



AARHUS
UNIVERSITY
SCHOOL OF ENGINEERING

ANVENDELSE AF DC/IP I FORBINDELSE MED GEOTEKNISKE UNDERSØGELSER I ANLÆGSBRANCHEN

Specialerapport i Teknisk Geologi Aarhus Universitet 2013

Line Sell, Studie Nr. 20108755

Line Sell

FORORD

Dette speciale er udarbejdet af Line Sell i forbindelse med afslutningen på civilingeniøruddannelsen 'Teknisk Geologi' på Aarhus Universitet, Ingeniørhøjskolen. Specialet tager udgangspunkt i vejbyggeriet 'Sdr. Borup – Assentoft Motortrafikvej', der har en fordelagtig placering uden for bebyggede områder, hvilket minimerer omfanget af kabler i undergrunden, som kan forstyrre målingerne. Vejprojektet var i udbud i foråret 2012 før specialets start, og det var derfor muligt at udføre målingerne upåvirket af anlægsarbejde. Projektmateriale for byggeriet er venligst stillet til rådighed af den rådgivende ingeniørvirksomhed COWI A/S, i særligt samarbejde med deres geotekniske afdeling i Aarhus. Materialet indeholder bl.a. 'Geoteknisk Hovedrapport' og 'Geoteknisk Datarapport', der omfatter boreprofiler, vingestyrkeforsøg, målt vandindhold, CPT forsøg, CBR forsøg, kornkurver mm.

Specialet har til formål at undersøge, om der er en økonomisk gevinst ved at anvende geofysiske metoder til jordbundsundersøgelser før og under projektudførelse i byggebranchen. En del af arbejdet med specialet har bestået i at planlægge og udføre geofysiske målinger og efterfølgende databehandling, invertering og analysering heraf.

Ved gennemlæsning af rapporten anbefales det at benytte vedlagte bilag 12.1 *Signaturoversigt og boreprofiler*.

En særlig tak til Caspar Thrane Leth fra COWI A/S for hjælp og vejledning i forbindelse med udarbejdelse af dette speciale.

Vejleder: Esben Auken, Aarhus Universitet

Medvejleder: Casper Thrane Leth, COWI A/S

Medvejleder: Ingelise Møller Balling, GEUS

Line Sell

Studie Nr. 20108755
Teknisk Geologi
Aarhus Universitet

RESUME

I forbindelse med vejbyggeriet 'Sdr. Borup – Assentoft Motortrafikvej' er der udført geofysiske målinger med det formål at undersøge om der er en sammenhæng mellem de fire Cole-Cole parametre og relevante styrkeparametre for jorden. Det har store omkostninger både økonomisk og tidsmæssigt at skaffe viden om jordbunden ved brug af traditionelle geotekniske undersøgelser, eksempelvis ved boringer i jorden. Desuden er de data, man får ud fra disse målinger, kun "stikprøver" og giver derfor ikke et samlet overblik over forholdene i undergrunden. Ved at udføre Direct Current (DC)/Induceret Polarisation Time Domain (IP) med Gradient Array får man et kontinuert profil af undergrunden. Hvis det er muligt at finde en sammenhæng mellem jordens styrkeparametre og DC/IP parametrene, har man en endnu bedre løsning til undersøgelse af jordbunden.

Det viser sig, at DC/IP målingerne mod forventning ikke har nogen sammenhæng med jordens styrkeparametre i denne undersøgelse. Undersøgelsen viser derimod, at der er en tidsmæssig og økonomisk besparelse ved at anvende DC og DC/IP målinger i projekteringsfasen. 2D inverterede DC/IP profiler giver et detaljeret billede af jordbunden, som kan anvendes sammen med boreprofilerne. En tidlig kortlægning af området i forundersøgelsen kan bidrage til at placere vejens linjeføring. Når den er fastsat, kan man ud fra resistivitetprofilet vurdere, hvor man bør udføre boringer, samt hvor dybe de skal være. Det er ikke nødvendigt at lave IP samtidig med DC målinger for at få et overblik over undergrunden. Det sparer tid at undlade IP, men IP målinger bidrager også med et ekstra element til tolkningen af data og øger dybden for troværdige data.

ABSTRACT

In connection with the road construction project 'Sdr. Borup-Assentoft expressway' geophysical measurements have been carried out with the purpose of investigating the relation between the four Cole-Cole parameters and the relevant strength parameters of the ground. The expenses in connection with producing knowledge about the subsurface are huge, both financially and in relation to time, when using traditional geotechnical methods like for instance drilling. Furthermore the data obtained from drillings are only "spot checks", which provide no comprehensive overview of the subsurface. By carrying out Direct Current (DC)/Induced Polarization Time Domain (IP) with Gradient Array you get a continuous section of the subsurface. If it is possible to connect the parameters concerning the strength of the ground and the DC/IP parameters you will get an even better solution for investigating the ground.

Unfortunately, in this study, no relation has been found between the DC/IP parameters and parameters concerning the strength of the ground. Investigations shows that ground investigation costs can be reduced by using DC/IP measurements during the project planning. 2D inverted DC/IP profiles provide a detailed image of the ground, which can be utilized together with the drill samples. An early mapping of the subsurface in the area during the preliminary examination can contribute to providing knowledge of how to achieve the best alignment of the road. Then the resistivity section should form the basis of where to carry out drillings and how deep they should be in the ground. It is not necessary to carry out IP together with DC in order to achieve a good image of the ground. It saves time to leave out the IP measurements, but IP contributes with an extra aspect to the interpretation of the data and increases the depth of reliable data.

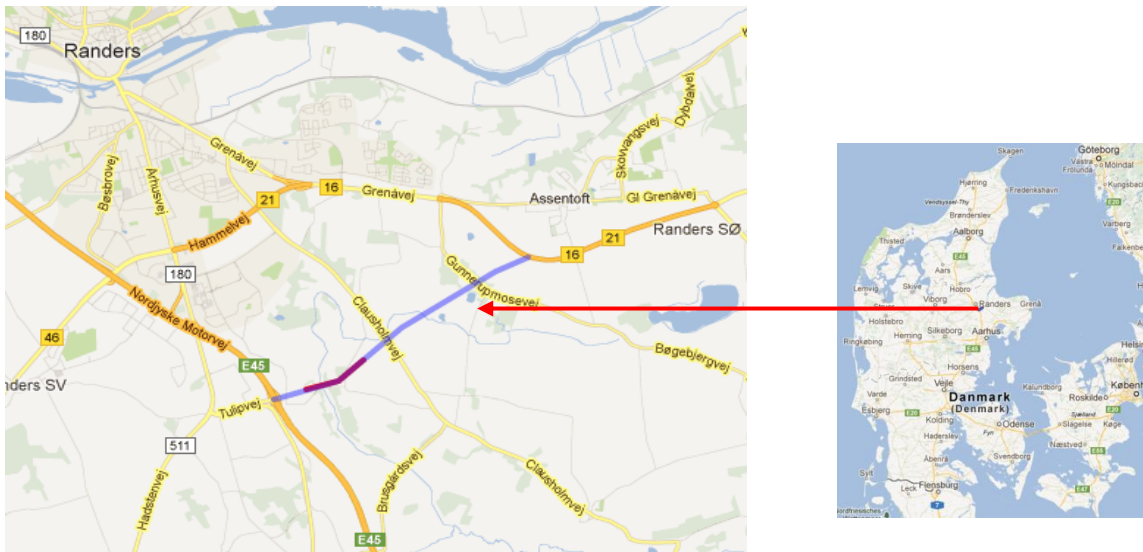
INDHOLD

Forord.....	2
Resume.....	3
Abstract	4
1 Indledning.....	7
1.1 Problemformulering.....	9
1.2 Forudsætninger og afgrænsninger.....	9
2 Teori	10
2.1 Litteratur overblik	10
2.2 Teoretisk baggrund for Geoteknik	12
2.3 Teoretisk baggrund for geofysiske metoder DC og IP.....	16
2.3.1 DC Teori.....	16
2.3.2 Induceret polarisation	19
2.3.3 Inversionsteori.....	23
2.3.4 Kortlægningsdybden	25
3 Metode.....	26
3.1 Målinger	26
3.2 Måleteknik.....	27
3.3 Data processing DC/IP målinger	29
4 Undersøgelser område.....	30
4.1 Lokalitet.....	30
4.2 Geologi	31
5 Geoteknik resultater	32
6 Resultat af DC/IP målinger	35
6.2 Geofysik Resultater 2D DC og DC/IP	35
6.3 Resultater Ellog	38
7 Sammenstilling af Geofysik og Geoteknik data.....	41
7.1 Fortolkning af profiler 1 og 2 og boreprofilerne	41
7.2 Krydsplot og plot af DC/IP parametre og Geotekniske styrkeparametre	41
7.3 Økonomisk sammenstilling af Geotekniske og geofysiske metoder.....	52

8 Diskussion.....	53
9 Konklusion	56
11 Reference liste.....	57
12 Bilag.....	60
12.1 Signatur oversigt og boreprofiler	60
12.2. 2D inversion af DC/IP alle profiler	61
12.3 Datakorrelation datafelter og boreprofiler	62

1 INDLEDNING

I forbindelse med aflastning af den nuværende hovedvej 21 igennem den sydlige del af Randers, besluttede Vejdirektoratet i 2010 at udvide det eksisterende vejnet med en motortrafikvej; 'Sdr. Borup – Assentoft'. Den nye motortrafikvej kommer til at strække sig fra motorvejsafkørsel Randers S - Sdr. Borup, til Grenåvej 16/21 (figur 1). Vejdirektoratet er bygherre for projektet med COWI A/S som rådgivende ingeniør. I perioden april – november 2011 har COWI A/S udført geotekniske detailundersøgelser for projektet. Byggeriet udbydes i 2012 og forventes færdigt i 2014.

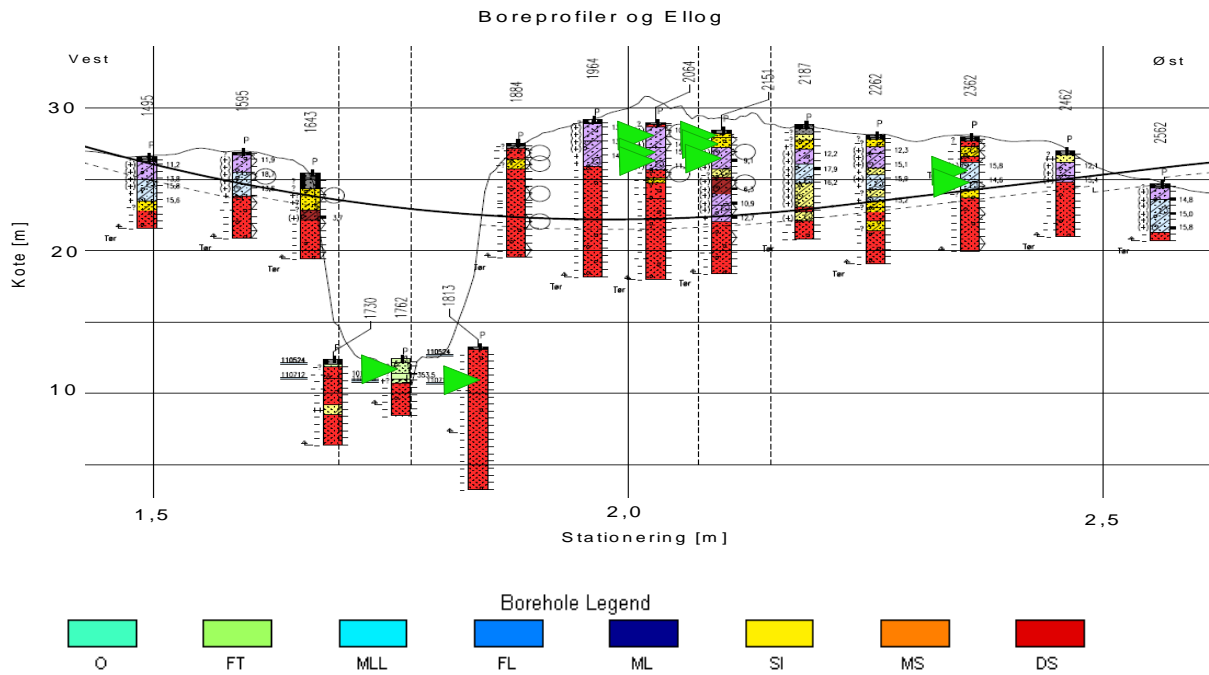


Figur 1, Kort over Randers S, Motortrafikvejen Sdr. Borup – Assentoft, er markeret med en blå linie. Med Lilla er markeret hvor DC/IP målingerne er lavet.

Projektet består bl.a. af en Geoteknisk hovedrapport og en datarapport udarbejdet af COWI A/S. Der er lavet geotekniske undersøgelser for hele strækningen bestående af boreprofiler, vingestyrkeforsøg, målt vandindhold, CPT forsøg, CBR forsøg, kornkurver mm, som anses at være den normale fremgangsmåde af forundersøgelser af undergrunden ved anlægsprojekter. I et forsøg på at udnytte ny teknologi vil denne rapport afdække om det er økonomisk fordelagtigt at supplere de normale geotekniske undersøgelser med geofysisk metoder. Det kan bl.a. være seismik, magnetisme eller elektriske målinger. I denne rapport undersøges geoelektrik, helt specifik Direct Current (DC) og Induceret Polarisation (IP) som måleværktøj. Der er foretaget målinger ved brug af denne metode over en strækning på 1080 m gennem en gammel tunneldal og over et markområde.

Det undersøgte område er udvalgt ud fra de boringer, der er foretaget på denne strækning. Boringerne her har størst dybde og bidrager derfor med et ekstra stort datasæt, hvilket giver mulighed for at sammenholde de geotekniske resultater med de inverterede DC/IP resultater. Til at

understøtte en sammenhæng mellem de geotekniske data og geofysiske data er der udført elektrisklog (ellog). Ellog måles ved boreprofilerne, hvor der graves et nyt hul 1 m fra en eksisterende boring (figur 2). Der måles med det formål at verificere, at de antagne intervaller for lithologiernes resistivitet (figur 6), også er gældende inden for undersøgelsesområdet.



Figur 2, Udsnit af boreprøveoversigten for den undersøgte strækning, motortrafikvejens linjeføring (sort bølget linie), konturen (tynd takket linie) og ellog test (grønne pile). Komplet signaturforklaring ses på figur 5.

1.1 PROBLEMMFORMULERING

I bygge- og anlægsbranchen bruges der store ressourcer på at undersøge jordbunden før og under udførelse af et byggeprojekt. Den mest anvendte metode til udførelse af jordundersøgelser, er ud fra boringer, vingestyrkeforsøg, Cone Penetration Test (CPT) og personlige erfaringer. Det er min opfattelse, at man ikke får et helhedsindtryk af undergrunden ud fra en "stikprøve kontrol" af den jord man skal arbejde i.

Problemformulering

Er der en økonomisk besparelse for bygherren ved at anvende DC og DC/IP målinger til undersøgelse af jordbunden forud for en geoteknisk rapport? Og hvordan kan DC og DC/IP målinger anvendes i forbindelse med en geoteknisk undersøgelse af jordbunden.

Målsætning

Målet med projektet er at undersøge, om det er fordelagtigt at anvende geoelektriske målinger, DC og DC/IP, i forbindelse med geotekniske målinger til jordundersøgelser før og under projektudførelse i byggebranchen. Der undersøges, om det er fordelagtigt at kombinere geotekniske relevante styrkeparametre og Cole-Cole parametrene for at opnå større kendskab til jordbunden og dermed give mulighed for besparelser i hhv. projekteringsfasen eller under projektudførelse.

Metode

Af geofysiske metoder vil der blive benyttet DC/IP målinger og ellog. Metoden er særlig anvendelig ved overfladenære målinger ned til 10-20 meters dybde, og samtidig giver den et kontinuerligt afbildning af jordbunden. Ved måling af DC/IP bliver der målt resistivitet, og ud fra resistiviteten kan man tolke et billede af geologien under terræn. IP giver information om jordens evne som kapacitor, og kan sammen med DC målingerne bidrage med flere relevante oplysninger, som fed ler og forurening. Datasættene er som oftest meget detaljerede og passer med boreprofilerne i lagdelingen og lithologi. Til at sammenholde boreprøver og DC målingerne udføres ellog. Her måles resistiviteten i et borehul og derved fås et direkte mål for resistiviteten for hver lithologi. Rapporten behandler sammenligningerne mellem boreprofilerne og de inverterede geofysiske data. En analyse af det tidsmæssige aspekt inden for begge metoder, samt hvilken fase i byggeriet geoelektriske metoder anvendes mest fordelagtigt.

1.2 FORUDSÆTNINGER OG AFGRÆNSNINGER

De geofysiske metoder vil blive brugt som et værktøj til at undersøge undergrunden. Der vil blive lagt vægt på at vurdere anvendeligheden og udbyttet af geofysik til jordundersøgelser, med det formål at anvende data til projektering i anlægsbranchen. Rapporten vil ikke indeholde dybdegående beskrivelser omkring fysikken bag de geofysiske metoder. Ej heller en geofysisk optimering af instrumenter eller måleteknikker.

2 TEORI

2.1 LITTERATUR OVERBLIK

I tilknytning til geoelektriske metoder sker meget af forskningen inden for områder som minedrift, miljø og grundvandsforskning (H.Seigelet al.,2007). Hvis geoelektriske metoder skal integreres i byggebranchen som et anvendt værktøj til jordbundsundersøgelse, skal der forskes mere i jordens egenskaber og styrkeparametre. Forurenede jord er en dyr omkostning i forbindelse med byggeri, forskningen på dette område er allerede omfattende i forhold til at kunne lokalisere kontamineret jord.

Forurenede jord

Flere undersøgelser af nedlagte lossepladser og militære anlæg viser, at chargeabiliteten er høj ved kontamineret jord. I Sverige har man lavet en undersøgelse (V.Leropux et. al.,2007), hvor man benyttede DC/IP til at lokalisere forurenede jord på en nedlagt losseplads. Der er skrevet flere lignende artikler om brug af DC/IP ved forurening af nedlagte lossepladser (A. Gazoty et al., 2012) og ved et nedlagt militær anlæg (A.Kemna et al., 2004), (H. Vanhala, 1997). Undersøgelser af L.D. Slater og D. Lesmes (2002) konkluderer, at IP er et stærkt værktøj til indskærpelse af geokemiske forekomster ud fra undersøgelser om polarisation ved organiske kemikalier og ler mineraler.

Jordarternes egenskaber

Jordarternes egenskaber er undersøgt i forhold til kornstørrelsesfordeling og lermineralogi. L.D. Slater og D. Lesmes (2002) undersøger forholdet mellem IP og lermineraler, som beskrevet ovenfor. A. Revil (2006) finder en sammenhæng med Cole-Cole parameterne, formfaktoren (c) og kornstørrelsesfordelingen. Endvidere tyder resultater på, at c ændres ved en udvikling af jordens kompakthed, også beskrevet af Tong M. And Tao H. (2007). I sammenhæng med kompakt jord laves en undersøgelse af M. Fukue (1999), der viser, at når lerjord er uforstyrret, vil de kemiske bånd i jorden øge resistiviteten. Når jorden bliver konsolideret eller omrørt, falder resistiviteten, formodentlig fordi man ødelægger båndet mellem partiklerne. Selvom der er lavet forsøg med borehul og IP korrelation, (A.Kemna et al., 2004) er der ikke beskrevet en sammenhæng mellem jordens styrkeparametre og IP.

Lerjord

Et interessant emne inden for lerjord er, hvorvidt det er muligt at skelne mellem fedler og ler. H.Trankjær og L. Christensen (2012) har lavet en undersøgelse af mineralsammensætningen af lerarter i Danmark. Det viser sig, at der er en stærk overvægt af ler mineralet smectit i fed ler. Da mineralsammensætningen er karakteristisk for fed ler, må det være muligt at måle et IP respons, som kan skelne fed ler og ler fra hinanden. Leroy og A. Revil (2009) finder en sammenhæng mellem IP og membran polarisation i forhold til forskellige ler mineraler.

Udførelse

Der er lavet mange undersøgelser af, hvordan man kan optimere undersøgelsestiden for et sæt målinger med DC/IP. Det er interessant for byggebranchen, da det er en langsommelig proces at udføre boreprofiler. T. Dahlin (2000) undersøger forholdet med elektrodernes selvpotentiale, og hvilken konfiguration, der er bedst, for at spare ventetiden, hvor elektroden aflades. Resultatet bliver videreudviklet af T. Dahlin og B. Zhou (2006), hvor forståelsen af selvpotentialet i elektroderne udgør en essentiel part i udviklingen af Gradient Array. Gradient Array gør det muligt at måle et profil fortløbende og derved spare en masse tid. Gradient konfigurationen giver de mest præcise målinger og har det bedste signal-støj forhold. Gradient Array kan med fordel bruges i forbindelse med multichannel instrumenter, og der er derfor mulighed for at spare tid.

2.2 TEORETISK BAGGRUND FOR GEOTEKNIK

I forbindelse med vejbyggeri gælder det om at udnytte den jordbund, man har til rådighed, så mest muligt kan genindbygges, og mindst muligt skal tilføres fra en råstofgrav. Jorden skal kunne bære vægten af trafik, uden at der kommer sætninger i jorden efter ibrugtagning af vejen. Derfor laves undersøgelser af bæreevnen og sætningsrisikoen.

