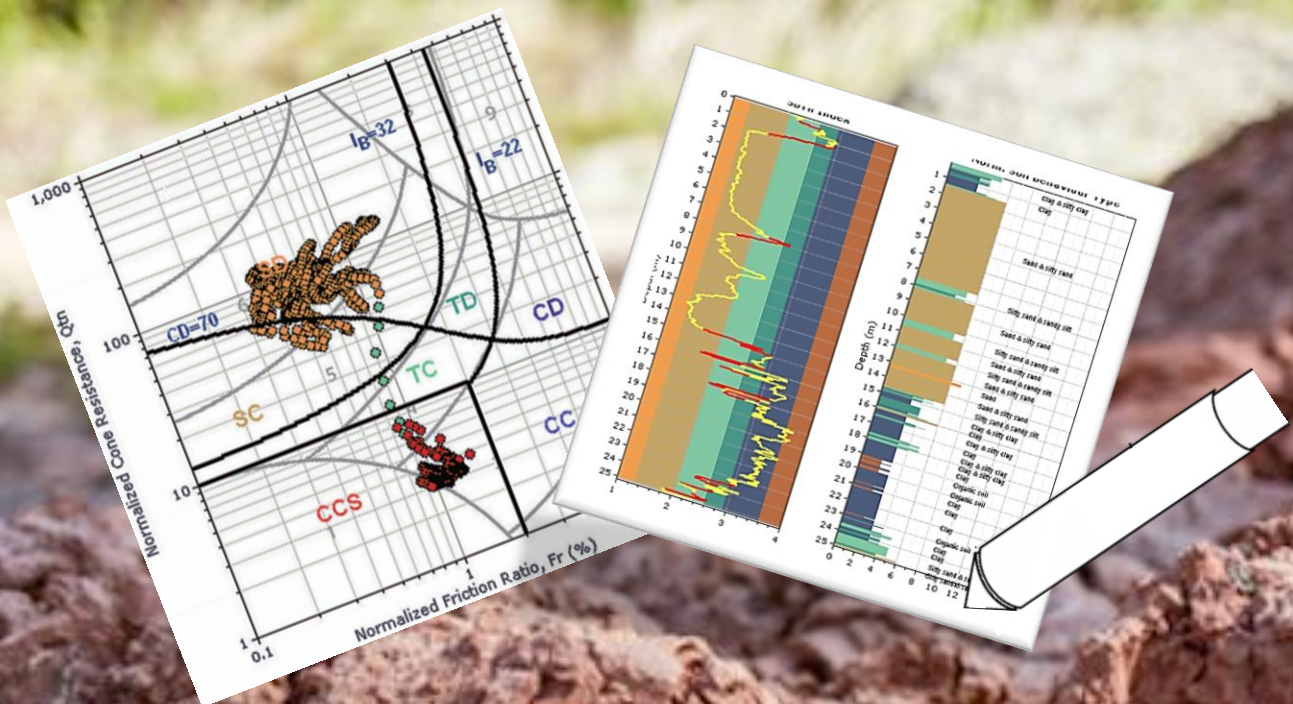


CPT

TOLKNING AF AARHUSIANSKE PALÆOGENE LERARTER VED BRUG AF CPT



**FORFATTERE:
JULIANA MAI & RASMUS BIRCH**

**VEJLEDER:
BENT GRØNSKOV JENSEN**

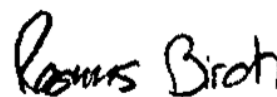
Titelblad

Projekttitle	Tolkning af aarhusianske palæogene lerarter ved brug af CPT
Rapporttype	Bachelorprojekt
Studieretning	Bygningsteknik, 7. semester
Specialeretning	Geostatik
Kursus	BT7BAM-01 og BT7BAC-01
Institut	Ingeniørhøjskolen, Aarhus Inge Lehmanns Gade 10 8000 Aarhus C
Omfang	95 sider (inkl. forside, indholdsfortegnelse og titelblad) 58 normalsider
Afleveringsdato	25/5-2020



Juliana Mai

201610447



Rasmus Birch

201501945

Abstract

Project title:	CPT as a tool for interpretation of Paleogene clays in Aarhus
Student(s):	Juliana Mai & Rasmus Birch
Supervisor:	Bent Grønskov Jensen
Consultant(s):	Christian Andersen Nygaard, GEO

The following bachelor thesis is inspired by the potential of using Cone Penetration Testing (CPT) as a useful tool for classifying Tertiary clays located just below the subsoil in Aarhus, Denmark. Based on a comprehensive data research, the purpose of this thesis is to explore the possibility of classifying Tertiary clays by using the software-programme 'CPeT-IT' combined with a fundamental background knowledge of local geology.

During the Quaternary period the overlying Oligocene and Miocene deposits in Aarhus eroded. Simultaneously several glaciers disturbed and covered the area. The fluctuating loading and unloading of the underlying deposits, namely the Viborg- and Søvind Marl Formations, resulted in a significant tearing of the clay leading to a large presence of fissures and a unique behavior.

