

Forskellige geofysiske metoders anvendelighed til at bestemme parametre for BNBO-størrelse



Forskellige geofysiske metoders anvendelighed til at bestemme parametre for BNBO-størrelse

Er udgivet af

SEGES Innovation P/S
Agro Food Park 15
8200 Aarhus N
+45 87 40 5000
seges.dk

Udarbejdet af

SEGES, Plante- og Miljøinnovation

Støttet af

Promilleafgiftsfonden for Landbrug

Forfattere

Helle Møller Holm, Konsulent (SEGES)
Rikke Krogshave Laursen, Landskonsulent (SEGES)

Forside foto

(SEGES Innovation)

Forord

Nærværende rapport "Forskellige geofysiske metoders anvendelighed til at bestemme parametre for BNBO-størrelse" er udarbejdet af SEGES Innovation i projektet "Grundvand – den rigtige løsning for landmanden" støttet af Promilleafgiftsfonden for Landbrug.

Daugbjerg og Vellevej udgør projektets caseområder. Data til rapporten vil både være tTEM data der er indsamlet i projektet i 2021 og eksisterende geofysisk data, der ligger tilgængeligt på GERDA databasen. Rapporten er udarbejdet i efteråret 2022.

Resume

I nærværende rapport er gennemgået forskellige geofysiske metoders potentiale til at bestemme de styrende parametre, der bruges til beregningen af størrelsen af BNBO.

Der er redegjort for de forskellige metoders potentiale, og hvordan disse kan anvendes i forbindelse med at bestemme BNBO afgrænsningen.

Der er lavet en gennemgang af hver metodes anvendelsesområde, og hvilke fordele og ulemper metoden har i forbindelse med at kunne bruges aktivt til BNBO arbejdet.

Til slut er der i rapporten diskuteret, hvordan geofysik også fremadrettet kan bruges til at afdække grundvandsmagasiners sårbarhed.

Indhold

Indledning.....	5
1.1 Baggrund	5
1.2 Formål.....	5
1.3 Beregning af BNBO	6
1.4 Bestemmelse af parametre til BNBO-beregning.....	7
1.5 Beskyttelsesbehovet.....	9
1.6 Datagrundlag for grundvandsmodellerne	10
Geofysiske metoder til grundvandskortlægning	11
2.2 Borehulslogning	11
2.3 Multi Elektrode Profilering – MEP.....	11
2.4 PACES Pulled Array Continuous Electrical Sounding	12
2.5 TEM Transiente ElektroMagnetiske Metode.....	12
2.6 SkyTEM.....	13
2.7 T-TEM.....	13
Forskellige cases med BNBO afgrænsninger og geofysisk kortlægninger	15
Case 1 – Daugbjerg.....	15
Case 2 – Vellev.....	17
Diskussion/konklusion	20
Geofysik til at sige noget om den generelle beskyttelsesbehov.....	21
Referencer	22

Indledning

1.1 Baggrund

Mere end 400.000 ha landbrugsjord geografisk fordelt i hele Danmark er beliggende inden for boring-snære beskyttelsesområder (BNBO) eller indsatsområder. På disse jorder er det aftalt, at der skal gøres en ekstra indsats for at beskytte grundvandet og sikre rent drikkevand til fremtiden. Derfor skal flere tusinde landmænd de kommende år indgå frivillige aftaler med vandforsyninger i forbindelse med, at deres landbrugsjorder pålægges dyrkningsrestriktioner. Landmænd og landbrugsrådgivere, som har været involveret i arbejdet med grundvandsbeskyttelse fortæller, at der er en række udfordringer og udækkede behov, som er nødvendige at få løst for at få succes med grundvandsbeskyttelsen.

BNBO-konceptet blev introduceret i 2007 under vejledning fra Miljøstyrelsen, herefter begynder en række kommune samt større vandforsyninger at kaste sig ud i at lave BNBO afgrænsninger. I 2012 og 2013 var det muligt for kommunerne at søge tilskud til at foretage BNBO beregningerne, og det bevirkede, at der skete en større indsats på området. Ofte fik kommunerne rådgivningsfirmaer til at lave beregningerne, og derfor har der været forskellig praksis for, hvordan beregningerne er foregået. Der opstod derfor et behov for, at beregningsproceduren blev mere standaliseret, og i 2016 er det det daværende SVANA (en del af Naturstyrelsen), der stod for at afgrænse BNBO for de indvindingsboringer, som ikke allerede havde et BNBO. Inden SVANA overtog arbejdet, var der et stort spænd på de vejledende parametre for beregningen af BNBO og der var flere forskellige metoder, der kunne bruges til at beregne afgrænsningen. Fra en simpel beregningsmetode til en numerisk modelopsætning. Det store spænd på parameterverdier, havde stor indflydelse på størrelsen af BNBO og beregningsmetoderne gav forskellige udformninger af BNBO. Derfor har der været usikkerhed omkring afgrænsningerne og baggrunden bag.

De sidste 5-7 år er der også sket en stor udvikling i terrænnær geofysiske metoder, som giver et væsentligt mere detaljeret billede af undergrunden. Alt dette føder ind i en usikkerhed for lodsejere, om arealerne er "rigtige". Som udgangspunkt er arealerne rigtige på det tidspunkt, de er blevet udpeget, men med de nye vejledninger fra Miljøstyrelsen og de nye kortlægningsmetoder, er der behov for at gennemgå praksis og den nye tilgang.

1.2 Formål

Kortlægningen af BNBO og indsatsområder er ikke sket på et harmoniseret og ensartet fagligt grundlag i landets kommuner, og nogle steder er uforholdsmæssigt store landbrugsarealer blevet udpeget som et BNBO. Dette skaber uenighed om afgrænsningen og beskyttelsesbehovet, og hindrer en gensidig succesfuld gennemførelse af grundvandsbeskyttelsen. Derfor er der behov for at finde og undersøge metoder, som kan understøtte landmandens behov for faglig sparring og støtte.

Formålet med denne undersøgelse er således at belyse, hvilke geofysiske metoder der er til at få viden om jordens opbygning og dermed få en bedre bestemmelse af de parametre, der bruges til at beregne afgrænsningen af et BNBO. Det skal bidrage til at skabe et overblik over de data, der allerede er tilgængelig og hvordan de eventuelt kan suppleres med nye og mere detaljerede målinger og derved udnytte den teknologiske udvikling, som vil forbedre og præcisere BNBO-afgrænsningen.

Dette er gjort ved at sammenligne allerede eksisterende geofysiske data med en nyere teknologisk opmålingsmetode, for at:

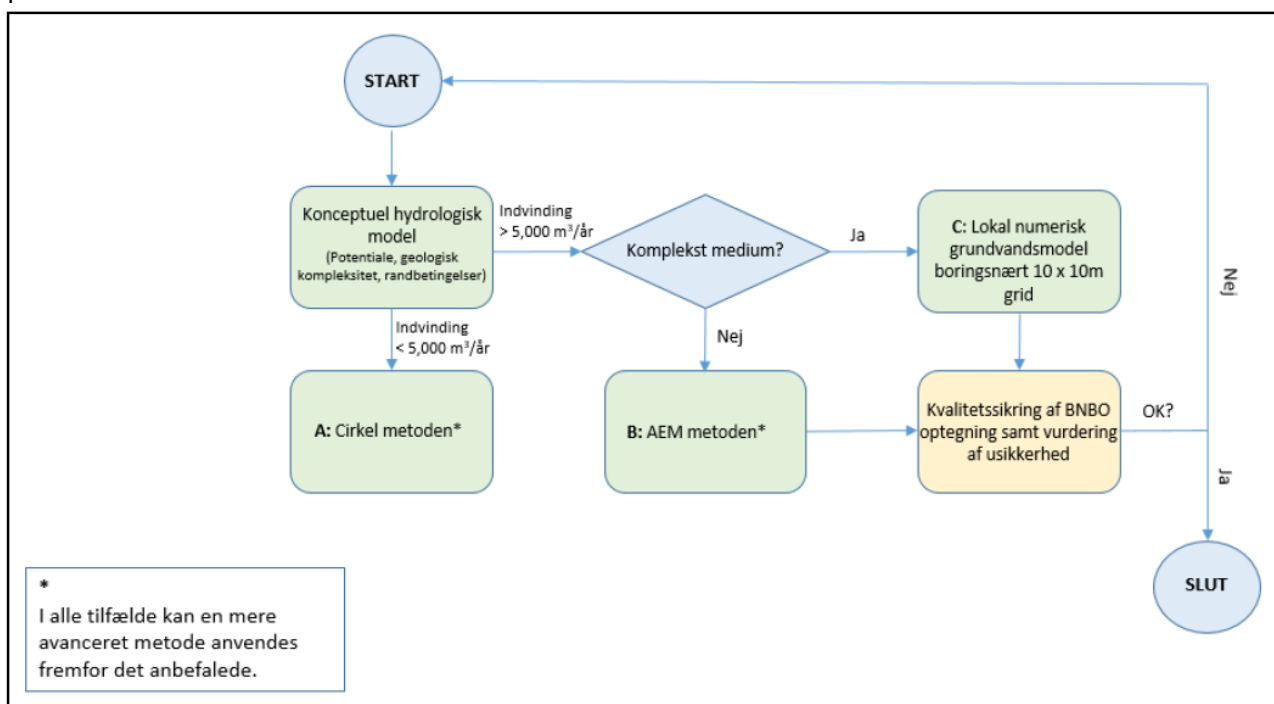
- Undersøge potentialet for brug af eksisterende data og geofysiske målemetoder til at kvantificere og bestemme beskyttelsesbehovet i udvalgte case områder.
- Undersøge ved at benytte flere geofysiske metoder om BNBO beregningsparametrene bedre kan bestemmes.

1.3 Beregning af BNBO

Der findes flere forskellige beregningsmetoder, når en BNBO-afgrænsning skal tegnes. Herunder vil vejledningen fra Miljøstyrelsen blive gennemgået /1/:

Generelt er vejledningen, at ved simple strømningsforhold skal der bruges simple beregningsmetoder og ved mere komplekse strømningsforhold, skal der bruges mere avancerede modeller. Simple strømningsforhold kan være begravede dale eller overfaldenære magasiner, hvor magasinet består af kvar-tære og miocæne sandlag, og der er ikke hydraulisk kontakt med andre magasiner. Mere komplekse strømningsforhold er, hvis magasinet består af kalk, der er opsprækket i forskellig grad, eller hvis der er opsprækkede lerlag over magasinet, som også giver komplekse strømningsmønstre, eller hvis der er hydraulisk kontakt mellem flere magasiner.

Der er lavet et flowchart til valg af beregningsmetode for BNBO i vejledningen fra MST, som ses i figur 1



Figur 1. Flowchart over valg af beregningsprocedure for BNBO-afgrænsning, fra /1/

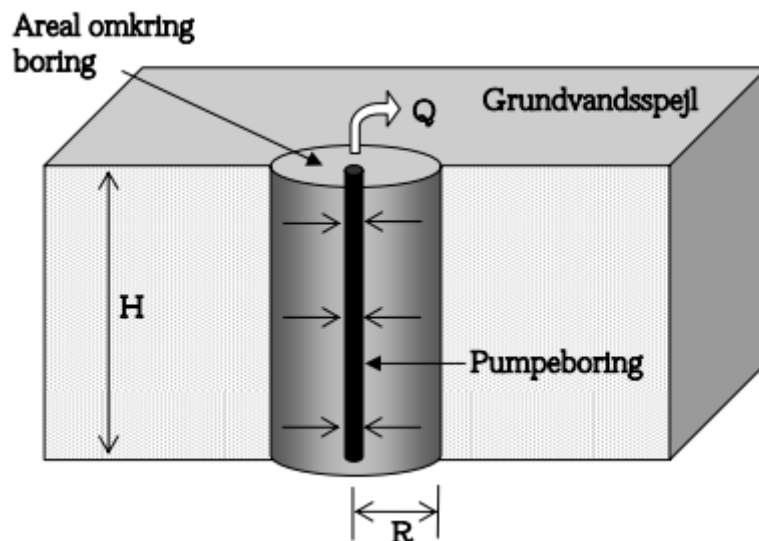
Miljøstyrelsen har inddelt beregningerne i tre metoder:

1. Den simple beregningsmetode, cirkelmetoden, hvor BNBO beregnes som en radius med boringen i centrum. Cirkelmetoden er beskrevet nærmere i afsnit 1.3.1.
2. Analytisk Element Metoden (AEM), hvor det er muligt at opstille simple grundvandsmodeller hvor de hydrologiske forhold ikke er komplekse og hvor indvindingsmængden er større end 5.000 m³/år.
3. Ved mere komplekse strømningsforhold skal en numerisk grundvandsmodel bruges. Den numeriske model, kan også bruges ved simple forhold i stedet for at bruge AEM eller den simple beregningsmetode.

1.3.1 Simple beregningsmetode

Afgrænsningen af BNBO bygger på et simpelt hydrologisk princip, hvor der beregnes en fast radius i forhold til boringens indvindingsmængde. Beregningen er baseret på princippet, at der skal være balance mellem oppumpet vandmængde og mængden af vand i magasinet. Dvs. at den volumen vand,

der er oppumpet i boringer, skal være lig med volumen af en cylinder rundt om boringer /1/. Figur 2 viser en skitse af de hydrologiske principper, taget fra /1/.



Figur 2. Princippet bag beregningen af BNBO og de parametre der indgår i beregningen. Arealet af en cylinder omkring boringen skal være lig det oppumpede volumen vand fra boringen. Figuren er fra /1/.

Radius (R) er lig den tid det tager for vandet i grundvandsmagasinet at strømme hen til boringen ved en given indvindingsmængde.

Ligningen til den simple hydrologiske sammenhæng beskrives på følgende måde:

$$R = \sqrt{\frac{Q \cdot t}{\pi \cdot H \cdot n_{eff}}} \quad (1)$$

Q er den tilladte indvindingsmængde, t er tiden for indvinding, H er den effektive magasintykkelse af grundvandsmagasinet og n_{eff} er den effektive porøsitet af grundvandsmagasinet.

Arealet fås dermed ved:

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (2)$$

1.4 Bestemmelse af parametre til BNBO-beregning

Til den simple cirkel beregningsmetode skal der indhentes oplysninger om:

- strømningstiden for vandet (t),
- den effektive porøsitet af magasinbjergarten (n_{eff}),
- den tilladte indvindingsmængde (Q),
- den effektive magasintykkelse (H),

Til de mere komplekse beregningsmetoder, skal der derudover indhentes oplysninger om:

- den hydrauliske konduktivitet (K),
- vandspejlets gradient og strømningens retning (i),
- påvirkning af og fra nærliggende vandværksboringer

Oplysningerne omkring Q og t fås fra borerapporterne i Jupiter. Sværere er det med at bestemme den effektive magasin tykkelse og effektive porøsitet. Miljøstyrelsen (herunder en periode SVANA) har justeret deres anbefalinger undervejs til porøsiteten. I tabel 1 er vist anbefalingen fra 2007 og i tabel 2 anbefalingen gældende fra 2020 og frem. I den oprindelige vejledning, var der ikke nogen fast anbefalet værdi, men i stedet et stort spænd indenfor en værdi kunne ligge.

Tabel 1. Anbefalinger til værdier for effektiv porøsitet fra 2007 /2/.

Magasin aflejring	Effektiv porøsitet
Mellemkornet sand	0,15 – 0,30
Groft sand	0,2 – 0,35
Grus	0,1 – 0,35
Kalksten	0,01 – 0,24

Tabel 2. Anbefalinger til værdier for effektiv porøsitet fra 2020 /1/.