Bæreevne

Beskrivelse af jordens bæreevne er udviklet i 1943 af K. Terzaghi, og beskrevet igen af G. Bagge og K. Bødker (2006). Bæreevnen beregnes for sand, ved hjælp af materialets densitet γ , overlejringsstrykket q , og for ler beregnes den ved hjælp af forskydningsstyrken. Det følgende afsnit vil beskrive, hvilke styrkeparametre der har størst indflydelse på bæreevnen af jorden, og dermed hvilke parametre som er interessante at sammenligne med DC/IP parametre. Bæreevnefaktoren N , er beregnet ud fra friktionsvinklen, hældningsfaktoren for sand i_γ er beregnet ud fra friktionsvinklen samt den effektive forskydningsstyrke og hældningsfaktoren for ler i_c beregnes ud fra resultatet af vingestykke forsøg.

$$\frac{R'}{A'} = \frac{1}{2} \gamma' b' N'_\gamma s_\gamma i_\gamma + q' N'_q s_q i_q d_q \quad (1)$$

(K. Terzaghi, 1943)

$$\frac{R'}{A'} = c' N'_c s_c i_c d_c \quad (2)$$

(K. Terzaghi, 1943)

R= bæreevnen [kN/m]	A= grundarealet af byggeriet [m ²]	
q= effektivt overlejringstryk [kN/m ²]	c'= forskydningsstyrke, udrænet [kN/m ²]	
s= formfaktor	i= hældningsfaktor	d= dybdefaktor
Y= jordens densitet [kN/m ³]	b= bredden af fundamentet[m]	N= bæreevnefaktor

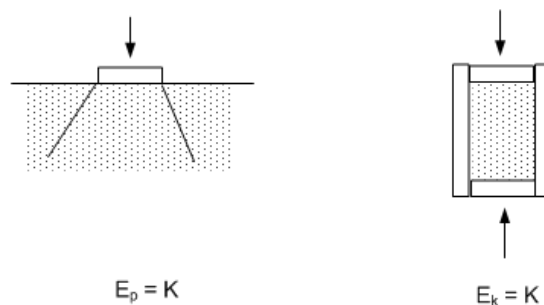
Ud fra formlerne (1) og (2) ses at de vigtige parametre i forhold til bæreevnen, forskydningsstyrke og friktionsvinkel.

Der er mange andre væsentlige faktorer, som spiller ind på jordens bæreevne. Omgivelserne, nabobebyggelse, vandindhold [%] og vandspejlets niveau mm. Rapporten tager kun udgangspunkt i jordens styrkeparametre og vandindhold. I dag undersøger man oftest jordens styrkeparametre ved boringer i jorden. Densiteten beregnes ud fra vægt og rumfylde fra jordprøver. Forskydningsstyrken måles ved vingeforsøg direkte i borehullet. Alternativt kan forskydningsstyrken måles ved trykforsøg eller pladebelastningsforsøg. Friktionsvinklen bør altid bestemmes ud fra triaksialforsøg, helst 3-5 test. Triaksial forsøgene har høje omkostninger og er meget tidskrævende, hvorfor man forsøger at bruge andre metoder til bestemmelse af friktionsvinklen. Den kan udledes af tabeldata ud fra uensformighedstal U, og lejringsstæthed på baggrund af erfaringstal eller ved Cone Penetration Test (CPT). CPT forsøgene måler spidsmodstanden q_t , der er et mål, for hvor kompakt sandkornene er

lejret, og dermed hvor god jordens bæreevne og e-værdien er (afsnit 2.2). Kappemodstanden måler, hvor stor overflade modstanden er og er mest relevant i lerede aflejringer.

Sætninger

Sætninger i jorden bestemmes ud fra elasticitetsmodulet, udtrykket er beskrevet af J. L. Rasmussen (2006). Ved trykspredning i jorden betegnes elasticitetsmodulet (E_p) (figur 3, TV), det kan måles ved pladebelastningsforsøg. Elasticitetsmodulet ved hindret sideudvidelse (figur 3, TH), betegnes E_k og kan findes ved at udføre konsoliderings-forsøg. Konsolideringstal er lig elasticitetsmodulet E_k . Elasticitetsmodulet for sand og ler bliver omtalt E-værdien herefter.



Figur 3, (TV) Elasticitetsmodul ved trykspredning, (TH) Elasticitetsmodul ud fra tryk med hindret sideudvidelse.

$$\text{E-værdien} \quad K = 10.000 \times \text{CBR}(\%) \quad (3)$$

Estimering af konsolideringsmodulet.

$$\text{E-værdien sand} \quad K = M(\sigma \times p_a)^{0,5} \quad (4)$$

$$\text{E-værdien ler} \quad K = \frac{4000 \times C_v}{W} \quad (5)$$

K = konsolideringsmodulet/ E-værdien [kN/m^2]

p_a = referencespænding = 100 kPa

CBR= California Bearing Ratio [%]

σ = spænding på overfladen [kPa]

M = konstant, som funktion af friktionsvinklen

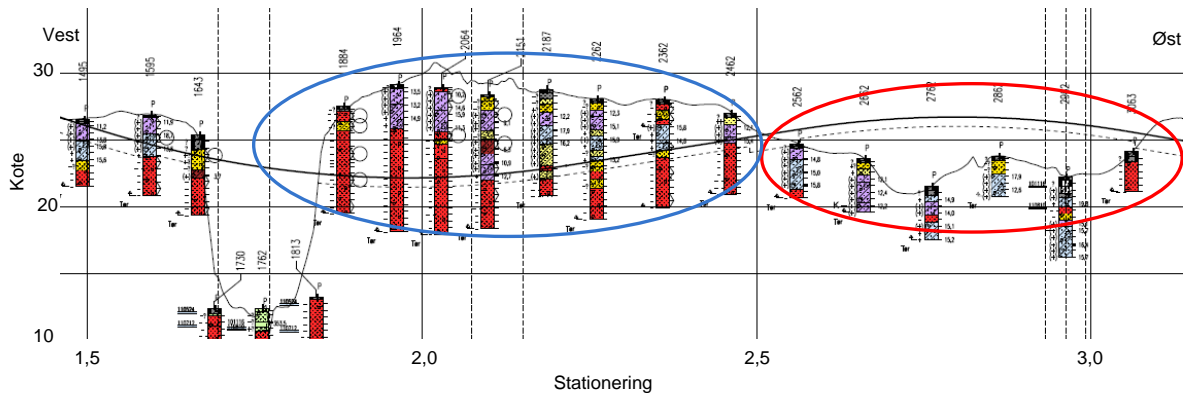
C_v = forskydningsstyrke [kN/m^2]

W = vandindholdet [%]

Igen ses det, at friktionsvinklen og kohæisionsstyrken er bestemmende for styrken af jorden. For sand er friktionsvinklen den afgørende parameter for elasticitetsmodulet og for ler er det forskydningsstyrken. Vandindholdet er også essentielt for beregning af sætninger i ler. Det skyldes, at

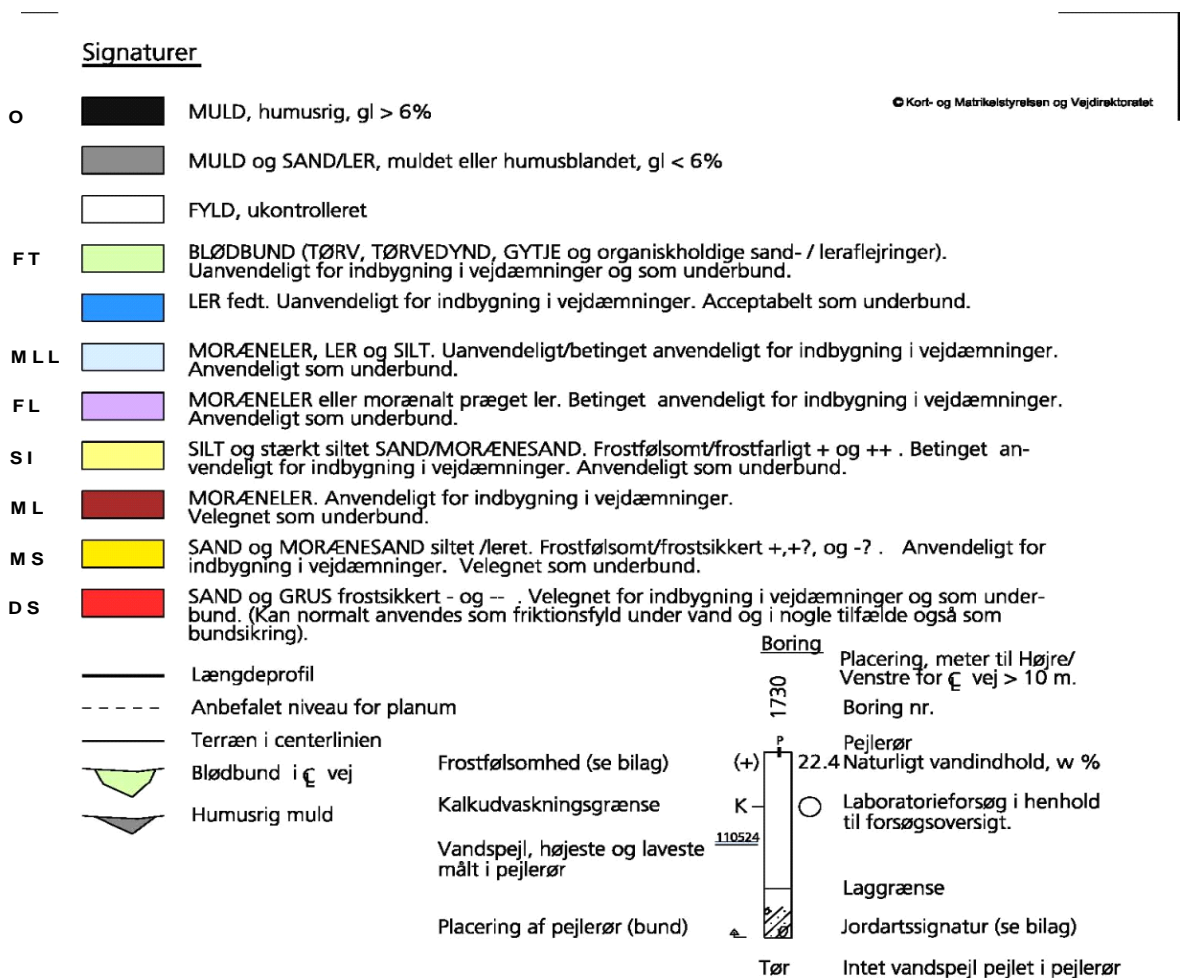
porevæsken er med til at øge lerets forskydningstyrke og styrke jorden, på samme måde, som kornskelettet er for sand. E-værdien kan findes ud fra forsøg direkte i jorden eller i laboratorium. Ellers kan værdien estimeres ud fra CBR og proctor forsøg. Disse vil ikke blive beskrevet yderligere i denne rapport.

På denne strækning skal der afgraves og indbygges jord (figur 4). Når en påfyldning skal laves, bruger man gerne jord, fra et sted på strækningen hvor der er en gennemskæring. For at kunne kontrollere bæreevnen og størrelsen af sætningerne, skal man kende parametrene for den jord, man flytter, og for jorden under det frit gravede og nye terræn. Hvis der fjernes 4 m jord, skal man yderligere 3-5 m i jorden for at undersøge parametre for de nye overfladenære lag. Dybe borer er omkostningsfulde og tager lang tid.



Figur 4, Udsnit af boreprøveoversigten for den undersøgte strækning, topografien (tynd takket linie) og linjeføringen (sort bølget linie). Den blå ring markerer gennemskæringen, den røde ring markerer påfyldningsområdet.

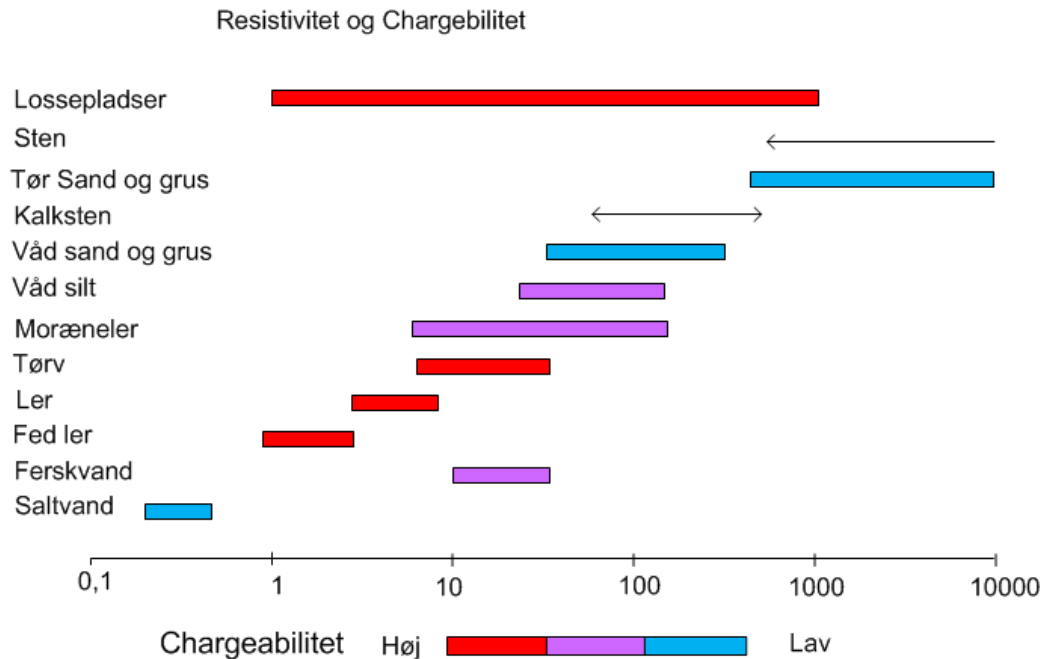
I denne rapport er der særlig fokus på, om jordens styrkeparametre og egenskaber har en sammenhæng med DC/IP parametre. Derfor er der benyttet samme inddeling af lithologier, som rådgivende ingeniører bruger (figur 5), lithologierne er delt ind efter jordart og dens egenskaber. Signaturforkortelserne yderst til højre anvendes gennem hele rapporten som betegnelsen for en bestemt lithologi. Der er kun signaturforkortelser for de lithologier, der er fundet inden for det undersøgte område.



Figur 5, Signatur oversigt, fra COWI A/S geoteknisk rapport (2012).

2.3 TEORETISK BAGGRUND FOR GEOFYSISKE METODER DC OG IP

Direct Current (DC) og Time Domain Induceret Polarisation (TDIP eller IP) er begge geoelektriske metoder til måling af jordbunden og er begge afhængige af lithologi, porevæske, turositet og mætningsforhold. DC registrerer jordens ledningsevne (figur 6), mens IP registrerer jordens egenskab som kapacitor.



Figur 6, Oversigt over resistivitet og chargeabilitet i henhold til en given lithologi eller porevæske. Modificeret figur (J. Pedersen, 2012 , H. Lykke-Andersen, 1974 og A. Villumsen and H. Lykke-Andersen, 1976)

2.3.1 DC TEORI

Christensen N. B. (2006), beskriver DC teori som følgende. DC målinger udføres ved at føre strøm ned i undergrunden og måle potentiale forskellen ved overfladen. Den målte størrelse kaldes modstanden (resistiviteten, ρ). Den specifikke modstand måles i ohm-meter [ohmm]. Det inverse af resistiviteten er konduktivitet som $\sigma = 1/\rho$, konduktiviteten måles i milliSimens pr. meter [mS/m]. Modstanden i jorden afgøres af, hvor stor en del af elektrisk ledende materiale, der er til stede. Jorden består af luft, mineralkorn og porevæske. Luft fungerer som isolator. Mineralkornene bidrager ikke meget til den elektriske ledning, eksempelvis har kvarts og feltspat modstande omkring 5×10^{12} ohmm, medmindre mineralkornene er af metal, magnetit eller pyrit, som har meget lave modstande ned til omkring $1,5 \times 10^{-8}$ ohmm. Porevæsken er til gengæld meget ledende, vand har lav modstand og en

mættet sandjord vil derfor have lavere resistivitet end en tør sandjord. Lerminerale er en gruppe for sig, her er ledningsevnen kvantificeret ved kation udvekslings kapaciteten (Cation Exchange Capacity, CEC) (R. Kirsch, 2006) og porevæsken.

Ohms lov for en resistor er givet ved,
$$\Delta V = R \times I \quad (6)$$

ΔV er potentialeforskellen, som måles i volt [V], R er modstanden og måles i ohm [ohm], I er strømmen, som måles i ampere [A]. Formlen er nært beslægtet med formelen for den specifikke modstand, der benyttes, når det elektriske felt måles i et halvrum.

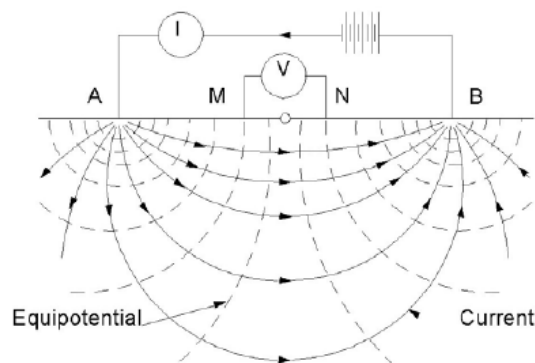
Den specifikke modstand
$$E = \rho \times j \quad (7)$$

Vektor E er det elektriske felt og måles i volt pr. Meter [V/m], ρ er resistivitet og måles i ohm meter [ohmm]. Vektor j er strøm, og densiteten måles i ampere pr. kvadratmeter [A/m²]. Ohms lov viser, at der er en proportional sammenhæng mellem den injakterede strøm og den målte potentiale forskel.

Ved måling af resistiviteten benyttes 4 elektroder, en strømkilde og et måleapparat. Målingen udføres ved at sende strøm i jorden gennem to elektroder, strømmelektroder A, B. Potentialeforskellen måles af to andre elektroder, potentiale elektroder M, N (figur 7). Hvis strømmen sendes ud i et isotopisk homogent halvrum kan potentialet udtrykkes følgende:

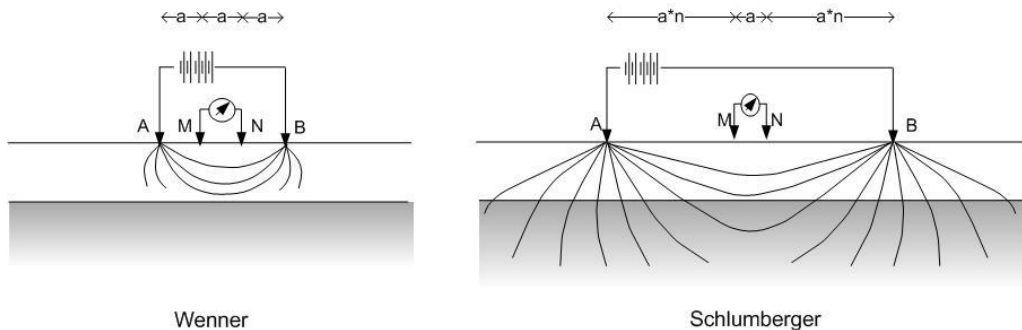
Potentialet
$$V(r) = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (8)$$

Her er ρ resistiviteten, I strømmen og r afstanden fra det gældende punkt i strømflowet til kilden, som her er strømmelektroden (figur 7).



Figur 7, Elektrode opstilling af Wenner konfiguration, strømflowet fra strømmelektroderne (Christensen N. B. , 2006).

På figur 8 ses elektroder opstillet som Wenner konfiguration, og strømflowet, set som et vertikalt snit gennem et halvrum. A og B er strømelektroder, M og N er potentialelektroder. Ved en Schlumberger konfiguration bliver afstanden mellem strømelektroderne og potentialelektroder længere og længere, samtidig med at gennemtrængningsdybden øges (figur 8, TH).



Figur 8, Schlumberger konfigurationen, når afstanden mellem strømelektroderne øges, stiger gennemtrængningsdybden. Modificeret figur efter Christensen N. B. (2006)

Potentialeforskellen findes ud fra superposition mellem potentialet for hver elektrode. Da afstanden mellem elektroderne er den eneste, som har ændret sig, kan potentialeforskellen findes som følgende:

$$\text{Potentialeforskellen} \quad \Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{|AM|} - \frac{1}{|BM|} - \frac{1}{|AN|} + \frac{1}{|BN|} \right) \quad (9)$$

$|AM|$, $|BM|$, $|AN|$, $|BN|$ er afstanden mellem elektroderne. Ud fra ligning 10 kan resistivitet bestemmes ved et homogent halvrum. Den geometriske faktor K, ses af ligningens sidste led, bestemmes udelukkende af opstillingen af elektroder.

$$\text{Resistivitet} \quad \rho = \frac{\Delta V}{I} 2\pi \left(\frac{1}{|AM|} - \frac{1}{|BM|} - \frac{1}{|AN|} + \frac{1}{|BN|} \right)^{-1} = \frac{\Delta V}{I} K \quad (10)$$

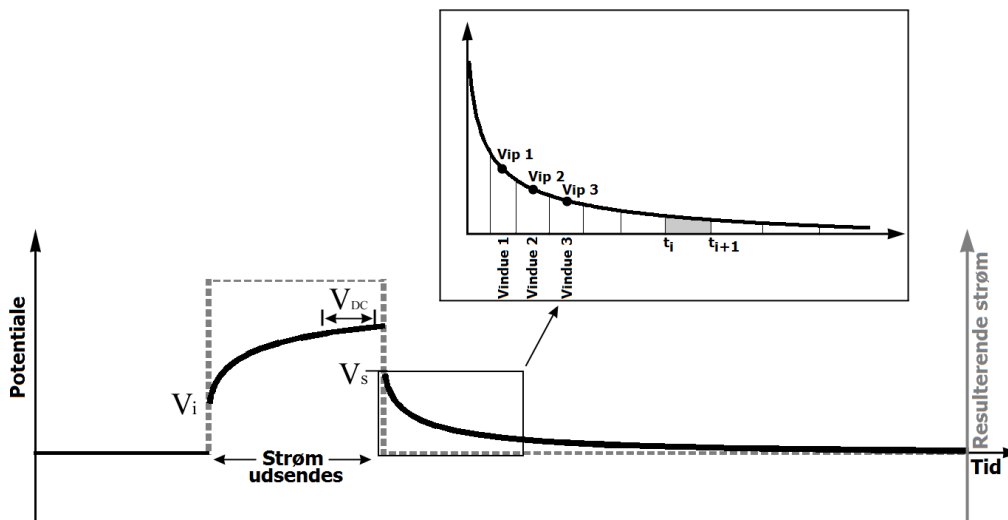
Da man aldrig måler på et homogent halvrum i praksis, skal resistiviteten ses som en tilsyneladende værdi. Ligningen 11, gælder for en 4 pols opstilling og beskriver den tilsyneladende resistivitet, hvor der beregnes et gennemsnit af resistiviteterne inden for det volumen, hvor det elektriske felt udbredes.

$$\text{Den tilsyneladende resistivitet,} \quad \rho_a = \frac{\Delta V}{I} 2\pi \left(\frac{1}{|AM|} - \frac{1}{|BM|} - \frac{1}{|AN|} + \frac{1}{|BN|} \right)^{-1} = \frac{\Delta V}{I} K \quad (11)$$

2.3.2 INDUCERET POLARISATION

I denne rapport vil IP responssets fulde afladningskurve blive brugt i datasættet. Inversion af DC/IP sker ved brug af Cole-Cole modellen; resistivitet (ρ), chargeabilitet (M_0), tidskonstanten (τ) og formfaktoren (c) (W.H. Pelton et al, 1978).

