

3. Geologisk variabilitet bestemt ved cone penetration testing (CPT)

Bertel Nilsson (GEUS) og Ditte Lykkesborg Petersen (Geologisk Institut, Københavns Universitet)

3.1 Indledning

Den geologiske variabilitet på markskala er undersøgt detaljeret på et 0.5 ha stort areal ved Højstrup på Stevns. Dette blev gjort ved et sammenlignende studium af forskellige overfladegeofysiske metoders egnethed til kortlægning af de indesluttede sandliners forekomst på 0.5 ha skala og en CPT sondeundersøgelse (CPT = Cone Penetration Testing) med sonderinger til 8-10 meters dybde på et 100 m x 50 m stort areal. Den eller de bedst egnede og mest cost-effektiv geofysiske målemetoder blev anvendt ved et mindre detaljeret måleprogram på et 50 ha stort areal (landskabelementskala) omkring den detailundersøgte mark ved Højstrup. Resultatet af de geofysiske undersøgelser på mark- og landskabelementskala er nærmere beskrevet i bilag 4. Skaleringsrutiner vedrørende geologisk variation fra 0.5 ha til 50 ha store arealer er testet ved brug af glacialdynamiske tolkningsanalyser og faciesbaserede geostatistiske værktøjer (overgangssandsynligheder).

3.1.1 Fordeling af sand og ler

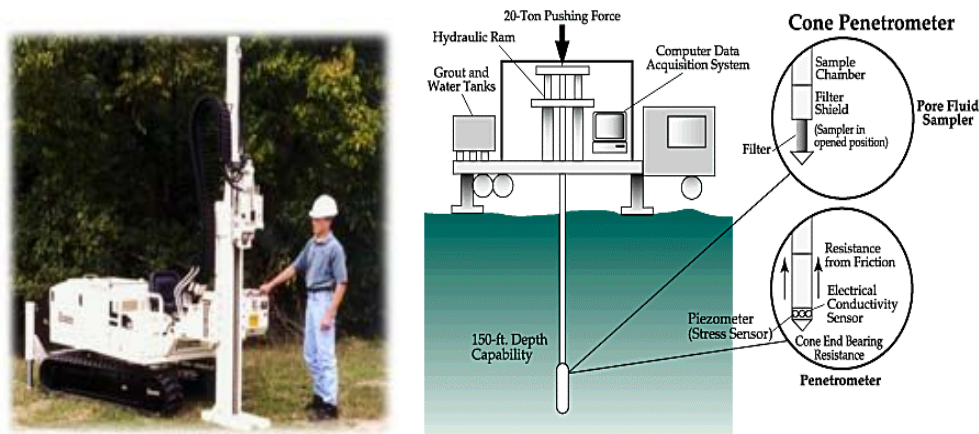
Indesluttede sandlinser forekommer i den umættede og mættede zone af morænelersaflejringerne, men udstrækning, orientering og hyppighed (korrelationslængder) er ikke veldokumenteret (Dreimanis et al., 1986; Fredericia, 1990; Haldorsen og Krüger, 1990). Glacialdynamiske tolkninger er i videst mulig omfang blevet inddraget til karakterisering af de glacialdynamiske morænelersaflejringsfordeling i indtil 8-10 meters dybde, inklusiv den 3-dimensionelle fordeling af sandlinser/lag (Smichak et al., 1996). Det er en almindelig opfattelse, at de indesluttede sandaflejringer er hydraulisk forbundet med komplicerede sprækkesystemer og bioporer over store afstande såvel vertikalt som horisontalt (Jørgensen og Fredericia, 1992; McKay og Fredericia, 1995; Sidle et al., 1998). For at forstå stoffers spredning i sådanne aflejringer er det således påkrævet at forstå den rumlige fordeling af sandindeslutninger, sprækker og bioporer til at forbedre vurderingen af stoftransporten i heterogene morænelersaflejringer (Nilsson et al., 2001). Nærværende undersøgelse fokuserer på 3D udbredelsen af sandindeslutninger i moræneler ved Højstrup på Stevns.

