

Geofysik kortlægger grundvandsforurening

Geofysiske DCIP-målinger kan nu anvendes til at kortlægge grundvandsforurening. Der er i de seneste år sket en stærk forbedring af de geofysiske DCIP-målemetoder i form af opløsning, databehandling og fortolkning af målingerne. Udviklingen har muliggjort, at resultaterne af geofysikken nu kan anvendes til at opnå en bedre forståelse af forureningskemien og udbredelsen af en grundvandsforurening. Tolkningen er dog ikke simpel, og der er fortsat et behov for at udvikle forståelsen af sammenhængen mellem de geofysiske DCIP-målinger og forureningskemien, så resultater ikke overfortolkes eller fejlfortolkes.

POUL L. BJERG, NICOLA BALBARINI, VINNI RØNDE, ANDERS VEST CHRISTIANSEN, PRADIP MAURYA, GIANLUCA FIANDACA, ESSEN AUKEN, INGELISE MØLLER & MADS GEORG MØLLER

Forureningsundersøgelser og målinger af jordens resistivitet

Der er mange forurenede grunde i Danmark, som skal undersøges for at vurdere risikoen for grundvandsforurening og mulighederne for oprensning af forureningen. Forureningsundersøgelser omfatter traditionelt feltundersøgelser med udtagning af jord- og vandprøver, som analyseres for forureningsstoffer. Der er i de senere år sket en rivende udvikling, så der kan udtages jord- og vandprøver med mange forskellige metoder ud over de traditionelle filtersatte borer. Boremetoder med forskellige prober (sonderinger), som trykkes eller hamres ned i undergrunden, er blevet meget udbredt. På trods af denne udvikling er traditionelle borer stadig en stor post på undersøgelsesbudgettet. Fælles for borer og sonderinger med

prober er, at de udelukkende bidrager med punktobservationer. Det er derfor attraktivt, hvis man indledningsvist i en forureningsundersøgelse vha. geofysiske målinger kan få oplysninger om den rumlige geologi, hydrogeologi og forureningsudbredelse, da denne viden både kan anvendes til at identificere den optimale placering af borer og probe-sonderinger og til at binde punktmålingerne sammen (interpolere).

Geofysiske målemetoder, som måler undergrundens elektriske egenskaber, har gennemgået en betydelig udvikling med hensyn til rumlig opløsning, databearbejdning og fortolkning, som det er beskrevet i Christiansen et al. (dette nummer). Der kan nu indsamles geofysiske data fra jordoverfladen i 3 dimensioner eller fra in-situ målinger i borer med oplysninger om jordlagenes elektriske modstand (resistivitet) og opladningsevne (chargeability) med den såkaldte DCIP (direct current resistivity and induced polarization) metode. Sådanne oplysninger er velegnede til at fortolke de geologiske forhold i undergrunden (Møller et al., dette nummer), men kan også bruges til at beregne den hydrauliske ledningsevne (Christiansen et al., dette nummer).

I GEOCON har vi undersøgt og udviklet disse nye muligheder, så geofysiske målinger og især DCIP i fremtiden kan bruges som en metode til at:

- Planlægge forureningsundersøgelser for optimal placering af nye borer
- Forbedre kendskab til de geologiske og hydrogeologiske forhold og herunder beregne den hydrauliske ledningsevne i 2 eller 3 dimensioner
- Kortlægge uorganiske forureninger i detaljer ved fx gamle lossepladser
- Forbedre interpolationer mellem punktmålinger fra eksempelvis borer og sonderinger.

I projektet har der også været fokus på at afklare mulighederne for at kortlægge miljøfremmede organiske stoffer, som ikke i sig selv bevirker ændringer i den målte resistivitet. I denne artikel vil vi belyse muligheder og udfordringer samt faldgruber i forhold til denne problemstilling.

Hvordan hænger forurening og resistivitet sammen?

Jordlagenes samlede ledningsevne (σ_{total} , den inverse af resistiviteten) målt med DCIP

Box 1: Overblik over de metoder til at kortlægge uorganiske og organiske forureninger i grundvandsfaner i forurenede områder.

