

3D-kortlægning af hydraulisk ledningsevne med nye geofysiske målinger

Geofysiske målinger med induceret polarisation kan give estimater af jordens hydrauliske egenskaber ud over den vanlige litologi-information (sand, ler, kalk, osv). Det er jordens evne til at oplade og aflade en strøm der måles på, og metoden har været kendt længe, men med nylige instrumentforbedringer og øget computerkraft er det muligt både at måle signaler i tilstrækkelig detalje samt at fortolke dataene efterfølgende. Disse forhold betyder, at det nu er muligt at foretage en rumlig bestemmelse af den hydrauliske ledningsevne, hvilket giver helt nye muligheder til kortlægning af grundvandsmagasiner.

ANDERS VEST CHRISTIANSEN, GIANLUCA FIANDACA, PRADIP KUMAR MAURYA, INGELISE MØLLER, ESSEN AUKEN, NICOLA BALBARINI & POUL L. BJERG

Målinger af Induceret Polarisation (IP) er en udvidelse af den mere velkendte geoelektriske metode. I den geoelektriske metode injiceres en strøm i jorden gennem et sæt stålspyd, og henover et andet sæt stålspyd måles den resulterende spændingsforskel. Den målte spændingsforskel omsættes normalt til en resistivitet, som er et udtryk for jordens evne til at lede elektriske strøm. Ofte refereres resistivitet blot til som "modstand". Resistiviteten afhænger af materialet i jorden, samt porøsiteten og porevæskens resistivitet. Fx er ler karakteriseret ved en lav resistivitet, mens tørt sand ligger i den anden ende af spektret med en meget høj resistivitet.

Med IP-metoden måles ikke bare jordens resistivitet, men også dens op- og afladningsevne. En skitse af dette kan ses i figur 1a. Når man ikke sender strøm i jorden er ionerne i porevæsken i ligevægt som angivet i det første billede, hvor kationerne ligger som en sky

omkring et korn med en negativt ladet overflade. Når man injicerer en strøm i jorden påtrykker man et eksternt elektrisk felt (E-felt), og dette E-felt vil få frie ioner til at bevæge sig i porerummet som vist på det midterste billede. Når det eksterne E-felt slukkes igen (eller retningen vendes) vil ionerne bevæge sig tilbage mod udgangspositionen. Flytningen af ionerne kan ses som en opladnings- og afladningseffekt, der foregår i porerummet.

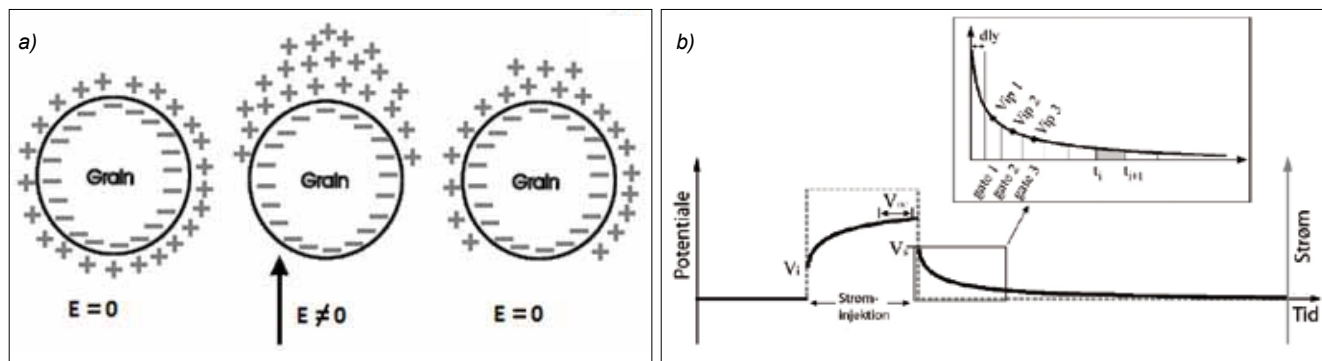
I Figur 1b kan det ses, hvordan IP-effekten giver sig udslag i et potentiale, der bygger langsomt op inden det rammer et plateau. Un-

der en IP-måling er det potentialet under hele denne opladning og afladning, der måles i en række "vinduer" kaldet gates.