IP målinger udføres på samme måde som resistivitetsmålinger, og ofte udføres dataopsamlingen samtidig. Måling af IP kan foretages ved Time Domæne Induceret Polarisation (TDIP) eller Frekvens Domæne Induceret Polarisation (SIP). Ved frekvens domæne metoden sendes en sinusformet elektrisk strøm i én frekvens i perioden T gennem jorden, og den resulterende spænding måles. Den målte spænding er karakteriseret ved tidsforsinkelse, kaldet "phase lag", i forhold til den udsendte strøm (A. Gazoty, 2012). Denne metode omtales ikke yderligere i denne rapport. Ved TDIP er det den karakteristiske henfaldskurve, der er interessant. Man måler den gradvist aftagende spænding resulterende fra strøm udsendt i jorden. Når strømmen slukkes ved DC/IP målinger, går spændingen mellem potentialeelektroderne ikke øjeblikkeligt i nul. En lille resterende spænding aftager langsomt, og dette spændingshenfald kaldes ofte den inducerede polarisations henfaldskurve (A. Gazoty, 2012), og en lignende effekt opstår når strømmen tændes (figur 9).



Figur 9, Princip for IP udfærdigelse/tilegnelse. Figuren viser strøm tilslutning og afbrydelse, og den efterfølgende op- og af-ladnings kurve (A Gazoty. et al.,2012)

Den primære spænding V_{DC} , måles lige inden strømmen slukkes. V_{DC} bruges både til beregning af resistiviteten og den tilsyneladende chargeabilitet. Når strømmen slukkes, falder spændingen til et sekundært niveau V_S , og henfalder herefter med tiden til et konstant niveau. Denne henfaldstid kaldes også "relaxation-time" (tidskonstanten). V_{IP} er det sekundære potentiale (mV) langs henfaldskurven og er normalt integreret over n , tidsvinduer (gates) til beregning af den tilsyneladende chargeabilitet. Gate-længden kan defineres på to forskellige måder, som en

liniærgating eller en logaritmiskgating. I denne undersøgelse er valgt loggating hvor chargeabilitet integreres over tidsintervaller, som øges logaritmisk over tiden, hvilket medfører, at signal-støj forholdet forøges væsentligt ved nedsættelse af standardafvigelsen for støjen (E. Auken et al., 2011). Chargeabiliteten kan beskrives som følgende (L.D. Slater and D.Lesmes, 2002).

$$M = \frac{\int_{t_1}^{t_2} V_s dt}{V_{DC}} \frac{1}{\Delta t} \quad [\text{mV/V}] \quad (12)$$

M er chargeabiliteten, **V_{DC}** [V] er det primære spænding DC resistiviteten også beregnes ud fra. **V_s** [mV] er den sekundære spænding, **t₁- t₂** og **Δt** [s] er strømmens åbne og lukke tider. Informationen fra henfaldskurven skildres ved brug af Cole-Cole modellen (W.H.Pelton et al.,1978). Den tilsyneladende chargeabilitet kan, ved TDIP, beregnes ved følgende (W.H.Pelton et al.,1978);

$$M(t) = M_0 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{t}{\tau}\right)^{nc}}{\Gamma(1+nc)} \quad (13)$$

M₀ [mV/V] chargeabilitet ved t=0 beskriver polaritetens størrelsesorden. **c** [dimensionsløs] er en "form-faktor" på henfaldskurven, en distributionsbredde som styrer længde og form på henfaldskurven den ligger mellem 0,0 og 1,0. **T** er gamma funktionen. **τ** [s] er den gennemsnitlige afladningstid, ifølge G. Schwarz (1962) er τ relateret til radius på mineralkorn (R) og en iondiffusion koefficient (D):

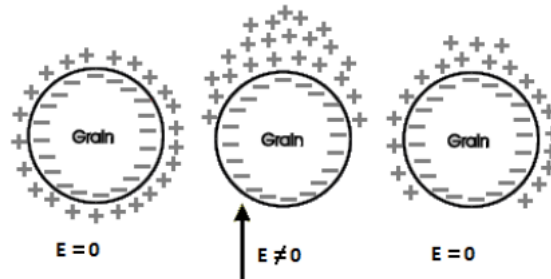
$$\tau = \frac{R}{2D} \quad (14)$$

IP responset

ELEKTRISK DOBBELTLAG

Flere af mekanismerne, som giver et IP respons, udspringer af det elektriske dobbeltlag (C. Ulrich and L.D. Slater, 2004 og L.D. Slater and A.K.Sandberg, 2000). Overfladen af et silikate mineralkorn har en negativ ladet overflade. Kationer tiltrækkes overfladen for at oprette en spændingsbalance. Dette fænomen skaber en dobbeltelektriskladet overflade over mineralet, en elektrolyt overflade. Mineralets negative overflade og de positive ioner, der ligger som et ekstra lag om mineralet, fungerer som et fast lag. Mineralet har derved en positivladet overflade, hvor et diffust lag af anioner og kationer tiltrækkes i højere eller mindre grad af fysiske eller kemiske kræfter. Efter dette diffuse lag er en fri ion fase.

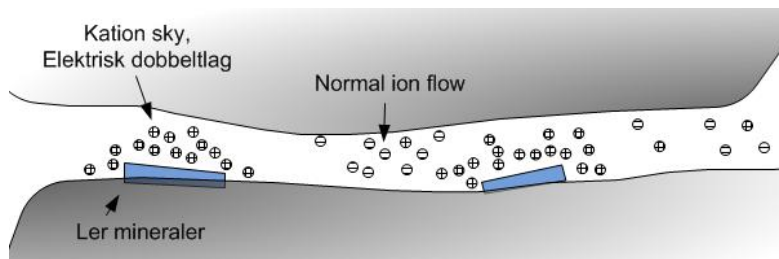
Ved polarisation af et enkelt mineralkorn omgives kornet af et elektrisk dobbeltlag (figur 10). Når der tilføres strøm, opstår lokale ladet ionophobninger. Når strømmen fjernes igen, søger ionerne tilbage til ligevægtstilstanden i dobbeltlaget rundt om mineralkornet. Dette giver anledning til intern spænding i mineral og porevæskens grænseflade, som kan resultere i en tidsvarierende polarisation af jorden.



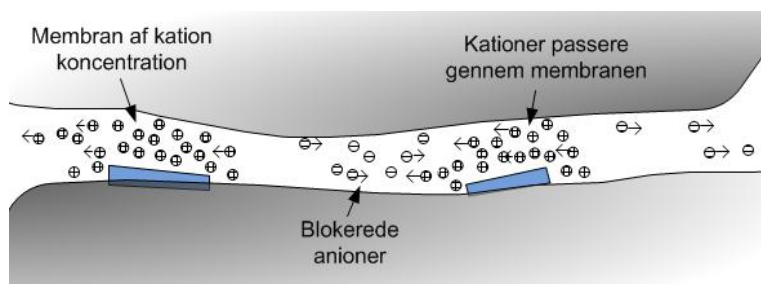
Figur 10, Polarisation af et mineralkorn (C. Ulrich and L.D. Slater, 2004)

Membran polarisation

Membran polarisation opstår ved, at positive ioner i porevandet tiltrækkes og lægger sig som en kation sky omkring lerpartiklerne med negativladning og skaber et elektriskdobbeltlag (L.D.Slater and A.K.Sandberg,2000). Disse zoner danner en semipermeabel negativ ladet membran i porevandet mellem tilstødende korn. Når der tilføres strøm, holder membranerne anioner tilbage, og tillader i større grad transport af kationer, dette sker lokalt(figur 11, øverst). Ved afbrydelse af strømmen aftager de opladede spændingskoncentrationer, som membranerne har forskyldt, og ionerne vender tilbage til en ligevægtstilstand (figur 11, nederst). Chargeabiliteten stiger derfor i sammenhæng med stor membran polarisation. Ved højt saltvandsindhold i porevæsken falder membran polarisationen pga. svagere elektrisk dobbeltlag. Kationskyerne bliver reduceret, og membranen, som holdt anionerne tilbage, bliver mindre betydende.



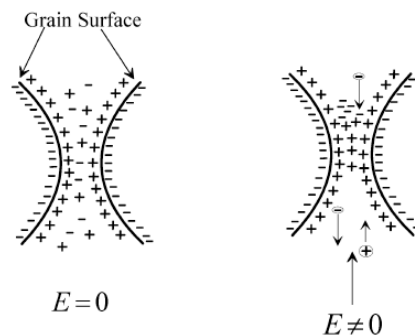
Figur 11, Membranpolarisation, modificeret figur fra L.D.Slater and A.K.Sandberg (2000). (Øverst) Ler mineralernes negative ladning tiltrækker kationer som lægger sig i en sky omkring.



(Nederst) Ved tilførsel af strøm bliver koncentrationen af kationer tættere, ionpassagen for anioner bliver stærkt besværliggjort og kun kationer har fri passage.

Porehals

I porehalsmodellen opstår også en blokade af anion strømmen (C. Ulrich and L.D. Slater, 2004)(figur 12). Den negativt ladede overflade på kornene tiltrækker kationer, som danner et elektrisk dobbeltlag i forbindelse med kornene. Givet kornenes placering i forhold til hinanden, fremkommer porehalse, hvor det elektriske dobbeltlag kun efterlader lidt plads til et diffust lag, hvor ioner kan bevæge sig. Når strøm tilføres, skabes et spændingsfelt, og der opstår en kation blokade i porehalsen, hvor anioner tager længere tid om at komme igennem. Dette medfører en tilsvarende længere afladningstid, efter strømmen slukkes.



Figur 12, Porehals mellem to korn, den negative ladning ved korn overfladen tiltrækker kationerne. Når der tilføres strøm (TH) ophober kationerne sig i porehalsen og anioner kan ikke komme igennem (C. Ulrich and L.D. Slater (2004)

Øvrige årsager til IP respons

Der er flere årsager til IP respons. Her gennemgås kort nogle af de øvrige årsager til IP respons.

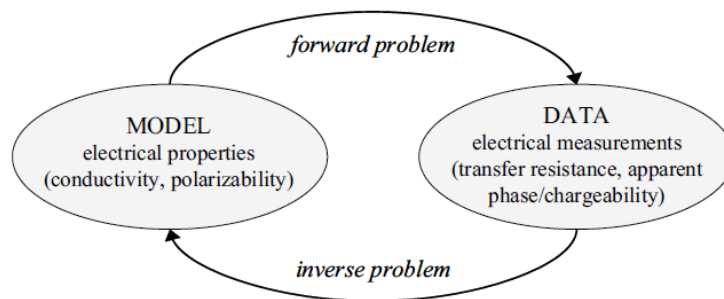
Hydrocarbon forurening: Ved tilstedeværelsen af hydrocarbon i jorden opstår der en forbindelse mellem mineralkorn og organiske materiale. Denne forbindelse skaber et elektrisk dobbeltlag, som er årsagen til IP responsen (H. Vanhala, 1997).

Salinitet i porevæske: Som beskrevet under afsnittet Membran polarisation, reduceres IP responsen ved høj saltindhold i porevæsken. Tykkelsen af de elektriske dobbeltlag falder, når saltindholdet øges. Ionerne holdes i den elektrolytiske fase, og der er således færre ioner, som bindes i det elektriske dobbeltlag.

Tørv: Det uomsatte organiske materiale i tørv har en høj ladningsdensitet, hvilket tillader en høj veksling af ioner (CEC). IP responset bliver højt, da ionerne hurtigt kan vende tilbage til en ligevægtstilstand efter tilførslen af strøm (L.D.Slater and A. Reeve, 2002).

2.3.3 INVERSIONSTEORI

For at transformere den store mængde data om til en model af jordbunden, tolkes (inverteres) alle data punkterne i forhold til hinanden. Da man ofte har en stor mængde data og ingen sikker model af undergrunden, må man løse problemet i omvendt rækkefølge, inverse. Først opstiller man en sandsynlig model, herefter efterprøves data i modellen (figur 13). Når et givent datasæt inverteres, kører iteration efter iteration igennem, indtil data misfit er tilstrækkelig lavt.



Figur 13, Definition på elektrisk forward og inverse problem (A. Binley and A. Kemna , 2005)

Til invertering af data er der brugt et inversionsprogram em1dinv64. Inversionsteorien (E. Auken and A. V. Christensen, 2004) tager udgangspunkt i målingerne udført i feltet. Her er indsamlet et datasæt på hhv. 10250 datapunkter for DC og 225240 data punkter for IP. Disse datapunkter samles i en datavektor **d**, givet ved

$$\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_N)^T \quad (15)$$

Der angives en række parametre for jorden, som datapunkterne korrigeres inden for. Parametrene er samlet i en modelvektor \mathbf{p} , givet ved

$$\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_N)^T \quad (16)$$

De indsamlede data er forbundet med en risiko for fejl, der kan udtrykkes ved Gaussisk fordelt støj. Fejlen ved målingerne er samlet i en fejlvektor $\boldsymbol{\varepsilon}$, givet ved

$$\boldsymbol{\varepsilon} = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_N)^T \quad (17)$$

Modelvektoren sættes op efter en model som data kalibreres efter. I denne undersøgelse er inversion lavet med en modellen på 17 lag, med sidste lag i -40 meters dybde. Hvert element i datavektoren har en tilsvarende genereret modelobservation, der er en funktion af modelparametrene \mathbf{p} , som igen er givet ved en modelvektor, $\mathbf{f}(\mathbf{p})$,

$$\mathbf{f}(\mathbf{p}) = (f_1(p), f_2(p), \dots, f_N(p))^T \quad (18)$$

Hvert element i modelvektoren afledes partielt med hensyn til en modelparameter og danner en ny vektor kaldet følsomhedsvektoren, \mathbf{G}_j . Hvert element i følsomhedsvektoren kvantificerer, hvor følsomme modelværdierne er for en ændring af den j 'te modelparameter. Alle følsomhedsvektorerne samles i en matrice, som udgør følsomhedsmatricen også kaldet; Jacobi-matricen.

$$\frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{p})}{\partial p_j} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(\mathbf{p})}{\partial p_j} \\ \frac{\partial f_2(\mathbf{p})}{\partial p_j} \\ \cdot \\ \cdot \\ \frac{\partial f_N(\mathbf{p})}{\partial p_j} \end{bmatrix} = \mathbf{G}_j \quad (19)$$

I 1D inversionen korrigeres hver datakolonne, som hvis jordbunden var et halvrum. Ved at indføre Laterally Constrained Inversion (LCI) korrigeres data i 1D inversionen med hensyn til datakolonnerne ved siden af. 2D inversionen implementerer et gitter (mesh) over alle datapunkter, og data bliver nu korrigeret både vertikalt og horisontalt gennem én inversion.

Til invertering af data i dette projekt er der anvendt en 1D Laterally Constrained Inversion (1D) af DC/IP data og 2D Laterally Constrained Inversion (2D) af DC og DC/IP data ved brug af Cole-Cole modellen. Når Cole-Cole modellen benyttes, er der 20 IP datapunkter for hvert DC data punkt, hvilket betyder, at DC data bliver underrepræsenterede. Derfor er der et større misfit for DC ved en invertering af DC/IP i forhold til at invertere DC alene (G. Fiandaca). Den totale residualværdi for de inverterede data i denne rapport ligger på under 3 %. Residual kurven er ikke vist på plottene med inverteret data pga. en softwarefejl i em1din_v_64 inversionsprogrammet, som programudvikleren

ikke havde rettet på daværende tidspunkt. Resistivitet har et mindre misfit, når data inverteret ved DC alene, men resultatet er ikke nødvendigvis bedre end DC/IP. Når der inverteres DC/IP, korreleres DC også i forhold til de øvrige parametre i Cole-Cole modellen. Derfor kan man argumentere for, at grundlaget for en troværdig inversion af DC er større ved DC/IP inversion.

2.3.4 KORTLÆGNINGSDYBDEN

Kortlægningsdybden (Depth Of Investigation, DOI) er et udtryk, for hvilken dybde data er troværdig til. DOI kalkuleres ud fra følsomhedsmatricen (A. V. Christensen and E. Auken, 2012). Efter alle data er inverteret, dannes en ny model med \mathbf{M} lag. Ved DC målinger benyttes data fra resistivitetmålinger til at beregne en ny følsomhedsmatrix. Her defineres en global og absolut grænseværdi for afvigelse i følsomheden. Grænseværdien fastsættes empirisk ud fra erfaring og intuition, der er sat til 0,8 (A. Christensen og E. Auken, 2012).

Ud fra den inverterede model, beregnes en ny følsomhedsmatrix G_{ij} , givet ved

$$G_{ij} = \frac{\partial \log(d_i)}{\partial \log(m_j)} \quad (20)$$

Følsomheden mellem data \mathbf{d} , og modelparameteren for den inverterede model \mathbf{m} , giver den afvigende normaliserede følsomhed S_j ,

$$S_j = \sum_{i=1}^N \frac{G_{ij}}{\Delta d_i} \quad (21)$$

N er observerede data punkter i \mathbf{d} . For at få et udtryk uafhængigt af de modelgenererede tykkelser for hvert lag divideres tykkelsen for hver d_j data. Herefter summeres den kumulative afvigelse i følsomheden. Dette plot angiver den totale følsomhed for en given dybde ned gennem hele profilet.

$$S_j = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{G_{ij}}{\Delta d_i}}{t_j} \quad (22)$$

$$S_j = \sum_{i=M,-1}^j S_i \quad (23)$$

T_j er tykkelsen af hvert j 'te lag. M angiver antallet af lag i modellen m_j . Ud fra den totale følsomhed aflæses dybden ud fra den givne grænseværdi for den kumulerede afvigelse.

3 Metode

3.1 MÅLINGER

INSTRUMENTET

(Kilder: Syscal brochure, Syscal user manual)



Figur 14, (TV) Syscal Pro Switch 72 instrumented. (TH) Opstilling af udstyret i felten. Syscal forbundet til switchboks.

SYSCAL Pro Switch 72

Til indsamling af DC/IP benyttes instrumentet SYSCAL Pro Switch 72 fra det franske firma Iris Instruments (figur 14). Instrumentet sælges i flere forskellige udgaver, alt efter hvor mange elektroder instrumentet skal håndtere. Den mindste model kan håndtere 48, den største 120. SYSCAL Pro Switch 72 kan håndtere 72 elektroder. Dette antal kan mangedobles ved brug af ekstern switch boks. Instrumentet indeholder både modtager, sender og en intern switch, der som nævnt kan håndtere 72 elektroder. Et internt 12V batteri kan benyttes til målingerne, men det er også muligt at tilslutte en ekstern strømkilde, fx et bilbatteri. Det maximale output er 800V. Der kan foretages ti målinger samtidig via de ti kanaler – dette gør indsamlingen af data væsentligt hurtigere sammenlignet med instrumenter med færre kanaler. IP-data kan måles i 20 tidsvinduer.

Iris leverer deres egne kabler, men til denne undersøgelse er der brugt kabler fra et andet firma. Kablerne, der anvendes, har 21 elektroder. Derfor er der tilsluttet en switch boks, figur 14 (TH) mellem instrumentet og kablerne, der gør, at de bliver kompatible. I denne undersøgelse anvendes fire kabler med i alt 84 udtag ($4 \times 21 = 84 - 3 \text{ overlap} = 81$).

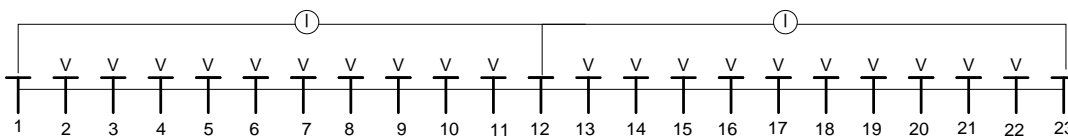
Software og data

Der findes en række programmer til styring af målinger og behandling af data. Målesekvenser kan indtastes manuelt på instrumentet eller loades vha. programmet ELEKTRE Pro. Instrumentet kan

styres via PC vha. programmet COMSYS Pro. Data fra målinger loades ud af instrumentet vha. programmet PROSYS II.

3.2 MÅLETEKNIK

Til at udføre målingerne er valgt Gradient array-metoden (T. Dahlin and B. Zhou, 2006) (figur 15). Fire kabler lægges ud på jorden i forlængelse af hinanden, spyd af rustfrit stål [elektroder] stikkes i jorden og forbindes til kablerne med en kort koblingsledning kaldet jumper. Der kan benyttes forskellige typer kabler alt efter, hvilken fokusdybde der ønskes. Til denne undersøgelse ønskes detaljerede overfladenære målinger. Derfor anvendes en elektrodeafstand på 2 meter.



Figur 15, Gradient Array opstilling ved to kabler, I er strømmelektroder og V er potentiale elektroder. Ved denne metode bliver potentialeelektroder aldrig strømmelektroder.

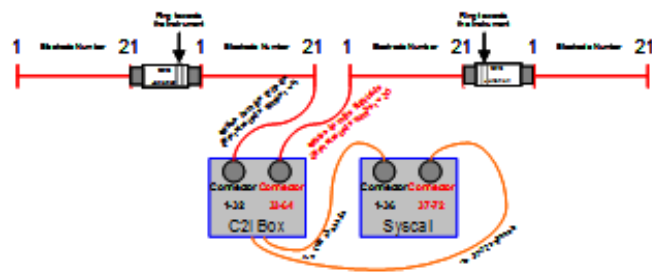
Fordelen ved Gradient Array metoden er, at strømmelektroder og potentialeelektroder aldrig bytter funktion, og derved minimeres risikoen for elektrodepolarisation. Når Gradient Array gentages, kaldes det Roll Along (RA). Det tager ca. 1 time for hver RA. Har man 2 meters afstand mellem elektroderne og 4 kabler, kan man teoretisk set lave DC/IP målinger med 20 m/t.