3.2 Cone Penetration Testing – metode og anbrebsvinkel

CPT er en form for geoteknisk boring, hvor en sonde nedpresses vertikalt gennem jorden, mens den måler en række specifikke egenskaber ved jorden med specielle sonder. Typisk udføres CPT for at bestemme stratigrafien og geotekniske egenskaber af jordlagene i et større område. Til kalibreringsformål placeres én eller flere af CPT borerne nær lagføl-

geboringer, så CPT boringens karakteristiske logmønster for ler subsidiært sand kan sammenholdes med lagfølgeboringernes kendte lagsekvens.

Sonden er forbundet til en borestang, der successivt forlænges som boringen nedpresses til større dybde. Da mange af parametrene kun kan måles i den uforstyrrede formation er det ikke muligt at gentage målingerne, som det er tilfældet for logning i åbne borehuller. Hvis sonden støder på en større sten, kan det blive nødvendigt at afbryde målingen. Figur 3.1 viser en typisk CPT sonde.



Figur 3.1. Til venstre, foto af Cone Penetrometer monteret på en mini-rig. Til højre, principskitse af Cone Penetrometer.

CPT sondeundersøgelsen udført ved Højstrup på Stevns var oprindeligt tiltænkt at skulle kunne belyse følgende tre problemstillinger på markskala:

- (1) Sandlinsers rumlige udbredelse i et morænelersdække;
- (2) Variationen af dybden til kalkudvaskningsgrænsen ("kalkgrænsen");
- (3) Variationen af dybden til redoxgrænsen.

Problemstilling (1): Bestemmelsen af den rumlige fordeling af sandlinsers forekomst i morænelers sekvensen er nærmere beskrevet i afsnit 3.3.

Problemstilling (2): GEUS har ved tidligere markundersøgelser vist en mulig sammenhæng mellem ændringer i målt vingestyrke (udrænet forskydningspænding, c_v) og dybden til "kalkgrænsen" i moræneler, idet vingestyrken målt med håndvingebor har vist en generel stigning på 3-4 gange hen over denne kemiske grænse i typisk 1-3 meters dybde hvor ler-matrix skifter fra at være blød kalkfri til fast kalkholdig. I Højstrup udgravningen har tilsvarende målinger vist samme stigningstendens i vingestyrken. Dybden til "kalkgrænsen" er meget tænkeligt bestemt i talrige tilfælde med CPT udstyr, hvor geotekniske vingestyrkeforsøg er udført med et helt andet formål, nemlig til vurdering af jordens styrkeparametre typisk i forbindelse med diverse byggeprojekter. Derfor er måling af vingestyrken med CPT blevet foreslået som mulig markør for "kalkgrænsen". Det må imidlertid konkluderes at

dybden til "kalkgrænsen" ikke har kunne fastlægges med det anvendte CPT udstyr i nærværende undersøgelse.

Problemstilling (3): Redoxgrænsen er normalt let at erkende på lermatrixens farveskift i jordprøver fra lagfølgeboringer eller udgravninger. En speciel CPT sonde til måling af redox potentialet ville muligvis kunne benyttes som indirekte bestemmelse af redoxgrænsens placering. Dette er imidlertid ikke forsøgt efterprøvet i indeværende projekt, så det må konkluderes at dybden til redoxgrænsen ikke kunne bestemmes med det anvendte CPT udstyr.

CPT sonder til belysning af problemstilling (1) er standard CPT måling i Danmark mens sonder til belysning af problemstilling (2) og (3) kræver specialsonder. Der findes imidlertid ikke et kommercielt tilgængelig CPT udstyr i Danmark (eller Sydsverige), hvor en kombinationssonde samtidig kunne dække alle tre skitserede problemstillinger. Inden for den økonomiske rammer for CPT sondeundersøgelsen har det derfor været nødvendigt at prioritere og det er valgt i nærværende undersøgelse at følge op på problemstilling (1).

På Højstrup marken blev der udført en detaljeret CPT sondeundersøgelse af det svenske firma Scc Scandiaconsult (nu Rambøll) i Malmø, der ligeledes bearbejdede de rå data til anvendelige logs. Til feltarbejdet blev der benyttet en borerig af typen Geotech 604D, hvor der blev målt de såkaldte CPT-R, hvor R henviser til elektrisk modstand (resistivity). Sonden blev presset ned med en hastighed på 20 mm/sekund, og der blev målt en række parametre for hver 2,5 cm nedpresning af sonden. De målte parametre er: porevandstryk, spidstryk, friktionsmodstand, resistivitet/konduktivitet, borehastighed, samt borestrengens hældning. Der blev i alt udført 29 borerig fra 3 – 9 meters dybde placeret efter statistiske overvejelser indenfor en mark på 50 x 100 m (for placering, se bilag 4).