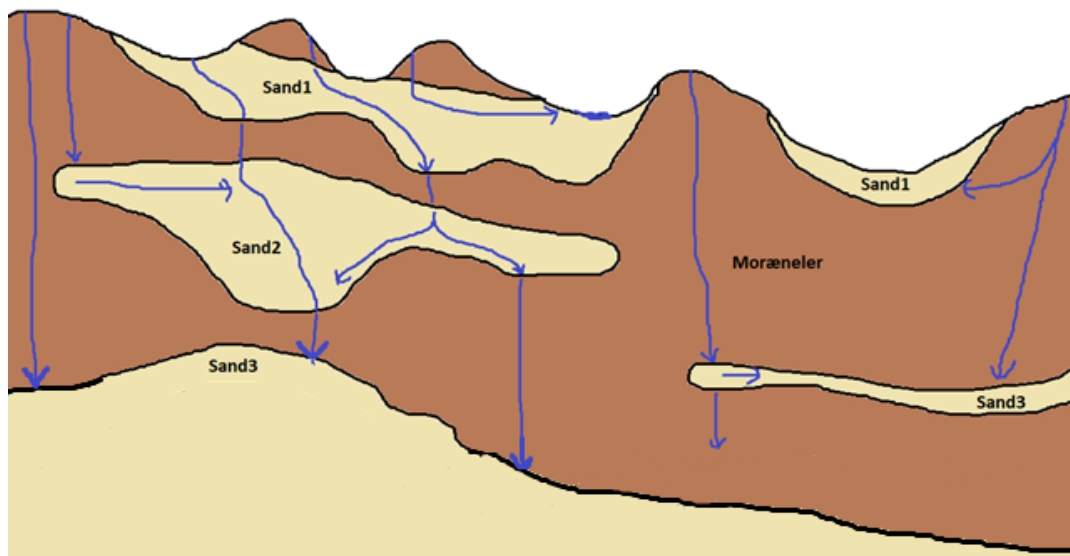
Geologisk lag	Specifik ydelse* (%)	Effektiv porøsitet (%)	Anbefalet effektiv porøsitet (%)
Ler	1 - 18	30 - 60	40
Moræneler	1 - 20	10 - 30	25
Silt (morænesilt)	5 - 20	35 - 50	40
Sand	10 - 30	25 - 40	30
Grus	15 - 30	20 - 35	27
Sand og grus (usortet)	10 - 30	15 - 35	25
København kalk**	0.5 - 5	10 - 25	18
Bryozo kalk**	0.5 - 5	35 - 43	38
Skrivekridt**	0.5 - 5	35 - 50	45
Kalk** (sprækkeporøsitet)	-	0,1 - 1	0.5
Kalk (matrix + sprækker)	0.1 - 10	0,1 - 10	10
Sandsten	5 - 15	5 - 30	15

Den effektive porøsitet udgør den del af totalporøsiteten, hvor der kan foregå strømning af grundvandet. Den effektive porøsitet har stor betydning for størrelsen af BNBO. Som det ses af ligning (1) er porøsiteten omvendt proportional med radius. Det har givet usikkerhed på bestemmelsen af BNBO-afgrænsningen, når værdien for den anbefalede porøsitet har haft et stort spænd (tabel 1). Især for kalkmagasiner kan ske meget hurtige strømninger, hvis det er et stærkt opsprækket magasin. Niras skriver bl.a. i en af deres BNBO-rapporter, at den største usikkerhed på den effektive porøsitet i en grundvandsmodel for Roskildeområdet, er knyttet til kalkmagasinerne, da de er dobbeltporøse, hvor en betydelig del af strømningen foregår i sprækkedannelser og der her kan være en meget høj hydraulisk ledningsevne /3/.

Den effektive magasin tykkelse har også en omvendt proportional effekt på radius af BNBO – en fordobling af tykkelsen giver en halvering af radius. I et tykt magasin kan der strømme meget vand indenfor den fastsatte strømningstid, dvs. BNBO bliver mindre jo tykkere magasinet er. Ved bestemmelse af magasinets tykkelse tages der udgangspunkt i det lag, hvor boringen er filtersat. I vejledningen /1/ skriver Miljøstyrelsen bl.a. at der er tale om et sandmagasin, hvor der i Jupiter både er oplyst magasinbund i form af et underliggende lerlag og en magasin top i form af et overliggende lerlag, er magasin tykkelsen veldefineret som tykkelsen af sandlaget mellem de to lerlag. Er der tale om et frit magasin defineres magasinets tykkelse fra toppen af det underliggende lerlag til vandspejlets beliggenhed i sandlaget. Det

er dog ikke altid, at de geologiske forhold er så simple, og det kan derfor være behæftet med stor usikkerhed at fastsætte den effektive magasintykkelse. Et eksempel på denne problemstilling er blevet mødt på Ærø, hvor Rambøll har skullet gennemgå allerede beregnet BNBO /4/. I første omgang er der brugt en AEM for øen, som gav en effektiv magasintykkelse på 30 meter. Ved efterfølgende tæk har det vist sig, at ingen af øens magasiner er tykkere end 10 meter. Ved denne justering er BNBO afgrænsningerne blevet ca. 3 gange større.

I figur 3 er der skitseret, hvorfor det kan være svært at ramme den "korrekte" magasintykkelse. Figuren viser, hvordan det primære magasin kan have forskellige tykkelser. Yderlig kan sandlinser af forskellige tykkelse og udbredelse udgøre sekundære magasiner, der også kan forstyrre billedet.



Figur 3. Skitsetegning af hvordan en magasintykkelse kan være forskellige indenfor kort afstand. De blå linjer angiver strømningsretning for nettonedbøren. Ved komplekse geologiske strukturer, som skitseret her, fornemmes det, hvor svært det kan være at bestemme den effektive magasintykkelse og porøsiteten.

De største udfordringer i beregningen af BNBO-afgrænsningen er altså magasintykkelsen og porøsiteten – da de for det første er meget følsomme parametre i forhold til den endelige størrelse af BNBO og fordi det er svært at fastsætte de mest korrekte værdier for dem.

1.5 Beskyttelsesbehovet

Om et magasin er sårbart eller ej er blandt andet styret af, hvordan jordlagene over magasinet er fordelt og hvor tykke de er. En simpel betragtning af jordens opbygning siger, at vandet vil strømme hurtigt i sandede sedimenter, da sandkornene er store og der derfor er hurtige transportveje for vandet i porerummene mellem sandkornene. I leret sediment er transporten langsommere, da lerminerallerne er mindre og dermed er porerummene også små og det tager længere tid for vandet at komme igennem. Desværre er jorden sjældent opbygget som en lagkage med ligeligt fordelte lag, men ofte meget heterogen som vist i figur 3. Jo tykkere de sammenhængende lerlag er ovenpå et grundvandsmagasin, jo bedre beskyttelse af laget /5/. Som vist på figur 3 så kan vandet dog via sandlinser opnå en hurtigere transport, end der hvor der ikke er sandlinser. Derfor er det vigtigt at have en detaljeret viden om undergrunden, så der bliver lavet passende afgrænsninger, så grundvandet beskyttes, men at der heller ikke inddrages unødvendigt meget areal.

1.6 Datagrundlag for grundvandsmodellerne

Det er statens grundvandskortlægning ledet af Miljøstyrelsen, der står for at lave den nationale grundvandskortlægning. Det tager mellem 2 og 5 år at opdatere og udføre kortlægning for et område, alt efter områdets størrelse og de naturgivne og menneskeskabte forholds kompleksitet. Kortlægningen er en iterativ proces, idet man som følge af, at man undervejs kan blive klogere og der kan være kommet ny data tilgængeligt, som skal indarbejdes. Når der er lavet en ny kortlægning, kan grundvandsmodellerne for regionen opdateres og der kan foretages nye beregninger af BNBO.

Geofysiske metoder til grundvandskortlægning

De geofysiske metoder dækker over mange forskellige typer teknologi, der alle har det tilfælles, at de ønsker at opløse jordens strukturer. De har hver deres fordele og ulemper, både hvad angår omkostninger, deres evne til at opløse jordens strukturer, i hvilke jordtyper de bedst fungerer og i hvilke dybder de bedst kan opløse strukturerne. Den målte elektriske modstand i jorden afhænger af andelen af lermineraller, lertype, vandindhold og porevandets ledningsevne. Rammerne for forskellige sedimenters modstande er meget vide, hvorfor den geologiske fortolkning af modstandsmodeller skal foretages med omtanke. Herunder følger en gennemgang af forskellige gængse geofysiske metoder.