Opstilling til måling

Ved sekvensen short_right og short_left benyttes kun to kabler. Ved sekvenserne Long+short [L+S] og long+short RA benyttes fire kabler (figur 16). Ved hver nyt profil starter og slutter man med en kort sekvens kaldet short_left (til at starte et profil) og short_right (til at slutte et profil). De korte sekvenser måler overfladenært og giver en god opløsning i de øverste lag. Med 2 meters afstand svarer det til en dybde omkring 10 meter. Her tages 200 målinger. Når man har startet et profil med en short_left, fortsættes med en L+S. Denne sekvens måler både kort og langt. Her tages 800 målinger. Dermed får man en god opløsning både i de øverste lag og i de dybere lag omkring 30 m. Profilet fortsættes med RA, som er samme sekvens som L+S, men på grund af overlap laves der kun 450 målinger. Standard opstilling ved Roll Along (figur 16 og 17).



Figur 16, Startopstilling til målinger med Roll Along, først ses S_Left konfigurationen som profilet startes med, herefter L+S og L+S RA. Profilet slutes af med S_Right. Figur fra A Gatzoty.



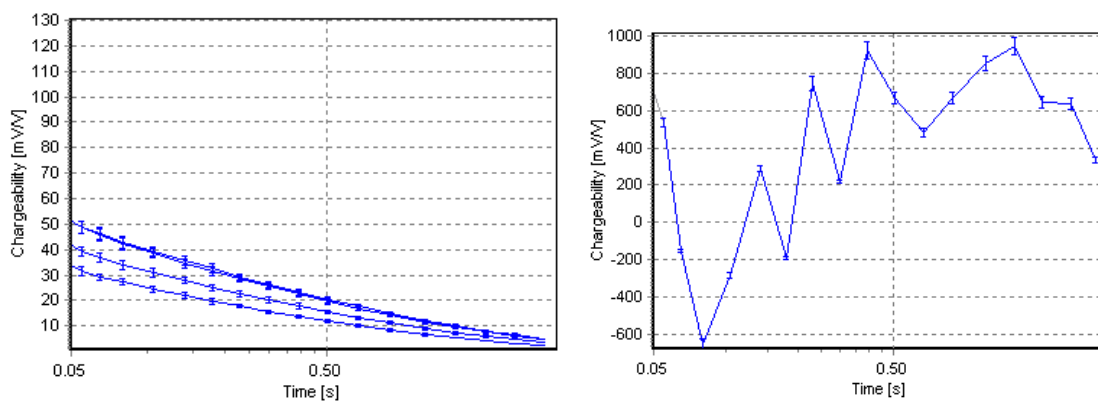
Figur 17, Opstilling af IP til en L+S konfiguration eller RA. Her er 4 kabler sat sammen med en hvid kobler i midten af hver. Figur fra A Gatzoty.

Parametre	Instillinger
Antal kanaler [stk]	10
Staking [stk]	4 - 16
Error	4,5 %
Måletid for hver gate	4 sek
M_{dly}	20 mmsek
Ip gates	20
Modstand	10 -600 Kohm
Strøm	1- 500 mA
Spænding	100 V
Multi Gradient, positionerer pr. Sekvens	18

Tabel 1, Parametre brugt til måling af profil 1 og 2

3.3 DATA PROCESSERING DC/IP MÅLINGER

For at sikre, at fejlmålinger og støj ikke kommer til at have indflydelse på tolkningen af målte data, foretages der kvalitetskontrol af alle data punkter. Ofte forekommer dårlig data, når forbindelsen mellem elektroder og jorden er dårlig. Derudover kan der være en række forskellige støjklender som beskrevet i afsnit 2.3. Målingerne behandles i programmet Aarhus Workbench, som er udviklet af HydroGeophysics Group (HGG), Aarhus Universitet. Det er et databehandlingsprogram, hvor man kan sortere datapunkter, og der er mulighed for at se alle målinger placeret korrekt i forhold til hinanden.



Figur 18, Eksempler på gode og dårlige data: (TV) Gode data med pæn henfaldskurve. (TH) Dårlig data, negative og upålidelig henfaldskurve.

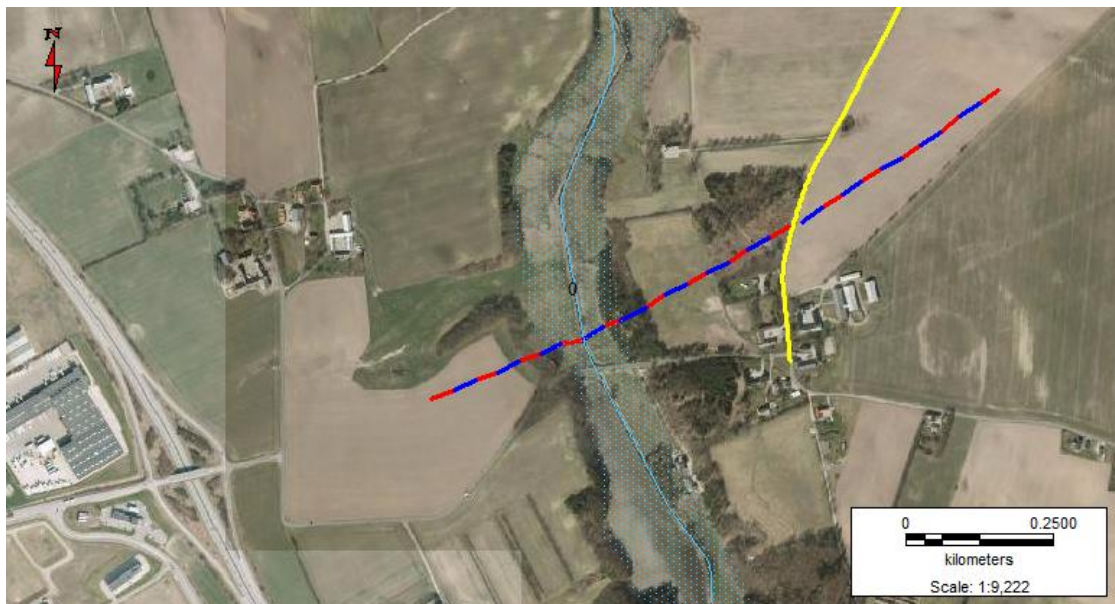
Henfaldskurverne skal være eksponentielt aftagende mod nul. På figur 18 ses henfaldskurven for forskellige datapunkter fra målingerne udført til undersøgelsen. Hvis der er for mange variationer i hældningen, er der støj i datasættet, hvilket gør dataene ubrugelige, og de slettes derfor (figur 18 TH). Hvis henfaldskurven er negativ eller enkelte punkter er negative, slettes punkterne (figur 18 TV).

4 UNDERSØGELSE OMRÅDE

4.1 LOKALITET

Motortrafikvejen Sdr. Borup – Assenstoft ligger få km syd for Randers. Motortrafikvejen starter ved motorvejsafkørslen Sdr. Borup og fortsætter tværs ind over landet mod øst til Assenstoft. På Grenåvej ved Assenstoft kobles motortrafikvejen til det eksisterende vejnet, der er ca. 4.5 km vej. På kortet figur 19 ses den strækning, der er undersøgt i forbindelse med specialet på ca. 1 km. Profilet strækker sig hen over, et markområde afbrudt af en dal med en å i bunden. Topografien svinger fra kote 12 ved å løbet i dalen til kote 32 på marken øst for dalen.

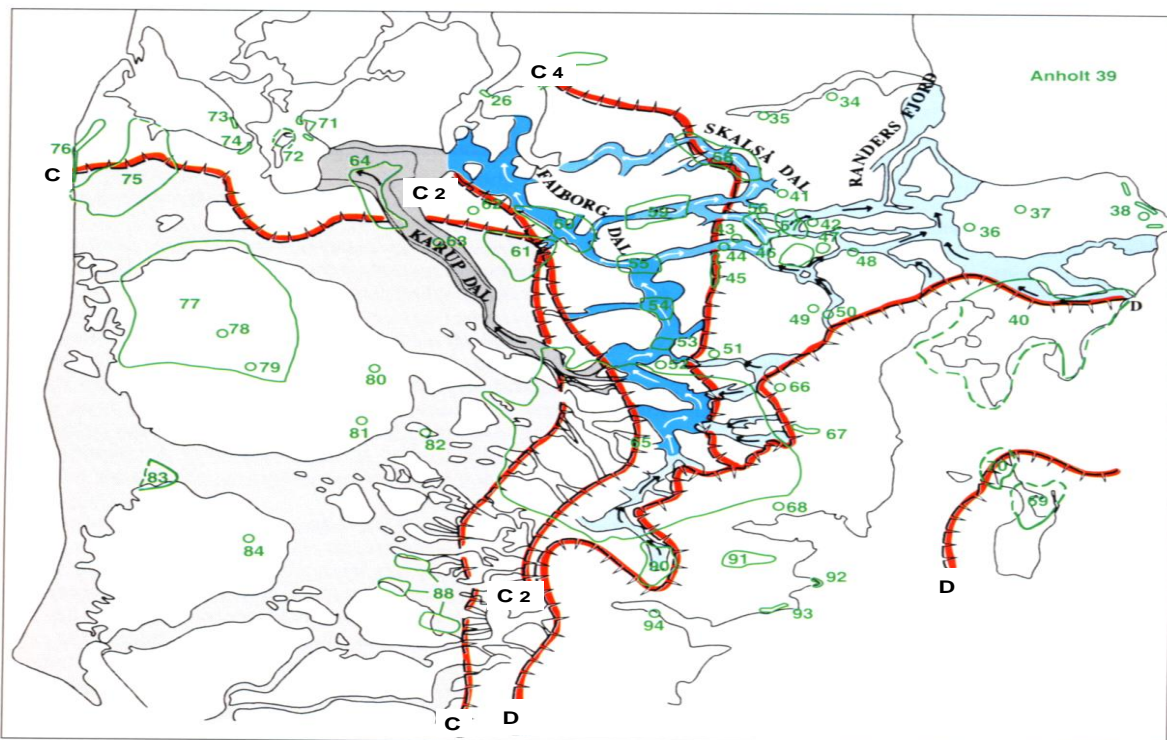
Lokaliteten er interessant, blandt andet fordi der skal bygges en mindre dalbro, og store mængder jord skal flyttes og indbygges andetsteds på strækningen. Her kan det være meget anvendeligt at få et overblik over, hvor i dalen der skal tages boreprøver, og hvor broens piller kunne placeres i tilfælde af dårlige funderingsforhold eksempelvis gytjeaflejringer. På grund af dalen er terrænet svært tilgængeligt og stejlt, hvilket betyder, at der ikke er taget boreprøver på skrænterne. Ved netop denne lokalitet er det værd at undersøge, om man kunne nøjes med geofysiske undersøgelser og dermed spare en stor del af boringerne væk.



Figur 19, Kort over motorvejsafkørsel Randers S. Den stiplede linie er det målte profil, farverne indikerer hver ny Roll Along sektion på 20 m kabel. Den gule linie viser Kirkevadbrovej som deler profilet i 2, til venstre profil 1 til højre profil 2. Den lyseblå linie og markering er Brugsgaard Møllebæk (å) og tunneldal.

4.2 GEOLOGI

Geologien i området er præget af den sidste istid i Danmark, Weichsel og de to sidste gjetsjerfremstød Nordøstisen for 18.000 år siden og Det Østjyske Isfremstød for 15.000 år siden. Istiden starter med det store hovedfremstød Nordøstisen, som danner den jyske højderyg. Da isen starter tilbagesmeltingen, dannes der ud over en stor smeltevandslette mod vest, nogle tunneldalsystemer mod øst under isen (figur 20). Den nuværende Randers Fjord bliver et område med stor vandføring fra land ud i Yoidalerhavet. Afstrømningen ud i dalsystemet ved Randers fortsætter hele Weichsel istid, efterhånden som isen trækker sig tilbage fra Midtjylland ud over Østjylland og Nordjylland. Der dannes et morænelandskab med fordybningerne og gennemskåret af tunneldalsystemet. Det sidste isfremstød, der når Djursland, er det østjyske isfremstød. Her ledes afsmeltningen fra isen ligeledes ud gennem Randers Fjord. På samme tid skifter de eksisterende smeltevandsløb i Centraljylland strømretning og ledes også ud gennem store dalsystemet ved Randers. Efterhånden som isen forsvinder, og den varme periode starter, bliver de store dale og dødishuller fyldt med sediment. Samtidig sker der en landhævning, så de dybe dalsystemer bliver til mindre fjorde mod Kattegat. Tilbage ses et gammelt morænelandskab fra Nordøstisens, isfremstød










Figur 20, Kort over isens fremryk under Weichsel istid, rød markering er isens front, C er det første isfremstød Nordøstisen og D det sidste isfremstød Det Østjyske Isfremstød (C. Kronborg).

med dødishuller og smeltevandsaflejringer. Morænelandskabet er skåret igennem af tunneldale. Den lokalitet, hvor profilet er målt, ligger i en gammel tunneldal (figur 21).



Figur 21, Per Smed (1981) Geomorfologisk kort over Randers omegn. (TV) Oversigt over området, Den røde firkant indikerer zoom in som ses TH, den røde streg er det målte profil. (TH) Zoom in på tunneldalen hvor profilet er målt, rød linie.

-  Morænelandskab fra sidste istid overvejende lerbund
-  Marint forland
-  Morænelandskab fra sidste istid overvejende lerbund
-  Randmorænelandskab
-  Tunneldal
-  Stenalderhavets højeste kystlinie
-  Ekstramarginalsmeltevandsfloddal

5 GEOTEKNIK RESULTATER

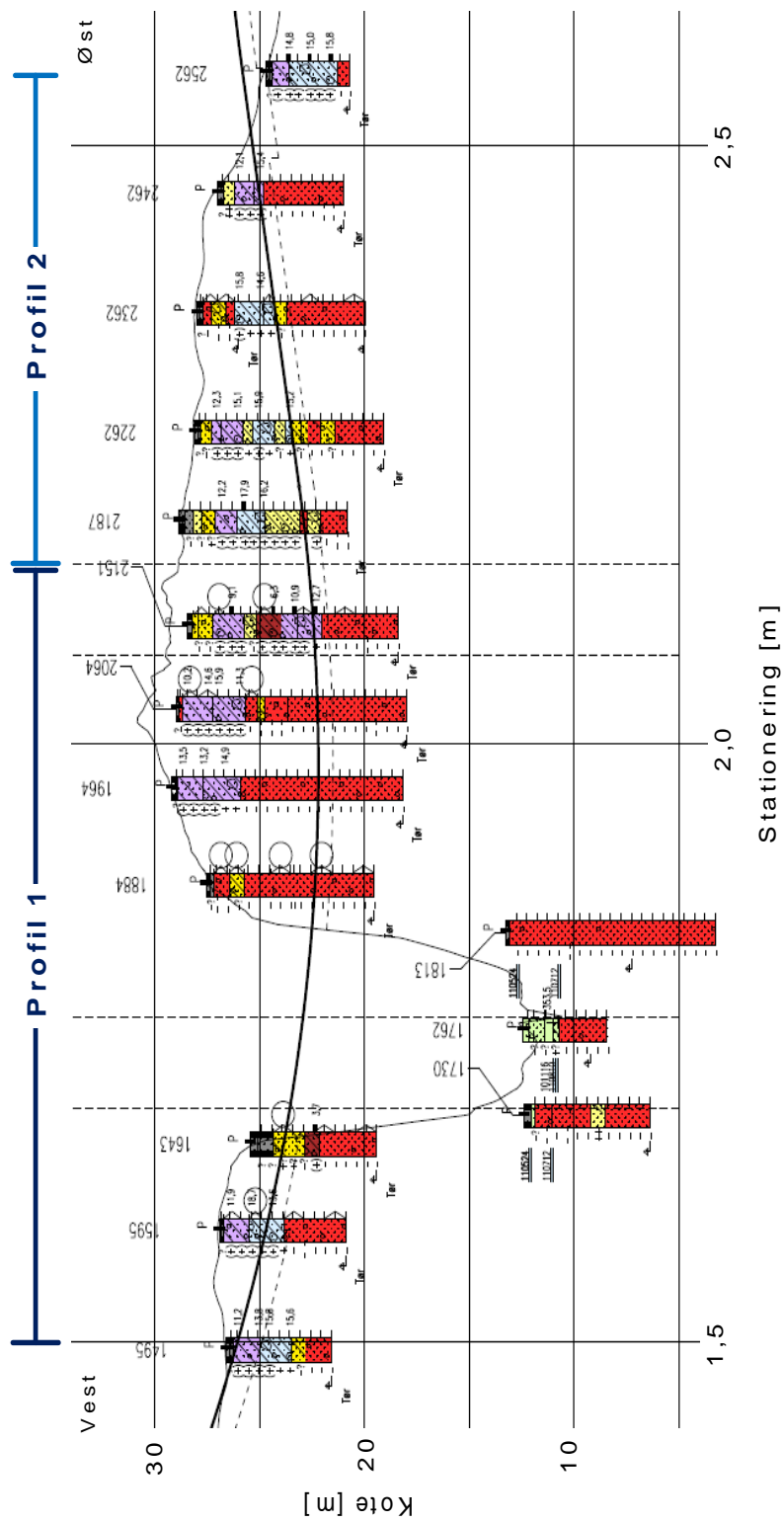
Fra den geotekniske datarapport, COWI A/S (2012) er følgende blevet anvendt som grundlag for at sammenholde data: 15 Boreprofiler (figur 22), CPT forsøg, vingestyrkeprøver og vandindhold [%].

Boreprøverne giver et groft billede af geologien i området. Der er lavet vingestyrke forsøg ved de fleste lerede aflejringerne, og tilsvarende for sand er der udført CPT forsøg, som indikerer sandets forskydningsstyrke. Vingestyrkeforsøg og CPT forsøg bruges endvidere til at fastlægge jordens styrkeparametre, der bruges til beregning af jordens bæreevne. Vingestyrkerne for dette profil er ikke særlig høje. Det stærkeste lerjord finder man i boring nr. 2151. Her ligger vingestyrkerne på 250-400 MPa for uomrørt jord. Det er en middelhøj forskydningsstyrke for lerjord (K. Bødker, 2009). Generelt ligger styrkerne på 100-200 MPa for moræneleret inden for profilet. Flere steder er styrken under 100 MPa, og kun 3 ud af 9 steder kommer prøverne op over 300 MPa.

Grundvandspejlet ligger meget lavt ved boring 1730 i 1,2 m under terræn. Det sekundære grundvandspejl ligger i kun 0,2 m. Boring nr. 1762 og 1884 har grundvandspejl 1,5 m under terræn, Dalen er generelt fugtig og der er et åløb tæt ved boring nr. 1762.

NR.	CV	W	CPT
1495	X	X	
1595	X	X	
1643			X
1730			X
1762			
1813			X
1884			X
1964	X	X	
2064	X	X	
2151	X	X	X
2187	X	X	
2262	X	X	
2362	X	X	
2462	X	X	
2562	X		

Tabel 2, Oversigt over prøver udført for boringerne. Vingestyrkeforsøg (CV), Vandindhold (W) og CPT



Figur 22 Oversigt over boreprøver på strækningen for det undersøgte profil. Øverst på figuren er markeret hvor de to profiler er målt fra og til. Den komplette signaturforklaring på boreprofilet kan ses i figur 5.

6 RESULTAT AF DC/IP MÅLINGER

6.2 GEOFYSIK RESULTATER 2D DC OG DC/IP

Dataene for de to profiler er af høj kvalitet og er ikke påvirket af støj. For profil 1 er der 1,2 % negative data, for profil 2 er der kun 0,4 %, hvilket betyder, at meget få data skal slettes. Resultatet af 2D DC gennemgås for hele profilet, og herefter sammenholdes 2D DC og 2D DC/IP for at undersøge forskellen mellem de to inversioner. Boreprofilerne, udført af COWI A/S, er sat ind på DC og DC/IP profilerne for at inkludere resultatet i tolkningen af profilerne:

Profil 1: 0-680 m, Boring nr. 1495- 2151.

Profil 2: 0-400m, Boring nr. 2178-2562.

Følgende inverteringer er udført på data og de er anvendt til følgende:

2D DC alene: Inversionen er vist som profil 1 og 2 (figur 23). Data er anvendt til grafer og krydsplot.

