

Slæbeseismik

- en rystende oplevelse

Af seniorprojektleder Henrik Olsen, COWI

Refleksionsseismik er efterhånden en meget anvendt metode til kortlægning af grundvandet, bl.a. fordi den kan adskille fx sand og kalk. Desuden kan den måle ned til stor dybde. Med den nye slæbeseismiske metode kan man kortlægge op til 3 km om dagen med en bemanning på kun to personer, så nu er omkostningerne virkelig bragt ned.

Refleksionsseismik bliver i stigende grad anvendt i forbindelse med grundvandskortlægning i Danmark. Hvor refleksionsseismik for bare 3-4 år siden stort set var ukendt som kortlægningsmetode i grundvandssammenhæng – bortset fra mere forskningsprægede projekter – er det nu en integreret del af kortlægningen i flere danske amter. Denne udvikling skyldes blandt andet, at der er udviklet nye metoder til refleksionsseismisk kortlægning. Denne artikel fortæller om den nyudviklede slæbeseismiske metode, som er en videreudvikling af den vibroseismiske metodik, der anvendes inden for olieefforskning. Energikilden er en lastvogn med en specialvibrator, som sender små rystelser ned i jorden, og geofonerne slæbes efter vibratoren fra vibrationspunkt til vibrationspunkt.

Fordele ved seismik

Grundvandsrelaterede geofysiske undersøgelser i Danmark har gennem mange år været



Den seismiske vibrator under slæbeseismisk arbejde på en lille asfaltevej. (Foto: Carsten Ploug)

synonyme med geoelektriske og elektromagnetiske undersøgelser. Disse undersøgelser kan som oftest udføres relativt hurtigt og til en rimelig pris. Der er dog en række situationer, hvor de elektriske og elektromagnetiske metoder kommer til kort, og her kan refleksionsseismik komme til hjælp.

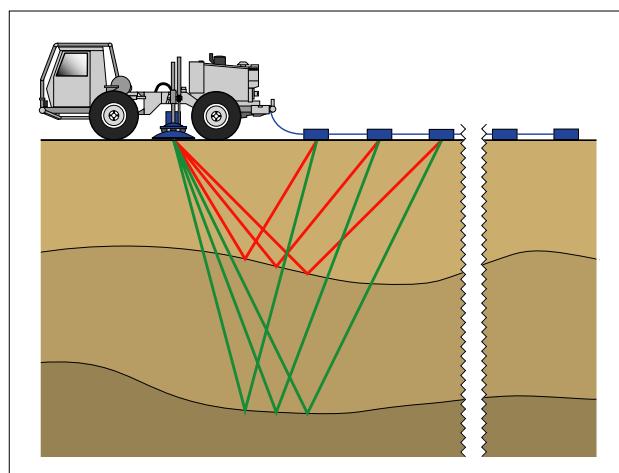
De mest almindelige geofysiske metoder - MEP, slæbegeoelektrik, TEM - baserer sig på variationer i jordlagenes elektriske modstand. Det betyder, at man ikke kan skelne mellem to geologiske enheder,

som har samme elektriske modstand, selvom de faktisk består af vidt forskelligt geologisk materiale fx sand og kalk.

Refleksionsseismik har en række fordele frem for de almindeligt anvendte geofysiske metoder. Seismik udnytter, at lydbølger delvist reflekteres fra grænser mellem jordlag med forskellige lyd-transmissionshastigheder og/eller densiteter. Det betyder, at sand og kalk kan adskilles, da disse aflejringer typisk har forskellige lyd-transmissionshastigheder. Samtidigt kan man med refleksionsseismik kortlægge den overordnede interne lagdeling. Med de elektriske og elektromagnetiske metoder er det derimod ikke muligt at skelne den interne lagdeling inden for lagpakker med relativt ensartet elektrisk sammensætning som fx sand og kalk.