Det der gør IP-effekten interessant er, at formen og længden på afladningsforløbet kan korreleres med karakteristiske egenskaber ved porerummet. Således vil fx tilstedeværelsen af lermineraller give en stor amplitude på IP-signalet, mens henfaldets længde er sigende for kornenes størrelse. Når der måles med geoelektriske metoder, hvor det kun er jorden elektriske ledningsevne der anvendes, kan man ikke skelne fx et lerlag fra et sandlag

Resistivitet, Induceret polarisation og hydraulisk konduktivitet

	Symbol	Relation	Enhed	Note
Resistivitet	ρ	$\rho = 1 / \sigma$	Ωm	Kaldes også "specifik elektrisk modstand", ofte blot "modstand"
Elektrisk ledningsevne	σ	$\sigma = 1 / \rho$	S/m	(mS/m) og ($\mu\text{S}/\text{cm}$) anvendes også. Kaldes EC når der refereres til porevæske
Hydraulisk ledningsevne	K	$K = (k \cdot d \cdot g) / \eta$	m/s	(cm/dag) anvendes også d = densitet g = tyngdeaccelerationen η = viskositet
Permeabilitet	k	$k = (K \cdot \eta) / (d \cdot g)$	m^2	d = densitet g = tyngdeaccelerationen η = viskositet



Figur 1. IP effekten. I a) vises hvordan man ved at generere et eksternt elektrisk felt kan flytte ioner omkring et korn, og når feltet fjernes igen vil ladningsforskydningen gå tilbage mod udgangspunktet. I b) vises hvordan denne effekt giver sig udslag i en opladnings- og afladningseffekt når man måler potentialet resulterende fra en strøminjektion i jorden. Det lille indsatte plot viser forstørret den del hvor målingen foretages over en række "gates" (vinduer) under afladningen af jorden.

med en stærkt ionholdig porevæske (fx en forurening). Med IP-metoden kan man skille disse ting ad, da lerlagene vil give et klart IP-signal, hvorimod et sandlag med tilsvarende resistivitet ikke vil give et IP-bidrag.

Ved at måle IP signalet har vi således direkte fat i parametre, der relaterer sig til hydrauliske egenskaber, og man har igennem laboratorieeksperimenter vist, at den hydrauliske konduktivitet kan bestemmes empirisk direkte ud fra målinger af IP-effekten.

Nye instrumenter og målemetoder

I klassiske geoelektriske måleinstrumenter har man ikke interesseret sig for IP-effekten, der udelukkende blev set som en støjkilde, man skulle undgå at måle på. Man målte derfor udelukkende på den del af kurven, hvor plateauet er nået (ideelt set). Det er VDC i Figur 1b. Dette er relativt simpelt, idet man blot skal "vente" længe nok, indtil IP-effekten er overstået og så foretage sin måling. Med IP-målingerne er det nu pludselig dette støj-signal, der er blevet til data. I figur 1 er IP-signalet dog stærkt overdrevet i skala, da det i praksis er mange gange mindre. Dette stiller store krav til instrumenterne, som først

er blevet honoreret i de nyeste generationer af instrumenter fra bl.a. svenske ABEM. Disse instrumenter måler i praksis hele forløbet af potentialet, hvilket generer meget store datamængder, men som også giver nye muligheder for avanceret behandling af dataene. Bl.a. er data påvirket af støj fra 50 Hz forsyningsnettet, som skal filtreres væk, inden dataene kan anvendes. Når dataene er færdigbehandlet, er hvert henfald repræsenteret af typisk 20 måleværdier – gates, startende fra ca. 2 millisekunder efter strømmen slukkes og ud til omkring 4 sekunder som vist i den lille figur i Figur 1b. Det er afgørende, at man kan måle nøjagtige data over hele tidsspændet for at kunne omsætte til pålidelige hydrauliske parametre.