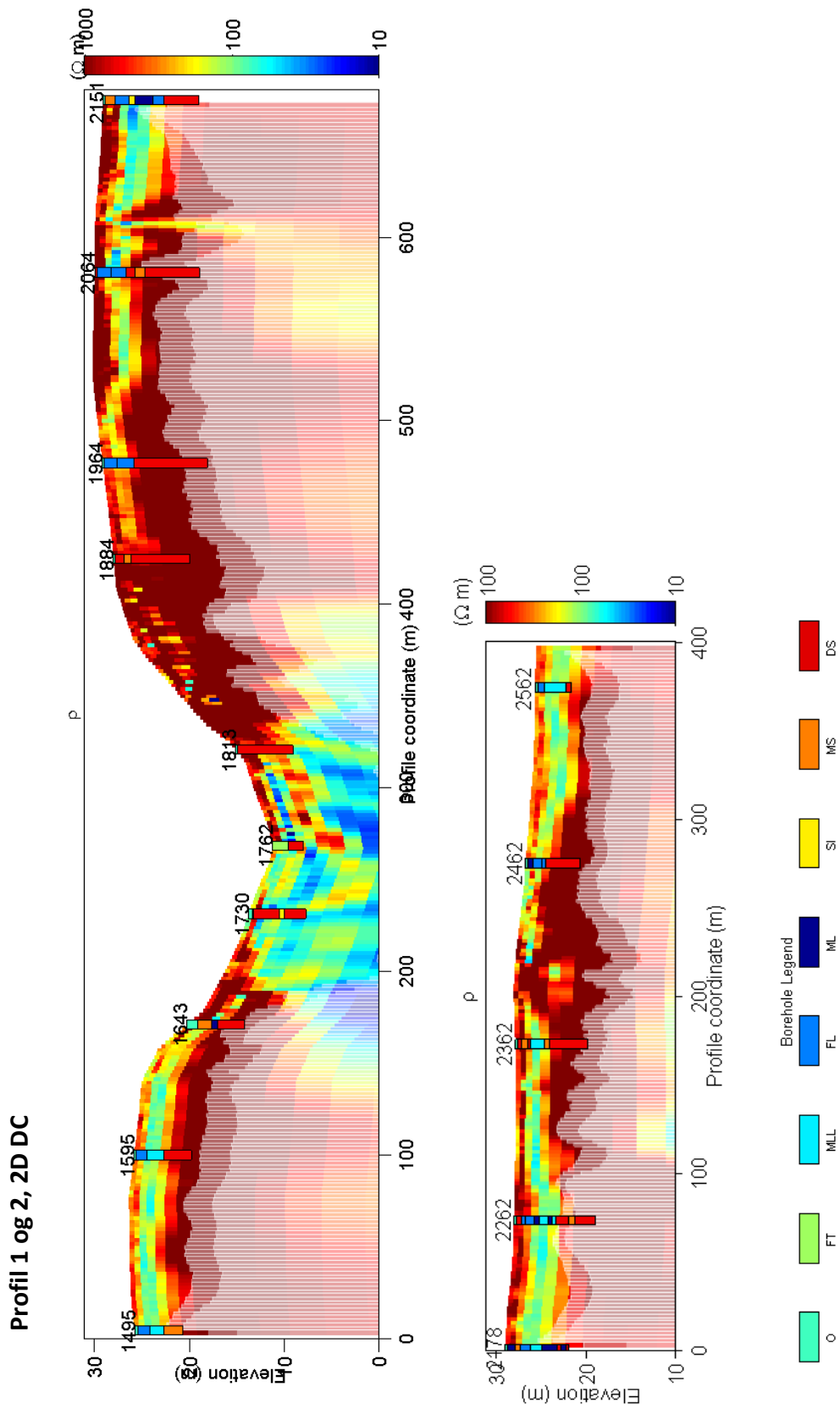
2D DC/IP: Inversionen er vist som profil 1, 120m-380m (figur 24)

1D DC/IP: Data er anvendt til grafer og krydsplot.

Gennemgang af 2D DC profil 1 og 2

2D inversionen af DC data alene ses på figur 23. Gennem begge profiler, 1 og 2, ses et konduktivt lag, 80-200 ohmm, på ca. 4 meters tykkelse kun nogle få meter under terræn. Den overfladenære jord 0-1m er resistiv ca. 500-1000 ohmm. Ligeledes jorden under det konduktive lag, hvor jorden har en resistivitet på omkring 1000 ohmm. Den centrale del af profil 1, 200-340m, har primært lav resistivitet, under 100 ohmm, gennemskåret af nogle resistive lag på 200-400 ohmm. Fra højre ses et kontinuerligt resistivt lag 8-10 m under terræn. Ved 230-280m går det resistive lag ned i en bue i 10-15 meters dybde. Lige under terræn, 240-280m ses endnu et resistivt lag, 200-400ohmm, ved 5 meters dybde.

Det fremgår af DOI, at data er troværdige ned til 10 meters dybde. Ved 200-340m ligger grænsen for DOI dybere i profilet, hvilket sandsynligvis skyldes det konduktive lag, som tillader en større grad af gennemtrængning. I profil 2 ved 200-220m er DOI bedre. Årsagen kan være, at aflejringerne ikke er skiftende, hvilket har en negativ virkning på gennemtrængningsdybden.



Figur 23, 2D DC profiler. Profil 1 (øverst) total data misfit 2,6%. Profil 2 (nederst) total data misfit 2,98 %. Den komplette signaturforklaring på boreprofilerne kan ses i figur 5.

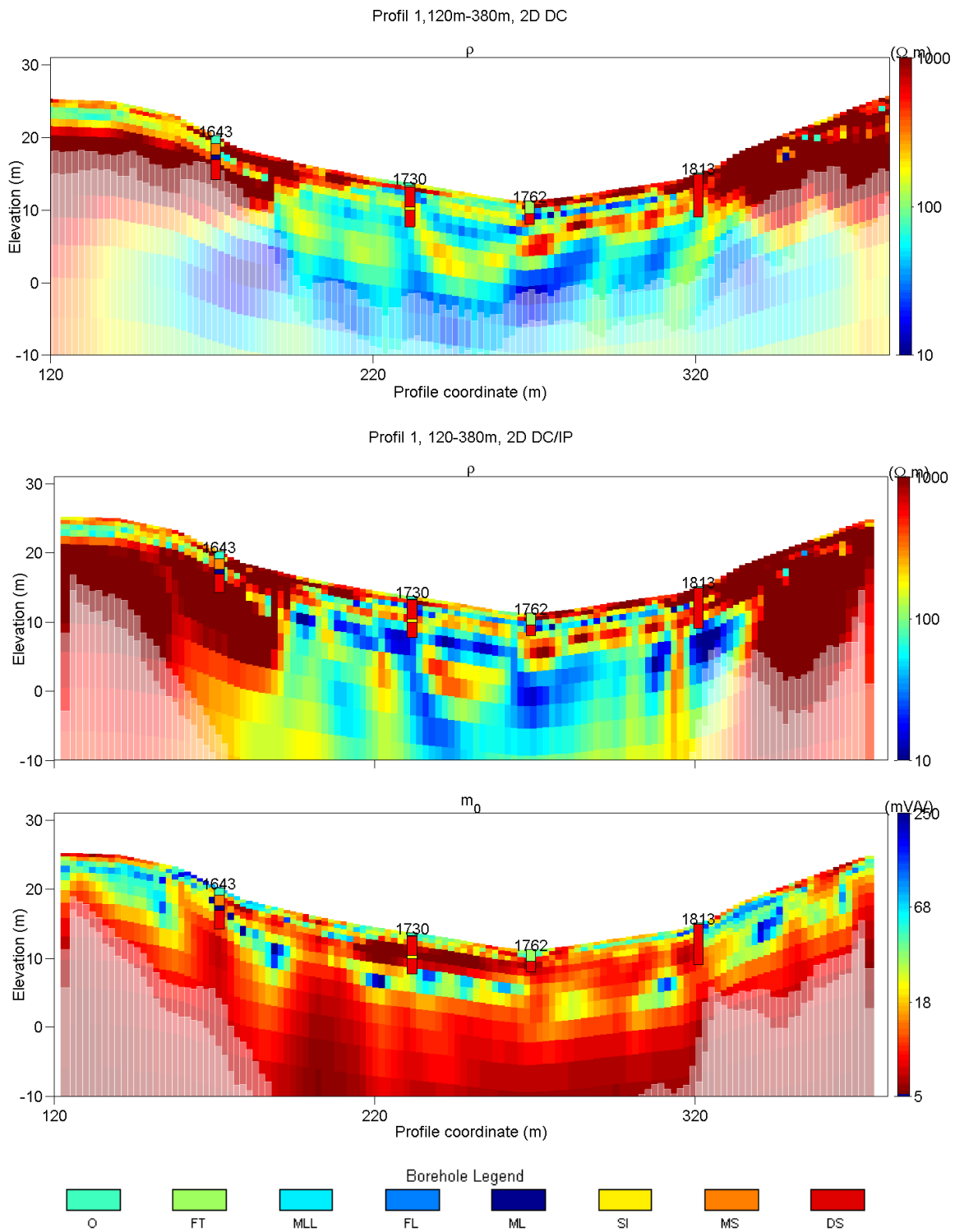
Gennemgang af 2D DC og DC/IP for den centrale del af profil 1, 120-380m

Det kan have en betydning for inversionen af DC, om den er inverteret alene eller ved DC/IP (afsnit 2.3.3). Umiddelbart er der en god overensstemmelse mellem de to resistivitetsprofiler (figur 24). Resistivitetsprofilet for DC har god horisontal sammenhæng, der er særlig tydeligt ved 240-280 m, hvor det "buende" resistive lag 200 ohmm er kontinuerligt. Ved resistivitet for DC/IP er laget mere brudt, og der er stærke udsving mellem høje og lave resistiviteter. Man kan se flere gennemgående lag få meter under terræn med høj resistivitet, 500-1000 ohmm, ved DC/IP end for DC alene. Der er også antydninger af flere skrå resistive lag 200-500 ohmm, i området fra 180-340 m.

Meget bemærkelsesværdig er DOI, som er dybere på DC/IP profilet end på DC profilet. Her findes troværdige data ned til en dybde på 30 m. Det skyldes sandsynligvis, at resistiviteten er blevet inverteret ud fra IP data, som kombinerer data fra chargeabilitet, τ og c i inversionen. Ved 140 m og 360 m er det afgørende for vurderingen af jordbunden, at DOI ligger dybere. På DC profilet er et konduktivt lag 50 ohmm, i 10-15 m dybde under det resistive lag, 800 ohmm. Men inversionens data er ikke troværdige data, i henhold til DOI. Ved DC/IP resistivitetsprofilet, er samme område ét resistivt lag 1000 ohmm og anses i henhold til DOI som værende troværdige data.

Chargeabilitetsprofilet ved DC/IP har en god overensstemmelse med resistivitetsprofilet DC/IP. Det resistive lag 500-1000 ohmm, 5-10m under terræn, kan ses som et lav chargebilit lag, 20-5mV/V, kontinuerligt fra 160-320 m. Over og under det lav chargebilit lag er lag med høj chargeabilitet 50-250 mV/V, der stemmer overens med områder med lav resistivitet. I området 120-160m og 320-360m er høj chargeabilitet 60-200mV/V mere udbredt vertikalt end den lave resistivitet 100-20 ohmm på samme sted. Det er ikke til at sige, hvad det skyldes. Begge områder er på skrænten og kan være påvirket af topografien. Normal kan det tyde på forurening, men lokalt set, er der intet grundlag for det.

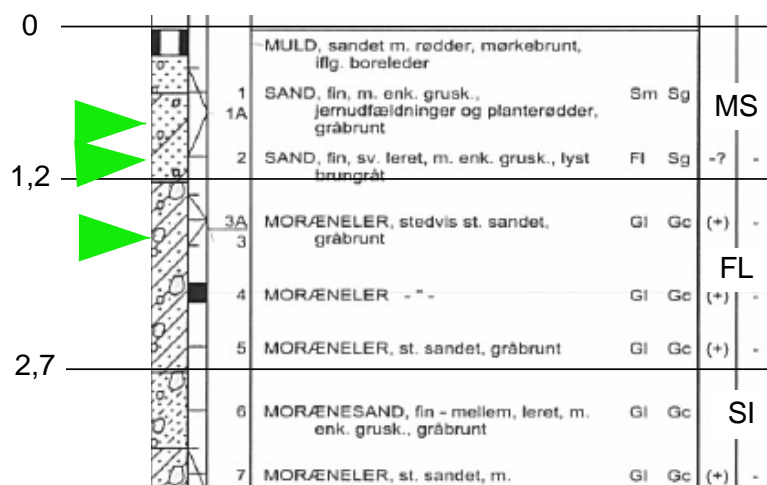
Generelt er begge profiler for resistivitet meget præcise og med stor detaljeringsgrad. Der er mest information i resistivitetsprofilet ved DC/IP inversion pga. DOI, som ligger meget dybere og derved giver en større mængde troværdige data.



Figur 24, Profil 1, 120-380m. 2D DC resistivitet profil (øverst) total data misfit 2,7 %, 2D DC/IP resistivitet plot (midt) total data misfit 2,4%, chargeabilitet plot (nederst) total data misfit 2,4%,. For at se alle IP parametre for 2D DC/IP se bilag 12.3 %. Den komplette signaturforklaring på boreprofilerne kan ses i figur 5.

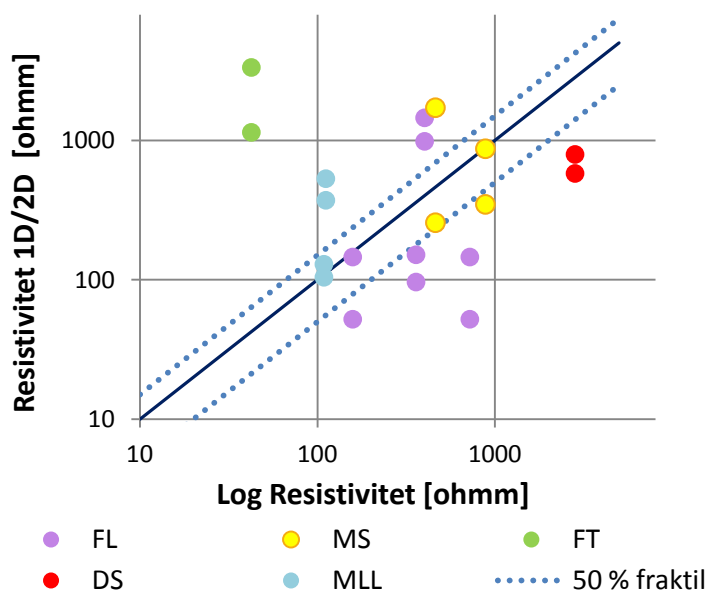
6.3 RESULTATER ELLOG

Ellog blev udført i november 2012 efter nogle dage med nedbør DS/IP målingerne blev udført i påsken 2012, så der kan være en forskel i porevæsken grundet årstiderne. Fem forskellige lithologier blev undersøgt, hvor lagene var tykke nok til, at målingerne ville være troværdige. Ellogtesten blev lavet 1 m fra de eksisterende borehuller udført af COWI A/S. Ved hjælp af et sneglebor graves et hul, der bores til den dybde, hvor den ønskede lithologi er aflejret ifølge boreprofilet (figur 25). Ellogen har en dybde på 3 m. Det var derfor begrænset, hvilke lithologier der var mulige at nå.



Figur 25, Boreprofil nr. 2151, eksempel på hvor ellog testen blev lavet. De Grønne pile er udførte ellog. MS Morænesand, FL moræneler leret, SI moræneler siltet og leret.

Korreletaion ellog data & DC målinger



Figur 26 Plot af ellog og DC data fra hhv. 2D og 1D. Med hjælpelinie for at tydeliggøre variationen mellem ellog data og 1D,2D data. Den komplette signaturforklaring på boreprofilet kan ses i figur 5.

Resultatet af elloggen er et plot (figur 26), med målte resistiviteter fra ellog og DC taget ved samme boring med en usikkerhed på ca. 2 meters afstand. Flere af datapunkterne varierer meget og kan være påvirket af nedbøren, som også varierer meget fra april til november. Der er mest nedbør i november, hvilket betyder, at jorden kan antages at være vandmættet, hvilket igen bevirker en lavere resistivitet. Denne teori passer fint på gytjeaflejringerne (FT), som har høj resistivitet for ellog data og lav for 1D, 2D data. Moræneaflejringerne FL, MLL og MS burde have de mindste variationer, men er ikke så ens, som forventet. Moræneaflejringerne er lerede formationer og burde ikke blive påvirket af nedbør i større grad.

Ved undersøgelse med ellog skulle målingerne også afdække IP, men pga. koblingsforstyrrelser i udstyret, måtte målingerne kasseres.

7 SAMMENSTILLING AF GEOFYSIK OG GEOTEKNIK DATA

7.1 FORTOLKNING AF PROFILER 1 OG 2 OG BOREPROFILERNE

Det er plausibelt, at den centrale del af profil 1, 200-340m, er en gammel tunneldal. Smeltevandfloder fra Nordøstisen og senere Det Østjyske Isfremstød har udhulet og skabt en fordybning i tunneldalen, som har skabt de skiftende resistive og konduktive lag i dalen. Perioder med større og mindre smeltevand i flodløbet har aflejret sediment fra gletsjerne. Der er aflejret sand og grus ved stærk strøm, og som floden er svundet ind, er strømmen aftaget, og der er aflejret ler og silt. I området i profil 1, 0-200m og 340-680m samt profil 2 har Nordøstisen med stor sandsynlighed aflejret en moræne i forbindelse med tilbagesmeltningen. Morænen ligger få meter under terræn og er uforstyrret og jævn, hvilket tyder på, at den sidste gletsjer, som dækkede området med is, har aflejret morænen. I dalen ligger grundvandspejlet kun nogle få meter under terræn (afsnit 5), vandet sænker resistiviteten og kan have en indflydelse på resistiviteterne mellem 200-340m. Ved at tilføje prior fra boringerne til inversionen af data kan man opnå et mere eksakt billede af undergrunden. Det kunne desværre ikke lade sig gøre i denne rapport, da universitet ikke kunne stille serverplads nok til rådighed i perioden, hvor inversionen blev lavet.

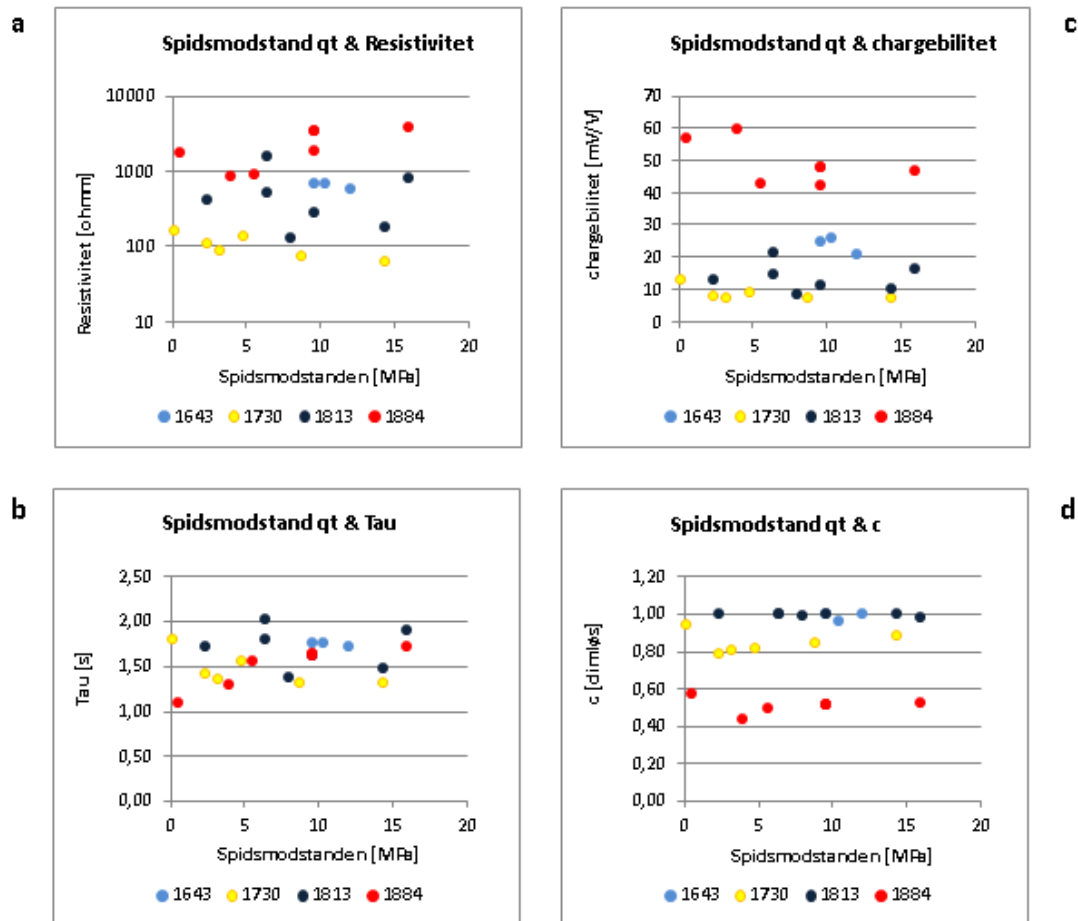
Boreprofilernes overensstemmelse med DC målingerne er god (figur 23). Boring nr. 1730 består næsten udelukkende af sand, mens lav resistivitet omkring boringen indikerer lerede aflejringer. Dog ser det ud som om, boringen har ramt kanten af det sandlag, der går ned i en bue, som nævnt ovenfor. Boring nr. 1762 har et tykt lag gytje i toppen og sand i bunden. Det er også meget svært at se, om det passer ind i resistivitetsmålingerne, da boringen kun er 5 m dyb. Lithologien i boring nr. 1813 passer godt med de målte resistiviteter. Her er kun sand i boringen, og resistiviteterne omkring er høje, 1000 ohmm.

7.2 KRYDSPLOT OG PLOT AF DC/IP PARAMETRE OG GEOTEKNISKE STYRKEPARAMETRE

Foruden de inverterede 2D DC og DC/IP profiler er der lavet en række krydsplot, histogrammer og grafer mellem de relevante geotekniske parametre, beskrevet i afsnit 2.2, og DC/IP parametrene, for at finde en mulig sammenhæng. Generelt er datagrundlaget for graferne småt, og tendenser kan derfor være svære at se. Data kan være påvirket af lokale afvigelser, da en enkelt boring vægter højt i datapuljen. Derfor skal eventuelle sammenhænge vurderes i forhold til, hvilke boringer der sammenlignes med, og hvor stort datagrundlag der er.