Most CPT-based classification systems (SBT) are based on experiments in young, uncemented soils. These may not always correspond well when applied in older, cemented soils such as the Tertiary clays. Based on these differences Professor Peter K. Robertson updated the classification system, allowing the system to capture several aspects of soils in-situ behavior. This was done with the purpose of identifying the existence of microstructure in soils.

During the research phase, several tendencies and correlations between interpretation in CPeT-IT and local geology were found. The applicability of the presented classification method should be accompanied and verified by substantial research in the area in order to obtain an optimal classification for future projects in these particular soils.

Forord

Nærværende rapport er skrevet i forbindelse med bachelorprojektet på 7. semester af diplomingeniøruddannelsen på Ingeniørhøjskolen, Aarhus Universitet. Rapporten er udarbejdet af to studerende på bygningsteknik med specialisering i geostatik og udfærdiget i perioden fra d. 23. marts til d. 25. maj 2020.

Projektet har til formål at optimere tolkningsarbejdet af de aarhusianske palæogene lerarter ved CPT-forsøg ud fra en omfattende dataundersøgelse i software-programmet CPeT-IT, hvortil en redegørelse for SBT-klassifikationsdiagrammer samt ingeniørgeologi tilknyttes.

Rapporten er for alle interesserede, men henvender sig hovedsageligt til læsere med en vis grundforståelse og interesse inden for geoteknik, herunder en særlig interesse for geotekniske forundersøgelser udført med CPT-forsøg.

Projektet er udarbejdet med afsæt i den gennem studiet erhvervede viden fra geoteknik-kurserne på 2. – 7. semester, herunder ingeniørpraktikken på 5. semester. Hertil suppleres projektet med ny, tilegnet viden gennem en omfattende litteratursøgning inden for faglige områder af relevant betydning for dets udformning. Dette omfatter bl.a. en grundforståelse for ingeniørgeologi samt CPT-forsøg, hvoraf kendskab til den sidstnævnte blev stiftet i forprojektet på 6. semester (bilag 1).

Rapporten er udfærdiget af studerende, Rasmus Birch og Juliana Mai. Fordelingsnøglen er 20 ECTS for Rasmus Birch (BT7BAC-01) og 15 ECTS for Juliana Mai (BT7BAM-01) som følge af valgfag.

Under udarbejdelsen af rapporten har vejleder, Bent Grønskov Jensen, været inddraget til at vurdere projektets indhold, progression, faglige problemstillinger samt afgrænsning heraf.

Grundlaget for projektet er leveret af den rådgivende ingeniørvirksomhed GEO, og vi siger tak for muligheden for at arbejde med et spændende og udfordrende projekt.

Læsevejledning

Rapporten kan opdeles i følgende overordnede opbygning:

- Afsnit 1: Introduktion til problemstilling
- Afsnit 2: Danmarks ingeniørgeologi
- Afsnit 3: Lokalgeologi, Aarhus by- og havneområde
- Afsnit 4: Soil Behaviour Type (SBT) klassifikationssystem
- Afsnit 5: Forventede korrelationer mellem geologi og SBT
- Afsnit 6: Manual til klassificering af palæogene lerarter i CPeT-IT
- Afsnit 7: Tolkning af palæogene lerarter i CPeT-IT
- Afsnit 8: Sammenfatning
- Afsnit 9: Refleksionsnotat

Rapporten er inddelt i nummererede afsnit med dertilhørende del- og underafsnit.

I rapporten henvises til samtlige figurer og tabeller, som angives på formen ”Figur/Tabel X.Y”, hvor X angiver hvilket afsnit figuren/tabellen hører under, og Y angiver, hvilken rækkefølge for præsentation, startende fra ’1’ i hvert afsnit. Ligninger nummereres på samme form ved ”(X-Y)”.

Referencekilderne er angivet efter MHRA-standard (forfatter, udgivelsesår) og er opstillet i litteraturlisten i afsnit 10. Oversigt over rapportens bilag fremgår af afsnit 11.

For definition af værdiers betegnelse og størrelse henvises til symboloversigten på side 6.

Projektet udarbejdes i forlængelse af forprojektet ’*CPT – Én alternativ analysemetode*’, der blev færdiggjort på 6. semester. Det anbefales, at læseren forud for projektet har læst forprojektet, under forudsætning af begrænset kendskab til analysemetoden. Forprojektet fremgår af bilag 1.

I afsnit 9 evalueres projektperioden og samarbejdet.