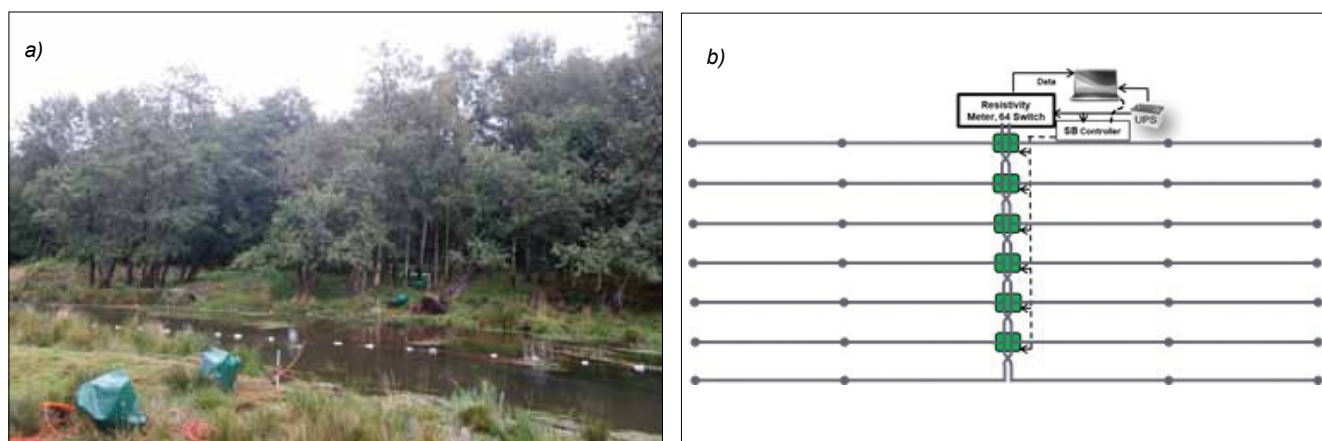
Med de nye instrumenter har vi i GEOCON målt på 3 forskellige måder: Målinger med ellog under snele boring, 2D målinger fra overfladen med elektroder langs et profil og 3D målinger fra overfladen med elektroder distribueret i et målenet $1/1$. Figur 2 viser et feltbillede af 3D-installationen i området ved Grindsted Å. En del af elektroderne kan ses ude i åen. Totalt set opererer dette udstyr med 448 elektroder, hvilket giver nærmest

uandede muligheder for målekombinationer til at dække undergrunden med 3D målinger. I de datasæt der er præsenteret her, er der målt knap 10.000 datasæt, hvilket tager omtrentligt 20 timer at gennemføre. Selve opsætningen af måleudstyret tager i samme størrelsesorden. 2D målinger langs et profil er at sammenligne med 3D målingerne, men hvor der kun måles langs én af linjerne i Figur 2b, og dette er derfor meget hurtigere i felten, og generer langt færre data, ligesom data også kun kan fortolkes i 2D.

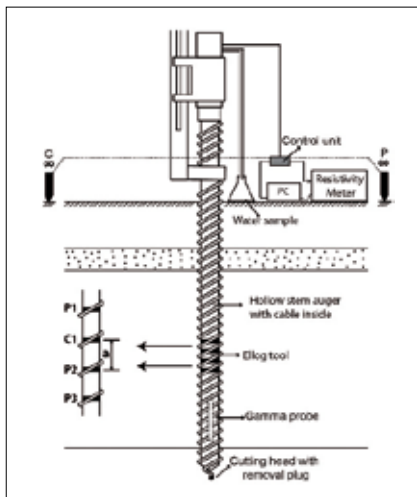
Endelig kan instrumentet kobles på ellogen som vist i Figur 3. Her måles IP-dataene in-situ, mens der bores igennem formationen. Elektroderne er monteret i en isoleret del af den nederste del af borestammen, og der måles, mens der bores. Fordelen med ellog-metoden er, at der samtidig udføres en gammalog, og at der kan udtages niveauspecifikke vandprøver i udvalgte niveauer. Metoden giver dog ikke den rumlige kortlægning, som kan opnås ved overflademetoderne.

Nye detaljerede tolkningsmetodikker

Sammen med nye avancerede måleinstrumenter er også computerkraften blevet stærkt



Figur 2. 3D IP-målinger. I a) ses et feltbillede fra Grindsted Å, med elektroder flydende i åen. De grønne plastcovers dækker over forbindelsesboksene imellem enkelte linjer i 3D-opstillingen som vist i b), hvor hver målelinje er markeret med en grå linje. På hver af disse linjer er 64 elektroder installeret. I alt er der således 448 elektroder.



Figur 3. Ellog.