Metode/Stoffer	Koncept/ide	Anvendelsesmuligheder	Fordele	Ulemper
Metode 1	Korrelation mellem Formationens modstand og EC_{vand}	Velegnet til kortlægning af uorganiske forureninger med salte som chlorid, calcium, natrium og kalium ved gamle lossepladser	Let at forstå sammenhængen. Er veldokumenteret. Kan understøtte placering af nye boringer.	Fungerer bedst ved god kontrast mellem formationens modstand og EC_{vand} *
Uorganiske stoffer/ioner				
Metode 2	Korrelation mellem EC_{vand} /ionstyrke og organiske stoffer	Anvendelig ved kortlægning af miljøfremmede stoffer ved gamle lossepladser, hvor der er en statistisk sammenhæng mellem ionstyrke og organiske forureningstoffer	Velegnet til at interpolere mellem boringer. Kan understøtte placering af nye boringer.	Der skal etableres en statistisk sammenhæng. Den statistiske sammenhæng er kun gældende for den specifikke lokalitet.
Miljøfremmede organiske stoffer				
Metode 3	Korrelation EC_{vand} /ionstyrke og organiske stoffer. Nedbrydning af organiske stoffer danner ioner, som korrelerer med EC.	Anvendelig ved kortlægning af miljøfremmede stoffer ved alle typer af lokaliteter, hvor der er en statistisk sammenhæng mellem uorganiske redoxindikatorer og organiske forureningstoffer	Velegnet til at interpolere mellem boringer. Kan understøtte placering af nye boringer. Kan anvendes ved lokaliteter, hvor der ikke er "samdeponeret" uorganiske stoffer	Sværere at fortolke. Der skal etableres en statistisk sammenhæng. Den statistiske sammenhæng kan være stedsspecifik inden for den samme lokalitet.
Miljøfremmede organiske stoffer				

*Dette gælder for alle 3 metoder.

er en kombination af ledningsevnen fra jordens forskellige bestanddele. Ved målinger i sand- og grusaflejringer uden ler er det særligt porevandets ledningsevne (EC_{vand}), der har betydning. Sammenhængen mellem σ_{total} og EC_{vand} kan udtrykkes med en simpel relation kaldet Archies lov:

$$\sigma_{\text{total}} = EC_{\text{vand}} \frac{1}{F}$$

F kaldes formationsfaktoren og er typisk mellem 3 og 8. EC_{vand} kan måles ved udtagning af vandprøver. Hvis man har samørende værdier af jordens totale ledningsevne og EC_{vand} kan formationsfaktoren bestemmes.

Hvis man har nogenlunde homogene geologiske forhold vil variationer i jordens samlede ledningsevne således beskrive variationer i porevandets ledningsevne. Dette kan vi udnytte, når vi vil kortlægge foreningsudbredelsen i jorden. Flere ioner i porevæsken afspejler sig i en højere elektrisk ledningsevne i porevandet og giver dermed også en effekt på jordens samlede ledningsevne.

Dette forhold har været udnyttet i mange år ved fx kortlægning af grundvandsforureninger ved gamle lossepladser, hvor der er et forhøjet indhold af uorganiske stoffer (ioner) såsom chlorid, natrium og kalium. Det nye er, at metoden er blevet meget mere følsom, og kortlægningen kan således blive mere detaljeret (Christiansen et al., dette nummer). Samtidigt har der i litteraturen været vist eksempler på, at metoden også kan bruges til at kortlægge ikke blot uorganiske forureninger, men også