2.2 Borehulslogging

Der er borehulslogging, hvor specifik viden fra et specifikt sted kan udledes. Her bores et hul, hvor der løbende bliver udtaget sedimentprøver, som beskrives. Denne metode er god til at give helt præcis viden om, hvilke jordlag der er, deres dybdeplacering og tykkelsen af dem, men den siger ikke noget om strukturerne rundt om. Det er en langsommelig og bekostelig metode, til gengæld fås den mest sikre viden om jordens opbygning på dette punkt. På Jupiter-databasen ligger der sedimentbeskrivelser af borerne under hver boring. Dog er kvaliteten i beskrivelsen af borerne af varierende kvalitet.

2.3 Multi Elektrode Profilerer – MEP

MEP-metoden er en elektrisk metode, hvor strøm sendes ned i jorden via to strømelektroder (jordspyd) og spændingsforskellen måles over to potentialelektroder, som vist på figur 4, hvor der også måles over en å, med samme metode. Den målte spændingsforskel omregnes til en elektrisk modstand. Et måleinstrument opsamler data, og det er muligt, at der kan måles på forskellige kombinationer af spyd, således der både kan måles over store og små afstande mellem spyddene og der kan laves kombinationer, således der kommer flere målinger, der dækker de samme dybder, og dette forbedrer datakvaliteten og datatætheden. Det er et tidskrævende feltarbejde, da elektronerne sættes i jorden manuelt og efter endt måleprogram flyttes videre til et nyt målested. Til gengæld kan MEP-udstyret anvendes på vanskeligt fremkommeligt terræn og arealer, hvor ATV'er ikke kan køre. I forhold til BNBO-kortlægning vil MEP-metoden have sin fordel ved meget terrænnære magasiner og hvis man ønsker at undersøge et mindre areal meget detaljeret.



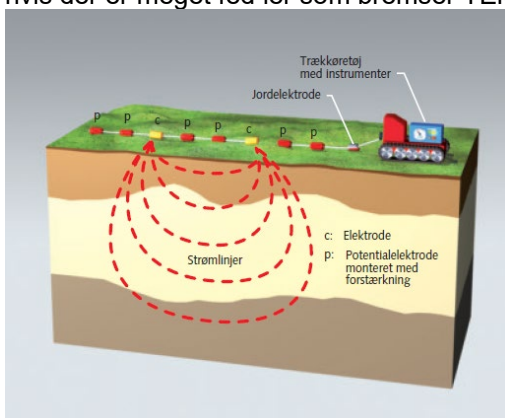
Figur 4. MEP-metoden vist, hvor jordspyddene er koblet til den orange ledning, hvor strømmen sendes ud. Her er lavet en opstilling, hvor der også måles over åen via flydende elektroder. Foto: Helle Holm.

2.4 PACES Pulled Array Continuous Electrical Sounding

PACES metoden er også en elektriske metode. Den fungerer som MEP-metoden, ved at der sendes strøm via strømlektroder som opsamles via potentialelektroder. Spændingsforskellen måles over potentialelektroderne. Elektroderne ligger på et langt og robust kabel, og trækkes hen over jorden, for opstilling se figur 5. Mens der køres, registrerer måleinstrumentet spændingsforskellen for hver 1,6 meter og i 8 forskellige måle-kombinationer. De samhørende værdier for strømstyrke og spænding optages løbende og omsættes til modstandsværdier langs profillinjen. Jo større afstand mellem elektroderne, jo større og dybereliggende jordvolumen afspejler målingerne /6/. Metoden kræver, at der er en vis fugtighed i jorden, før end at strømmen har forbindelse og jorden kan lede strømmen. Det har været en af de mest udbredte metode til kortlægning af modstandsforholdene i den øvre del af lagserien. Metodens styrke er, at der kan indsamles store mængder tætliggende data på kort tid – specielt i det åbne land. Til gengæld kræver udstyret relativt åbne og fremkommelige arealer, hvilket kan være en begrænsning i anvendelsesmulighederne. PACES-kortlægninger vil ofte være udført i områder, hvor der har været særligt ønske om at vurdere dæklagene over grundvandsmagasinerne. Dette kan typisk være i eksisterende eller potentielle oplande til kildepladser.

En af ulemperne ved PACES er, at jorden skal have en vis fugtighed før der er kontakt mellem elektroderne og jorden. Derfor kan der godt være huller i dataindsamlingen, hvis kablet med elektroderne ikke har kunne skabe kontakt.

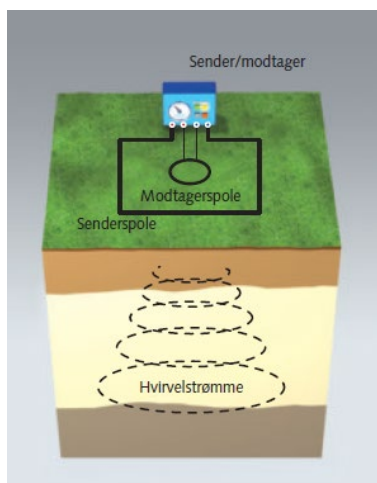
PACES kortlægningen vil have sine fordele i områder, hvor der er mange elektriske installationer eller hvis der er meget fed ler som bremser TEM sonderingerne.



Figur 5. PACES metoden skitseret, hvor en ATV trækker et kabel med strøm- og potentialelektroder som kontinueret sonderer undergrunden, og en computer opsamler målingerne løbende. Figur fra [Den flyvende pilekvist \(videnskab.dk\)](http://Den.flyvende.pilekvist.videnskab.dk).

2.5 TEM Transiente Elektromagnetiske Metode

En TEM sondering foregår ved, at der lægges en ledning ud i en formation, som der sendes strøm igennem. Strømmen genererer et statisk magnetfelt i luften og i jorden. Så længe strømmen ikke ændres, induceres der ikke strømme i jorden. Når strømmen slukkes abrupt, induceres hvirvelstrømme i jorden. Disse strømme diffunderer nedad og udad i jorden. Dette sker samtidig med, at hvirvelstrømmens amplitude falder pga. jordens elektriske modstand /7/. I modtagerspølen måles det inducerede felt fra henfaldet af disse hvirvelstrømme og opnår derved, gennem en geofysisk tolkning af disse målinger, et estimat på jordlagenes elektriske formationsmodstand. Metoden er skitseret i figur 6. Fordelen ved TEM er, at der indsamles kontinuerede, tætliggende data langs måleprofilen, og disse data giver en meget detaljeret opløsning af jorden. Ulempen er, at metoden er meget følsom overfor elektriske installationer i landskabet og derfor kræver data ofte en stor efterbehandling for at finde og fjerne fejlslutninger og koblinger. Metoden er praktisk talt overtaget af de to andre TEM-opstillinger omtalt i de næste to afsnit.



Figur 6. Den transiente elektromagnetiske målemetode (TEM) går ud på at skabe elektriske hvirvelstrømme i jorden, som inducerer et magnetfelt, hvis styrke kan måles af en modtager, fra /8/.

2.6 SkyTEM

SkyTEM-systemet er en luftbårne version af TEM, som beskrevet i afsnittet før. SkyTEM består ligesom TEM af en senderspole og en modtagerspole. I stedet for at ligge på jorden, er de to spoler monteret på en ramme, som hænger under en helikopter (figur 7). Systemet sender et elektromagnetisk signal ned mod jorden og danner hvirvelstrømmene som TEM, og signalet der kommer retur, bliver oversat til en model over den elektriske modstand i undergrunden. Metoden er effektiv til at kortlægge store områder, og den kan kortlægge områder, som ikke vil være fremkommelige på anden vis som fx skove og søer. Den er god til at kortlægge i de dybereliggende strukturer ned til omkring 200 meter under terræn. Det er også en dyr metode, da helikopteren er bekostelig i drift.

