse af sedimentsøjler bekræfter effekt af miljølovgivning

Forureningstrykket varierer over tid eftersom nye stoffer ibrugtages, begrænses eller forbydes. En undersøgelse benyttede daterede sedimentsøjler fra Nordsøen til at følge niveauet af 90 kemiske stoffer gennem det seneste århundrede. Forskerne fandt at forureningsniveauet af mange stoffer faldt efter lovgivende reguleringer, men at de resterende niveauer forblev højere end før forureningen i mange tilfælde.

Kemisk forurening er en væsentlig bekymring. I Europa er problemet karakteriseret ved cykluser af udvikling af og brug af nye kemiske stoffer fulgt af identifikation af forureningsniveauer og risici, som fører til indførelse af regulering af brugen gennem nationale eller EU lovgivningsmæssige instrumenter. Data vedrørende den langsigtede virkning af sådanne reguleringer er vigtig for forståelsen af og retfærdiggørelse af reguleringerne.

Persistente forurenende stoffer samler sig i marine områder. Som sedimenterne vokser fastholdes stofferne proportionalt til forureningsniveauet på tidspunktet. Dette muliggør at følge det historiske forureningsniveau i

prøver fra forskellige sedimentdybder.

Studiet analyserede sedimentkerner indsamlet i 2017 i Skagerrak, der vides at akkumulere høje niveauer af sediment. Forskerne daterede lagene i sedimentsøjlerne ved analyse af bly og cæsium isotoper. Herudover analyserede de 90 stoffer over en tidsskala på omkring 100 år.

Disse inkluderede: 1) 8 spormetaller af toksikologisk relevans – arsen, cadmium, chrom, kobber, nikkel, bly, titanium og zink. 2) 21 per- and poly-fluoroalkyle stoffer (PFAS) og 3) 61 hydrofobe organiske forbindelser (HOCs - incl. pesticider og flammehæmmere). Herefter så de på resultaterne i relation til historien for brug og regulering af stofferne.

Blandt spormetallerne fandt man at for bly steg niveauet i sedimentet fra 1958 til omkring 1981, hvorefter det faldt. Dette korresponderer med brugen af bly i brændstofadditiver, som blev reguleret i Europa i 1970erne og 1980erne.

Af de 21 PFASer blev kun 6 gentagne gange målt i tilstrækkelige koncentrationer. Alle blev fundet med stigende niveau fra 1980erne til de tidlige 2010ere, hvorefter de aftog stærkt. Dette svarer til stramninger, der begyndte omkring 2000, via EUa regulering af persistente organiske forurenende stoffer og FNs Stockholm Konvention om persistente organiske forurenende stoffer for at kontrollere anvendelsen af PFAS.

De fleste af HOC forbindelserne, der blev målt, viste et tilsvarende mønster af stejl stigning fulgt af vedvarende fald. Men forskerne bemærkede, at koncentrationen af nogle stoffer faldt meget langsommere end de var akku-

muleret. For eksempel niveauet af PCBer (bl.a. anvendt i transformere og andet elektrisk udstyr), som begyndte at falde i 1980erne efter omfattende begrænsninger, var omkring 2010 stadig 6 gange højere end det var 100 år tidligere.

Forskerne hævder, at resultaterne bekræfter vigtigheden, effektiviteten og begrundelsen for lovgivningsmæssige ordninger for regulering af miljøforurening. Men de forurenende stoffer kan fortsætte med at komme ud i miljøet selv efter et forbud, f.eks. fra bortskaffelse og nedbrydning af eksisterende produkter eller frigivelse fra smeltende havis eller permafrost områder. Relativt korte perioder af brug af et stof før regulering kan føre til en forurening der tager meget længere tid at omvende.

Fremtidig monitoringsprogrammer for forurening bør omfatte kendte og nye forurenende stoffer, være fleksible og mere følsomme til at identificere trusler over korte tidsrum. Man må finde måder at følge blandinger af stoffer, gamle og nye, da synergiefekter mellem stofferne kan øge toksisiteten for organismer.

### Kilde:

Logemann, A., Reininghaus, M., Schmidt, M., Ebeling, A., Zimmermann, T., Wolschke, H., Friedrich, J., Brockmeyer, B., Pröfrock, D. and Witt, G. (2022) Assessing the chemical anthropocene – Development of the legacy pollution fingerprint in the North Sea during the last century. *Environmental Pollution* 302: 119040. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119040>

CH

# 1-årig Akademisk Overbygningsuddannelse i Klimatilpasning

Med uddannelsen kan du bidrage til at løse udfordringer skabt af klimaforandringer



På uddannelsen har du kurser om klimaforandringernes effekt på byerne, naturen og det åbne land, projektledelse, klimatilpasningsmetoder, miljølovgivning, bæredygtig vækst og projektværktøjer.

Du kan søge ind med en naturvidenskabelig, samfundsvidenskabelig eller teknisk bacheloruddannelse.  
Studiestart: september 2022

**Læs mere om uddannelsen,  
adgangskrav og jobmuligheder på  
[sdu.dk/nat/klimatilpasning](https://sdu.dk/nat/klimatilpasning)**

# ATV JORD OG GRUNDVAND

## Vandområdeplaners kvantitative vurdering og målsætning

**Tid: Onsdag den 21. september 2022, kl. 16.00 – 18.00**

**Sted: GEUS, Øster Voldgade 10, 1350 København K (online deltagelse mulig)**

Vandrammedirektivet fastsætter fælles mål om kvaliteten af søer, vandløb, grundvand og kystnære hav-områder. Vandrammedirektivets mål er, at vand i Europa skal opnå god tilstand. Dette mål skulle være opfyldt i 2015, dog med mulighed for udsættelse til 2027. Tilstandsvurderinger for grundvandets kvantitet og kvalitet indgår i basisanalysen for vandområdeplanerne (2021-2027), som er et krav i EU's vand-rammedirektiv.

Der er nu udarbejdet tilstandsvurderinger for grundvandets kvantitative tilstand. Tilstandsvurderingerne er udarbejdet med ny viden fra faglige projekter og overvågningen. Resultaterne viser bl.a., at 38 % af forekomster er vurderet til at have en ukendt kvantitativ tilstand. For de forekomster, som har en ukendt tilstand, er det nødvendigt at vurdere om den nuværende og fremtidig indvinding vil påvirke tilstanden i en sådan grad, at god kvantitativ tilstand ikke kan opnås inden 2027. Det kan give udfordringer for kommuner, vandforsyninger, landbrug og industri, når nye indvindinger skal placeres og påvirkninger vurderes.

Til dette gå-hjem møde præsenteres resultater fra den kvantitative vurdering samt målsætning og krav i vandområdeplaner. Der bliver præsenteret, hvilke udfordringer kommuner har for at opnå en god kvantitativ tilstand for grundvandet. Til sidst vil der være en åben diskussion om, hvordan kommuner, vandforsyninger og andre forbrugere kan håndtere krav i vandområdeplaner.

Mødet er et "gå-hjem-møde", og deltagelse er uden beregning, men du bedes venligst tilmelde dig med en kort e-mail til [atvlv@env.dtu.dk](mailto:atvlv@env.dtu.dk) senest mandag den 19. september. Der vil være mulighed for at følge mødet online via et Teams-link, så man kan se/lytte til indlæggene og stille spørgsmål eller deltage i diskussionerne. Angiv venligst i din tilmelding, om du deltager fysisk, eller om du gerne vil følge mødet online.