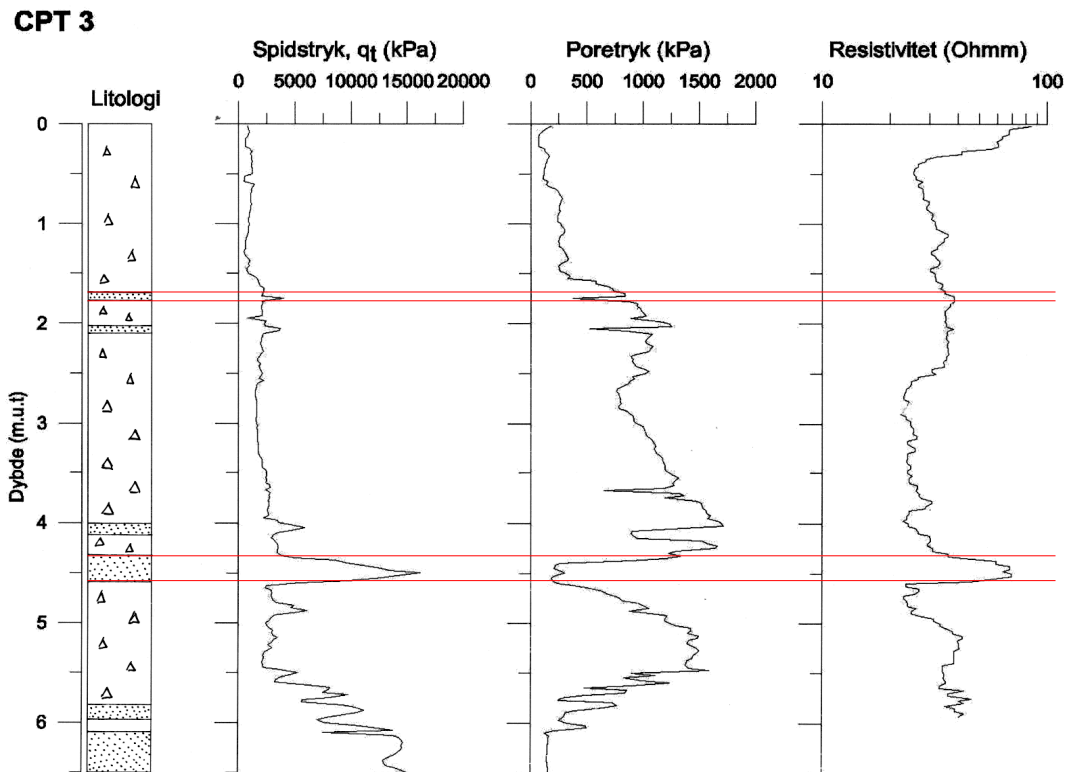
3.3 Resultater

3.3.1 Feltobservationer

Til tolkning af sandlinsernes rumlige udbredelse i morænelersdækket ved Højstrup er følgende parametre benyttet: Det korrigerede spidstryk (q_T), porevandstrykket (u) samt resistiviteten (Wenneropstilling). Et karakteristisk logmønster for de tre nævnte parametre benyttes til at udskille sandindslagene fra ler i CPT borerigene. Når poretrykket stiger samtidig med at spidstrykket og resistiviteten falder (relative værdier) tolkes dette som tilstedeværelsen af sand i CPT profilet (se fig. 8.4). Omvendt når poretrykket er højt samtidig med at spidstrykket og resistiviteten er lav optræder ler i det tolkede CPT profil. Undtagelsen for denne regel er i dybder, hvor spidstrykket i enkelte tilfælde overstiger 20 MPa. I disse tilfælde formodes sondespidsen at have antruffet sten - sandsynligvis kalkbrokker, da det er primært disse der forekommer i udgravningen.