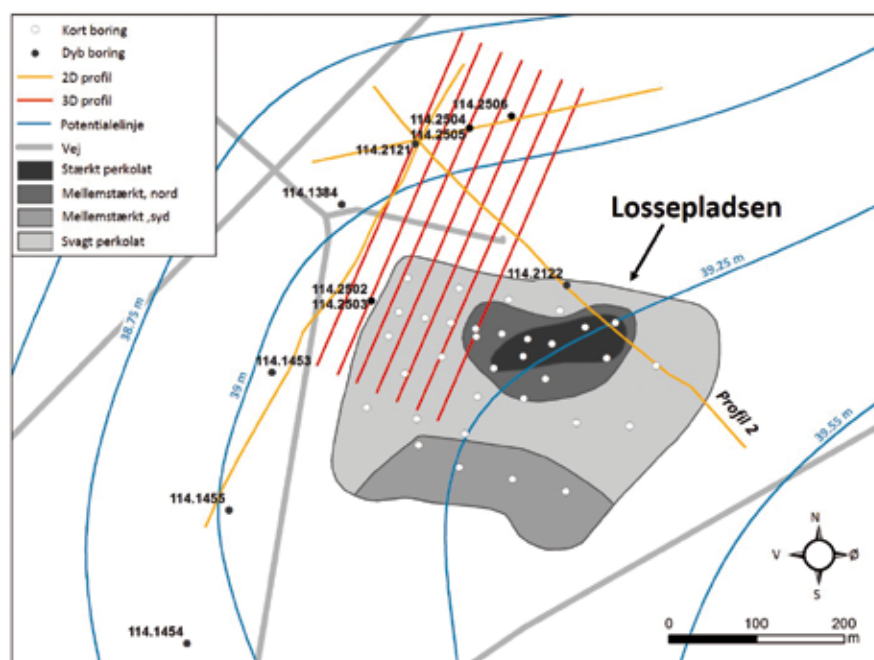
miljøfremmede organiske stoffer. Dette har givet anledning til lidt forvirring om, hvilke forureninger der egentlig kan kortlægges med DCIP.

Der er tre måder, som DCIP kan bidrage til kortlægning af forureninger i grundvandet:

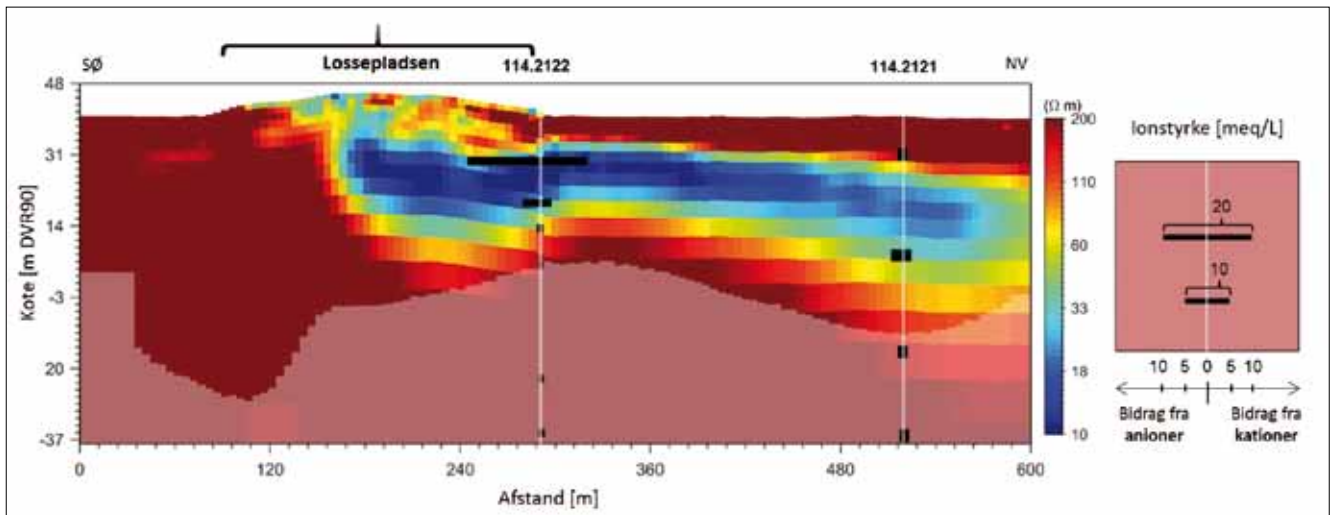
- **Metode 1: Korrelation mellem jordens samlede ledningsevne og porevandets EC.** Forureningen kan kortlægges, ved at der er en statistisk sammenhæng mellem jordens samlede ledningsevne og porevandets EC. Den høje EC skyldes et højt indhold

af ioner i vandet. Dette er den simpleste metode og kan give meget fine resultater ved forureninger med lossepladsperkolat i sandede aflejringer.