## Fra udviklingsprojekt til praktisk anvendelse - Erfaringer, udfordringer og nye resultater

**Tid: Onsdag den 12. oktober 2022, kl. 10.00 – 16.00**

**Sted: DGI Byen/CPH Conference, Tietgensgade 65, København (online deltagelse mulig)**

Forskning og udvikling er vigtige forudsætninger for at finde bedre løsninger til at undersøge og oprense forurenede jord og grundvand og for at kunne tackle nye udfordringer, som jævnligt opstår – f.eks. med nye problemstoffer. Den generelle

teknologiudvikling kaster også helt nye muligheder af sig – bl.a. for real-time overvågning og -dataudstilling på vand- og miljøområdet.

Men hvor meget kan vi selv styre udviklingen, hvor meget dikteres af udefrakommende rammebetingelser, og hvad skal der til, for at lovende forsknings- og udviklingsresultater kan omsættes til praktiske løsninger, som anvendes bredt i branchen?

Disse spørgsmål vil blive belyst fra forskellige vinkler på dette møde samtidig med, at resultaterne fra nogle igangværende og nyligt afsluttede spændende projekter vil blive præsenteret. Dagen vil byde på oplæg fra en række eksperter fra vand- og jordforureningsområdet, som alle har stor erfaring med at drive forsknings- og udviklingsresultater frem mod praktisk anvendelse – og som ved noget om, hvad der virker og ikke virker i den sammenhæng.

På mødet vil vi i fællesskab også diskutere og synliggøre, hvilke udfordringer vi står overfor – og hvordan vi bedst griber dem an. Mødet er for alle, som interesserer sig for udvikling og praktisk anvendelse af nye teknikker og løsninger inden for vand- og miljøområdet.

Læs mere og tilmeld dig på hjemmesiden [www.atv-jord-grundvand.dk](http://www.atv-jord-grundvand.dk).

## Injektionsbaseret afværge til oprensning af forureningsfaner - State of the art

**Tid: Onsdag den 3. november 2022, kl. 10.00 – 16.00**

**Sted: DGI Byen/CPH Conference, Tietgensgade 65, København (online deltagelse mulig)**

I de seneste år er der kommet øget fokus på håndtering af forureningsfaner, som udgør en længerevarende risiko for grundvandsressourcen på trods af, at kilden er håndteret, eller fordi det ikke er muligt at håndtere kilden. I nogle indvindingsoplunde findes desuden flere tætliggende forureningskilder, der giver anledning til en større grundvandsforurening, som måske mest effektivt oprenses samlet i grundvandsmagasinet. Typisk foretages oprensning vha. pump and treat, men dette er ikke altid den mest kosteffektive metode. Derfor er det nødvendigt at have flere metoder i værktøjskassen. Teknologier baseret på injektion af reaktanter er i de seneste år kommet i spil. På mødet vil vi samle op på erfaringer fra danske og udenlandske projekter med fokus på injektions- og dokumentationsmetoder til fordeling af reaktanter i grundvandsmagasiner.

Læs mere og tilmeld dig hjemmesiden [www.atv-jord-grundvand.dk](http://www.atv-jord-grundvand.dk).

## Fondens formål:

ATV Fonden for Jord og Grundvand er en almennyttig, erhvervsdrivende og non-profit fond, der arbejder aktivt for at fremme formidling og udveksling af viden om fagområdet jord- og grundvandsforurening. Der arbejdes med at stimulere og initiere undervisning, forskning, udvikling samt styrke den faglige debat. Konkret udmøntes Fondens arbejde i, at der årligt afholdes i størrelsesordenen 10 konferencer, møder, kurser og ekskursioner.

Bestyrelsen samt arbejdsgrupper under denne arbejder frivilligt med at opfylde Fondens formål. Fondens sekretariat varetager den løbende kontakt til Fondens brugere og bidragydere.

**For generel information om aktiviteterne i ATV Jord og Grundvand og tilmelding til møderne – se [www.atv-jord-grundvand.dk](http://www.atv-jord-grundvand.dk)**

# Økonomisk gevinst ved detaljeret retentionskortlægning

Med det detaljerede retentionskort er det muligt at placere virkemidlerne hvor effekten er størst og hvor omkostningerne er lavest. Konkret angives her hvordan placeringen af efterafgrøder og udtagning kan målrettes i to oplande ved Skive. Den økonomiske gevinst ved mere detaljeret kortlægning er opgjort til 100-200 kr. pr. ha, mens omkostningen ved kortlægningen er ca. 100 kr. pr. ha pr. år.

BRIAN H. JACOBSEN &  
JENS ERIK ØRUM

Der er med Mapfield skabt et værktøj, der kan kortlægge grundvands N-retention på en meget detaljeret skala. Den økonomiske fordel ved at kunne målrette virkemidler kommer ved at virkemidler kan placeres hvor effekten er størst og omkostningerne lavest. I denne analyse sammenlignes anvendelsen af én retention for hele området med en situation hvor retentionen er opgjort på 25 m x 25 m markniveau /1,2/. I analysen indgår to niveauer for reduktion af udledningen på henholdsvis 8% og 20% i forhold til den nuværende udledning.

Det er relevant at kigge på eventuelle yderligere krav til reduktioner i kvælstofudledningen til Skive Fjord, fordi der i udkast til vandområdeplaner fra 2021 er et foreløbigt årligt indsatsbehov på ca. 740 tons N (8 kg N pr. ha), hvilket svarer til en reduktion på ca. 42% i dette opland, mens der i andre oplande, hvor en del af de deltagende landmænd har marker, er et meget mindre indsatskrav.

Gevinsten ved at kende retentionen vil variere fra bedrift til bedrift fordi ikke alle bedrifter har samme variation i retentionen. En bedrift hvor alle marker har samme retention kan således ikke udnytte kendskab til retentionen på markniveau til ændringer i sædskiftet.

De to konkrete deloplande der indgår i denne analyse er to demonstrationsområder (Hagens Møllebæk og Hulebro Bæks oplande) nordvest for Skive. Detaljeringsniveauet der anvendes i det nationale kvælstofretentions-

kort, er på omkring 1.500 ha (ID15 områder) og det omfatter typisk en del bedrifter. Et interval (fx 20-40% retention) kan let omfatte 3.000 - 4.500 ha.

## De anvendte N-retentionskort

Der er i analysen anvendt N-retentionskortet for grundvandet (grundvandsretentionen) fra MapField vist i figur 1 /1,2/). Fokus i Mapfield er grundvandsretentionen, mens overfladevandsretentionen ikke kortlægges. Middelværdi for grundvandsretentionen i området er i Mapfield opgjort til ca. 37%. Det nationale kvælstofretentionskort, der omfatter både grundvands- og overfladevandsretention, angiver for de samme to ID15 områder en retention på 66%. Noget af forklaringen på denne forskel er, at overfladevandsretentionen indgår i den totale nationale kvælstofretention.

Hovedformålet her er at belyse de miljøøkonomiske fordele ved at erstatte det nationale retentionskort, hvor retentionen er den samme i hele området med det nye, meget detaljerede grundvandsretentionskort fra MapField. Til brug for de miljøøkonomiske analyser er MapField grundvandsretentionen blevet suppleret med en differentieret overfladevandsretention baseret på en estimeret, simpel retention pr. meter vandløb fra den nærmeste åkant til kysten.

I analysen indgår således grundvandsretentionen fra Mapfield og den her estimerede overfladevandsretention således at der samlet opnås en total retention der er kan bruges i forhold til krav i overfladevand som anført i vandområdeplanerne. Den anvendte totale retention er herefter på ca. 48% og den er fortsat lavere end den totale retention anført i Vandområdeplanerne på ca. 66%. De angivne

Tabel 1 Fordeling af indsats (efterafgrøder og udtagning) for at nå årlige indsatskrav på hhv. 8 og 20 tons N (% af samlet areal), givet at landmændene samlet kan fordele indsatsen hvor effekten er størst.