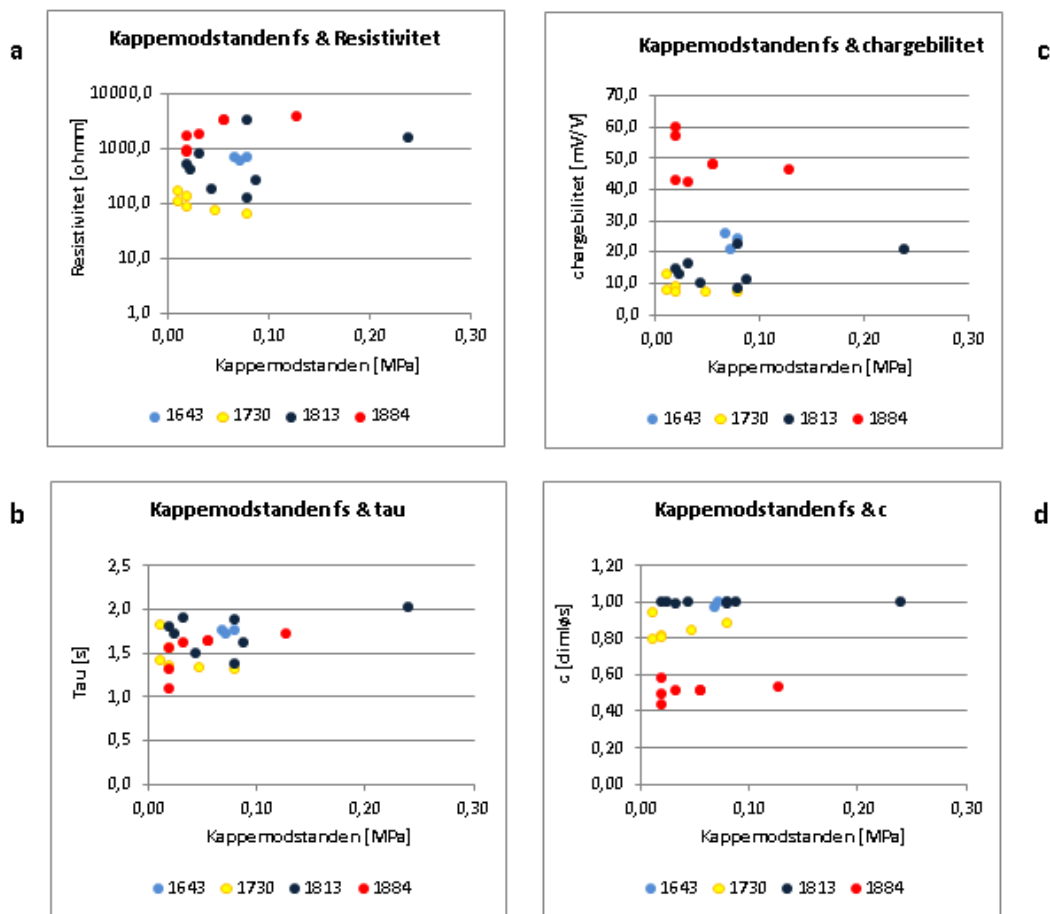
CPT og DC/IP

CPT forsøgene er udført i sandede aflejringer for at måle forskydningsstyrken af jorden. Plottene figur 27 viser spidsmodstanden i et krydsplot med DC/IP parametrene. Der er kun data fra sand og grus (DS), og data er derfor opdelt efter, hvilken boring de stammer fra.



Figur 27,a,b,c,d. Boreprofilerne nr.:1643, 1730, 1813 og 1884 med sand og grus (DS), 1D DC/IP er plottet mod Spidsmodstanden, a) Spidsmodstand og resistivitet, b) Spidsmodstand og chargeabilitet, c) Spidsmodstand og c, d) Spidsmodstand og τ .

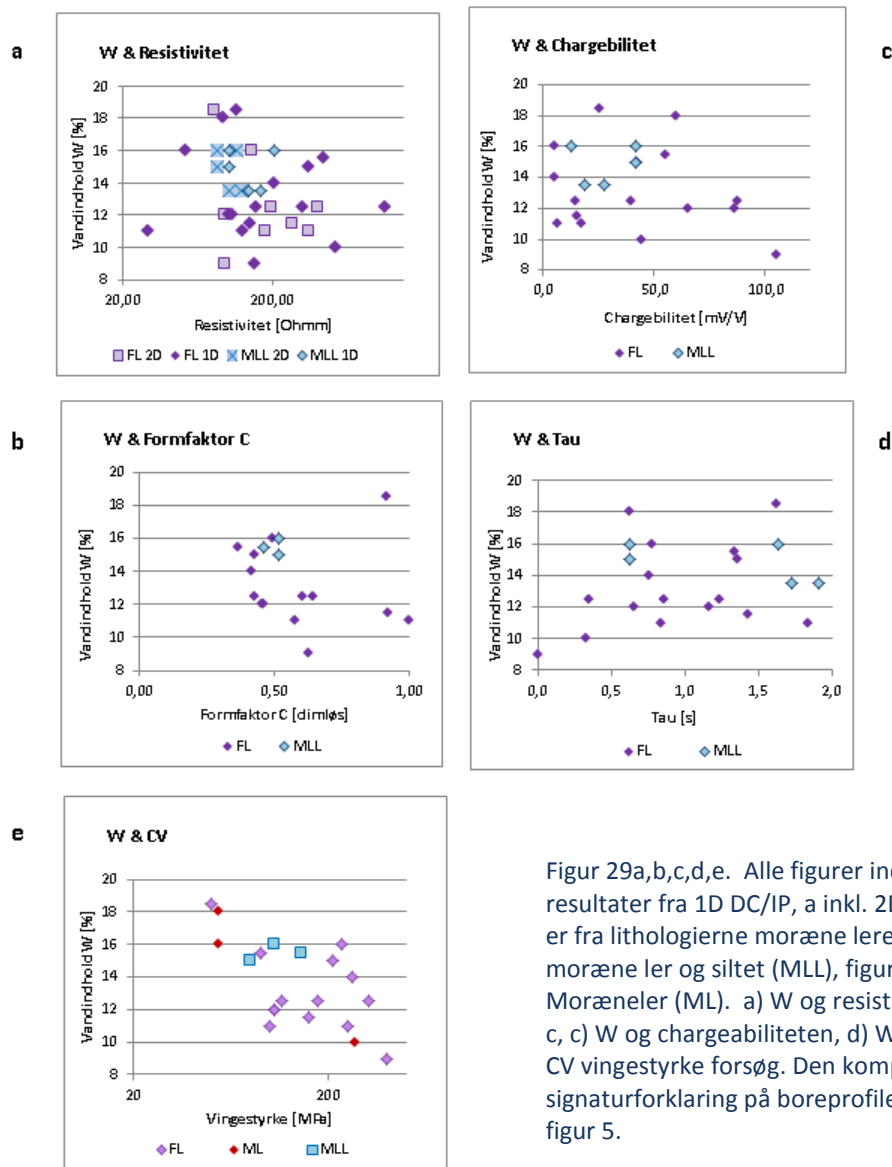
Der er ingen tendens mellem DS og DC/IP, kun en sammenhæng i data fra samme boring. Spidsmodstanden er stigende med dybden. Spidsmodstanden for DS når ikke over 20 MPa i nogen af plottene, men der er ingen knytning til DC/IP parametrene. Som nævnt i afsnit 2.1 viser A. Revil et al. (2006) en sammenhæng mellem c og fordelingen af kornstørrelser. Derfor kunne man forvente en sammenhæng ved CPT forsøg og c , da der kan være en sammenhæng mellem kornstørrelsesfordeling og forskydningsstyrken. I denne rapport er der ingen sammenhæng mellem c og jordens styrkeparametre.



Figur 28a,b,c,d. Boreprofilerne nr.: 1643, 1730, 1813 og 1884 med sand og grus (DS), 1D DC/IP er plottet mod Spidsmodstanden. a) Spidsmodstand og Resistivitet, b) Spidsmodstand og chargeabilitet, c) Spidsmodstand og c , d) Spidsmodstand og τ .

Vandindhold (W) og DC/IP

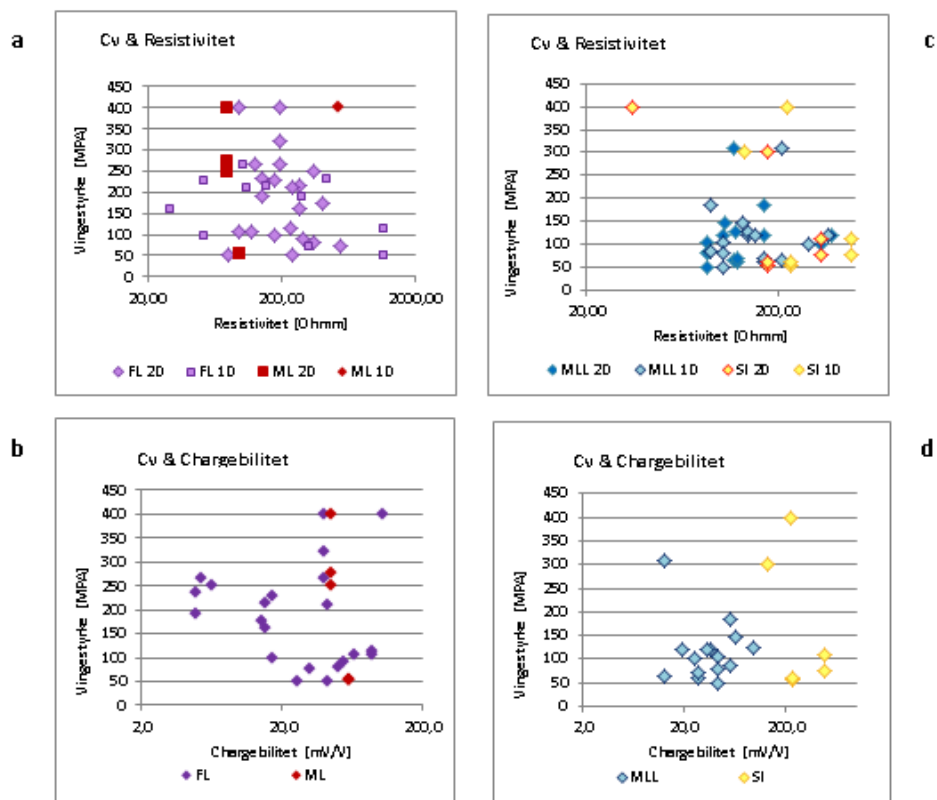
Det er kendt, at porevandet har betydning for resistiviteten og chargeabilitet. Derfor er det muligt, at der er en sammenhæng mellem vandindholdet og DC/IP parametrene. Vandindholdet er målt i maj 2011 samtidig med, at borerne er lavet. Geofysikmålingerne er lavet i starten af april 2012, og vandindholdet skulle være omtrent det samme. Når figur 29 betragtes, er der dog ingen tendens mellem vandindholdet og DC/IP parametrene. Vingestyrken er krydset med vandindholdet (figur 29e) som kontrol, og her ses en sammenhæng, for jo større vingestyrke jo mindre vandindhold. Ingen af de andre plots; resistivitet, chargeabilitet, τ eller c viser nogen sammenhæng med vandindholdet.



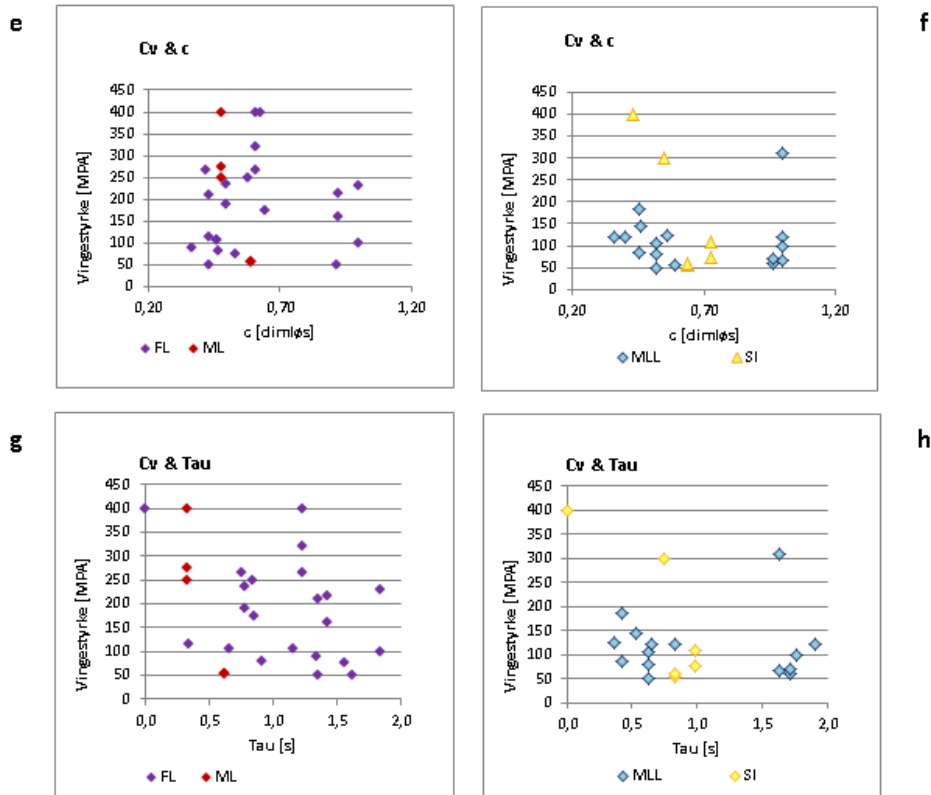
Figur 29a,b,c,d,e. Alle figurer indeholder resultater fra 1D DC/IP, a inkl. 2D DC/IP. Data er fra lithologierne moræne leret (FL) og moræne ler og siltet (MLL), figure inkl. Moræneler (ML). a) W og resistivitet, b) W og c, c) W og chargeabiliteten, d) W og τ , e) W og CV vingestyrke forsøg. Den komplette signaturforklaring på boreprofilerne kan ses i figur 5.

Vingestyrkeforsøg (CV) og IP

Krydsploottene af resistivitet og vingestyrkeforsøg er delt op på to plot med FL, ML og MLL, SI for at overskueliggøre data. Der er ingen klar korrelation mellem nogle af plottene med vingestyrkeforsøg og DC/IP. FL data er uden sammenhæng og er meget spredt på samtlige plots. MLL ligger meget samlet (figur 30c,d), men der er ingen klar sammenhæng mellem vingestyrkeforsøg og MLL. SI og ML ligger på en linie i flere plots, ML på plot figur 30a,b, SI på plot 30e, men der er så få data, at det kan være et sammenfald.



Figur 30a,b,c,d,. Alle figurer indeholder resultater fra 1D DC/IP, a og c inkl. 2D DC/IP. Data er fra lithologierne; moræne leret (FL), moræneler (ML), moræne ler og siltet (MLL) og morænesand siltet og sandet (SI). a) CV og resistivitet for FL og ML, b) CV og chargeabilitet for MLL og SI, c) CV og resistivitet for FL og ML, d) CV og chargeabilitet for MLL og SI. Den komplette signaturforklaring på boreprofilerne kan ses i figur 5.



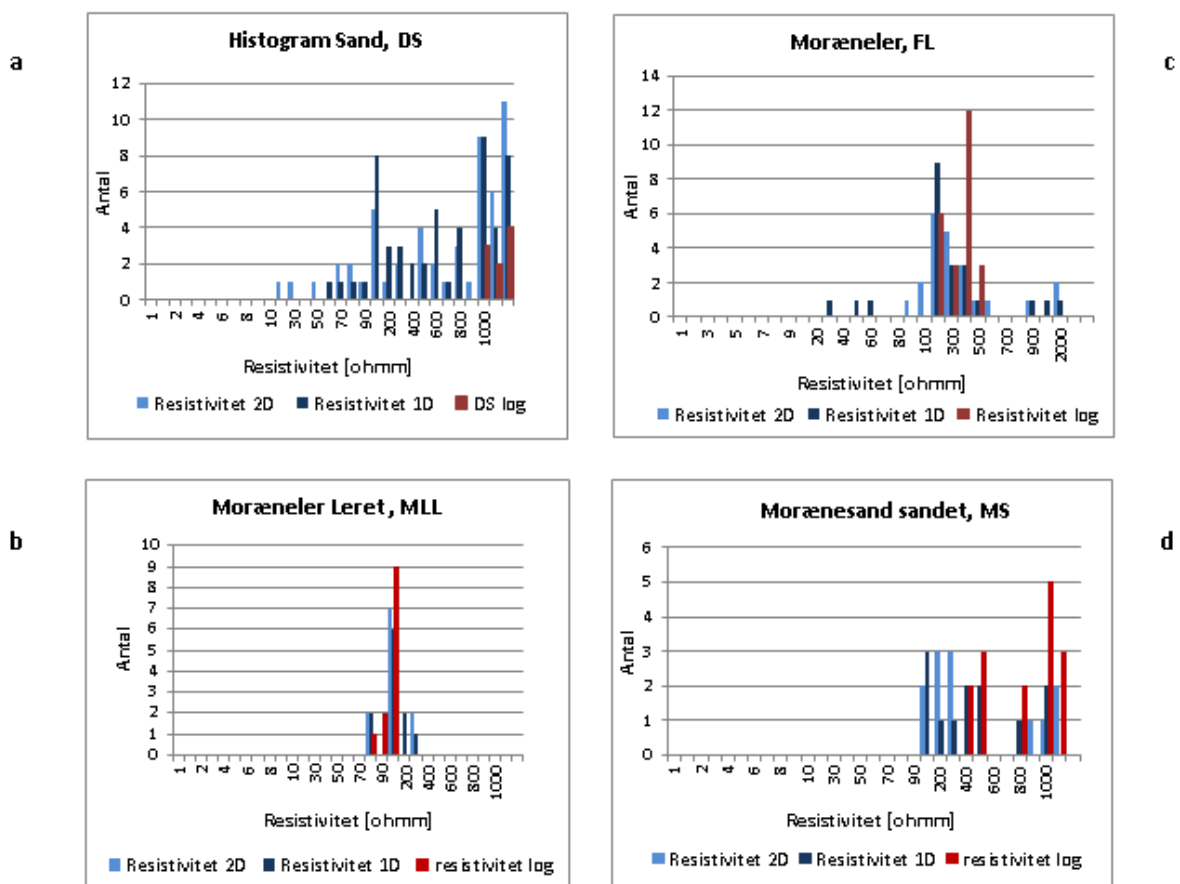
Figur 30e,f,g,h. Alle figurer indeholder resultater fra 1D DC/IP, a og c inkl. 2D DC/IP. Data er fra lithologierne; moræne leret (FL), moræneler (ML), moræne ler og siltet (MLL) og morænesand siltet og sandet (SI). a) CV og resistivitet for FL og ML, b) CV og resistivitet for MLL og SI, c) CV og chargeabiliteten for FL og ML, d) CV og chargeabiliteten for MLL og SI. Den komplette signaturforklaring på boreprofilerne kan ses i figur 5.

Lithologier og DC/IP parametrene

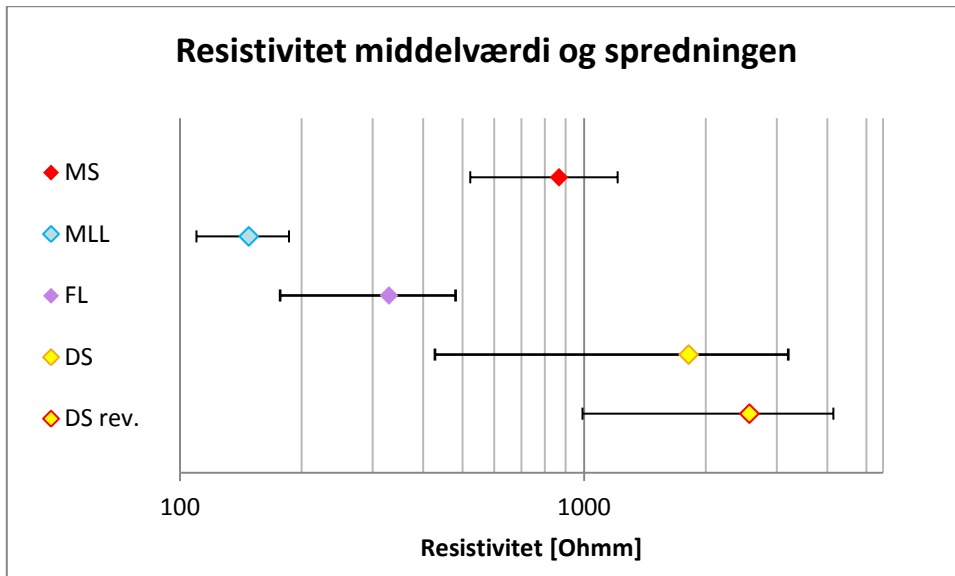
For at tydeliggøre sammenhængen mellem lithologierne og DC/IP parametrene er data stillet op i et histogram. Det er allerede kendt, at lithologi og resistivitet har en sammenhæng pga. indholdet af sand og ler (afsnit 2.3.1). Der er kun valgt de lithologier, hvor der er tilstrækkelig med data. Derfor ses kun DS, FL, MLL og MS.

Resistivitet

Resultaterne er meget i overensstemmelse med det forventede (figur 31). DS har nogle høje resistiviteter, 900-2000 ohmm (figur 31a). Alle ellog målingerne er over 900 ohmm. De lave målinger under 100 ohmm stammer fra boreprøverne 1730, 1762 og 1813, som er taget i bunden af dalen, hvor vandspejlet ligger nogle få meter under jorden. Det ses tydeligt på figur 33, hvor middelværdien ses med spredningen. Her har 'DS' alle data med, mens 'DS rev.' er eksklusiv boring nr. 1730-1813. Det betyder, at middelværdien stiger, og spredningen bliver mindre. MML er meget specifik og har den mindste spredning. Moræneleret ligger i dybden 1,1- 4 m og er formentlig en meget homogen moræneaflejrung, muligvis pga. leret i aflejrungen. FL har mange målinger med resistiviteter på 200-500 ohmm, hvilket er højt for en leret moræneler. Men tør og sprækket ler har høj resistivitet og kan hæve resistiviteten af aflejrungen. Det er dog bemærkelsesværdigt, at FL har værdier over 900 ohmm. Ms er meget fint fordelt. Morænesand har højere resistivitet end moræneler, og det er i god overensstemmelse med histogrammet (figur 31d), hvor MS har resistiviteter fra 100-2000 ohmm.