Til understøttelse af tolkningen af CPT-borerigene, er de tolkede lagfølger i CPT borerigene sammenlignet med tre lagfølgeboringer, der er placeret i 1-1,5 meters afstand fra tre CPT borerig. I en kerneboring og den tilhørende CPT-boring, kunne nogle af sandlagene

korreleres tilfredsstillende mellem de to boringstyper, mens andre sandlag ikke kunne findes i enten CPT- eller kerneboringen. Kerneboringen var ikke komplet, da mange brudstykker manglede. Det er derfor svært at afgøre, om tolkningen af CPT-parametrene er forkert, sammensætningen af kernens brudstykker er forkert, eller om geologien er så kompleks, at den skifter inden for kort afstand (1,4 m). Snegleboringerne, med jordprøver for hver 0,5 meter, kunne for en stor del ikke benyttes til korrelation med tilhørende CPT boringer da sandlagenes tykkelse sjældent overstiger 20 cm.



Figur 3.2. Eksempel på logmønstre for de tre CPT parametre (spidstryk, poretryk og resistivitet), hvor sandlag er tolket som indslag i en overvejende lerpræget litologisk profil.

3.3.2 Parametrisering ved brug af T-PROGS

Et sekundært formål med undersøgelsen var at skaffe en forbedret parametrisering af de hydrauliske parametre (rumlig fordeling af hydraulisk ledningsevne) til de numeriske modeller på markskala og oplandsskala.

I morænedæklagene ved Højstrup er en del indesluttede sandlag påvist i lagfølgeboringer og i en større udgravning etableret indenfor undersøgelsesmarken (se bilag 2). Sandlagene er desuden tolket indirekte fra CPT-boringerne. Ud fra tolkningen af den vertikale sand og lervedelingen i CPT-boringerne (terræn til 8-9 meters dybde) og den visuelt påviste ho-

risontale udstrækning af sandlinser i udgravningen (indtil ca. 4 meters dybde) er der ved hjælp af det geostatistiske software T-PROGS opstillet en geologisk model med fordeling af sand og ler i tre dimensioner. T-PROGS, som står for Transition PRObability Geostatistical Software (Carle et al., 1998; Carle, 1999), bygger på en geostatistisk metode (overgangssandsynligheder) velkendt blandt oliesedimentologer. Forenklet angiver overgangssandsynligheden i nærværende eksempel sandsynligheden for at sand optræder over/under ler i forskellige afstande i såvel den vertikale som horisontale litologiske sekvens. Ved hjælp af geostatistikken bag T-PROGS er det i modsætning til traditionel variogramanalyse, muligt at inddrage geologens viden og iagttagelser direkte i den geostatistiske beskrivelse.

Dataene til T-PROGS modellen stammer overvejende fra CPT-boringer samt geologiske beskrivelser og fortolkninger fra den 4-5 meter dybe udgravningen (se bilag 2). CPT dataene er korreleret til lagfølgen i hhv. to snegleboringer (prøver for hver ½ meter) og en i princippet fuldt kernet boring, der dog flere steder manglede dybdeintervaller hvor jordmaterialet var løst (typisk sandet). Der har desuden været udført overfladegeofysisk opmåling med den geoelektriske MEP metode med det formål at inddrage resultaterne fra denne metode til at forbedre korrelationen af sandindslagene mellem de enkelte CPT boringer. MEP dataene var imidlertid præget af en for dårlig dybdeopløsning af sandindslagene, så disse ikke kunne inddrages i en forudsigelse af sandlags korrelation mellem CPT boringer.