Indsatskrav	Reduktion på 8 tons N		Reduktion på 20%	
	Ensartet retention for alle marker	Mapfield (retention opgjort på markniveau)	Ensartet retention for alle marker	Mapfield (retention opgjort på markniveau)
Ingen efterafgrøder	0	20	0	0
Efterafgrøder Nu	10	75	0	60
Efterafgrøder max	70	0	73,5	25
Udtagning	10	5	26,5	15
i alt	100	100	100	100

Note: Efterafgrøder Nu er det nuværende efterafgrødekrav i området, mens efterafgrøde max. er det størst mulige areal med efterafgrøder på bedrifterne uden at det kræver sædskifteændringer.



niveauer for N-udledning kan derfor ikke direkte sammenlignes med tal i udkast til vandområdeplaner.

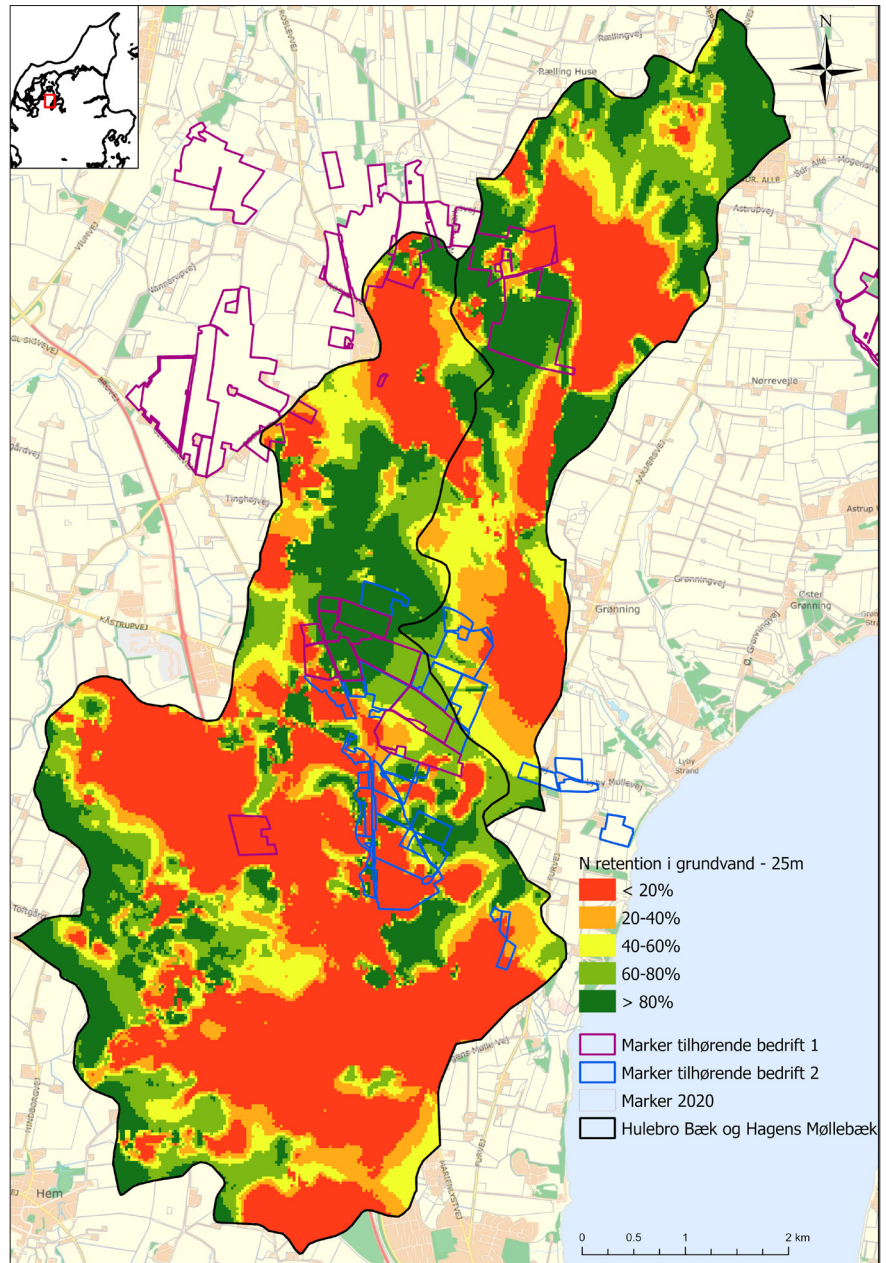
### De økonomiske scenarier

Der er gennemført 13 interviews med landmænd i de to demoområder. Der blev ved interviewene præsenteret de foreløbige retentionskort som gav anledning til en konkret vurdering af hvordan den enkelte bedrift kunne tilpasse sig til det nye kort (Figur 1).

Det er kendetegnede for de fleste bedrifter, at de også har marker i tilstødende kystområdersområder. De gennemførte interviews gav en god indsigt i forhold til de udfordringer omkring sædskifteplanlægning der er på de enkelte bedrifter. Generelt var der en positiv holdning til det at inddrage detaljeret retentionskortlægning i markplanlægningen for at opnå en større og mere målrettet reduktion af N-udvaskningen. Det var også tydeligt, at de økonomiske aspekter af sædskifteændringer skulle analyseres grundigt. Bedrifterne har mere eller mindre faste sædskifter der tilgodeser en række forhold på den enkelte bedrift. Det nuværende niveau af efterafgrøder er acceptabelt, men yderligere krav vil være en udfordring og jo mere jo større indvirkning vil det have på bedrifternes sædskifte. Interviewene afdækkede, at der generelt er en stor fleksibilitet og pragmatisme med hensyn til arealanvendelsen og placering af virkemidler. En del bedrifter var interesseret i kollektive virkemidler (specielt minivådområder), men landmænd havde ikke fået svar fra kommunen siden de søgte for 1-2 år siden, hvilket reducerer motivationen til at bruge disse virkemidler. Hvad angår andre virkemidler så var der en meget begrænset interesse for lavere kvælstofnormer, randzoner og energiafgrøder som virkemiddel. Fokus var i langt højere grad på efterafgrøder, tidlig såning og udtagning, samt for nogle også præcisionsdyrkning.

### Driftsøkonomisk gevinst ved målretning i de to demoområder

Analysen der præsenteres her, er foretaget for hele området (to ID15 områder) under et, og der indgår kun valg mellem efterafgrøder eller udtagning som virkemidler. Efterafgrøderne kan doseres enten som ingen efterafgrøder, nuværende niveau eller maksimum, hvor maksimum er den maksimale anvendelse af efterafgrøder, der er plads til på de enkelte bedrifter uden sædskifteændringer. Baseret på virkemiddelkataloget er det antaget, at omkostningen ved at skifte fra de nuværende efterafgrøder til maksimum efterafgrøder (uden sædskifteændringer) udgør 264 kr. pr. ha, mens omkostningen ved udtagning koster



Figur 1. Det anvendte kort over grundvandsretentionen i Hagens Møllebæk og Hulebro Bæk. Markeringer illustrerer at bedrifter kan have marker indenfor og udenfor området. Kilde: /1/ og offentligt tilgængelige registerdata ved Institut for Agroøkologi, AU Viborg.

2.660 kr. pr. ha pr. år når det antages at 80% af arealet er drænet lerjord /3/.