Det er også muligt at kortlægge forkastninger, selvom materialet på de to sider af forkastningen har samme gennemsnitlige lydshastighed (og elektriske modstand). Refleksionsseismik har nemlig en meget høj opløsningsgrad, så forsatninger ned til ca. 10 m kan erkendes i de seismiske profiler.

Desuden kan refleksionsseismik udføres til langt større dybde end de traditionelle metoder. Typisk kan der kortlægges til 1 km's dybde, hvilket er mere end tilstrækkeligt i langt de fleste tilfælde.



Princippet i slæbeseismik. Den seismiske vibrators vægt på ca. 7 ton hviler på vibratorpladen, mens der sendes P-bølger ned i jordlagene frembragt vha. vibrationer. P-bølgerne reflekteres delvis ved lagrænserne, og det reflekterede signal registreres af geofoner på jordoverfladen. Når målingerne er tilendebragt på et vibrationspunkt, løftes vibratorpladen, og vibratoren kører videre til næste vibrationspunkt, mens geofonerne slæbes hen over jordoverfladen. (Grafik: Richard Thrane).

Vibroseismik

Traditionel refleksionsseismik udføres ved at udlægge et seismisk kabel med geofoner og udsende P-bølger (lyd) gennem jordlagene ved hjælp af en impulskilde, som kan være en sprængladning, en riffel eller et mekanisk faldlod. De reflekterede P-bølger fra jordlagene opfanges af geofonerne, og målingerne gentages på en ny skudposition langs geofonudlægget. Således fortsættes der med skud langs hele geofonudlægget, hvorefter hele opstillingen flyttes i forlængelse af den første opstilling, og der udføres en ny serie målinger. Der fortsættes på denne måde, indtil hele undersøgelseslinien er opmålt.

I vibroseismiske undersøgelser benytter man sig af gentagne rystelser – vibrationer – til at frembringe P-bølgerne. Udsendelsen af vibrationerne styres nøje af en seismisk vibrator. Vibratoren er en lille lastvogn med en stor bruttovægt. COWIs seismiske vibrator – som er den største vibrator på markedet inden for terrænnære seismiske undersøgelser – har en bruttovægt på ca. 7 ton. Den store vægt muliggør, at den frembragte P-bølge-energi transmitteres effektivt ned i jorden.

P-bølgerne overføres til jorden ved at sænke en stor plade ned på jorden og lade stort set hele vibratorens vægt hvile på denne plade, mens P-bølgerne udsendes. Selve energiudsendelsen foregår ved, at der udsendes vibrationer i 5-10 sekunder. Vibrationerne udsendes i et såkaldt "sweep", hvor signalet starter med at være lavfrekvent og slutter med at være højfrekvent. Det typiske frekvensbånd er 50-350 Hz. Der optages reflekterede signaler under hele "sweepet" og yderligere i 0,5-2 sekunder efter "sweepets" ophør. På hvert vibrationspunkt foretages normalt 3-5 "sweeps" for at forbedre signal/støjforholdet. Når målingerne på et vibrationspunkt er afsluttet foretages en matematisk processering af data, så de fremstår, som om de var optaget med en impulskilde til en tidsdybde på 0,5-2 sekunder. Herefter løftes vibratorpladen op, og der køres frem til næste vibrationspunkt, hvor operationen gentages.

Slæbeseismik

Slæbeseismik er en videreudvikling af vibroseismik. Der anvendes ligeledes en seismisk vibrator og et udlæg bestående af et større antal geofoner, som er forbundet med et seismisk kabel. Det seismiske kabel er dog fastgjort til vibratorens bagende, og når vibratoren bevæger sig fra et vibrationspunkt til det næste, slæbes geofonerne med.