De i alt 29 CPT-boringer er placeret indenfor et areal på 100 x 50 meter af en større mark. På baggrund af lokal geologisk viden og iagttagelser er der gættet på at sandlinserne under CPT marken har form som pandekager med en diameter på ca. 3 - 10 meter og en tykkelse på 0.2 - 1.5 meter samt optræder med en indbyrdes afstand 20 - 50 meter. Disse antagelser viste sig senere at være sandsynlige, da der i profilerne fra udgravningen er observeret en sandlinse på en meters længde, og i tværsnit fra CPT-boringerne kan der observeres sandlinser fra under en meter op til 10 m (en enkelt muligvis op til 20 m). Med udgangspunkt i denne geologiske fortolkningsmodel af sandlinsers forekomst i moræneler ved Højstrup er 15 af boringerne fordelt regelmæssigt med en indbyrdes afstand på 25 meter, og de resterende 14 er placeret i midten af området i et dobbelt kryds (se bilag 4). CPT boringerne kan således sammenlignes i indbyrdes afstande på 1, 6.25, 12.5, 25, 50 og 100 meter. Derudover er de tre ovenfor nævnte lagfølgeboringer sat med en afstand på ca. en meter fra tre af CPT boringerne til korrelationsformål. I tabel 3.1 er vist antallet af CPT boringer samt øvrige 3 korrelationsboringer relateret til slutdybder fra ca. 3 til 10 meters dybde. Udfra datasættet beregnes overgangssandsynligheden i de tre retninger, x, y, z, hvor x, y akserne er laterale og z akser orienteret vertikalt. For at få størst udnyttelse af data, er x og y retningen drejet minus 8° i forhold til nord, så det ligger parallelt med boringsnettets akser. Området er længest i x aksens retning. Den største datatæthed optræder i z-aksens retning (hver 2.5 cm) og den mindste i x-aksens retning.

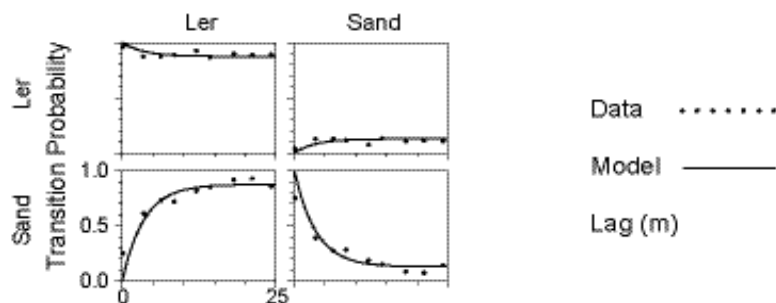
De litologiske tolkninger omsættes i en database med x, y, z koordinater. Der blev oprindeligt valgt 4 litologiske kategorier: moræneler, sand, kalk, og "kalkfri moræneler". I den initiale opsætning af T-PROGS modellen er imidlertid valgt en forsimplet model, hvor der kun indgår to litologiske kategorier (moræneler og sand) i denne, da kalk (bjergarten) og kalkfri moræneler senere kan lægges ind som flader i hhv. ca. 9 meters og 2 meters dybde.

Tabel 3.1. Statistik for boringsdybden af 29 CPT boringer og 3 kalibreringsboringer.

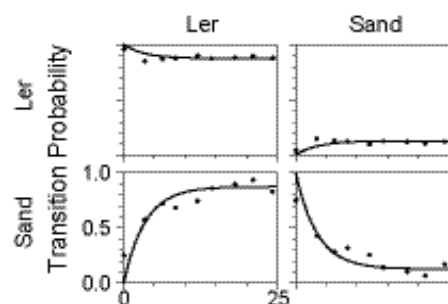
Boringsdybde (m)	Boringer (antal)
2,5-3,0	1
5,0-5,5	2
6,0-6,5	5
6,5-7,0	1
7,5-8,0	1
8,0-8,5	9
8,5-9,0	7
9,0-9,5	2
9,5-10,0	4

Figur 3.3 viser de målte og modellerede overgangssandsynligheder mellem sandlag (prikker) og den tilhørende geostatistiske model (linie) i henholdsvis vertikal retning (z-aksen) og lateral retning (x og y retningen). Modellen for den vertikale retning er beregnet ud fra de målte værdier. Modellen for den laterale retning er baseret på antagelser om en gennemsnitslængde på 4 meter for sandlinserne og korrelationsmæssige afstande forholder sig som anført ovenfor. Modellen har for hele jordvolumenet under CPT marken på 100 x 50 x 10 meter beregnet en procentvise fordeling af sand og ler på 13 % sand og 87 % ler.