- **Metode 2: Korrelation mellem porevandets EC og et organisk forureningsstof.** Forureningen kan kortlægges, ved at der eksisterer en statistisk sammenhæng mellem EC og et organisk forureningsstof. Den høje EC skyldes igen et højt indhold af ioner i vandet, og ikke den organiske forurening, som ikke i sig selv giver EC signal. Det kan



Figur 1: Oversigt over undersøgelser, geofysiske profiler (DCIP) og boringer ved Grindsted Losseplads. Modificeret figur fra Maurya et al. (2017)



Figur 2: Kortlægning af forureningsfanen ved Grindsted Losseplads ved hjælp af resistivitetsmålinger (Profil 1). Figuren viser også sammenligningen med ionstyrke, som er et mål for de uorganiske ioner. Modificeret figur fra Maurya et al. (2017)

fx, forekomme ved en losseplads, hvor der er højt indhold af uorganiske stoffer i de samme områder af forureningsfanen, hvor der er høje indhold af organiske forureningsstoffer. Denne sammenhæng er ofte historisk betinget.

- **Metode 3: Nedbrydning af organiske stoffer danner ioner, som korrelerer med EC.** Nedbrydning af fx benzen kan give ændringer i grundvandskemien. Der kan skabes iltfattige forhold og dannes opløst, reduceret jern og måske forøget alkalinitet på grund af nedbrydning af benzen til kuldiioxid. Disse ioner forøger porevandet EC. Hvis der er korrelation mellem disse ioner og fx benzen, kan DCIP anvendes til at forudsige udbredelsen eller forbedre kortlægningen af benzen i grundvandet.

I Box 1 er muligheder, fordele og ulemper for at anvende DCIP til at kortlægge forskellige forureningstyper med de tre metoder op-

summeret. I de næste afsnit er konceptet i metoderne uddybet, og anvendelsen af de tre metoder er illustreret ved eksempler fra undersøgelserne ved Grindsted Losseplads og Grindsted Å.

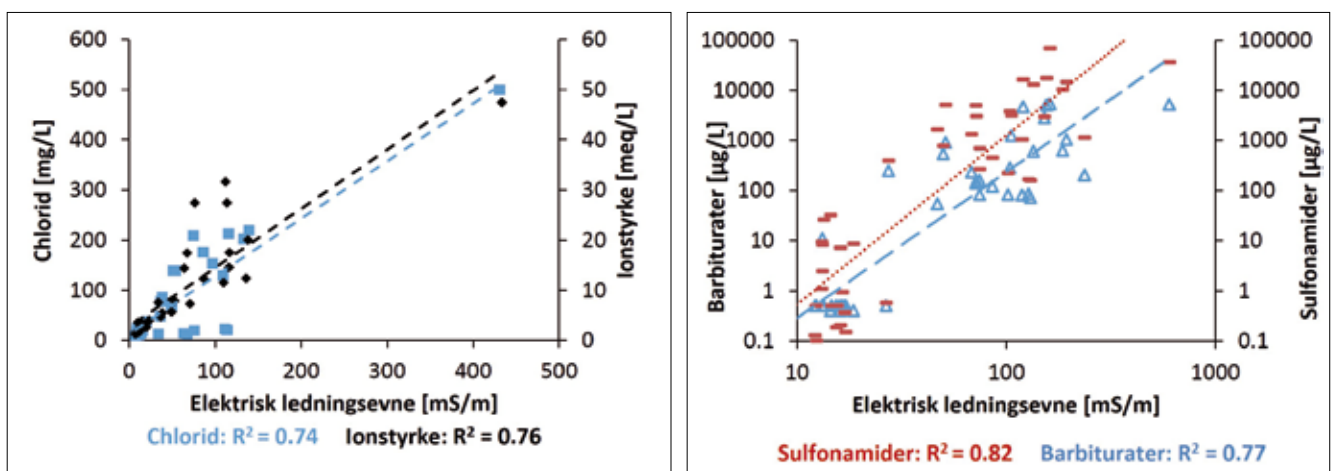
Forureningsfanen ved Grindsted Losseplads