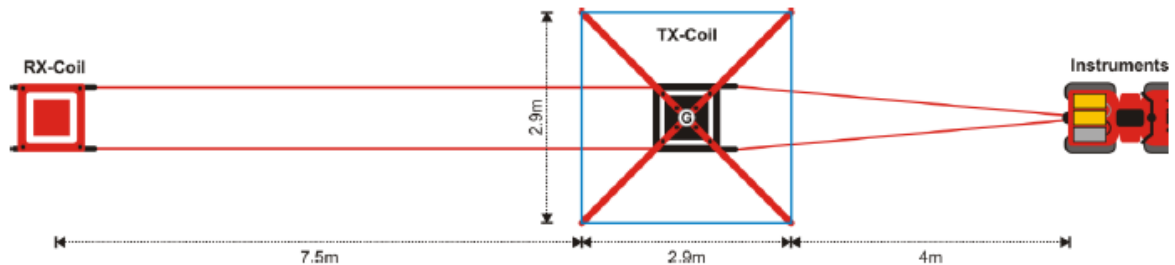


Figur 7. Billede af SkyTEM opstillingen, hvor helikopteren flyver rundt med den påmonteret ramme hvor strømmen sendes igennem og hvor modtagerspolen også sidder. Foto fra SkyTEM.

2.7 T-TEM

tTEM er også en videreudvikling af TEM metoden ligesom SkyTEM er det. I tTEM opsætningen er senderpolen (TX) og modtagerspolen (RX) trukket efter en ATV. Afstanden fra ATV'en til transmitterspolen er ca. 4 meter og afstanden herfra til modtagerspolen er ca. 7,5 meter, se figur 8. ATV'en kan køre med en hastighed på 5-15 km/t, hvor der stadig er god opløselighed af data. Afstanden mellem de kørte linjer kan ofte passe med afstanden på sprøjtesporene, og derved er der minimal skade på markstrukturen. tTEM er en hurtig kortlægningsmetode og den er forholdsvis billig i forhold til fx SkyTEM. Der kan kortlægges mange hektar på en dag og der opnås en stor datatæthed og dermed en god opløsning af

undergrunden. Metoden har sit virke fra omkring 5-10 meter runder terræn og ned til 70-100 meter alt efter hvilke lag jorden består af. Metoden er forholdsvis ny og den vinder større indpas som et af de fortrukne instrumenter til terrænnær kortlægning. I BNBO-sammenhænge er metoden oplagt, da store områder kan kortlægges med stor opløsning.



Figur 8. Opstillingen af tTEM. Til højre er ATV'en hvorpå måleinstrument, GPS-udstyr og controller sidder. Sender-spolen sidder i midten og det er den, der udsender et elektromagnetisk felt, som når strømmen slukkes, inducere et felt i jorden. Den inducerede strøm modtages af modtagerspolen som sidder længst til venstre. Det hele kan trækkes hen over jorden, da udstyret er installeret på en slæde. Figuren er fra tTEM kortlægningsrapporten som HydroGeophysicsGroup ved Aarhus Universitet har udført for SEGES.

Forskellige cases med BNBO afgrænsninger og geofysisk kortlægninger

I dette afsnit vil forskellige BNBO-afgrænsninger blive gennemgået, hvor der vil blive set på, hvilket geofysik der er i området, og hvordan tolkningen af geofysikken passer med de værdier, der er blevet brugt i beregningen af BNBO. Der vil være mest fokus på den effektive magasintykkelse, da den effektive porøsitet er svær at bestemme med geofysisk data.

Der tages udgangspunkt i to af de tre caseområder, hvor der blev kørt tTEM i det første projektår. I det tredje caseområde har det ikke været muligt at få det overlappende geofysiske lag tolket tilfredsstillende, da det er SkyTEM som ligger som enkelte sonderinger.

Case 1 – Daugbjerg

I Daugbjerg er der to indvindingsboringer med ét samlet BNBO. Der er i 2003 lavet en MEP-kortlægning i området. Det må formodes, at det er denne kortlægning, der er blevet brugt til den regionale grundvandsmodel i området sammen med andet tilgængeligt data. Resultatet fra MEP-kortlægningen er sammenlignet med den tTEM-kortlægning SEGES foretog i 2021.

BNBO er blevet beregnet af Orbicon (nuværende WSP) i 2015 for SVANA. Der er brugt AEM til modelarbejdet (WhAEM). Data er fra /9/.

Parameter

I tabel 3 er listet boringsoplysninger for de to boringer som er hentet fra Jupiter databasen.

Tabel 3. boringsoplysninger fra Jupiter.

DGU nr	65.978	65.979
Magasintype	Frit	Frit
Magasinbjergart	Kalk/kridt	Kalk/kridt
Lerdæklagstykkelse [m]	0	0
Magasintykkelse [m]	15-73 meter er der boret i kalk	15-73 meter er der boret i kalk
Filterhøjde [m]	Uforet	Uforet
Indvinding [m ³ /år]	30.000	30.000
Strømningstiden [år]	1	1

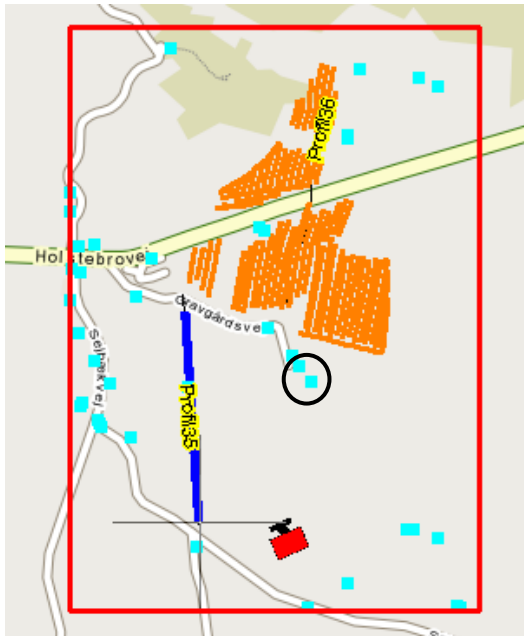
I tabel 4 er listet de værdier for beregningsparametre som Orbicon har brugt i de endelige beregninger af BNBO for Daugbjerg. Der er kun vist for den ene boring, da det er tilsvarende værdier for den anden boring.

Tabel 4 data der er brugt til beregningen af BNBO. Fra Orbicons BNBO-rapport /9/.

DGU nr 65.978			
Parameter	Data	Enhed	Bemærkning
Tilladelse pr boring	30.000	m ³ /år	
Korrigeret tilladelse	40.083	m ³ /år	
Strømningstid til boring	2	år	Kontrolfrekvens fastsat ud fra tilladelsens størrelse
filterdiameter	203	mm	Uforet, sættes til forerørsdiameteren
filterbund	73	m.u.t.	
Rovandspejl	21.3	m.u.t.	
Magasintop	0	m.u.t.	
Magasinbund	33	m.u.t.	Bund ej beskrevet i boring. Magasinbund sættes til 10 m under forerør, da øverste 8 m af kalken er i forerør.
Magasintype	Frit	-	
Effektiv magasintykkelse	11.7	m	
Transmisivitet	0.00034	m ² /s	Beregnet
Effektiv porøsitet	0.2	-	
Gradient	0.0071	-	Beregnet ud fra potentialekortet
Strømningsretning	128.6	Grader	Vurderet ud fra potentialekortet