I analysen er de 3.083 ha opdelt i 20 grupper efter den samlede retention. Til eksempel er den gennemsnitlige grundvandsretention i første gruppe 1,2%, mens den sidste gruppe har en grundvandsretention på 98,4%. Dertil kommer så overfladevandsretentionen som gør, at den totale retention varierer fra 5% til 98,6%. Udvasningen fra rodzonen er baseret på arealanvendelsen 2012-2019 og et gødningsforbrug udledt fra gødningsregnskaberne for 2017. Den årlige udvaskning fra rodzonen er opgjort til mellem 52,7 og 65,6 kg N pr. ha i de 20 grupper. Den gennemsnitlige årlige udvaskning fra rodzonen er 61,7 kg N pr. ha svar-

ende til i alt 190 tons N for området.

Med udgangspunkt i de nuværende krav til efterafgrøder så udgør den samlede årlige kvælstofudledning 97,7 tons N i området svarende til 31,7 kg N pr. ha.

Spørgsmålet er så hvad en målsætning om en yderligere reduktion af udledningen med fx 8 tons N (-8%) betyder, hvis man anvender et detaljeret retentionskort i forhold til et gennemsnitsretentionskort? Den opsatte målsætning kan opnås ved udtagning af jord i gruppe 1 (laveste retention) (5% af arealet) og der vil så ikke være behov for efterafgrøder i gruppe 17-20 (dem med den højeste retention). Denne ændring koster samlet bedrifterne 805.000 kr. eller 261 kr. pr. ha eller 100

Tabel 2. Årlige omkostninger ved den i Tabel 1 viste fordeling af indsatser for at nå indsatskrav på 8 og 20 tons N (% af samlet areal)

Indsatskrav	Reduktion på 8 tons N			Reduktion på 20 tons N		
	Ensartet retention for alle marker	Mapfield	Forskel	Ensartet retention for alle marker	Mapfield	Forskel
Omkostninger i alt (kr. ialt)	1.150.514	804.534	-345.979	2.136.471	1.416.019	-720.452
Omkostninger (kr. pr. ha)	373	261	-112	693	459	-234
Omkostninger (kr. pr. kg N)	144	100	-44	107	71	-36

kr. pr. kg N.

Uden Mapfield kortlægning (ens retention for alle marker) vil en 8 tons reduktion i udledning kræve udtagning af 10% og der skulle være maximalt efterafgrøder på 70% af areaerne, mens de 20% af arealet har de nuværende krav til efterafgrøder (Tabel 1). Denne ændring koster samlet bedrifterne 1,2 mio. kr. eller 373 kr. pr. ha. Samlet betyder dette at der med målretning og kortlægning med Mapfield er muligt at reducere omkostningerne med 346.000 kr. svarende til 112 kr. pr. ha eller 44 kr. pr. kg N der fjernes (Tabel 2).

Nu øges kravet så til en reduktion i udledningen til ca. 20 tons eller ca. 20%. Hvis virkemidler igen placeres optimalt i hele oplandet udfra de angivne forudsætninger, så viser analysen at der med brug af Mapfieldkortet kræves udtagning af 15% af arealet og at der skal være 25% af arealet med max efterafgrøder og resten (60%) har det efterafgrødekrav der gælder i dag. Denne ændring koster bedrifterne 1,4 mio. kr. eller 459 kr. pr. ha eller 71 kr. pr. kg N i forhold til udgangspunktet.

Uden Mapfieldkortet (ens retention for alle marker) kræver en 20 tons reduktion i udledningen en udtagning af 26,5% af arealet og maksimal dækning af efterafgrøder på resten af arealet. Det giver en samlet meromkostning på 2,1 mio. kr. eller 692 kr. pr. ha eller 107 kr. pr. kg N. Mapfield kortlægningen har under disse antagelser reduceret omkostningerne med 720.000 kr. eller 234 kr. pr. ha eller 36 kr. pr. kg N.

Der vil være bedriftsspecifikke forhold som gør, at det for nogle bedrifter vil være dyrere at øge til maksimum efterafgrøder, mens det for andre bedrifter måske vil være billigere

end angivet. For udtagning vil et højere omkostningsniveau fremme fordelene ved målretning.

### Omkostninger ved detaljeret kortlægning

Det har været en del af projektet at vurdere omkostningerne ved kortlægningen (se også /4/).

Landmænd ønsker imidlertid ikke at betale for en dyr analyse, hvis ikke den kan bruges til noget. Uden variation i retentionen er der ikke nogen gevinst ved målretning. Det er derfor vurderet om der via en trinvis vurdering kan opnå, at man kan stoppe processen, hvis der afdækkes en meget begrænset variation i retentionen på bedriften. I tabel 3 er angivet de trin der er i analysen og hvor kortlægningsprocessen kan stoppes.

De samlede investering for oplandet vil udgøre ca. 1.175 kr. pr. ha, hvilket svarer til ca. 100 kr. pr. ha pr. år set over 20 år (Tabel 3). Man kan fx stoppe efter scanningen af undergrunden med tTEM, hvis der ikke viser sig nogen variation i undergrunden og der ikke er grundlag for målretning. Derved undgås en stor del af de resterende udgifter, der ville være forbundet med en fuld kortlægning men til gengæld vil der ikke blive produceret et N-retentionskort for grundvandet.

### Afrunding

Analysen her peger på, at der er en endog meget stor variation i N-retentionen i det analyserede område, hvilket giver en god baggrund for at udnytte den kortlagte retention. Der peges i denne analyse på en mulig gevinst på hhv. mellem 100 kr. og 200 kr. pr.

ha afhængig af indsatsbehov. De gevinster, der er angivet her, kræver samarbejde mellem bedrifterne med henblik på en – på tværs af bedrifterne – omkostningseffektiv placering af virkemidlerne.

For at opnå denne gevinst vil det kræve en reguleringsmodel der understøtter denne optimering på tværs af oplandet, da den nuværende regulering giver et ensartet reduktionskrav til alle bedrifter uden hensyn til de ledige potentialer. Denne udveksling af muligheder for at opfylde et fælles krav kan enten ske via handel med udledningskvoter eller det kan aftales indbyrdes. De nye kort og værktøjer kan fx inddrages i de oplande, hvor der oprettes kystvandråd.

### Referencer:

- /1/ Hansen, B. & Christiansen, A.V. 2022. MapField projektet. Vand & Jord, nr. 4, s. 132-136
- /2/ Frederiksen, R.R., Christiansen, A.V., Blicher-Mathiesen, G. & Hansen, B. 2022. Et grundvandsretentionskort på lokal skala. Vand & Jord, nr. 4, s. 156-159
- /3/ Eriksen, J., Thomsen, I. K., Hoffmann, C. C., Hasler, B., Jacobsen, B. H. (ed.) (2020). Virkemidler til reduktion af kvælstofbelastningen af vandmiljøet. Aarhus Universitet. DCA – Nationalt Center for Fødevarer og Jordbrug. 452 s. – DCA rapport nr. 174
- /4/ Jacobsen B.H and Hansen, A.L. (2016). Economic gains from targeted measures in agriculture based on detailed nitrate reduction maps. Science of the Total Environment. 556, 264-275.

BRIAN H. JACOBSEN (brian@ifro.ku.dk) og JENS ERIK ØRUM (je@ifro.ku.dk) er seniorforskere ved Inst. for Fødevarer og Ressourceøkonomi (IFRO) på Københavns Universitet.