Grindsted Losseplads er en gammel losseplads uden beskyttelse af grundvandet i form af membran eller opsamling af perkolat (se Bjerg et al., dette nummer; Bjerg og Kjeldsen, 2010). Grundvandsstrømningen i de kvartære og miocæne sandaflejringer er nordvestlig (figur 1). Der er i lossepladsen deponeret en blanding af husholdningsaffald, bygningsaffald og kemisk affald fra det gamle Grindstedværk, som har skabt en betydelig grundvandsforurening nedstrøms lossepladsen. Perkolatets styrke udtrykt som EC_{vand} eller ionstyrke i grundvandet under lossepladsen varierer, som det fremgår af figur 1 (angivet som svagt til

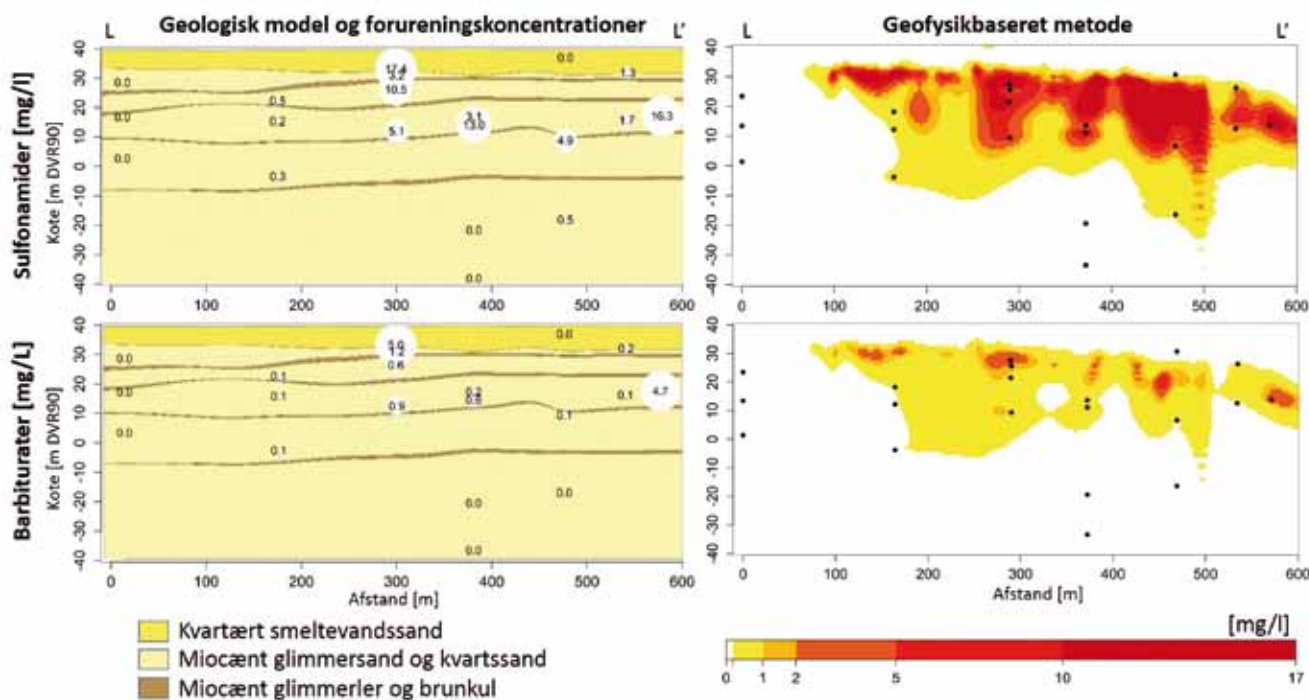
stærkt perkolat).

På figur 2 er vist en måling af undergrundens modstand (resistivitet) i en linje gennem lossepladsen fra sydøst mod nordvest. Profilet følger nogenlunde grundvandet strømningsretning og viser, hvordan metode 1 kan anvendes i praksis (Box 1). De blå, kolde farver viser meget lave modstande svarende til høje ledningsevner af formationen. Sandlagene har nogenlunde den samme elektriske modstand langs profilet og over dybden. Resultaterne viser derfor næsten direkte den rumlige variation af EC_{vand} eller ionstyrken af porevandet ifølge Archies lov.