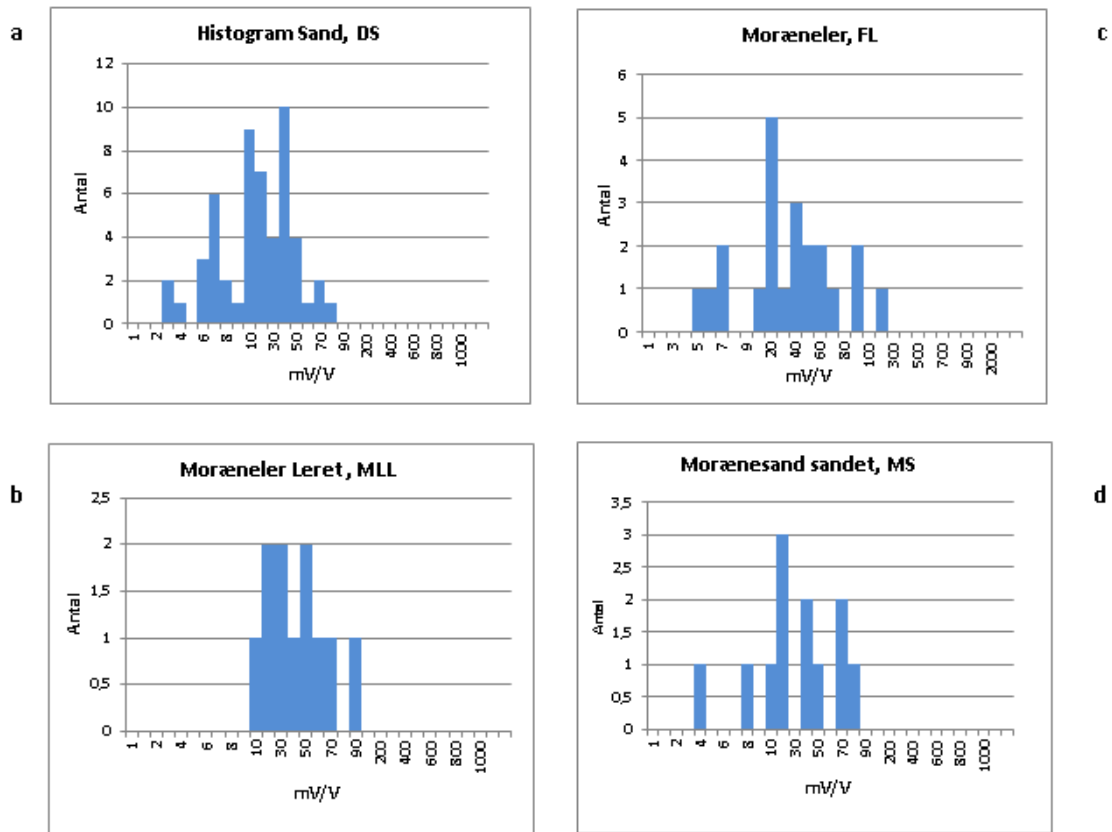
Figur 31abcd, Fordelingen af resistivitet, alle figurer indeholder resultater fra 1D DC/IP, 2D DC/IP og ellog. a) DS sand og grus, b) MLL moræneler leret, c) FL moræneler, d) MS morænesand. Den komplette signaturforklaring på boreprofilerne kan ses i figur 5.



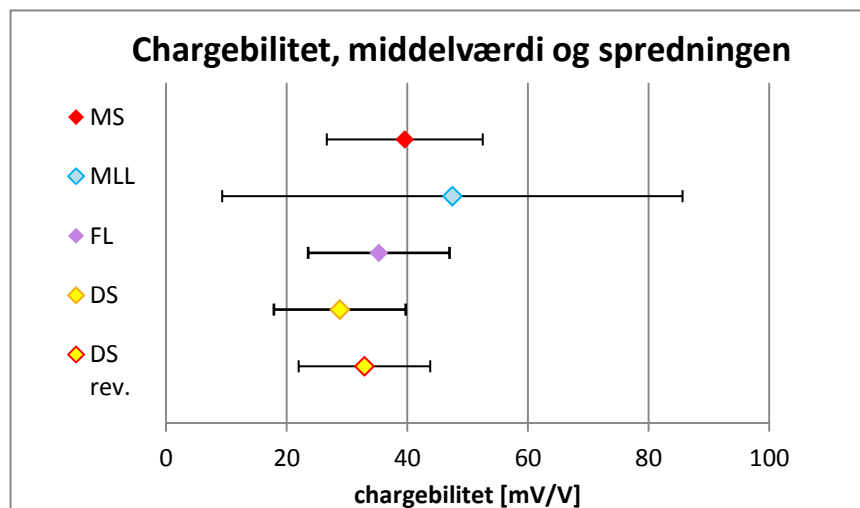
Figur 32, Oversigt over resistiviteter for forskellige lithologier. Grafen er lavet ud fra samme data som histogrammet figur 31. Den komplette signaturforklaring på boreprofilerne kan ses i figur 5.

Chargeabilitet

Histogrammerne for lithologi og chargeabilitet (figur 33) hænger fint sammen med resistiviteterne. DS har lav chargeabilitet 2-80 mV/V, og høj resistivitet 1000 ohmm. MS har lav og middel chargeabilitet 4-90 mV/V, hvilket også passer fint med den tilhørende resistivitet 200-1000ohmm. FL og MLL er mindre konsekvent. Her er chargeabiliteten middel 5-150 mV/V, hvor den skulle have været middel til høj. Der er ikke noget generelt udtryk, for de forskellige lithologier og deres chargeabilitet (figur 34). MLL, som så ud til at have det mest samlede udtryk, har alligevel den største spredning, hvilket kan forklares med den lille data mængde. Alle middelværdierne ligger stort set oven i hinanden, så det er svært at sige, at der er en sammenhæng mellem chargeabiliteten ud fra dette plot.



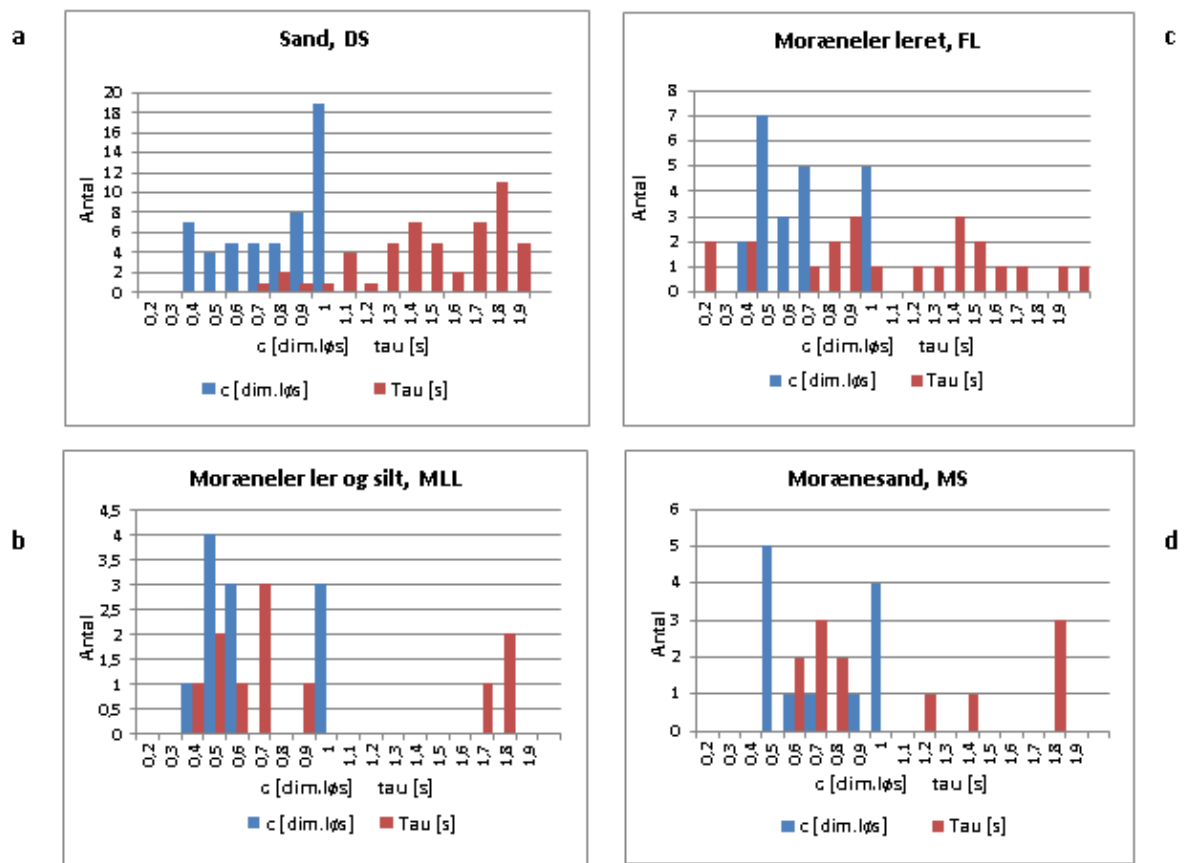
Figur 33a,b,c,d. Fordelingen af chargeabilitet. Alle figurer indeholder resultater fra 1D DC/IP. a) DS sand og grus, b) MLL moræner leret, c) FL moræner, d) MS morænesand. Den komplette signaturforklaring på boreprofilerne kan ses i figur 5.



Figur 34, Oversigt over chargeabilitet for forskellige lithologier. Grafen er lavet ud fra samme data som histogrammet figur 33. Den komplette signaturforklaring på boreprofilerne kan ses i figur 5.

τ og c

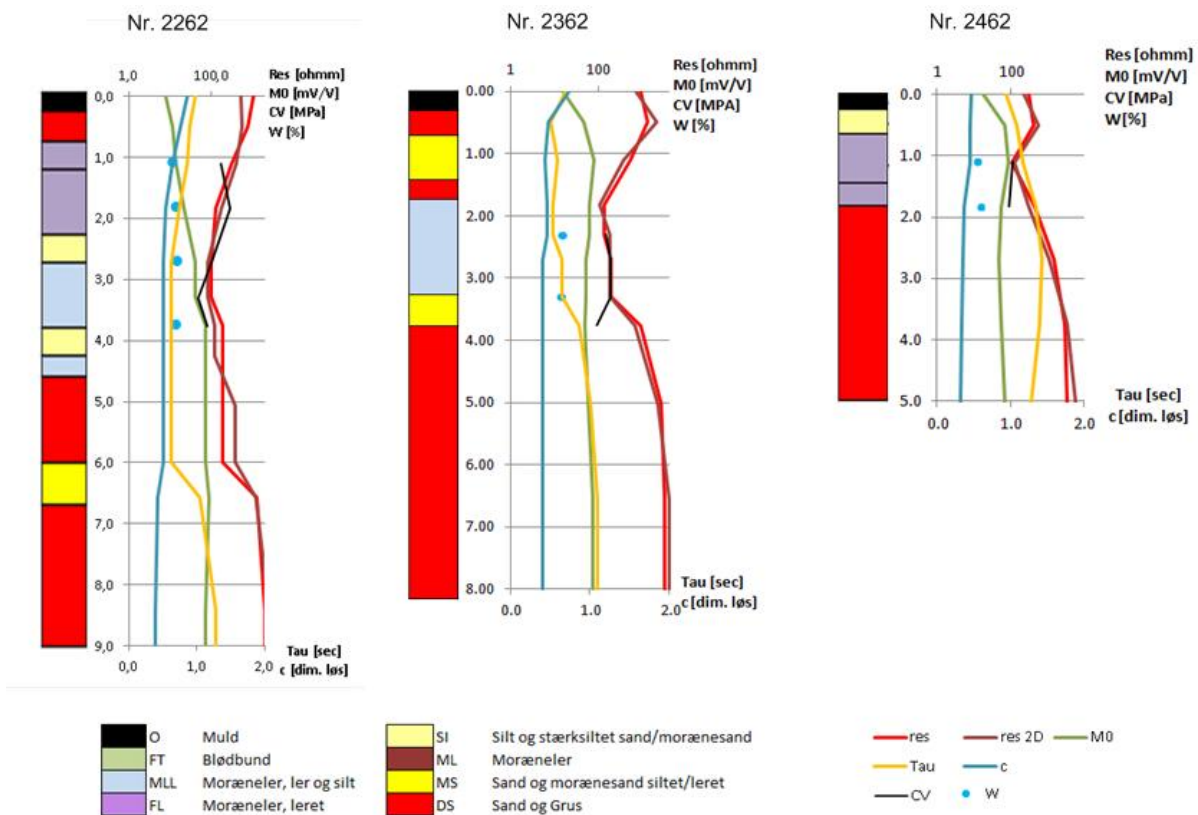
Histogrammerne for τ og c er meget forskellige (figur 35). Værd at bemærke er DS, som er ens i sin værdi for τ og c . Begge er høje inden for deres egen skala τ går til 2 s og c har over 36 % af data over 0,9 [dimensionsløs]. For MLL er der generelt en lav værdi for τ og middelværdi c . Her har de fleste data en værdi på ca. 0,5 c værdi og en τ værdi på 0,6. For alle moræneaflejringerne gælder det, at c er middel med en værdi omkring 0,6 [dimensionsløs]. Der er ingen sammenhæng mellem lithologierne og τ og c .



Figur 35a,b,c,d, Fordelingen af c og τ . Alle figurer indeholder resultater fra 1D DC/IP. a) DS sand og grus, b) MLL moræner leret, c) FL moræner, d) MS morænesand. Den komplette signaturforklaring på boreprofilerne kan ses i figur 5.

Boreprofiler geotekniske og geofysiske data

Ved at sætte boreprofilerne i direkte sammenhæng med DC/IP parametrene undersøges igen, om der er en sammenhæng mellem lithologi, geotekniske styrkeparametre og DC/IP parametre. Der er valgt tre boreprøver ud, som er dybe, og som ligger i forbindelse med hinanden. Boringerne er vist til venstre for IP parametrene (figur 36). Vandindhold og vingestykken er indtegnet sammen med DC/IP parametrene, for at sammenfald bliver tydeligere. Resistiviteten passer med lithologierne. Der er lav resistivitet ved ler og høj resistivitet ved sand. Chargeabiliteten er mindre konsekvent. Den varierer meget lidt og er lav, hvor resistiviteten er lav ved boring nr. 2362 og 2462. Vandindholdet og vingestykkerne har ingen sammenhæng med DC/IP parametrene, og data følger ikke DC/IP data i kurveforløb hverken med dem eller modsat DC/IP parameterkurverne. Ved MS aflejringer slår τ et knæk. Det er konsekvent ved alle boringer, og c er påfaldende upåvirket af lithologien ned gennem boringerne.



Figur 36, Oversigt over boreprofil nr. 2262, 2362 og 2462 og tilhørende vandindhold (W), vingestykforøgelse (CV) og IP parametre.

7.3 ØKONOMISK SAMMENSTILLING AF GEOTEKNISKE OG GEOFYSISKE METODER

Det kræver et kendskab til målemetode og instrument at lave DC/IP målinger i felten. Det er en fordel at være to til at flytte elektrode opstillingen ved hver Roll Along (RA) og måletiden afhænger af hvor god kontakt der er mellem jorden og elektroderne. DC/IP målinger har den fordel i forholdt til boreprøver at det kan laves i svært tilgængeligt terræn, som kuperede områder, skov, mose mm. DC/IP målinger bliver til gengæld påvirket meget af kabler i jorden og luften som ved beboede områder.

Beregningseksempel

Teoretisk eksempel for undersøgelse af 1000 m undergrund. Boringerne laves pr. 100 m og er 6 m dybe. DC/IP måling laves med 2 meters afstand mellem elektroderne. Det forudsættes, at det er "godt" vejr, og at en arbejdsdag er på 8 timer.

DC/IP måleudstyr		Pris pr. 100 m	Pris pr. Dag
Måle hastighed DC [m/t]	40 m/t		
Målehastighed DC/IP [m/t]	20 m/t		
Lån af udstyr, Iris inkl. Alt materiale i 14 dage	45.000 kr.	1.004 kr./100 m	3.214 kr. /d
Lønninger 2 personer	800 kr./t	250 kr./100 m	6.400 kr. /d
Processering, invertering og analyse, 1 person i 1 dag 400 m	3.200 kr./d/100m	800 kr./100 m	3.200 kr. /d
Total DC		2.054 kr./100 m	12.814 kr. /d/ 320 m
Total IP		4.658 kr./100 m	22.428 kr. /d/ 160 m
Boringer			
Målehastighed [m/t]	1,88 m/t		
Boring, laboratorieforsøg og afrapportering inkl. Lønninger	2.000 kr./m i dybden	12.000 kr. /100 m	30.000 kr./d
Total Boringer		12.000 kr./100 m	30.000 kr./d/ 250 m

Tabel 3, Beregningen er baseret på tal fra HydroGeofysik gruppen, Aarhus Universitet og Geoteknisk afdeling COWI A/S.

Det er mest økonomisk at lave DC målinger, da de har den laveste pris 2054 kr./100m. Målingerne bliver lavet med en hastighed på 40 m/t, den hurtigste udførsel af målinger i beregningseksemplet. Iris instrumentet og materiale til målingerne alt. Inkl. Er den dyreste omkostning ved DC/IP målingerne. Prisen er beregnet ud fra leje af udstyret, ved en rabat ved udlejning på 25 %, en mindre rabat sammenlignet med hvad udstyret bliver udlejet til normal. Processering af data fra DC/IP målinger kan tage længere tid end estimeret i beregningseksemplet det afhænger af hvor meget støj der er på den lokalitet hvor målingen udføres.

8 DISKUSSION

Jordens styrkeparametre og DC/IP parametrene

Gennem flere forskellige plot og grafer er der forsøgt, på at finde en sammenhæng mellem jordens styrkeparametre og DC/IP parametrene. Der er ikke fundet nogen tendens mellem vingestyrker, CPT forsøg, vandindhold og resistivitet, chargeabilitet, c eller τ . Teorien om, at kornstørrelsesfordelingen og c skulle have en sammenhæng (A. Revil, 2006), er ikke bevist i denne undersøgelse. Kornstørrelsesfordelingen har betydning for, hvor kompakt sand er, og derfor kunne man antage, at spidsmodstanden havde en sammenhæng med c . Plottene med spidsmodstanden og c (figur 27) viser en sammenhæng inden for boreprøverne, som antyder, at spidsmodstanden stiger med dybden. c forbliver næsten konstant, så der kan ikke påvises nogen sammenhæng mellem c og spidsmodstanden. Samme teori er udviklet for ler (afsnit 2.1), hvor c ændres ved en udvikling af jordens kompakthed (Tong M. And Tao H., 2007), og konsolideret eller omrørt lerjord har lavere resistivitet end uforstyrret jord (M. Fukue, 1999). I det tilfælde skulle vingestyrkeforsøgene korrelere med c (figur 30), hvilket undersøgelserne ikke finder muligt.

Resistivitet, chargeabilitet og lithologi

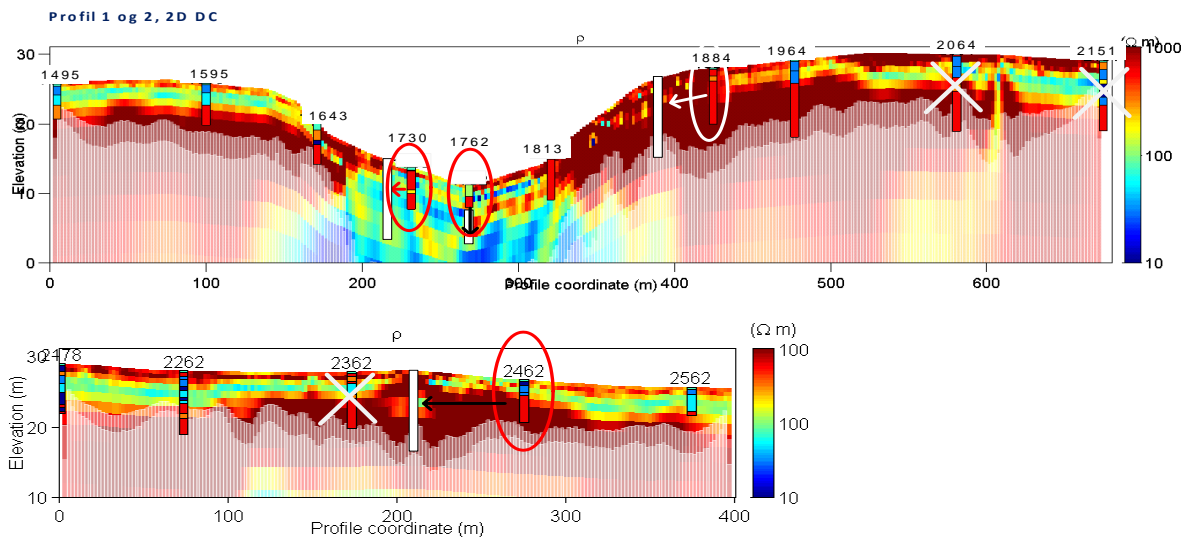
Inden for geofysik er sammenhængen mellem resistivitet og lithologi kendt (figur 6). I denne undersøgelsen er der også fundet en sammenhæng mellem resistivitet og lithologi (figur 31) værdierne stemmer overens med de intervaller resistivitet dækker for en bestemt lithologi (figur 6) Der er en mindre afvigelse ved moræneleret (FL), som varierer meget og har resistiviteter op til 1700 ohmm (figur 31c). Lerede aflejringer har normalt ikke så høje resistiviteter (figur 6), og det tyder på, at jorden enten indeholder sprækket og hulrum med luft som isolator, eller at der er store sten i aflejringerne, hvilket er mest sandsynligt. Plottene med chargeabilitet og lithologi har ikke så konsekvent en sammenhæng som forventet. Middelværdierne varierer meget lidt og spredningen overlapper for alle undersøgte lithologier (figur 34). Chargeabiliteten har en god overensstemmelse med lithologien i profilerne, hvor der er en tydelig forskel i høj og lav chargeabilitet (figur 24). Den manglende sammenhæng mellem chargeabilitet og lithologi kan skyldes de vekslende jordlag, hvis chargeabiliteten bliver påvirket af overgangen fra et lag til et andet, kan det forstyrre data og dermed plottet. Korrelationen af DC/IP data og boreprofilerne er udført med stort hensyn til tynde aflejringer og data intervaller som ligger oven i et skel mellem to aflejringer i boreprofilet (se bilag 12.3). Data for resistivitet viser ikke tegn på at være påvirket af dårlig korrelation mellem DC/IP data og boreprofilerne, men de øvrige IP parametre kan være mere sensitive og det kan være grunden til at der ingen sammenhænge af fundet mellem IP parametre og jordens styrke parametre. Denne teori er ikke undersøgt i dette speciale.