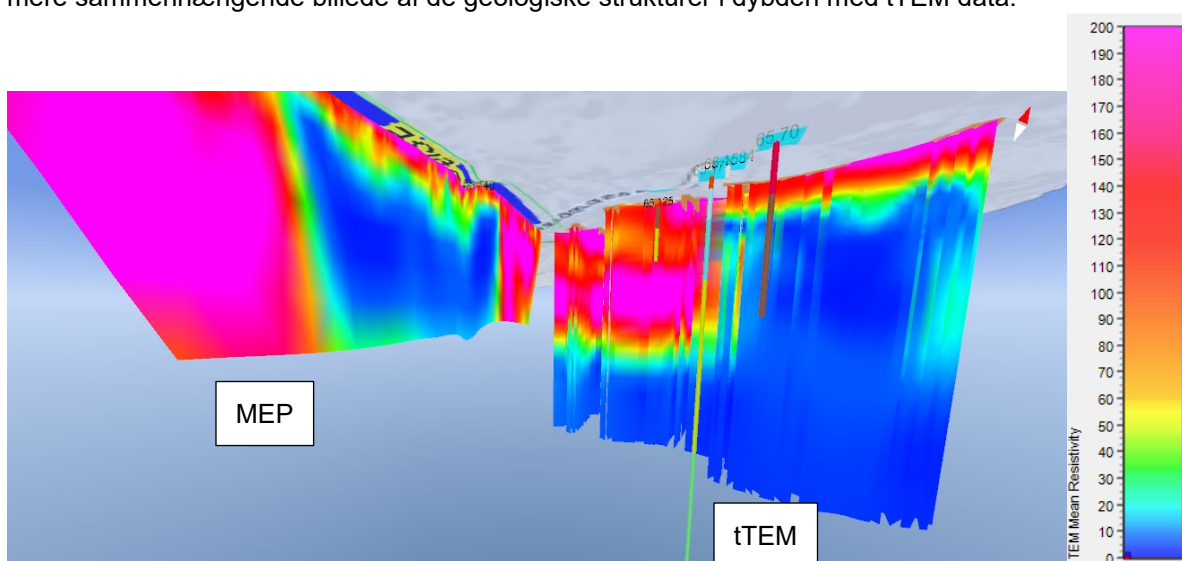
Geofysikken

Der er som sagt lavet en MEP-kortlægning i 2003 i området. MEP-kortlægningen ses som mørkeblå linjer på kortet (figur 9), hvor elektrodespyddene har stået. På figur 9 er den MEP-linje, der ligger tættest på tTEM, tegnet som en blå linje. tTEM-kortlægningen er vist på samme figur som orange linjer. Der er desværre ikke fuldstændig overlap mellem de to kortlægningstyper, men data fra dem kan stadig godt sammenlignes.



Figur 9. MEP og tTEM-kortlægning i Daugbjerg. MEP-kortlægningen er ved den blå linje og tTEM er de orange striber. Den sorte cirkel viser, hvor de to borer, der er beregnet BNBO for, ligger. De lyseblå prikker er borer fra Jupiter.

På figur 10 er data fra de to kortlægninger vist, som det ser ud i GeoScene3D. Det ses, at datatætheden er stor ved begge metoder. Der er også overensstemmelse mellem modstandsprofilerne og laggrænserne. Forskellen ses især ved indtrængningsdybden. På MEP ses bunden af de højresistive lag ikke (varme farver) men det ses på tTEM data. På tTEM profilet er det også lettere at se, at det lavresistive legeme (kolde farver) er opskubbet i en del af området og ellers ligger under kalkmagasinet. Denne information fås ikke på MEP-profilet, da indtrængningsdybden er mindre. I dette tilfælde fås et mere sammenhængende billede af de geologiske strukturer i dybden med tTEM data.

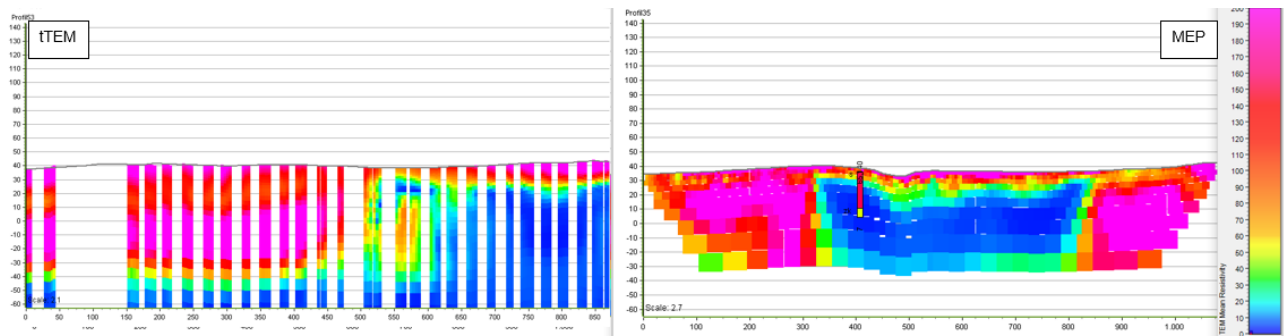


Figur 10. MEP og tTEM data fra Daugbjerg som vist i figur 9. Resistiviteten er angivet i Ohm meter.

Bestemmelse af magasintykkelse

Da grundvandsmagasinet her er kalk, og der i den nyeste anbefaling til BNBO-afgrænsning, anbefales at bruge 10 meter som magasintykkelsen /1/, da størstedelen af transporten foregår i de øverste 10 meter, er der her ikke så meget, der kan ændre ved den værdi. Men det er tydeligt at se både på tTEM og MEP-profilerne, at magasintykkelsen er mere end 10 meter (de lilla-røde farver på figur 11). Og på data fra Jupiter-boreprofilet at kalklaget også er tykkere end de 11,7 meter, der er blevet brugt i beregningen (tabel 4). De blå farver på figur 11 er et opskubbet lerlag.

I dette tilfælde giver den geofysiske kortlægning – både med tTEM og MEP mere viden om undergrunden end hvad der er lagt til grund for beregningerne.



Figur 11. Profil med hhv. tTEM og MEP kortlægningsdata. MEP-data er tolket i en 2D model og tTEM er mange 1D modeller. Resistiviteten er angivet i Ohm meter.

Case 2 – Vellev

I Vellev er der to indvindingsboringer med ét samlet BNBO. Der er i 2004 lavet en PACES kortlægning i området. Det må formodes, at det er denne kortlægning, der er blevet brugt til den regionale grundvandsmodel i området sammen med andet tilgængeligt data. Resultatet fra PACES-kortlægningen er sammenlignet med den tTEM-kortlægning SEGES foretog i 2021.

BNBO er blevet beregnet af Rambøll i 2021 for Miljøstyrelsen. Der er brugt Mike She, som er en numerisk grundvandsmodel til arbejdet.

Parameter

I tabel 5 er listet boringsoplysninger for de to boringer, som er hentet fra Jupiter-databasen.

Tabel 5. boringsoplysninger fra Jupiter.

DGU nr	68.473	68.945
Magasintype	Frit	Frit
Magasinbjergart	Sand	Sand
Lerdæklagstykkel [m]	0	3
Magasintykkelse [m]	0-30 meter er der boret i sand/grus	3-30,5 meter er det boret i sand med et indslag af fedt ler på 0,25 meter
Filterhøjde [m]	25-30 m.u.t.	24-30 m.u.t.
Indvinding [m ³ /år]	35.000	35.000
Strømningstiden [år]	1	1

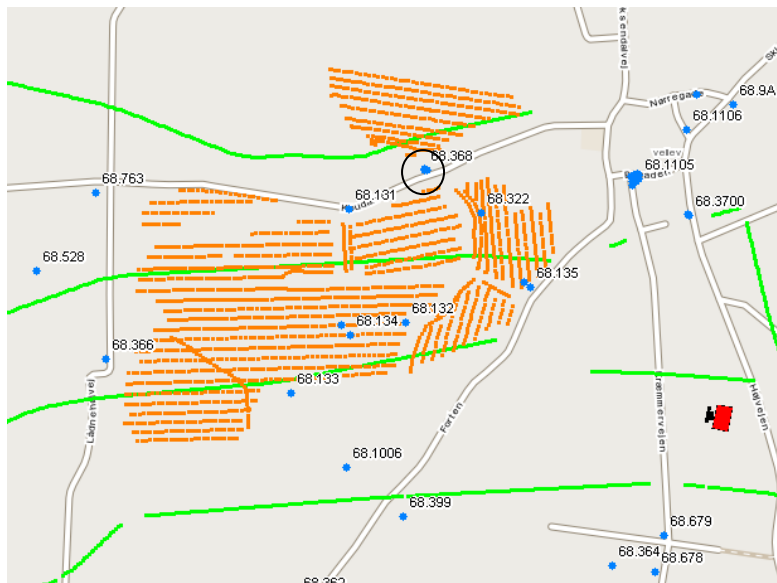
I tabel 6 er listet de parameterværdier som Rambøll har skrevet i deres BNBO-rapport, at de har brugt (de værdier, der er brugt i beregningen er blevet tilsendt personligt og kan ikke refereres i skrivende stund). Der er ikke angivet lige så mange parameterværdier som for Daugbjerg.