Det fremgår, at forureningsfanen dykker gradvist med afstanden fra lossepladsen. Nedsynkningen skyldes infiltration og måske densitetsbetinget strømning på grund af et meget højt indhold af uorganiske ioner i perkolatet tæt ved lossepladsen. På figur 2 er også angivet ionstyrken i vandprøver udtaget i borer langs denne linje. Resultaterne fra disse passer



Figur 3: Sammenhæng mellem geofysiske målinger (DCIP) og vandkemiske parametre ved Grindsted Losseplads. Venstre Korrelation mellem elektrisk ledningsevne og ionstyrke og chlorid. Højre: Korrelation mellem elektrisk ledningsevne og sulfonamider og barbiturater. Modificeret figur fra Balbarini (2017)



Figur 4: Kortlægning af forureningsfanen ved Grindsted Losseplads (kombination af Profil 2 og 3, den stiplede linie indikerer hvor de to profiler mødes). Modificeret figur fra Balbarini (2017)

fint med de målte modstande ved DCIP. Som det fremgår af figur 1, er der udført en række andre geofysiske målinger i både 2 og 3 dimensioner ved lossepladsen, så man samlet set har forbedret kortlægningen af forureningsudbredelsen betydeligt. Resultaterne kan både bruges til at placere nye borer optimalt samt at binde punktmålinger sammen ved interpolering. En af styrkerne ved metode 1 er, at den er baseret på en årsagssammenhæng mellem de uorganiske ioner og den elektriske modstand, så resultaterne er lette at fortolke. Disse resultater er publiceret i sin helhed i en artikel af Maurya et al. (2017).

Målinger med DCIP fortæller ikke noget om fordelingen af ioner i den uorganiske forureningsfane. Der vil dog ved mange forureningsfaner fra gamle lossepladser være en sammenhæng (statistisk korrelation) mellem specifikke ioner og EC_{vand} . Dette er også tilfældet ved Grindsted losseplads, som det er vist på figur 3 for chlorid. Dermed vil DCIP-målingerne i 2 eller 3 dimensioner også give et fint billede af indholdet af chlorid i grundvandsmagasinet.

Kan miljøfremmede organiske stoffer kortlægges?

Ved forureningsundersøgelser er man ofte mere interesseret i udbredelsen af de miljøfremmede organiske stoffer, som er de vigtigste for risikovurderingen af en forurenet grund. Mange miljøfremmede stoffer er uladede (fx benzinstoffer og chlorerede opløsningsmidler) og giver derfor ikke en æn-

dring i det elektriske signal. Ladede (ioniske) miljøfremmede stoffer giver i princippet en ændring, men da de i forureningsfaner kun vil være tilstede i meget lave koncentrationer (mikrogram/l), vil ændringen ikke være målbar med DCIP-målinger.

I stedet kan det undersøges, om der er en statistisk sammenhæng mellem vandets ledningsevne og de specifikke miljøfremmede stoffer. Ved Grindsted losseplads er de vigtigste problemstoffer medicin- og pesticidstoffer, som stammer fra det tidligere Grindstedværk. Det viser sig, at der er en god korrelation mellem EC_{vand} og sulfonamider/barbiturater (figur 3). Dette skyldes, at medicin- og pesticidstofferne er deponeret sammen med en række uorganiske stoffer, og således er området med stærkt perkolat med høje værdier for EC_{vand} sammenfaldende med høje koncentrationer af medicin- og pesticidstoffer (se figur 1). Dermed kan DCIP målingerne og anvendelse af metode 2 (se box 1) understøtte tolkningen, samt kortlægningen af forureningen med medicin- og pesticidstoffer, som det er vist på figur 4.