DC alene og DC/IP

DC målinger og den efterfølgende dataprocessering er hurtige at udføre, og resultatet er profiler, der indeholder en stor detaljeringsgrad. Det tager mere end dobbelt så lang tid at foretage DC/IP målinger sammenlignet med DC målinger. Til gengæld er DC/IP mere præcist, og muligheden for at sammenholde resistivetsprofil med chargeabilitetsprofil er en fordel. Grundlaget for en tolkning af geologien under terræn bliver væsentligt forøget da der er to forskellige profiler at tolke ud fra. Nogle aflejringer bliver nemmere at skelne fra hinanden fx har leraflejringer og saltvandsmættet sand næsten samme resistivitet, men vidt forskellig chargeabilitet (figur 6). Der er også større mængde information om jorden i resistivetsprofil ved DC/IP inversion pga. DOI, som ligger meget dybere end ved DC alene og derved giver en større mængde troværdige data. DC resistivetsprofil har et mindre misfit end resistivetsprofil DC/IP i forhold til målt data. Til gengæld er der større input ved invertering af DC/IP, og inversionen kan vægtes at være mere troværdig. Det er altid en fordel at sammenligne resistivetsprofil med chargeabilitetsprofil, da det giver et større grundlag for fortolkningen af data. I denne undersøgelse er målingerne foretaget med en elektrodeafstand på 2 m for at få et så detaljeret profil som muligt. I tilfælde af, at metoden skal bruges over en større afstand på kortere tid, kan man anvende en elektrodeafstand på 5 m, hvilket vil øge måle hastigheden med faktor 20.

Anvendelse af DC/IP målinger

Geoelektriske målinger kan med fordel anvendes i projekteringsfasen af fx vejbyggeri, DC/IP målingerne kan danne grundlag for fastlægning af vejens linjeforløb og give et vurderingsgrundlag for en mere nøjagtig placering af boreprøver. Sammenlignet med at lave en boring for hver 100-150 m, som er standardafstanden i anlægsbranchen, får man en mere konkret viden for de samme omkostninger ved kvalificeret placering af boreprøverne. Resultaterne af mine undersøgelser viser at inden for de 1080 meter, hvor målingen med DC/IP er foretaget, kan man undlade 3 borer og med fordel flytte 7 af borerne (figur 37). I de områder, hvor geologien ikke ændrer sig, kan man nøjes med én boring i start og én i slut af strækningen, samt en kontrolboring i midten af feltet, profil 1, 500-680m og profil 2, 0-180m. Boring nr. 2462 kan flyttes for at undersøge det førnævnte fænomen i profil 2 ved 200 m. Boring nr. 1884 kan flyttes for at undersøge, hvor meget sandjord der er i skrænten. I dalen kan man med fordel flytte både boring nr. 1730 og 1762. Boring nr. 1730 ligger lige over kanten af et "buet" lag af høj resistivitet, og boringen giver derfor et misvisende billede af geologien. Boring nr. 1762 kan med fordel flyttes for at se, om de konduktive områder svarer til ler aflejringer.



Figur 37, Oversigt over profilerne med boringer hvor det tydeliggøres hvilke boringer der kan undlades, og hvilke man med fordel kan flytte. Profil 1 (øverst) og profil 2 (nederst) 2D DC. Komplet signaturoversigt se figur 5.

Økonomisk gevinst

Vigtige aspekter ved valg af metoder til undersøgelse af jordbunden er tid, omkostninger og kvalitet. Ved at sammenligne omkostningerne for boreprøver og DC/IP målinger til undersøgelse af undergrunden ses det tydeligt, at denne undersøgelse er relevant. Selv om DC/IP målinger er forbundet med færre omkostninger og er hurtigere at udføre, er boringer stadig den mest anvendte metode til undersøgelse af undergrunden. Et kvalificeret gæt på hvorfor dette er tilfældet kunne være den manglende viden om DC/IP og et manglende kendskab til geofysiske metoder, hos de rådgivende ingeniørfirmaer. Den lange tradition for brugen af boringer til undersøgelser af undergrunden, kunne også være en del af forklaringen på, at der ikke bliver iværksat nye tiltag, da det kræver et overskud økonomisk og tidmæssigt at indfører nye metoder i et firma.

Ud fra beregningseksemplet (tabel 3) ses, at det er mest økonomisk fordelagtigt at udføre DC målinger af undergrunden i sammenlignet med omkostningerne til boreprøver. For 22.428 kr. kan man på én arbejdsdag måle en strækning på 320 m. Boringerne er mere end dobbelt så dyre at udføre, og her får man kun én boreprøve pr. 100 m. Boringerne er ekskl. CPT og vingestyrkeforsøg, og uden test af jordens styrkeparametre indeholder boringerne den samme information som DC målingerne der giver et overblik over geologien i undergrunden.

9 KONKLUSION

Geofysiske målinger Direct Current (DC)/Induceret polarisation (IP) kan med fordel anvendes i forbindelse med vejbyggeri. Det er et godt værktøj til undersøgelse af jordbunden og giver et kontinuerligt og detaljeret billede af geologien under terræn. Resultatet af undersøgelsen er ikke kvalitativ i den forstand at man ikke kan uddrage konklusioner angående jordens styrkeparametre ud fra DC/IP data. Til gengæld er der en kvantitativ fordel da man ved DC/IP målinger kan profilere undergrunden over en lang strækning hurtigere end ved geotekniske undersøgelser.

Der er ingen sammenhæng mellem vingestyrker, CPT forsøg, vandindhold og resistivitet, chargeabilitet, c eller τ . Det er derfor heller ingen fordel at kombinere geotekniske data for jordens styrke med DC/IP parametrene. Jordens styrke og egenskaber skal undersøges ved geoteknik, man kan heller ikke undlade at udføre borerer da DC/IP profilerne skal holdes op imod data taget direkte i jorden for at få den mest præcise tolkning af undergrunden.

De indlændede undersøgelser kan man med fordel udføre ved DC alene, da det er hurtigst og billigst i forhold til at måle IP samtidig. Områder med mistanke for forurening eller fed ler kan måles med DC/IP for at øge informationen om jordbunden. DC/IP målinger kan inverteres med DOI, som viser hvor troværdige data er i profilerne. Når DC/IP skal anvendes i anlægsbranchen skal man udnytte den viden man får fra DC/IP profilerne. Der er en klar besparelse i at anvende DC/IP i forundersøgelsen, da man ved DC/IP kan måle en længere strækning på kort tid. Opmålingen ved DC/IP skal udgøre et vurderingsgrundlag for hvorfra der kan fastlægges linjeforløb og placering af borerer. Det er dyrt at udføre borerer i forhold til DC/IP måling. Ved at placere borererne mest fordelagtigt ud fra DC/IP målingerne reduceres omkostningerne til undersøgelse af jordbundsforholdene, hvilket giver både den rådgivende ingeniør og den udførende entreprenør reducerede omkostninger. Det er vigtigt at pointere at vingestyrkeforsøg bliver lavet i forbindelse med udførelsen af en boreprøve, så det er begrænset hvor mange borerer man kan undlade. Omkostningerne for jordbundsundersøgelserne er værd at bemærke da der er en økonomisk gevinst for bygherren ved at anvende geofysiske metode DC/IP.

Total DC	2.054 kr./100 m	12.814 kr. /d/ 320 m
Total IP	4.658 kr./100 m	22.428 kr. /d/ 160 m
Total Borerer	12.000 kr./100 m	30.000 kr./d/ 250 m

Tabel 4, Oversigt over omkostninger for jordbundsundersøgelser. Udsnit fra tabel 3.

11 REFERENCE LISTE

- Auken, E. and Christiansen,A.V. (2004). Layered and laterally 2d inversion of resistivity data. *Geophysics* 69, No. 3, P. 752-761.
- Auken,E., Christiansen, A.V., Jacobsen B.H., Foged, N. and Sørensen, K.I. (2005). Piecewise 1d laterally constrained inversion of resistivity data. *Geophysical Prospecting*, 50, p. 497-506.
- Bagge G. (2006). Lærebog I Geoteknik, afsnit 7 Jordens styrker.
- Binley, A. and Kemna, A. (2005). DC resistivity and Induced Polarizations Methods. *Hydrogeophysics* p. 129-156.
- Bødker, K. og Ovesen, N. K. (2006). Lærebog I Geoteknik afsnit, afsnit 10, Fundamentets bæreevne.
- Bødker K. (2009) Styrke- og deformations parametre, notat.
- Christensen, A. V., Auken, E. And Sørensen K.(2006). The Transient electromagnetic method, *Groundwater Geophysics - A tool for hydrogeology*. p.179- 225.
- Christiansen , A.V and Auken, E. (2012). A global measure for depth of investigation. *Geophysics*, 70, p. 171-177.
- Christensen, N.B. (2000) Geoelektriske formationers specifikke elektriske modstand. *Noter til miljøgeofysisk metodik*, p. 1-12.
- Christensen, N.B. and Sørensen K.(2001) Pulled array continuous electrical sounding with an additional inductive source: an experimental design study. *Geophysical Prospecting*, 49, p. 241-254.
- Christensen, N.B. (2008), *Environmental Applications of Geoelectrical Methods*. Lecture notes, p. 4-10
- Dahlin, T. (2000) Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays. *Geophysical prospecting*, 48, p. 181-187.
- Dahlin, T. and Zhou, B. (2006) Multiple-gradient array measurements for multichannel 2D resistivity imaging. *Near Surface Geophysics*, 4, p. 113-123.
- Dahlin, T. and Leroux, V. (2007) Dense resistivity and induced polarization profiling for a landfill restoration project at Härlöv, southern Sweden. *Waste management Research*.
- Fuglsang, L.D. (2006) Lærebog i Geoteknik, afsnit: Jordens deformationer, Konsolideringens tidsforløb.
- Fukue, M., Minato, T., Horibe, H. and Taya, N. (1999) The micro-structures of clay given by resistivity measurements. *Engineering Geology*, 54, p. 43-53.

Gazoty, A., Fiandaca, G., Pedersen, J. and Auken, E.(2012). Application of time domain induced polarization to the mapping of lithotypes in a landfill site. *Hydrology and earth system sciences*, 1, p. 1739-1804.

Kirsch, R. (2006) *Groundwater Geophysics – A tool for hydrogeology*, p. 8-16, 85-89.

Kemna, A., Binley, A. and Slater, L.D. (2004). Crosshole IP imaging for engineering and environmental applications. *Geophysics*, 69, No. 1, p. 97-107.

Laroy, P. and Revil, A.(2009). A mechanistic model for the spectral induced polarization of clay materials. *Journal of Geophysical Research*, vol. 114.

Lykke-Andersen, H. (1974). Kortlægning af undergrunden i omegnen syd og vest for Århus.

Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R. and Nelson, P. H.(1978). Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP. *Geophysics*, vol. 43, p.588-609.

Revil, A., Leroy, P. Ghorbani, A., Florsch, and Niemeijer, A. R. (2006). Compaction of quartz sands by pressure solution using. *Journal of Geophysical Research*,vol. 111.

Schwarz, G., (1962), A theory of low-frequency dielectric dispersion of colloid particles in electrolyte solution: *Journal of Physical Chemistry*, 66, p.2623-2642.

Seigel, H., Nabighian, M., Parasnis, D. S. and Vozoff, K.(2007). The early history of the induced polarization method. *The leading edge* Marts.

Slater, L.D. and Lesmes, D.(2002). IP interpretation in environmental investigations.*Geophysics*, vol.67, No. 1, p.77-88.

Slater, L.D. and Reeve, A. (2002). Investigating peatland stratigraphy and hydrogeology using integrated electrical geophysics. *Geophysics*, vol.67, No.2, p.365-378.

Slater, L. D. and Sandberg, S. K. (2000). Resistivity and induced polarization monitoring of salt transport under natural hydraulic gradients.*Geophysics* vol. 6, No. 2, p. 408-420.

Smed, P. (1998). *Landskabskort over Danmark*, Geografforlaget.

Syscal brochure, http://www.iris-instruments.com/Pdf%20file/SyscalPro_Gb.pdf

Syscal user manual, <http://www.heritagegeophysics.com/images/promanual.pdf>

Sørensen, K. I., Auken, E. Christensen, N. B. and Pellerin, L. An integrated approach for hydrogeophysical investigations: new Technologies and a case history. *Near-surface geophysics*.

Tong, M. and Ta, o H. (2006). Experimental study of induced polarization relaxation time spectra of shaly sands. *Journal of Petroleum Science and engineering*, 59, p. 239-249.

Trankjær, H. og Christensen, L. (2012). Har ler mineralsammensætningen i fede, danske ler arter betydning for funderingen. *DGF Bulletin* 27.

Ulrich, C. and Slater, L. D.(2004). Induced polarization measurements on unsaturated, unconsolidated sands. *Geophysics*, vol. 69, No.3, p.762-771.

Vanhala, H. (1997). Mapping oil-contaminated sand and till with the spectral induced polarization (SIP) method. *Geophysical Prospecting*, 45, p. 303 - 326.

Viezzoli, A., Pedersen, J., Pytlich, A.(2008) Quantitative Appraisal of Noise in Time Domain Induced Polarization Data: Near surface 14th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics Kraków, Poland

Villumsen, A. and Lykke-Andersen, H. (1976). Late- and Post-glacial sediments in the Randers fjord area.

Regler og standarder

Rasmussen, J. L. (2006). Ballasttal, Rambøll.

Berg, F. Ubundne vejmaterialer – nye regler og standarder. Vejdirektoratet, Vejteknisk institut.

Materialernes anvendelighed, Vejdirektoratet standart bilag nr. 5 (2012). Vejdirektoratet.

Stabilt grus, Almindelig Arbejdsbeskrivelse (AAB) (2003).

Tolkning af CPT forsøg (revision sept. 2008), Geo, Internt memo.

Rapporter

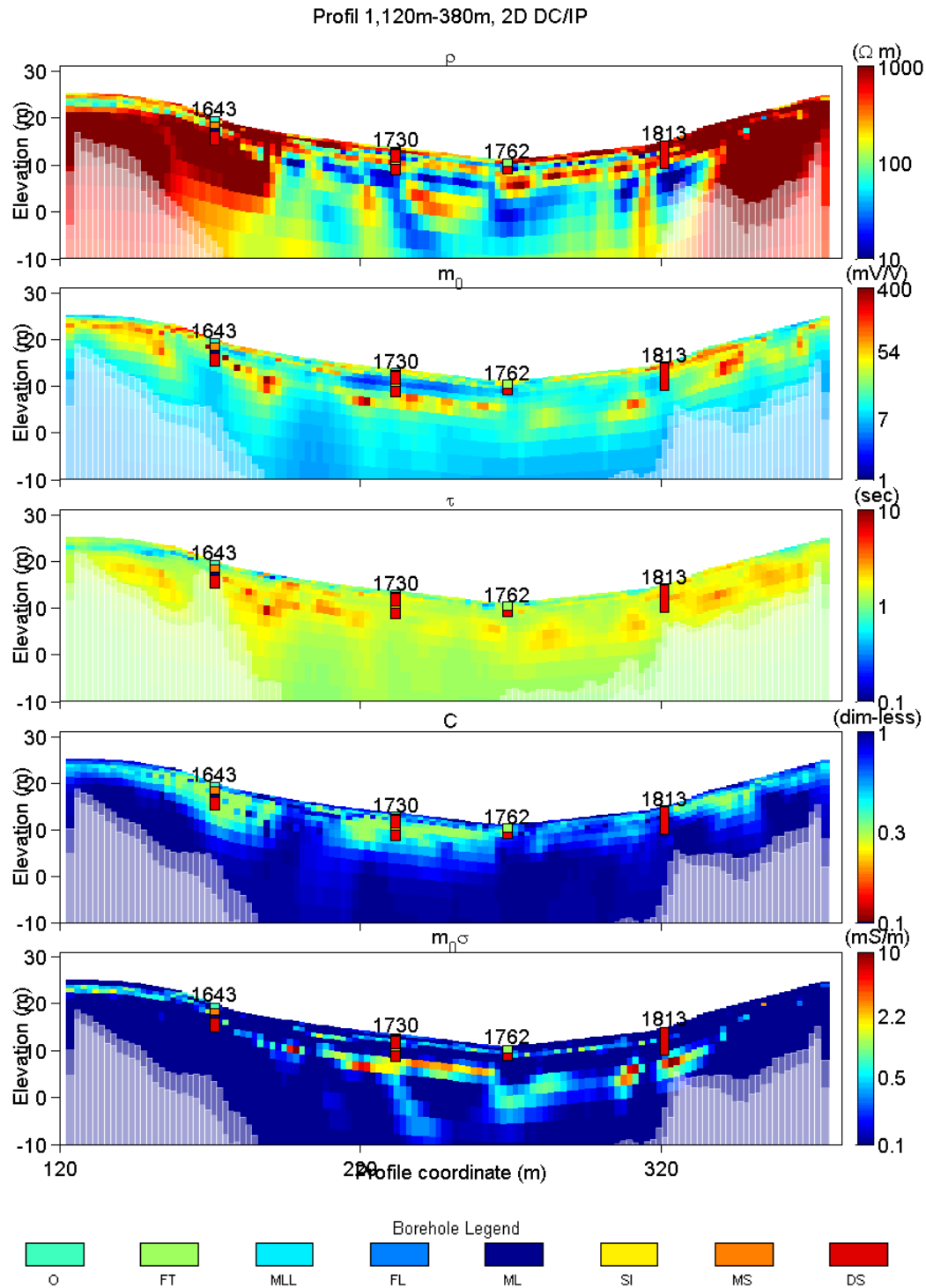
Cowi A/S, Geoteknisk hovedrapport, 415 Randers - Grenå, etape 41510 Sdr.(2012). Vejdirektoratet.

12 BILAG

12.1 SIGNATUROVERSIGT OG BOREPROFILER

Se vedlagte A3

12.2. 2D INVERSION AF DC/IP ALLE PROFILER

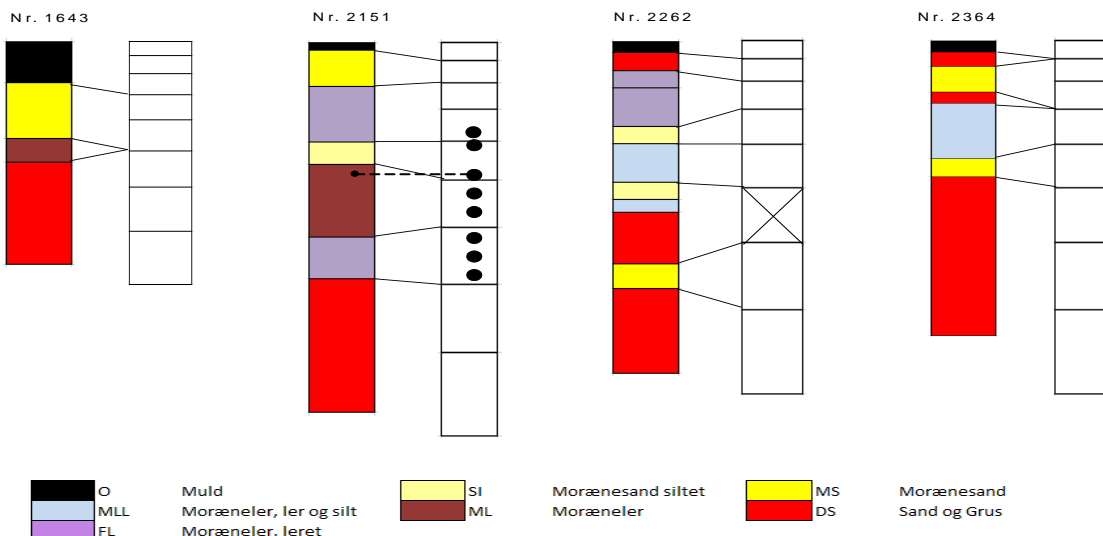


Figur 38, Profil 1, 120-380m 2D DC/IP total data misfit 2,4 %. Den komplette signaturforklaring på boreprofilerne kan ses i figur 2.1.2.

12.3 DATAKORRELATION DATAFELTER OG BOREPROFILER

Ud for hvert boreprofil er der samlet data svarende til det data serie af inverteret DC/IP data. Der er fundet middelværdier for parametrene; resistivitet, chargeabilitet, τ og c , ud fra de tre nærmeste data kolonner ved hvert boreprofil. Kolonnerne ligger med en afstand fra 1-5 meter fra boreprofilet, der er ca. 100 m mellem hvert boreprofil, som derfor "dækker" en omkreds på 50 m til hver side. Afstandene mellem datakolonnerne og boreprofilets randområde er mindre end 10 %, datakolonnerne vægtes derfor lige i en beregning af middelværdien. Middelværdien for en datakolone og boreprofilet er lavet ud fra en visuel bedømmelse, en hensyntagen til CPT og vingestyrkeforsøg, og en grovsortering af mindre aflejringer i boreprofilet. Lerede aflejringer påvirker i højere grad sandaflejringer med en reducereing af resistiviteten end sandaflejringer påvirker ler. Derfor vurderes der på sandaflejringer som ligger i forbindelse med ler, sådan at en given resistivitet ikke korreleres med en sand aflejring hvis den overlapper delvist med en moræneaflejring.

Eksempelvis er moræneleren MLL i boring nr. 1643 slettet i korrelationen med datakolonnerne, da overlappet til to datafelter er for stort (figur 39). Boring nr. 2151 er et eksempel på at en vingestyrke prøve (figur 39 sort cirkel) ligger i en moræneleraflejring MLL og samtidig i datafeltet for Morænesand siltet SI. Her tæller de oprindelige boreddybder, hvor prøven er taget i moræneler ML. Hvis overlappet mellem datafelter og jordaflejringer bliver for stort slettes både datafelt og aflejringer. Det er gjort i boring nr. 2262, se krydset samt tilhørende aflejringer. Boring nr. 2364 er et eksempel på små aflejringer som bliver sorteret fra da ingen datafelter er upåvirket af omkringliggende leraflejringer.



Figur 39, Korrelering af boreprofiler og DC/IP data. Boreprofilerne er kolonnen med farve til venstre, til højre er en tom kolonne som repræsenterer det interval en given DC/IP parameter er, gælder indenfor. De sorte ringe viser udtag til prøver i boringen.