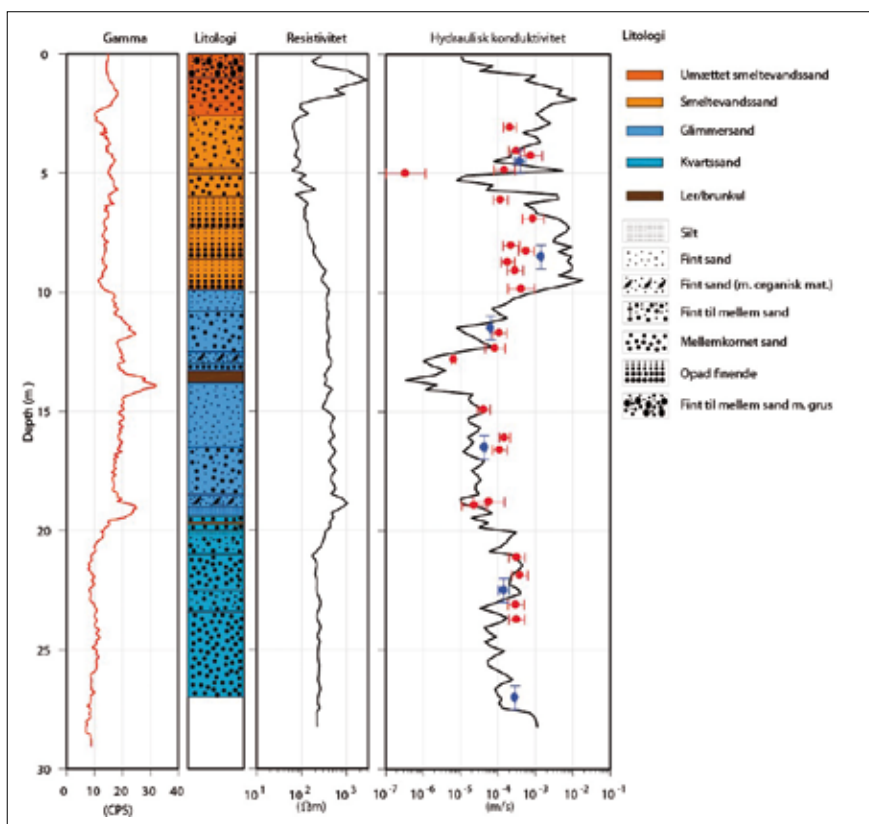
forøget, hvilket har åbnet for nye muligheder for tolkning af IP data. Traditionelt set har man fortolket IP-data med simple modeller, hvor IP-henfaldet er blevet integreret til én værdi, da det var det kompleksitetsniveau, man kunne håndtere numerisk. Nu håndteres hele henfaldet med som nævnt omkring 20 datapunkter, og for en typisk dataindsamling har man let 1-5000 af disse henfald, altså op mod 100.000 datapunkter totalt.

Forståelsesmodellerne for IP-signalerne er

udelukkende empiriske, og en af de bedst kendte refereres til som Cole-Cole-modellen. I Cole-Cole-modellen modelleres hvert henfald med 4 parametre, hvorfor der i et stort datasæt godt kan være op imod 20.000 (5000 gange 4) modelparametre, der skal bestemmes. Med moderne computere er dette nu muligt, om end man stadig skal optimere alle led i processen for, at det kan lade sig gøre. Modellerne, der tidligere var én-dimensionale er nu todimensionale, hvilket også har øget kompleksiteten betragteligt, men omvendt har det gjort, at jorden kan modelleres mere realistisk, når man fx har at gøre med en forurening, hvor variationerne kan være meget store over korte afstande /2/.

Eksempel på vertikal kortlægning af den hydrauliske ledningsevne med ellog

I Figur 4 er der vist eksempler fra en ellog målt ved Grindsted Losseplads. Elloggen har indsamlet gammalog-data (panel 1) og IP-målinger under den kontinuerte nedboring til 30 m /3/. Det ses tydeligt, at gammalogen giver nogen information om litologien, og dens udslag bekræftes generelt af resistivitetsloggen. For eksempel viser gammalogen et udsving omkring 13,5 meter, der indikerer et lerlag, hvilket modsvarer af et fald i



Figur 4. Resultater Ellog. Panel 1 viser den målte gammalog. Panel 2 viser geologien som beskrevet på boreprøver. Panel 3 viser den målte resistivitet, og i panel 4 er vist hydraulisk konduktivitet (K) som er beregnet vha IP-datene. Til verifikation er vist målinger af K-værdier fra hhv. slug-tests (blå error-bars) og beregnede værdier ud fra kornstørrelsesfordelingen (røde error-bars).