På baggrund af resultaterne ved Grindsted, er det således oplagt at anvende DCIP ved fremtidige undersøgelser af forureningsfaner ved gamle lossepladser. Metoden virker bedst, hvor der er en høj kontrast imellem modstanden i EC_{vand} og formationen, som det er tilfældet i Grindsted. Det vil sige ved høj modstand af formationen (fx i en sandet aflejring) og høje koncentrationer af uorganiske ioner (høj EC_{vand}). Der er behov for yderligere undersøgelser i andre typer af aflejringer og forure-

ningsfaner fra lossepladser for at give mere specifikke retningslinjer for anvendelsen af metoden.

Kan vi kortlægge redoxforhold, benzinstoffer og chlorerede opløsningsmidler i grundvandet?

I det hidtidige eksempel fra Grindsted Losseplads har der været et stærkt uorganisk signal, som kunne måles i forureningsfanen med DCIP. De miljøfremmede stoffer kunne kortlægges, fordi deres udbredelse korrelerede med den uorganiske forurening. Ved mange forurenede grunde fx benzinstationer, renses- og værksteder og industrigrunde er der ikke deponeret uorganiske stoffer. Der vil primært være en forurening med miljøfremmede organiske stoffer såsom benzinstoffer og chlorerede opløsningsmidler, der ikke i sig selv giver et målbart elektrisk signal.

Spørgsmålet er, om geofysikken kan hjælpe os i disse tilfælde.

Ved nedbrydning af benzinfureninger sker der en ændring af redoxforholdene i grundvandet (Christensen et al., 2000). Der vil ske et forbrug af elektrondonorer (ilt, nitrat, mangan, jern, sulfat) og en dannelse kuldioxid. Jern og mangan er i iltet form tilstede i jorden som hydroxider/oxider, som bliver omdannet til vandopløselige mangan og jernforbindelser på ionform. Den opløste kuldioxid findes på ionform som alkalinitet (hydrogen-carbonat). Dermed er der en række ioniske forbindelser, som i princippet kan give et ledningsevne signal, der kan måles med DCIP.

Signalet fra disse redoxindikatorer er ofte tæt sammenknyttet med forekomsten af de nedbrydelige organiske forbindelser. Der er ingen garanti for at høje koncentrationer korrelerer med stofferne, som nedbrydes, da de kan være forsvundet som følge af nedbrydning opstrøms målepunktet og/eller redoxindikatorerne kan være transporteret hurtigere nedstrøms end de organiske forbindelser.

Der kan også være organiske stoffer, som nedbrydes under specielle redoxforhold, så deres nedbrydningsprodukter fortrinsvis findes under disse forhold. Det gør sig fx gældende for nedbrydningen af trichlorethylen til dichlorethylen og videre til vinylchlorid, som kun sker under meget reducerede redoxforhold. Her kan der være en sammenhæng mellem koncentrationen af opløst jern og vinylchlorid. I dette tilfælde skyldes forekomsten af de høje jernkoncentrationer ikke dannelsen af vinylchlorid, men blot at redoxforholdene indikeret ved høje jernkoncentrationer er gunstige for nedbrydning af trichlorethylen til vinylchlorid.

Der kan i nogle tilfælde etableres en statistisk sammenhæng mellem redoxparametrene og de specifikke miljøfremmede organiske forbindelser (Box 1, metode 3). Det var bl.a. tilfældet ved forureningsfanen fra Grindstedværket ved Grindsted Å (Balbarini, 2017). Dermed kunne kortlægningen af benzen, dichlorethylen og vinylchlorid forbedres ved at interpolere punktmålinger af forureningskoncentrationer ved brug af de geofysiske målinger.

Anvendelse af metode 3 er dog stadig under udvikling, og i mange tilfælde vurderes gevinsten ved metoden at være begrænset i forhold til forureningskortlægning. Det er dog stadig meget vigtigt at være opmærksom på, at ændringer i den elektriske modstand i en forureningsfane ikke blot skyldes geologiske variationer. I en sandet aflejring kan et fald i den elektriske modstand være tegn på ændringer i vandkemien, som kan skyldes ændringer i redoxforhold forårsaget af nedbrydning. Tilsvarende skal faldende modstand ikke automatisk fortolkes som et lerlag, da det kan

skyldes en forurening. Ved at anvende samtolkning af DC (resistivitet) og IP (opladningsevne) signaler kan dette løses, hvilket er en af DCIP-metodens absolutte styrker i forhold til traditionelle målinger, der kun ser på resistiviteten. Dette er diskuteret i større detalje i Christiansen et al. (dette nummer).