Det seismiske slæb er ikke en hyldevare, som kan bestilles hos leverandører af seismisk udstyr. Det slæb, som COWI anvender, er specielt fremstillet efter anvisninger fra COWI. På slæbet, som er 200 m langt, er der monteret 95 geofoner, som er gyroskopisk ophængt. Den gyroskopiske ophængning medfører, at accellerometret,



Undersøgelserne ved Vorbasse blev hovedsagelig udført på en lille jordvej. Vibrationerne overføres fra den seismiske vibrator til jordlagene via en vibratorplade (indsat foto), som bærer hele vibratorens vægt på ca. 7 ton, mens hjulene fungerer som støttehjul. (Foto: Henrik Olsen)

som sidder inde i geofonen, altid er orienteret optimalt i forhold til svingningsretningen af P-bølgerne. Hvis accellerometret var orienteret skævt i forhold til P-bølgerens svingningsretning, ville man kun optage en brøkdel af P-bølge-energien og derfor få et dårligere signal-støjforhold. Der er endvidere anvendt lille afstand – 1,25 m – mellem geofonerne tæt på vibratoren, mens en større indbyrdes afstand – 2,5 m – er anvendt for den øvrige del af slæbet. Den lille geofonafstand tæt på vibratoren betyder, at der opnås en bedre datakvalitet i de mest terrænnære dele, hvor der som oftest er stor interesse i at få detailoplysninger.

Målingerne registreres i en labtop PC, hvor der er installeret et specielt seismisk optageprogram. Når et "sweep" er udført, foretages en automatiseret proces, som rekonstruerer data på en sådan måde, at de fremstår som om, de var optaget med en impulskilde. Denne proces kaldes korrelation. Alle de "sweeps", som udføres på samme vibrationspunkt, samles til en enkelt måling ved at foretage en såkaldt "stacking". Herved øges signal/støjforholdet, idet de egentlige reflektorer forstærkes, mens tilfældig støj udlignes.

Den slæbeseismiske metode har den helt klare fordel frem for traditionel seismik, at dagsproduktionen er langt højere. Der kan kortlægges op til 3 km om dagen – afhængigt af forholdene – og undersøgelserne udføres af bare 2 mand. Metoden er derfor langt billigere end vibroseismik og traditionel seismik med sprængladninger, som kvalitetmæssigt er på linie med slæbeseismik. Seismiske undersøgelser med riffel eller faldlod kan også udføres billigere end vibroseismik og traditionel seismik med sprængladninger, men resultaterne har ikke samme kvalitet.