Tabel 3. Omkostninger ved implementering af MapField-konceptet på 1500 ha landbrugsareal, se beskrivelse af trin i boks 2 (artikel 1)

Kortlægning	Beskrivelse	Investering (kr./ha)	Årlig omkostning (kr./ha/år)
Trin 1	Analyse af muligheder udfra historisk viden	58 (5 %)	3
Trin 2	Undergrunden bliver scannet	497 (42 %)	25
Trin 3	Centrale borer og analyser udføres	268 (23 %)	12
Trin 4	Kort over N-retention fremstilles	252 (21 %)	13
Trin 5	Valg af virkemidler analyseres	100 (9 %)	21
Fuld analyse	I alt	1.175 (100 %)	100

# tTEM i jord- og grundvandsforurening

Geofysik finder normalt kun begrænset anvendelse i arbejdet med jord- og grundvandsforurening, men med udviklingen af tTEM er geofysikken for alvor kommet ind i varmen. Dette skyldes, at geologiske strukturer, der er styrende for grundvandets lokale strømning, nu bedre kan kortlægges. tTEM giver et vigtigt input til arbejdet, der kan spare ressourcer og opnå bedre risikovurderinger.

FLEMMING JØRGENSEN

TEM-metoden (Transient ElectroMagnetic) har været benyttet i den danske grundvandskortlægning siden begyndelsen af 90'erne. I starten som en håndudlagt punkt-sonderingsmetode, men med afsæt i dansk-udviklede tolkningsalgoritmer samt rutiner til udstyrskalibrering og dataindsamling blev metoden senere videreudviklet til kontinuert opmåling med helikopter (SkyTEM). Mange succesfulde kortlægninger med TEM og SkyTEM har ændret forståelsen af den danske undergrund ved at afsløre nye og hidtil ukendte forhold. Først og fremmest viste undergrunden sig langt mere kompleks og varieret end man tidligere havde forestillet sig. SkyTEM-metoden har dog sine begrænsninger, idet kun større geologiske strukturer kan kortlægges. Geologiske strukturer styrende for grundvandets lokale strømningsmønstre er typisk for små til at blive kortlagt, og derfor har metoden kun i mindre omfang været relevant i forbindelse med grundvandsforurening fra punktkilder.

Senest har ny teknologi muliggjort udviklingen af en ny TEM metode, kaldet tTEM (to-wed-TEM). tTEM-metoden har en væsentligt forbedret opløsningsevne, og resultaterne af tTEM-metoden ser ud til igen at føje væsentlig ny viden til forståelsen af den danske undergrund. Nu kommer mindre strukturer til syne – og i høj grad de strukturer, der er behov for at kende, når der f.eks. skal laves risikovurderinger i forhold til grundvandsforurening fra punktkilder. Igen observeres en kompleks og varieret undergrund, nu blot bestående af strukturer på mindre skala. Særligt er det ble-

vet muligt at kortlægge glacialtektonisk dannede strukturer, små begravede dale, tynde lerlag, indsynkninger, små grundvandsmagasiner m.m. Strukturer, hvis eksistens og form er afgørende at kende, når spredningsveje for forureningsfaner skal afgrænses.

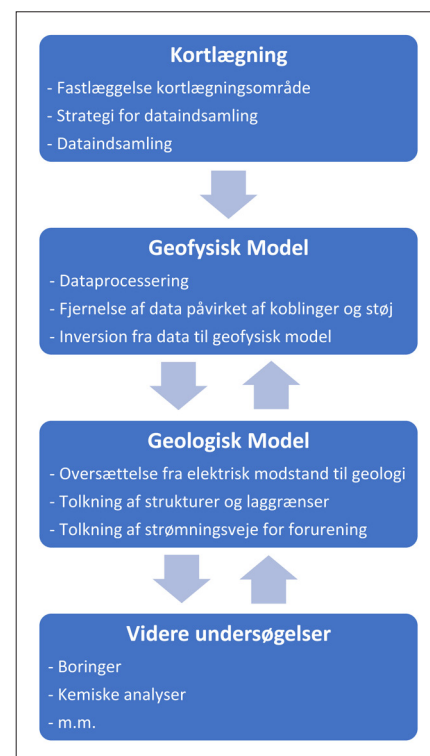
tTEM-systemet er designet til detaljeret 3D kortlægning af den overfladenære undergrund (0-80 m) på en omkostningseffektiv måde. Der kan kortlægges op til 150 ha/dag, og der opnås en detaljeret 3D-dækning ved dataopsamling langs kørelinjer med en indbyrdes afstand på 10-25 m. Dette resulterer i en tæt lateral datadækning, der muliggør konstruktion af detaljerede geologiske og hydrogeologiske modeller. Systemet består af en ATV, der trækker instrumenteringen – en senderamme adskilt fra en modtagerspole; begge dele monteret efter ATV'en. Systemet er beskrevet i /1/.

## tTEM-systemet og behandling af de indsamlede data

tTEM måler på jordens elektriske modstande. De indsamlede data består af stakkede sonderinger, som efter dataprocessering og inversion beskriver jordens elektriske modstand i en lagdelt geofysisk model. Modellerne interpoleres efterfølgende til en rumlig resistivitetsmodel.

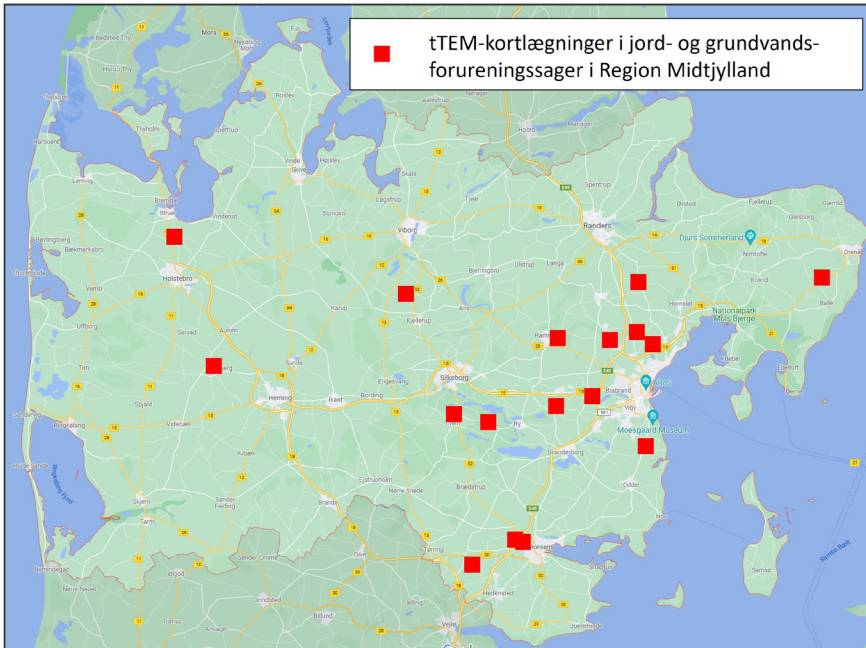
For at få fuldt udbytte af tTEM-metoden, skal resistivitetsdata omsættes til geologi gennem tolkning. Denne tolkningsproces kræver erfaring med metoden og indsigt i både geofysiske og geologiske forhold. Her er det vigtigt at kende metodens begrænsninger og også at kende de elektriske modstande af de geologiske aflejringer i et givent kortlægningsområde.

I Figur 1 ses processen for et optimalt kort-



Figur 1. Processen for tTEM-data fra indsamling til anvendelse

lægningsforløb. Først udføres selve kortlægningen i et design tilpasset sagens problemstilling. Herefter processeres og inverteres data til en geofysisk model. Næste skridt er så at omsætte den geofysiske model til en geologisk model, som danner grundlag for gennemførelsen af de videre undersøgelser. Modellerne forbedres gennem feedback loops mellem miljøogsagsbehandler, geolog og geofysiker. Dette samarbejde har erfaringsmæssigt vist sig at være meget vigtigt.