For at lette fortolkningen af disse komplicerede sammenhænge kan det være hensigtsmæssigt at udtage vandprøver, som både analyseres for alle indflydelsesrige ioner og relevante miljøfremmede stoffer. Dermed får man indsigt i redoxforholdene, samt klar besked om, hvilke stoffer der primært bidrager til ionstyrken/elektrisk ledningsevne. Med disse data i hånden kan man meget mere kvalificeret vurdere årsagerne til overraskende ændringer i den elektriske modstand i undergrunden.

For at få det fulde udbytte af DCIP-målinger ved forureningsundersøgelser er det derfor essentielt at planlægning af undersøgelserne, samt fortolkning af geologiske, hydrogeologiske og forureningskemiske data foretages i et samarbejde mellem forskellige faggrupper.

Konklusion

I GEOCON har vi undersøgt og udviklet, hvordan geofysiske målinger og især DCIP i fremtiden kan bruges som en metode til at planlægge forureningsundersøgelser (placere borer og sonderinger) samt kortlægge forureninger. Det er demonstreret at DCIP-målinger kan bidrage med detaljeret kortlægning af uorganiske forureninger ved fx gamle lossepladser.

I projektet har der også været lagt vægt på at belyse mulighederne for at kortlægge miljøfremmede organiske stoffer, som ikke i sig selv giver et ledningsevne signal. Hvis der er en korrelation mellem den elektriske ledningsevne og et organisk stof, er der udviklet en metode, som kan forbedre kortlægningen. Metoden er afprøvet i forureningsfanen ved Grindsted losseplads, hvor den giver gode resultater.

Ved andre typer af forureningskilder er der typisk ikke deponeret uorganiske stoffer sam-

men med de miljøfremmede organiske stoffer. Nedbrydning af organiske stoffer kan danne uorganiske ioner, som giver ændringer i ledningsevnen. Disse sammenhænge og ændringer kan med omtanke bruges til at forbedre kortlægningen af organiske stoffer i grundvandet.

Referencer

- Balbarini, N., (2017). Modelling tools for integrating geological, geophysical and contamination data for characterization of groundwater plumes. Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark. PhD Thesis.
- Bjerg et al. (Dette nummer).
- Bjerg, P.L.; Kjeldsen, P. (2010). Grindsted gamle losseplads – en sammenfatning af DTU's forskningsresultater. Institut for Vand og Miljøteknologi, Danmarks Tekniske Universitet & Region Syddanmark, Kgs. Lyngby.
- Christensen, T.H.; Bjerg, P.L.; Banwart, S.; Jakobsen, R.; Heron, G.; Albrechtsen, H.-J. (2000). Characterization of redox conditions in groundwater contaminant plumes. *Journal of Contaminant Hydrology*, 45, 165-241.
- Christiansen et al. (Dette nummer).
- Maurya, P. K., V. K. Rønde, G. Fiandaca, N. Balbarini, E. Auken, P. L. Bjerg, and A. V. Christiansen, (2017), Detailed landfill leachate plume mapping using 2D and 3D Electrical Resistivity Tomography - with correlation to ionic strength measured in screens: *Journal of Applied Geophysics*, v. 138, p. 1-8.
- Møller et al. (Dette nummer).
- POUL L. BJERG, DTU Miljø, Danmarks Tekniske Universitet
NICOLA BALBARINI, DTU Miljø, Danmarks Tekniske Universitet
VINNI RØNDE DTU, Miljø, Danmarks Tekniske Universitet
ANDERS VEST CHRISTIANSEN, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet
PRADIP MAURYA, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet
GIANLUCA FIANDACA, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet
ESBEN AUKEN, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet
INGELISE MØLLER, De nationale geologiske undersøgelser for Danmark og Grønland
MADS GEORG MØLLER, Orbicon, Høje Tåstrup