Tabel 6. data der er brugt til beregningen af BNBO.

Vandværk	Anlæg	Boring	Beregningsgrundlag 2021 (m3/år)	Samlet tilladelse 2021	Porøsitet
Vellev Vandværk	61316	68. 473 og 68.945	35000 for hver	70000	0,3

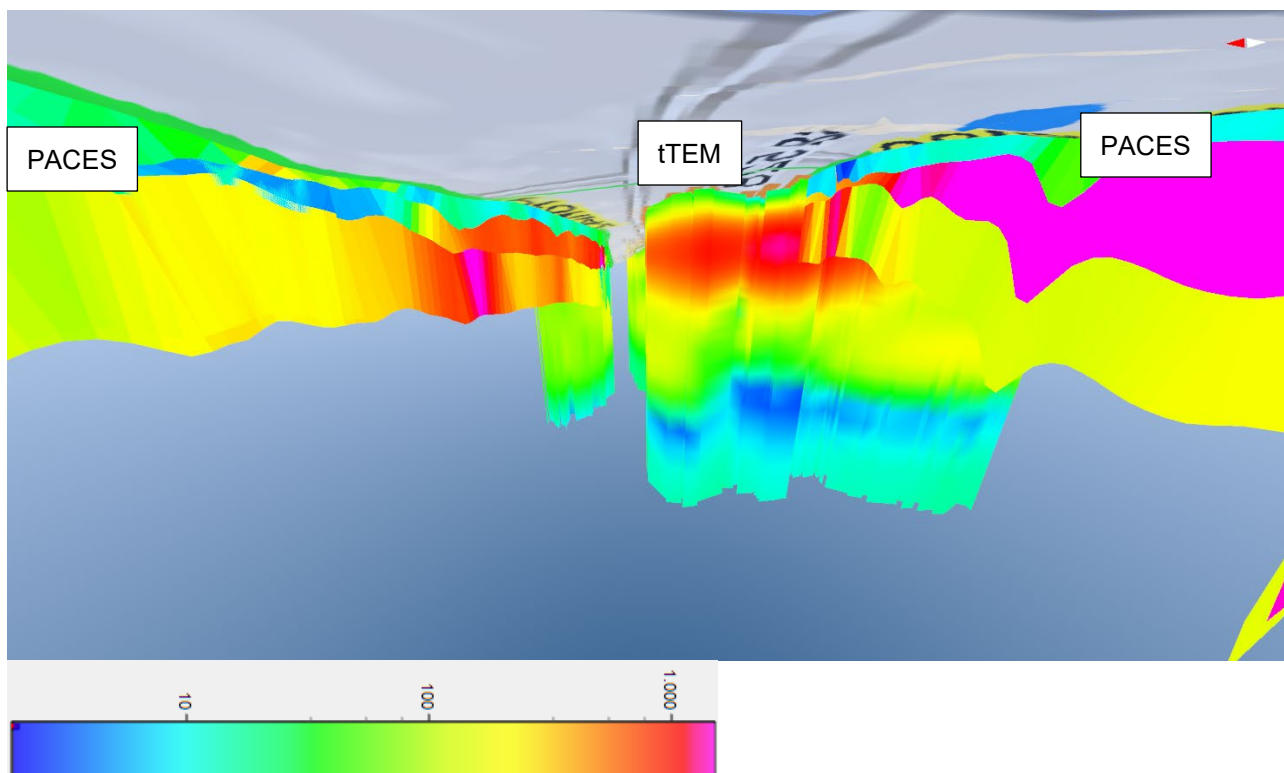
Geofysikken

Der er lavet en PACES-kortlægning i 2004 i området. PACES-kortlægningen ses som grønne linjer på kortet (figur 12), hvor der er kørt med instrumentet. På figur 12 er PACES kortlægningen, der ligger tætteste på tTEM vist. tTEM kortlægningen er vist på samme figur som orange linjer.



Figur 12. PACES (grønne linjer) og tTEM (orange linjer) kortlægning ved Vellev. Blå prikker angiver vandindvingsboringer. Sorte cirkel er hvor borerne ligger, som der er beregnet BNBO for.

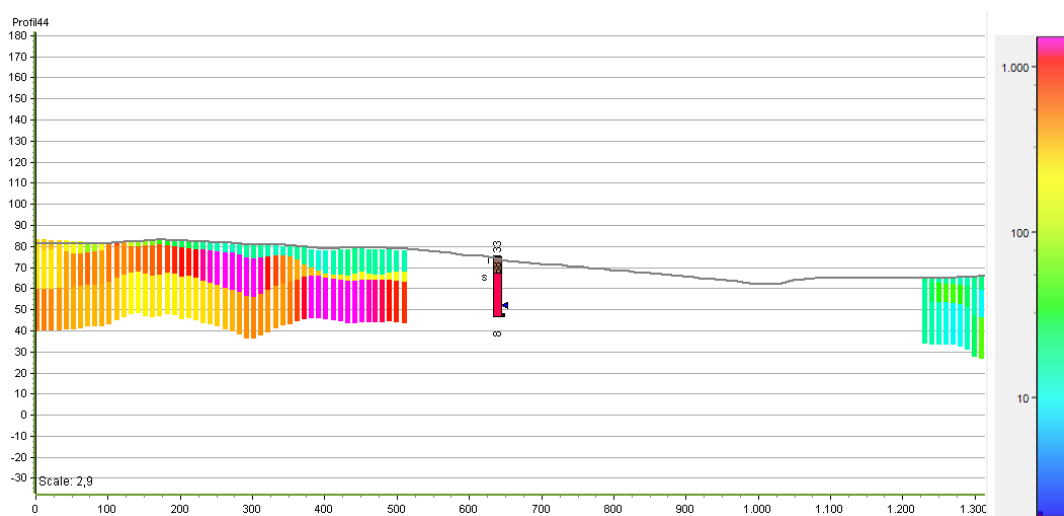
På figur 13 er de to datatyper vist, som det ser ud i GeoScene3D. Det ses, at datatætheden er stor på begge metoder. Modellen fra PACES kortlægningen har en mere kontant overgang mellem lagene, og det ser lidt fortegn ud på figur 13. Forskellen på de to datasæt ses især ved indtrængningsdybden. På PACES er det kun de allerøverste lag, der opløses, mens indtrængningsdybden er væsentlig højere på tTEM.



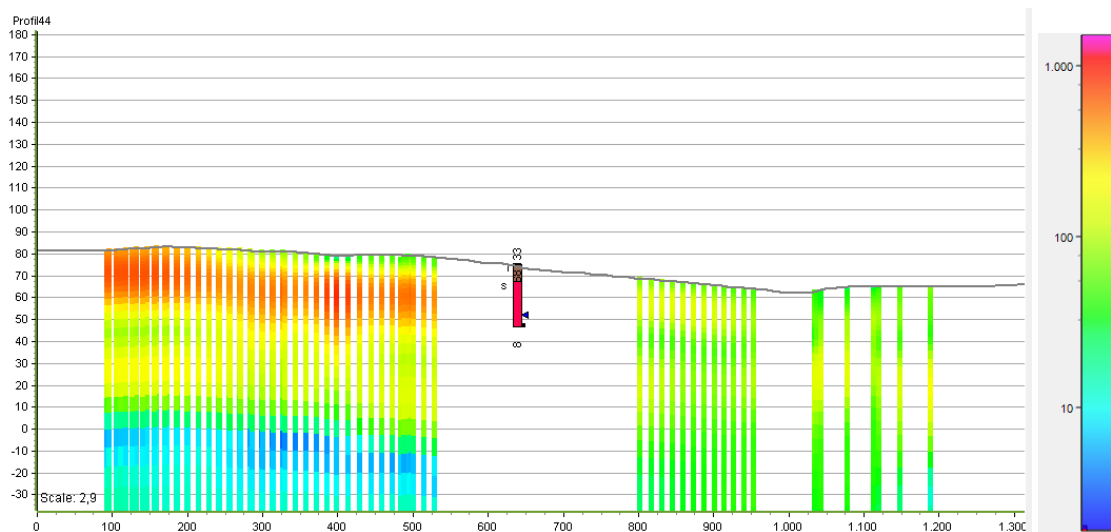
Figur 13. MEP og tTEM data fra Daugbjerg som vist i figur 12. Resistiviteten er angivet i Ohm meter.