resistiviteten. Udsvingene og de absolutte niveauer for den hydrauliske parametre er dog helt umulige at forudsige direkte fra resistivitetsloggen og gammalogen, men vha. af IP-dataene kan vi omsætte målingerne til en detaljeret log over den hydrauliske konduktivitet, som her er verificeret med både målinger fra slug-tests (hydrauliske felttests i boringens filtre) og beregninger foretaget ud fra kornstørrelsesfordelinger fra sigteanalyser på jordprøver. Som det ses er både niveauerne og udsvingene repræsenteret i elloggen. Ved slugtests i feltet og ved bestemmelsen af kornstørrelsesfordelingen ved sigteanalyser kan man generelt bestemme den hydrauliske konduktivitet med en nøjagtighed på omkring en dekade, hvilket fuldt reproduceres i dette felt eksempel ved anvendelse af IP-målingerne. Vi har altså en metode, der kan give en detaljeret vertikal log over den hydrauliske permeabilitet direkte vha. geofysiske målinger.

Eksempel på rumlig kortlægning af den hydrauliske ledningsevne med overflademålinger

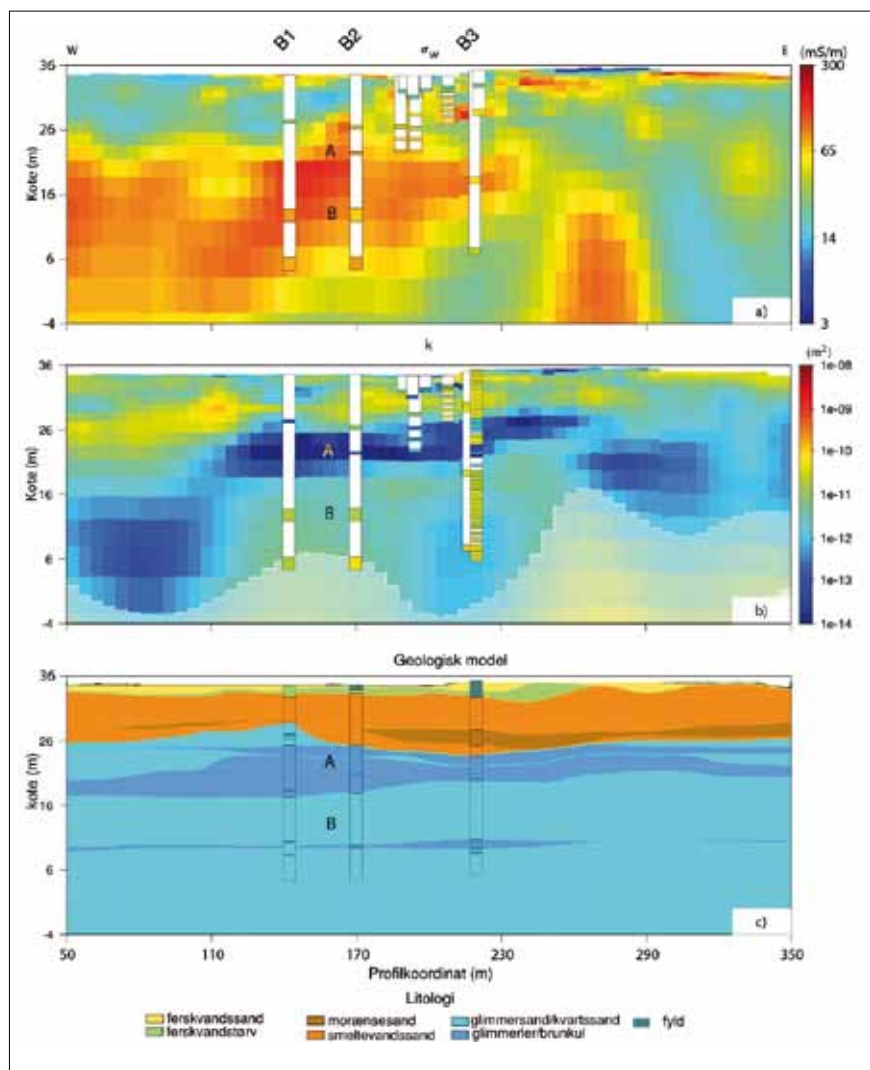
Når man måler fra overfladen har man den fundamentale begrænsning at den detaljegråd man kan opløse falder med dybden, modsat elloggen der har den samme opløselighed i alle dybder.