Figur 2. Fordeling af tTEM-kortlægninger i Region Midtjylland

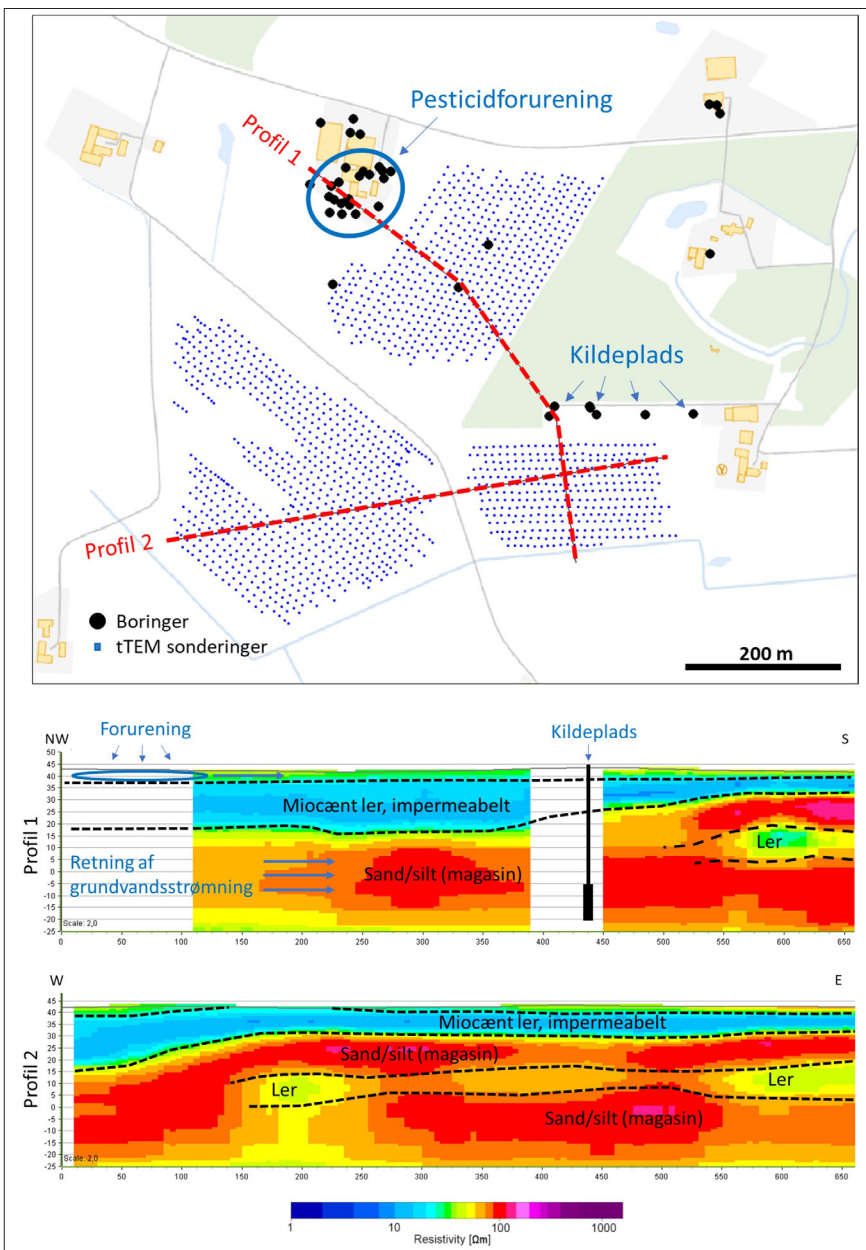
TEM-metoden er generelt følsom overfor elektrisk støj og tekniske installationer og er derfor udfordret tæt på bebyggelse, infrastruktur, elledninger, kabler m.m. Der kan ikke måles data tættere end ca. 50 m på sådanne installationer, hvilket er et problem i mange forureningssager. I Region Midtjylland er det i en GIS-analyse estimeret, at det kan være problematisk at kortlægge i ca. halvdelen af alle sager med videregående undersøgelser.

I Region Midtjylland er tTEM-metoden indtil videre blevet anvendt på 17 lokaliteter i forbindelse med forureningsundersøgelser (figur 2). Disse lokaliteter omfatter en blanding af affaldsdepoter, landbrug, maskinstationer og andre virksomheder. Fælles for de undersøgte lokaliteter er, at de hovedsageligt ligger helt eller delvist i det åbne land, og at der er tale om grundvandsbårne forureninger. De forurenende stoffer dækker primært over klorerede opløsningsmidler og pesticider, men også PFAS.

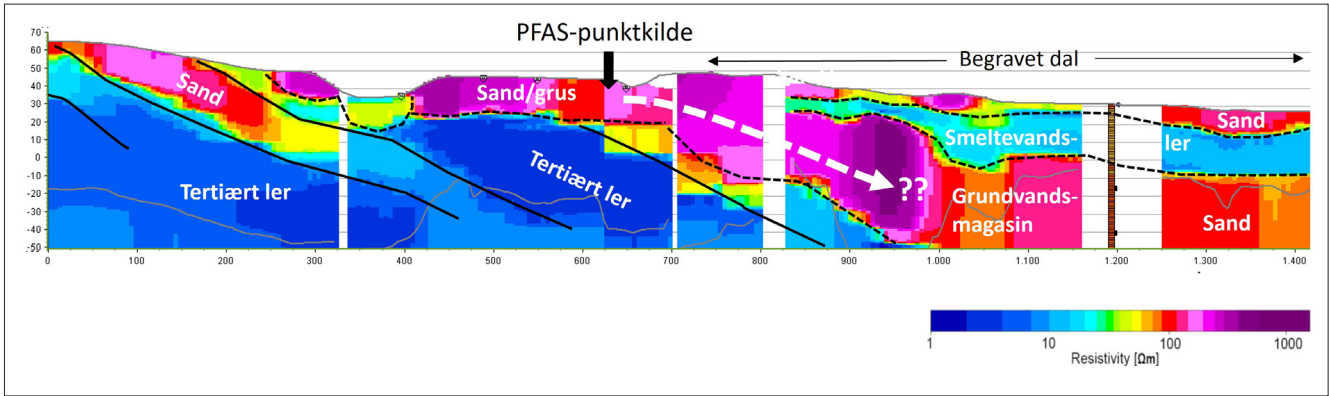
I alle sager har tTEM-kortlægningerne givet et vigtigt input til sagsbehandlingen og de videre undersøgelsesaktiviteter og resulteret i mere sikre risikovurderinger. tTEM-kortlægningerne har typisk medført, at sagerne har kunnet afsluttes med en mere målrettet resterende indsats, og i nogle tilfælde har tTEM-kortlægningerne vist, at punktkilderne ikke udgør en trussel mod grundvandsressourcerne, og sagen har kunnet afsluttes uden videre tiltag.