Bestemmelse af magasintykkelse

Der er vist en profilinje med overlap af PACES og tTEM i figur 14 og 15. Der er kun vist en type data på hver figur, da de i samme figur vil mudre billedet. På PACES profilet (figur 14) ses afgrænsningen mellem det øverste lerlag (grønlig nuancer) og sandlaget (røde-gullige nuancer) tydeligt. Afgrænsningen flugter også godt med borerapporten for DGU 68. 945, at der er et lerlag allerøverst. Der hvor forskellen på de to kortlægninger træder frem, er ved indtrængningsdybden. Som det ses med MEP-kortlægningen fra Daugbjerg, gælder det samme her for PACES, at opløsningen i dybden ikke er særlig stor i forhold til tTEM. På figur 15 hvor kun tTEM data er vist på profilet, ses bunden af sandmagasinet. Derfor kan magasintykkelsen med tTEM data bedre bestemmes, end hvad tilfældet er med PACES.



Figur 14. PACES resistivetsprofil.



Figur 15. tTEM resistivitetsprofil for samme profil som figur 14.

Det har ikke været muligt at finde frem til, hvilken værdi der er brugt som lagtykkelse ved denne BNBO. I stedet er denne værdi udledt fra de øvrige oplysninger, idet det var den eneste ubekendte parameter i ligning (1). Arealet af BNBO er slået op på MiljøGIS. Dermed fås en magasintykkelse på 4,4 meter. Denne magasintykkelse passer hverken med de oplysninger, der er angivet i borerapporten, som vist i tabel 5, og det passer heller ikke med, hvad vi ser i geofysikken.

BNBO for Vellevej er som nævnt tidligere beregnet med en numerisk metode, og det kan være at grunden til, at der er anvendt en værdi, der ikke stemmer overens med, hvad der ellers ligger af oplysninger. Denne lille sammenligning viser, at der er meget viden at hente, når undergrunden bliver "scannet" med tTEM og at denne viden burde indgå i beregningen af BNBO for at få en bedre og mere retvisende afgrænsning af området.

Diskussion/konklusion

Der er behov for metoder, der sikkert kan opløse jordens strukturer. Der er allerede udviklet mange metoder, og der vil helt sikkert komme flere til. Den mest oplagte metode for nuværende er tTEM-metoden, da den på relativ kort tid kan kortlægge et stort område, og den kan gøre det med en datatæthed, der giver stor sikkerhed for det indsamlede. Det er med til at sikre, at BNBO-afgrænsningen er så præcis som muligt. Derfor er det vigtigt, at viden fra de nye kortlægninger bliver indarbejdet i grundvandsmodellerne hurtigt og nemt, så nye BNBO-udpegninger beror på den nyeste viden.

Der er stort potentiale i at bruge geofysisk data til at forbedre fastlæggelsen af behovet for grundvandsbeskyttelse, samt sikre at afgrænsningen af et udpeget grundvandsbeskyttelsesområde er fagligt begrundet, og at størrelsen af området, der kræver en ekstra beskyttelsesindsats, også er det. Jo bedre oplysninger vi kan få af jordens opbygning, jo bedre modeller kan der laves, og jo bedre vil vi kunne give bud på, hvor der er et ekstra behov for at beskytte grundvandet. Som det ses ved Vellevej, så er der blevet brugt en meget mindre magasintykkelse end geofysikken viser, og for dette tilfælde vil det betyde, at arealet af BNBO vil blive mindre, hvis der bliver brugt en større magasintykkelse, som geofysikken viser.

For de to case-områder her, er der ikke det meget mere information ved hhv. PACES og MEP end som tTEM kan give i de øverste jordlag. Men havde vi haft SkyTEM og tTEM sammen, så vil vi kunne opløse endnu dybere strukturer og i fremtiden, hvor nye kildepladser skal udvælges og det er større områder, der skal ydes en ekstra beskyttelse på, vil det være en stor fordel at kunne kombinere flere typer data.

Geofysik til at sige noget om den generelle beskyttelsesbehov

I forhold til at vurdere beskyttelsesbehovet, så skal der kigges på den akkumulerede lertykkelse. Det vil sige tykkelsen af alle lerlag over et magasin. Til dette job har tTEM-kortlægningen vist sig at give gode data, der kan opløse tynde lag og derved give en bedre fornemmelse af, hvor godt beskyttet et grundvandsmagasin er.

Den nye forskning der er lavet omkring sårbare lerjorde /10/ viser, at nedsivningen af pesticider fra jordoverfladen langt overvejende foregår gennem bioporer, der kan blive tilbage, selv efter at træerne for længst er væk, samt via små lag af sand i lerjorden. Nedsivningen gennem selve leret er ubetydelig. Det er derfor værd at overveje, om tTEM eller andre geofysiske metoder kan forfines til bedre at kunne kortlægge, om dæklagene over magasinerne udgør en god beskyttelse.

Referencer

/1/ BNBO Beregningsprocedure. Miljøstyrelsen 2020

/2/ Miljøministeriet, Miljøstyrelsen. Boringsnære beskyttelsesområder – BNBO. Vejledning fra Miljøstyrelsen Nr. 2 2007.

/3/ Niras for Miljøstyrelsen. Teknisk beskrivelse af BNBO-beregninger inden for FEAR kortlægningsområdet – Allerød, Frederikssund og Roskilde Kommune. Numeriske beregninger af BNBO.

/4/ Rambøll. Boringsafklaring og dataindsamling i Region Syddanmark, BNBO. 2016. Marlene Ullum, Bianca Pedersen, Lars Holm Thomsen, Line Eltved, Karoline Edelvang, Stig Marstal, Andreas Mørch-Madsen. ISBN nr. 978-87-7175-555-8

/5/ Vejledning om boringsnære beskyttelsesområder (BNBO). Miljøstyrelsen 2015. Vejledning nr. 45. <https://www2.mst.dk/Udgiv/publikationer/2020/06/978-87-7038-195-6.pdf>

/6/ Geovejledning 3. <https://www.geovejledning.dk/gv3/index.php/vejledningen/3-vaerktoejskasse-af-snit-3-1-3-14/3-3-paces-og-pacep/>

/7/ ANVENDELSE AF TEM-METODEN VED Geofysisk Afdeling Geologisk Institut Aarhus Universitet 2003. GEOLOGISK KORTLÆGNING. http://www.hgg.geo.au.dk/rapporter/TEM-metoden_geologisk-kortl%C3%A6gning.pdf

/8/ Kurt I Sørensen (2015). [Den flyvende pilekvist. Lokaliseret den 29. august 2022 på Den flyvende pilekvist \(videnskab.dk\).](#)

/9/ Afgrænsning af BNBO. Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning, SVANA, Region Midtjylland. Orbicon 2016. Bilag 2 Beregningsgrundlag Viborg.

/10/ Jens Aamand, Nora Badawi, Peter Roll Jakobsen, Peter R. Jørgensen, Klaus Mosthaf, Lars Trolborg, Massimo Rolle, DTU Mapping groundwater vulnerability to pesticide contamination through fractured clays CLAYFRAC. 2022. Pesticide Research no 206.