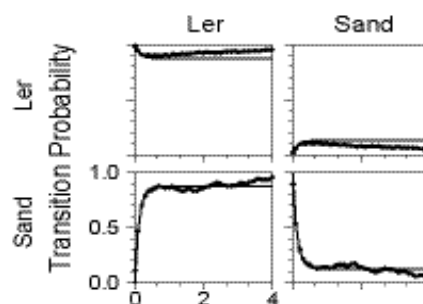
Lateral X TP



Lateral Y TP



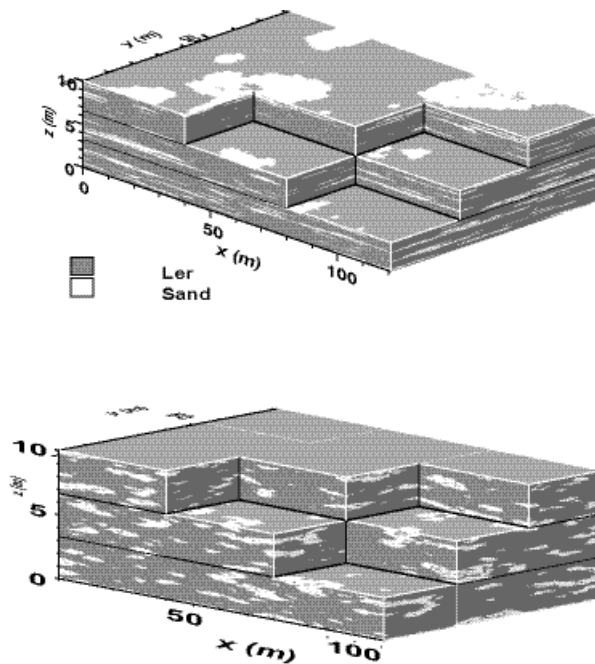
Vertikal TP



Figur 3.3. Målt og modelleret overgangssandsynlighed (transitional probability) i både lateral (x,y akserne) og vertikal retning (z aksen) (Petersen, 2004).

En eventuel asymmetri af sandlinserne er forsøgt undersøgt med den geostatistiske model, da det er kendt fra litteraturen at i subglaciale/basale till aflejringer kan indesluttede sandlinser have en tendens til at være langstrakt i isens bevægelsesretning (Brodzikowski and van Loon, 1987). På baggrund af den opstillede geostatistiske model har asymmetri-forhold imidlertid ikke kunne understøttes af datasættet vist i figur 3.3. Dette antages dog primært at kunne skyldes at hverken x eller y akserne er orienteret parallelt med den - eller rettere de retninger, som isen har overskredet området med ved Højstrup (se bilag 2). Der er i modelopsætningen valgt samme gennemsnitslængde for x og y akserne for sandlinserne. De i T-PROGS beregnede laterale dimensioner af sandlinserne er i gennemsnit 4 meter med en gennemsnitlig tykkelse i den vertikale retning på 0.14 meter. I begge retninger synes modellen således at give resultater som stemmer rimelig overens med "hårde data" fra CPT og med udgravningsdata fra lokaliteten på Stevns, samt med den generelle geologiske opfattelse af området.

Brugen af geostatistiske metoder til beskrivelse af heterogeniteter i moræneler åbner op for stokastiske simuleringer. Stokastiske simuleringer kan bruges til at belyse noget af den usikkerhed, som den geologiske beskrivelse er behæftet med. Oftest anvendes multiple stokastisk simulerede geologiske modeller som grundlag for den numeriske beskrivelse af strømningssystemet. Herved kan den geologiske heterogenitet bidrage til information om hvorvidt et givet stof kan forventes at finde vej igennem et tilsyneladende tæt morænelersdække. Et eksempel på en stokastisk realisation af den behandlede morænelerspakke er vist i figur 3.4. Det skal bemærkes at de eksisterende geologiske former kan genfindes i figuren og at sandlinserne til trods for den lille volumen procent kan danne sammenhængende transportveje gennem systemet.



Figur 3.4. Konditioneret simulering af sandlinser i morænelersdækket ved Højstrup på Stevns. Der er vist to forskellige realisationer som opfylder samme overgangssandsynligheder i x, y og z retningen. I den øverste figur er topjorden fjernet. Bemærk at dybdeskalaen (y akse) er inverteret, dvs. "10 meter mærket" svarer til terrænoverfladen og "0 meter mærket" svarer til underkanten af morænelersdækket (fra Petersen, 2004).