I Figur 5 er vist 3 profiler fra målinger ved Grindsted Å. Målingerne er foretaget med et 400 meter kabel-udlæg, med en elektrode for hver 5 m. Totalt set er der anvendt 64 elektroder i det, der kaldes en gradient-konfiguration, hvorved der opnås information til omkring 50 meters dybde. Profilet viser den beregnede porevandsledningsevne afledt af IP-målingerne (plot (a)), og permeabiliteten som er afledt direkte fra den hydrauliske ledningsevne som vist i boksen (plot (b)), og den tolkede geologiske model (plot (c)). Plottene viser, at IP målingerne tillader en at skelne lag med højledningsevne fra lerlag ("A"), fra områder ("B") hvor den høje ledningsevne stammer fra et sandlag med højt ionindhold. Dette kan være en indikation på, at der er en forurening i dette område.

Endelig er der på baggrund af geofysikresultaterne og en række boringer i området blevet fremstillet en egentlig geologisk model for området vist i det nederste profil.

Konklusion og perspektivering

Med moderne forbedrede instrumenter og forøget computerkraft er det nu muligt at måle og fortolke induceret polarisation, der kan ses som målinger af jordens opladningsevne. Dataene siger noget om porerumsgeometrien, og med denne information er det



Figur 5. Resultater overflademålinger i et længdeprofil. På øverste figur er vist den målte resistivitet, mens der på den midterste figur er vist den beregnede permeabilitet (tolket på baggrund af IP data), og nederst er vist den tolkede geologiske lagfølge.

muligt at bestemme den hydrauliske ledningsevne.

Med IP målinger i borer (ellog) har det været muligt at kortlægge den hydrauliske ledningsevne detaljeret i dybden, mens det med anvendelse af overflademålinger har været muligt at kortlægge den hydrauliske ledningsevne rumligt i 2D og 3D. Der er dog med overflademålingerne ikke helt denne samme præcision på målingerne som med ellog, da præcisionen af overflademålingerne

falder med dybden.

Med andre ord er det med disse optimerede geofysiske målinger nu muligt at foretage en rumlig kortlægning af de hydrauliske forhold i et grundvandsmagasin. Præcisionen på den rumlige kortlægning anbefales stadig suppleret med punktmålinger for sammenligning og korrigeret af den hydrauliske konduktivitet ved udførelse af ellogs, slugtest, pumpetest og sigtekornanalyser. Til gengæld opnås et meget mere præcist billede af de hydrogeolo-

giske forhold i et område.

Med udviklingen af IP målingerne har vi således fået et helt nyt redskab i værktøjskassen, der har afgørende betydning for alle der beskæftiger sig med vandets strømningsveje i jorden. Mht. forureningsundersøgelser giver dette værktøj mulighed for at foretage en meget mere detaljeret kortlægning af forureningsspredningen fra en lokalitet, hvilket er af afgørende betydning for at kunne foretage en robust risikovurdering, men også inden for problemstillinger relateret til overfladevand, ind- og udsivning til åer, klimatilpasningsprojekter mv. har denne metode et stort potentiale i forhold til at forbedre datagrundlaget og analysen for dermed også at styrke beslutningsgrundlaget.

Referencer

- 1/ Maurya, P. K., V. K. Ronde, 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.
- 2/ Fiandaca, G., J. Ramm, A. Binley, A. Gazoty, A. V. Christiansen, and E. Auken, 2013, Resolving spectral information from time domain induced polarization data through 2-D inversion: Geophysical Journal International, 192, 631-646.
- 3/ Maurya, P.K., 2017. Imaging lithology, water conductivity, and hydraulic permeability at contaminated sites with induced polarization. Department of Geoscience, Aarhus University. PhD Thesis.

PRADIP KUMAR MAURYA, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet

ANDERS VEST CHRISTIANSEN, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet

GIANLUCA FIANDACA, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet

ESBEN AUKEN, Institut for Geoscience, Aarhus Universitet

INGELISE MØLLER BALLING, De nationale geologiske undersøgelser for Danmark og Grønland

POUL L. BJERG, DTU Miljø, Danmarks Tekniske Universitet

NICOLA BALBARINI, DTU Miljø, Danmarks Tekniske Universitet