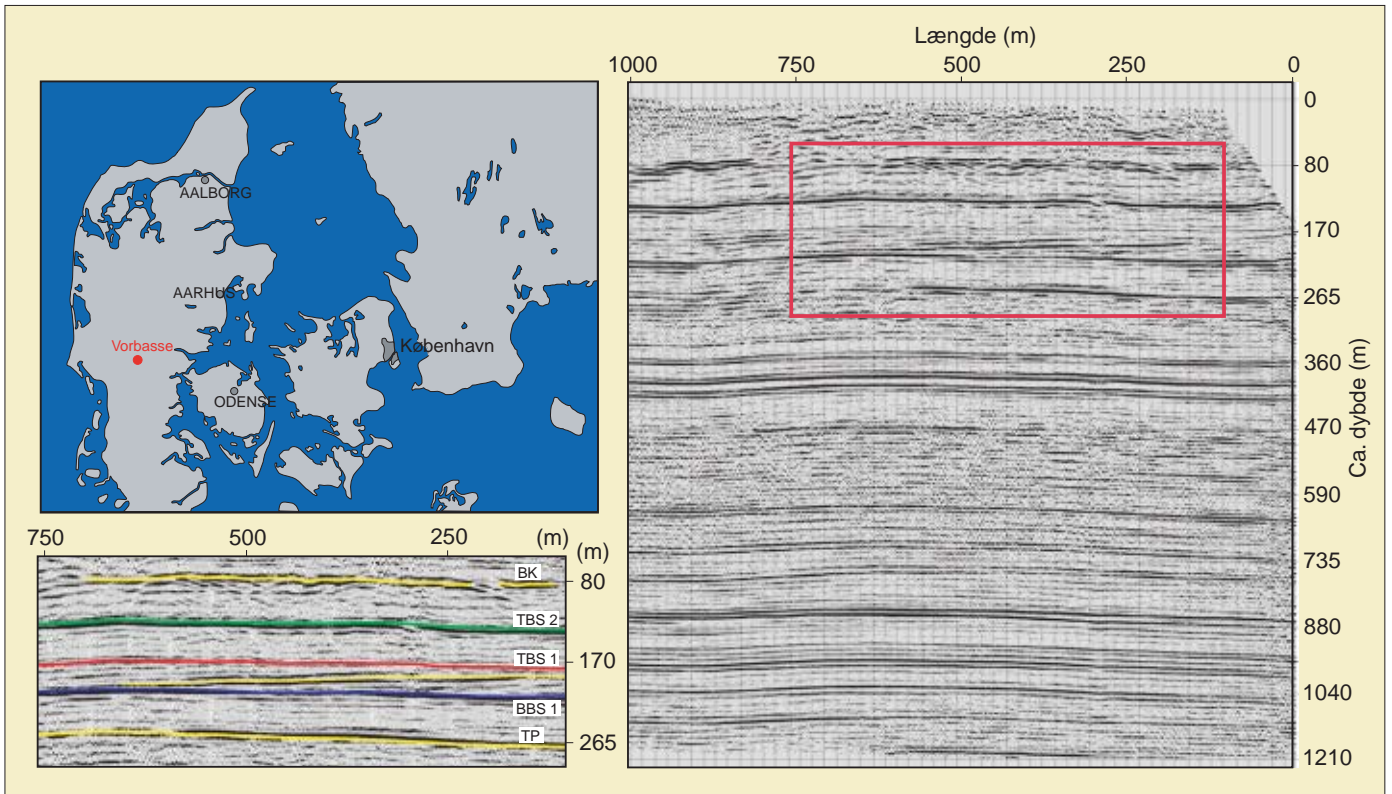
Anvendelse til grundvandsundersøgelser

I kalkmagasiner er den hydrauliske ledningsevne styret af sprækker i kalken. Hvis der optræder en forkastning i kalken vil den som oftest være ledsaget af intens opsprækning i en zone langs forkastningen. Da der ikke er forskelle i den elektriske modstand på de to sider af forkastningen, kan de elektriske/elektromagnetiske metoder ikke "se" forkastningen. Med refleksionsseismik kan man derimod afsløre selv små forskydninger langs en forkastning, og den vil derfor klart fremstå som en struktur i det seismiske profil.

Hvis en grundvandsmodel skal opstilles, og en sådan sprækkezone ikke er kortlagt, vil det ikke være muligt at få modellen til at fungere optimalt. I andre tilfælde kan afsløringen af en forkastning betyde, at den geologiske model bliver radikalt ændret. Det kan således vise sig, at et reservoir slet ikke har den kontinuerte udbredelse, som man hidtil har antaget, og udnyttelsen af ressourcen må revideres.

I Østjylland er man i stigende grad interesseret i at kortlægge begravede udfyldninger fra istidens smeltevandsdale, da de kan indeholde store vandressourcer af god kvalitet, når de er dækket af et beskyttende lerlag. Det har vist sig, at afgrænsningen af disse dale i nogle tilfælde kan være vanskelig med elektriske/elektromagnetiske metoder. Her kan refleksionsseismik give et detaljeret billede af den begravede dals afgrænsning, da det er selve de geologiske strukturer, som afspejles i de seismiske data.

Og endelig er der næsten ingen beskyttende lerlag i hedesletteaflejringer over store områder i Vestjylland. Her er det i stigende grad vigtigt at finde dybereliggende grundvandsmagasiner, fx de mio-cæne sandmagasiner i Ribe-Formationen



Seismiske data fra en slæbeseismisk undersøgelse ved Vorbasse. På det lille udsnit er der indlagt tolkning. BK: Basis Kvartær; TBS 2: Top Bastrup Sand, øvre kile; TBS 1: Top Bastrup Sand, nedre kile; BBS 1: Basis Bastrup Sand, nedre kile; TP: Top Palæogen. En intern reflektor i Bastrup Sand er ligeledes markeret. (Grafik: Richard Thrane)

og Bastrup Sand eller begravede kvartære dale. I disse tilfælde er det vigtigt at kunne kortlægge til stor dybde – og helst med så stor opløsningsgrad som muligt. Refleksionsseismik er den eneste metode, som kan opfylde disse krav.