### Eksempler

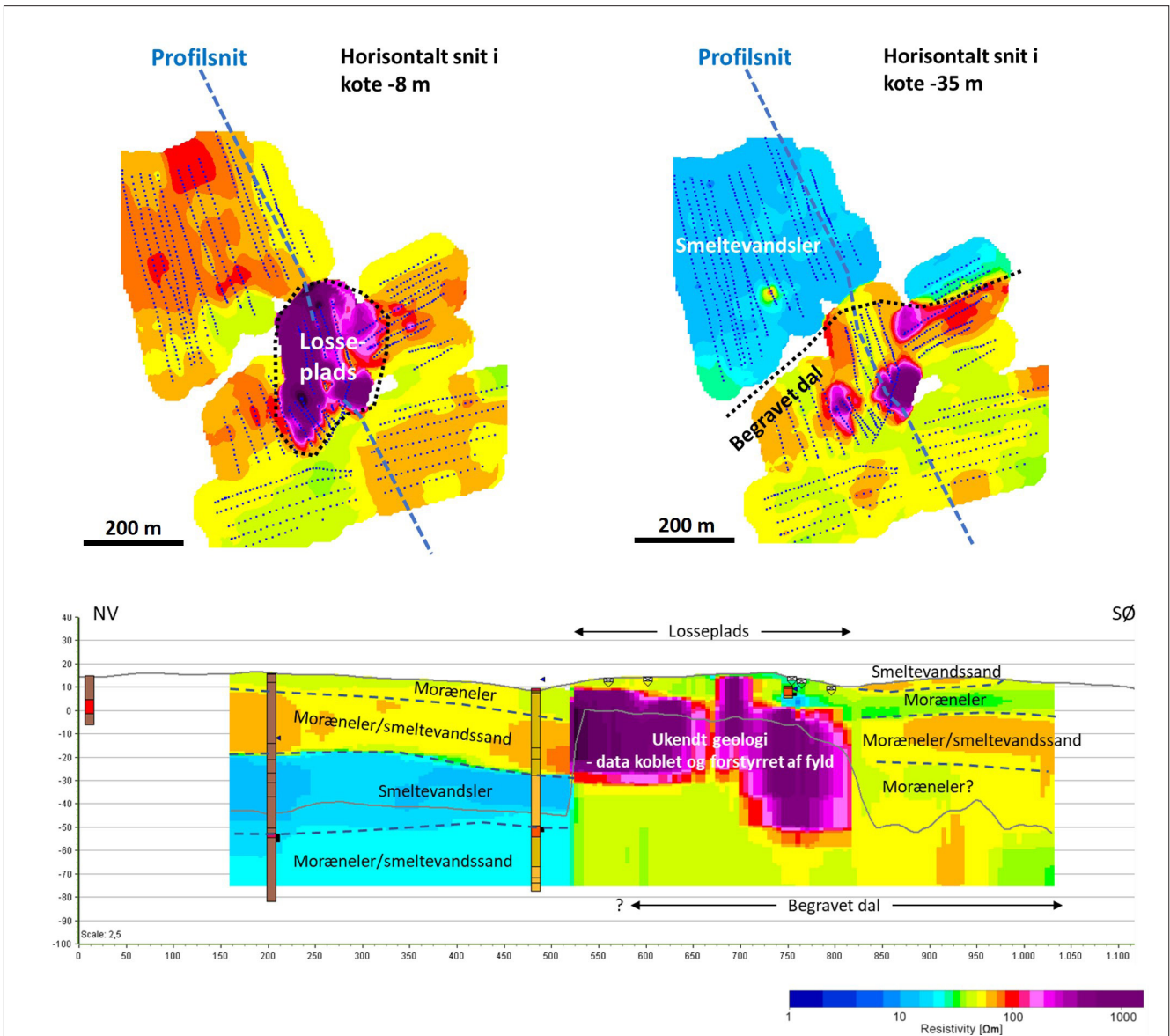
I en del af de kortlagte områder har det været muligt at kortlægge beskyttende lerlag under punktkilden. Ofte adskiller disse lerlag et primært grundvandsmagasin med terrænnært grundvand, som typisk er der, hvor forureningen er fundet. Er lerlaget tykt



Figur 3. Resultater af en tTEM-kortlægning fra Herning-området. Øverst ses et kort med en pesticid-forurening og en kildeplads for et vandværk. tTEM-data, boringer og profiler er også vist. Nederst ses to profilsnit gennem området (650 m lange og 70 m dybe). Det øverste går gennem punktkilden og kildepladsen. Her ses et terrænnært lavmodstandslag, tolket som miocænt ler (blå farver) og et dybereliggende højmodstandslag, tolket som miocænt sand/silt (rødlige farver). Det nederste profil viser ligesom det øverste, at lagserien er relativt homogen og uforstyrret i hele området.



Figur 4. Profilsnit gennem en tTEM-kortlagt PFAS-lokalitet vest for Århus. Profilet er 1400 m langt og ca. 110 m dybt. Geologien er komplekst opbygget formodentlig med en glacialtektonisk forstyrret lagserie i den venstre del af profilet og en dyb begravet dal i den højre del. Den begravede dal indeholder et stort grundvandsmagasin, som ikke umiddelbart ser ud til at være beskyttet af smeltevandsler tættest ved PFAS-lokaliteten.



Figur 5. Resultater fra en tTEM-kortlægning af en nu tildækket losseplads ved Harlev. Øverst ses to horisontale snit gennem tTEM-data. tTEM-sonderinger er vist med små blå prikker. Nederst ses en profilsnit gennem området (1100 m langt og 100 m dybt). Den grå streg viser den estimerede kortlægningsdybde – herunder er data usikre.

og hydraulisk tæt, vil det kunne beskytte det primære grundvandsmagasin, hvis det samtidigt er uforstyrret og har en stor udbredelse i nedstrøms retning. Her er det således afgørende at kende udbredelse, permeabilitet og forstyrrelsesgrad/variabilitet af lerlaget, og til kortlægning af sådanne forhold har tTEM vist sig at være et velegnet værktøj.

Figur 3 viser en sag fra Herning-området, hvor en pesticidforurening fra en maskinstation vurderedes at true den lokale vandindvinding. Forureningen blev fundet i en række korte borer på lokaliteten i terrænnært grundvand. Det generelle grundvandspotentiale for det primære grundvand i området indikerede en strømningsretning mod sydøst netop i retning af det lokale vandværks kildeplads kun 400 m væk. Resultatet af tTEM-kortlægningen viste et 5-25 m tykt lag med meget lave modstande i hele det kortlagte område. Dette lag befandt sig umiddelbart under det forurenede, terrænnære grundvand og ovenpå det regionale grundvandsmagasin (høje modstande). Den meget lave modstand af lerlaget indikerede et højt lerindhold og dermed en lav permeabilitet. Data viste også, at lerlaget var uforstyrret, og at det kunne antages at eksistere i de områder, hvor det ikke var muligt at indsamle data (langs veje og i skov). Oplysninger fra boredata viser, at lavmodstandslaget består af miocænt ler og at højmodstandslagene på større dybde består af miocænt sand og silt. Efter kortlægningen med tTEM lød risikovurderingen, at der kun var en meget lav eller ingen risiko for at pesticidforureningen ville kunne nå det primære grundvand og true vandforsyningen. Hvis ikke tTEM-kortlægningen var blevet udført, ville en tilsvarende sikker risikovurdering have krævet et stort antal dybe borer. Dette ville have været mange gange dyrere, og borer gennem lerlaget ville desuden kunne skabe lækage mellem det sekundære og det primære grundvand.

I andre tilfælde viser tTEM-kortlægningerne en noget mere varieret geologi. Her er grundvandets strømningsveje komplekse, og forureningsfaner er sværere at kortlægge og forudsige. Brudte og usammenhængende lerlag skaber lækage mellem grundvandsmagasiner, og strømningsretninger kan hurtigt skifte når grundvandet strømmer mellem magasiner, lag

og geologiske strukturer. Da tTEM kortlægger undergrunden i tre dimensioner, kan de rumlige forhold beskrives, hvilket er vigtigt når strømningsveje skal bestemmes. I Region Midtjylland ses mange af den slags lokaliteter, der er svære at håndtere på grund af usikkerhed på de geologiske og hydrogeologiske forhold. Når de geologiske strukturer er tilstrækkelig store, og modstandscontrasterne mellem aflejringerne er markante, har tTEM vist sig nyttig også under disse forhold.