3.4 Diskussion og konklusion

Hvorledes kan resultatet af CPT undersøgelsen bidrage til at skaffe data som er nødvendige for at udpege og afgrænse særlige pesticidfølsomme lerområder i forhold til de fire afgørende kategorier:

- Nedbrydning

CPT er ikke velegnet til at skaffe mere viden om direkte målte nedbrydningsparametre (fx DT50).

- Sorption/binding

CPT er ikke velegnet til at skaffe direkte målte sorptionsparametre (fx Kf eller Kd). Dog er CPT sandsynligvis velegnet til indirekte at kunne kvantificere lerholdige og/eller organisk rige sedimentenheder volumenmæssige andel af et jordprofil på markskala hvortil sorptionen af sorberende pesticider kunne tænkes at ske. CPT kunne altså skaffe viden om/kvantificere simple jordparametre som ved andre forsøg har vist korrelation til relevante beskrivende sorptionsparametre.

- Strømning og transport

CPT vil være meget velegnet til at identificere mulige sammenhængende strømningsveje gennem morænelersdækkerne. CPT vurderes således at være et velegnet værktøj/metode til fremskaffelse af strømnings og transport data. CPT data står dog ikke alene men skal bearbejdes med geostatistiske metoder (f.eks. T-PROGS).

- Repræsentativitet

CPT er meget velegnet beskrivelse af fysiske heterogeniteter/geologisk variabilitet i moræneler. Specielt sandindeslutninger der typisk vil udgøre en lille del af det samlede jordvolumen kan udskilles med tydelighed med denne metode og på sigt forventes konnektiviteten mellem disse indeslutninger at kunne kvantificeres.

3.5 Litteratur

Carle, S.F., Labolle, E.M., Weismann, G.S., Van Brocklin, D. og Fogg, G.E. 1998. Conditional simulation of hydrofacies architecture: a transition probability/Markov approach, In Fraser, GS, and Davis, JM; Concepts in Hydrogeology and Environmental Geology No 1, SEPM (Society for Sedimentary Geology) Special Publication, p. 147-170.

Carle,SF (1999). T-PROGS: ransition Probability Geostatistical Software. Version 2.1 Hydrologic Science Graduate Group. University of California, Davis.

Brodzikowski, K. óg A.J. van Loon. 1987. A systematic classification of glacial and periglacial environments, facies and deposits. Earth-Sciences Reviews, 24:297-381.

Dreimanis, A., Hamilton, J.P. og Kelly, P.E. 1986. Complex subglacial sedimentation of Catfish Creek till at Bradtville, Ontario, Canada. In: J.J. M. Van Der Meer (Editor), Tills and Glaciotectonics. A. A. Balkema, Rotterdam , 73-87.

Fredericia, J. 1990. Saturated Hydraulic Conductivity of Clayey Tills and the Role of Fractures. Nordic Hydrology, 21:119-132.

Haldorsen, S. og Krüger, J. 1990. Till genesis and hydrogeological properties. Nordic Hydrology, 21:81-94.

Jørgensen P.R. og Fredericia, J. 1992. Migration of nutrients, pesticides and heavy metals in clayey till. Géotechnique, 42:67-77.

McKay, L. og Fredericia, J. 1995. Origin, distribution and hydraulic influence of fractures in clay-rich tills glacial tills. Canadian Geotechnical Journal, 32:957-975.

Nilsson, B., Sidle, R.C., Klint, K.E.S., Bøggild, C.E. og Broholm, K. 2001 Mass transport and scale-dependent hydraulic tests in a heterogeneous glacial till - sandy aquifer system. Journal of Hydrology, 243:162-179.

Petersen, D.L. (2004). En geologisk og hydrogeologisk undersøgelse af inhomogeniteter i moræneler. Kandidatafhandling udarbejdet ved Geologisk Universitet, Københavns Universitet.

Sidele, R.C., Nilsson, B., Hansen, M. og Fredericia, J. 1998. Spatially varying hydraulic and solute transport characteristics of a fractured till determined by field tracer tests, Funen, Denmark. *Water Resources Research*, 34:2515-2527.

Smichak, J.R., Domonic, D.F. og Ritzi, R.W. 1996. Indicator geostatistical analysis of sand interconnections within a till. *Groundwater*, 34:1125-1131.