Eksempel på anvendelse af slæbeseismik

I efteråret blev der foretaget en undersøgelse af dybtliggende miocæne formationer ved Vorbasse. Undersøgelserne var led i Ribe Amts indsats for at kortlægge dybtliggende grundvandsmagasiner, som skal sikre fremtidens vandforsyning.

I områder med en umættet zone på mindre end ca. 15 m blev der opnået meget detaljerede oplysninger til den fulde "undersøgelsesdybde" på 1 sekund, som svarer til ca. 1200 m. Størst interesse i dette område er forekomsten af en sandet enhed, som endnu ikke har fået et formelt

litostratigrafisk navn. Den sandede enhed kaldes uformelt for Bastrup Sand. Bastrup Sandet optræder som to kiler, der strækker sig ind i Arnem Formationens mere lerholdige aflejringer.

På de seismiske data fra den slæbeseismiske undersøgelse ses den nedre kile at være udviklet som en godt 30 m mægtig enhed med interne svagt dykkende reflektorer. På basis af disse strukturer tolkes denne kile af Bastrup Sandet som en deltaudbygning. Stadier i deltaets udbygning har medført vekslende kornstørrelser i de skråstillede deltafront-aflejringer, som derfor giver ophav til refleksioner af P-bølgerne. De skråstillede deltafront-aflejringer fremstår derfor tydeligt på den seismiske sektion. Deltaet har bygget sig ud i sydlig eller sydvestlig retning. Tæt på det seismiske profil, hvor deltaaflejringerne kan observeres, er der foretaget en dyb boring, som

underbygger tolkningen af Bastrup Sandet som en deltaafsætning, idet der findes mikrofossiler af såvel marin- som ferskvandsoprindelse.

De karakteristiske strukturer i Bastrup Sandet medfører, at det er relativt enkelt at kortlægge grundvandsmagasinet i dette område med slæbeseismik – selv uden boringsoplysninger til at støtte sig op ad. De slæbeseismiske undersøgelser ved Vorbasse viste i øvrigt, at hele den tertiære lagserie samt den kretassiske lagserie kan kortlægges, og selv under basis Øvre Kridt – i Trias aflejringerne – opnås fine resultater med veldefinerede reflektorer.

Perspektiver

Refleksionsseismik har – som nævnt ovenfor – en række fordele frem for elektriske og elektromagnetiske undersøgelsesmetoder. Hidtil har det dog været for omkostningsfuldt at foretage seismiske undersøgelser i større målestok i forbindelse med grundvandskortlægning. Med den slæbeseismiske metode er omkostningsniveauet nu bragt ned på under halvdelen af prisen for traditionelle seismiske undersøgelser – uden at gå på kompromis med kvaliteten.

Det betyder, at seismiske undersøgelser i langt højere grad vil blive integreret i kortlægningen af grundvandsressourcerne. At seismiske undersøgelser også bidrager med oplysninger i større dybde, end grundvandsinteresserne normalt koncentrerer sig om, betyder, at vi fremover vil få en guldgrube af oplysninger om den danske undergrund, som vil bidrage væsentligt til forståelsen af den geologiske udvikling i Tertiær og Kridt. ■

Vandressourcekortlægning

...er ikke bare geofysik, men en kombination af en række fagdiscipliner:

- hydrologi
- vandkemi
- geologi
- geofysik
- GIS og databaser

WaterTech a/s

Søndergade 53, 8000 Århus C - Tlf.: 8732 2020
 Algade 43, 4000 Roskilde - Tlf.: 4638 1970
 Mail: wt@watertech.dk - www.watertech.dk