Et eksempel på en kortlægning af en punktkilde i kompleks geologi ses i figur 4. Dette eksempel er fra et affaldsdepot med PFAS vest for Aarhus. tTEM-kortlægningen viser, at lokaliteten befinder sig ovenpå en glacialtektonisk forstyrret lagserie på kanten af en dyb begravet dal, som indeholder store og vigtige grundvandsreserver. Den begravde dal er i de øvre dele beskyttet af en tæt lagpakke af fed smeltevandsler, men netop op mod flanken af dalen ses lerlaget at tynde ud og forsvinde. Dermed viser data, at der formodentlig er fri hydraulisk kontakt mellem punktkilden og det dybe grundvandsmagasin. Denne viden har været meget vigtig for den fortsatte undersøgelse af lokaliteten, blandt andet fordi det har været muligt at optimere placeringen af undersøgelsesboringer, men også fordi antallet af disse er blevet reduceret betydeligt. Undersøgelsen er pågående, og omfanget af en eventuel forurening af de dybe grundvandsmagasiner kendes ikke endnu.

Et andet eksempel på en tTEM-kortlægning af en punktkilde i et område med kompleks geologi er fra Harlev vest for Århus (figur 5). Her undersøges i hvilket omfang en gammel tildækket losseplads lækker perkolat til grundvandet. Til venstre i figur 5 er vist et horisontalt snit i kote 8 m, og her ses lossepladsfyldet tydeligt med en meget høj modstand. Dette er et artefakt idet fyldet i lossepladsen forstyrrer data, men trods dette giver det en klar indikation af lossepladsens eksistens og udbredelse. Omkring lossepladsen ses moderate modstande svarende til blandede lag af smeltevandssand og moræneler. I snittet svarende til kote -35 m ses i den nordlige del med blå farver et lag af udbredt smeltevandsler. I den sydlige del har en dyb begravet dal borte-roderet dette lag, og dalen er udfyldt med blandede lag af moræneler og smeltevandssand.

Den dybe del af den begravde dal indeholder et værdifuldt grundvandsmagasin i området, og det er derfor vigtig information, at lossepladsen befinder sig ovenpå flanken af dalen.

## Perspektiver

tTEM-metoden er blevet udviklet i regi af EU Interreg projektet TOPSOIL og MapField, og brugen af metoden i forbindelse med jord- og grundvandsforening er også blevet udviklet i forbindelse med disse projekter. Da metoden er særdeles avanceret at anvende, kræves specialiseret viden og erfaring, både når det gælder indsamling, processing og bearbejdning af data, men også når det drejer sig om tolkning og anvendelse af data. Der er mange begrænsninger og faldgruber, og der er risiko for, at det fulde udbytte af en kortlægning ikke opnås, hvis kortlægningerne og fortolkningerne ikke udføres af personer med specialviden. Metodens anvendelse og udbredelse er i noget omfang begrænset af mangel på ovennævnte ude hos både rådgivere og regioner, og derfor er 4 af landets regioner, Miljøstyrelsen og WSP gået sammen om et Teknologi-Udviklings-Projektprojekt (TUP), der skal udbrede kendskabet til metoden og implementere den i regionernes arbejde med jord- og grundvandsforurening.

Næste skridt i udviklingen kunne være at kortlægge med drone. Dette vil gøre det endnu mere effektivt og lettere at indsamle data på alle tidspunkter af året, og der vil kunne indsamles data i svært tilgængeligt terræn. Der arbejdes på dette i nogle projekter, og det bliver interessant at følge udviklingen også med henblik på kortlægning af fx punktkildeforureninger som de her viste.

Endelig ville det være ønskeligt at kunne kortlægge nærmere bymæssig bebyggelse og tættere på øvrig infrastruktur. Dette problem er særdeles svært at løse, men enhver forbedring vil øge antallet af forureningssager der kan kortlægges.

## Referencer

/1/ Pedersen, J.B., Christiansen, A.V., Auken, E. & Sandersen, P. 2022: Geoscanner til overfladenær kortlægning. Vand & Jord nr. 4, s. 142-144.

FLEMMING JØRGENSEN (fljoer@rm.dk) er chefkonsulent ved Regional Udvikling, Region Midtjylland, Viborg.

# Land CRAFT



## - nyt pionercenter med fokus på en bæredygtig fremtid for landbruget

En grøn omlægning af de nuværende fødevarer-systemer, forvaltning af landskabet, reduktion af landbrugets miljøpåvirkninger samt tilpasning til klimaforandringer er med i visionen for Aarhus Universitets nye pionercenter Land-CRAFT.

Grøn omstilling betyder for landbruget en minimering af miljø- og klimaaftrykket. Det kræver en gennemgribende omlægning af eksisterende landbrugsmetoder og måder at forvalte landskabet på. Land-CRAFT er et nyt center på Aarhus Universitet, der netop fokuserer på landskab, landbrug, miljø og klima. Med fire skarpe forskningsområder, er målet at skabe det nødvendige videnskabelige grundlag for den grønne omstilling af landbruget:

1. Landskabsforsøg for at begrænse næringsstof- og drivhusgasstrømme
2. Digitale landskabsanalyser med droner og satellitter
3. Landskabsmodellering til simulering af vand, kulstof- og kvælstofstrømme fra landskabet
4. Samfundsøkonomi og dialog med interessenter om udnyttelse af landbrugsarealer og landskaber i den grønne omstilling

Du kan få mere information om Land-CRAFT på: <https://land-craft.dk>



## Støtte til Vand & Jord via abonnement eller sponsorat

Vand & Jord har en lang tradition for formidling af forskningsresultater og anvendt praksis inden for vand, miljø, klima og natur. Vi er dermed det eneste danske naturvidenskabelige tidsskrift, der kombinerer den direkte formidling af forskningsresultater og anvendt praksis fra rådgivning og forvaltning.

Vand & Jord finder den naturvidenskabelige formidling særdeles vigtig og med en gratis elektronisk udgave, når vi ud til en langt større målgruppe, der udover den nuværende læsergruppe også omfatter danske gymnasieelever og universitetsstuderende. Vi opfordrer Vand & Jords læsere, der ønsker at modtage den gratis elektroniske version til at tilmelde sig nyhedsbrevet på Vand & Jords hjemmeside <http://vandogjord.dk>

Udgivelsen af Vand & Jord kræver ressourcer til opsætning af bladet samt til trykning og omdeling. Finansieringen sker dels via abonnementsindtægter samt sponsorater. En stor tak til de danske universiteter, virksomheder og fonde, der støtter udgivelsen af Vand & Jord via et sponsorat, samt en tak til vores trofaste abonnenter. Tidsskriftet er endnu ikke fuldt finansieret via sponsorater, og vi har derfor stadig brug for abonnementsindtægter. Vi søger derfor fortsat universiteter, virksomheder og fonde, der vil bidrage til at sikre den brede danske naturvidenskabelige formidling via et sponsorat.

Vi tilbyder to typer af sponsorater:

- (1) Sponsorat på årligt kr. 25.000 + moms. Sponsorater giver mulighed for én helsidesannonce i hvert nummer samt omtale med logo sammen med øvrige sponsorer, der støtter udgivelsen af bladet.
- (2) Sponsorat på årligt kr. 15.000 + moms. Sponsoratet giver omtale med logo sammen med øvrige sponsorer, der støtter udgivelsen af bladet.

Henvendelse vedr. sponsorat til Claus Hagebro på mail: [hagebro3@hotmail.com](mailto:hagebro3@hotmail.com)

For private og organisationer, der ikke har mulighed for at støtte via sponsorat, vil det fortsat være muligt at støtte udgivelsen af Vand & Jord via en abonnementsaftale, se mere på <http://vandogjord.dk>