Symboloversigt

B_q	Normaliseret poretryk [\div]	q_c	Keglens målte spidsmodstand [MPa]
CD	Kontraktiv-dilatativ grænse [\div]	q_n	Netto spidsmodstand ($q_t - \sigma_{v0}$) [MPa]
c_{fv}	Intakt vingestyrke [kPa]	q_t	Korrigeret spidsmodstand for poretryk [MPa]
c_u	Udrænet forskydningsstyrke [kPa]	Q_t	Normaliseret spidsmodstand $\left(\frac{q_n}{\sigma'_{v0}}\right)$ [\div]
c_v	Konsolideringskoefficient (vertikal) [m ² /s]	Q_{tn}	Normaliseret spidsmodstand, variabel med n [\div]
D_r	Relativ lejringstæthed [\div]	R_f	Friktionsforhold [%]
e	Naturlig poretal [\div]	s_u	Udrænet peak forskydningsstyrke [kPa]
E_0	Youngs modul [MPa]	S_t	Sensitivitet [\div]
f_s	Kappe-/friktionsmodstand [MPa]	t_{50}	Tidsfaktor for $U = 50\%$ [s]
f_t	Korrigeret kappemodstand [MPa]	u_0	In-situ poretryk [MPa]
F_r	Normaliseret friktionsforhold [%]	u_2	Poretryk målt bagved sondekegle [MPa]
G_0	Forskydningsmodul [MPa]	U_2	Normaliseret poretryk [\div]
i	Inklinometer [%]	V_s	Forskydningshastighed [m/s]
I_B	Modifieret jordtypeindeks [\div]	ε_v	Volumentøjning [%]
I_c	Jordtypeindeks [\div]	ε_1	Aksialtøjning [%]
I_G	Stivhedsindeks [\div]	μ	Faktor (udrænet forskydningsstyrke) [kPa]
k	Permeabilitetskoefficient [m/s]	γ	Rumvægt [kN/m ³]
k_{OCR}	Korrelationsfaktor [\div]	γ	Forskydningstøjning [%]
ka	Kalkindhold [%]	γ_w	Vands rumvægt [kN/m ³]
K_G^*	Stivhedsindeks [\div]	ρ	Densitet, $\rho = \frac{\gamma}{g}$ [kg/m ³]
n	SpændingsekspONENT [\div]	σ'_{pc}	Forbelastningsspænding [MPa]
N_{kt}	Cone factor [\div]	σ_{v0}	Lodret overlejringstryk [MPa]
OCR	Konsolideringsgrad [\div]	σ'_{v0}	Effektivt, lodret overlejringstryk [MPa]
p_a	Atmosfærisk referencetryk [100 kPa]	τ	Forskydningsspænding [MPa]
PI	Plasticitetsindeks [%]	φ'	Effektiv/peak friktionsvinkel [°]
p'	Effektiv middelspænding [MPa]	Δu	Differensporetryk ($u_2 - u_0$) [MPa]
q	Deviatorspænding ($\sigma'_1 - \sigma'_3$) [kPa]		

Indholdsfortegnelse

1. Introduktion	8
1.1 Problemstilling	8
1.2 Undersøgelsesområde.....	9
2. Danmarks ingeniørgeologi	10
2.1 Dannelsesproces	11
2.2 Mineralogi	13
2.3 Tidsperioder.....	15
3. Lokalgeologi, Aarhus by- og havneområde.....	20
3.1 De overordnede geologiske forhold	20
4. Soil Behaviour Type (SBT) klassifikationssystem.....	27
4.1 Generelt	27
4.2 Teoretisk grundlag.....	27
4.3 Metodeudvikling.....	30
5. Forventede korrelationer mellem geologi og SBT	38
5.1 Generelt	38
5.2 Case-studier	38
5.3 Lokale undersøgelser	39
5.4 Hypoteser.....	40
5.5 Forventet fordeling	41
6. Manual til klassificering af palæogene lerarter i CPeT-IT	44
6.1 Databehandling i CPeT-IT.....	45
6.2 Beregningsforudsætninger.....	50
7. Tolkning af palæogene lerarter i CPeT-IT.....	55
7.1 Lokation 1.....	56
7.2 Lokation 2.....	66
7.3 Lokation 3.....	74
8. Sammenfatning.....	82
8.1 Palæogene leraflejringer i CPeT-IT.....	83
8.2 Begrænsninger og fejlkilder	87
8.3 Bæredygtighed.....	90
8.4 Konklusion på problemformulering	91
8.5 Områder til videreundersøgelse.....	92
9. Refleksionsnotat	93
10. Litteraturliste	94
11. Bilagsoversigt.....	95

1. Introduktion

Cone Penetration Testing (CPT) har undergået en rivende udvikling de seneste 40 år og benyttes i større grad som en del af den geotekniske forundersøgelse. Udviklingen har effektiviseret analysemetoden, og nye udgivelser af *Soil Behaviour Type (SBT)*-diagrammerne samt adskillige empiriske korrelationer til estimering af geotekniske parametre, vidner om en fortsat optimering og finjustering af metoden.

På trods af de åbenlyse fordele ved at anvende CPT i geoteknisk sammenhæng, har metodeudviklingen ikke komplet udfaset brugen af konventionelle analysemetoder. Det er stadig nødvendigt at korrelere CPT-forsøg med lagfølgeboringer for at verificere stratigrafien og de afledte parametre. De CPT-baserede klassifikationsmetoder og korrelationer bygger på forsøg i unge, ucementerede jorde, hvorfor korrelationen mellem analysemetoden og ældre, cementerede jorde ofte vil resultere i fejltolkninger.

1.1 Problemstilling

Viborg- og Søvindmergel Formationerne træffes ved jordbundsundersøgelser i det aarhusianske by- og havneområde. Aflejringerne er stærkt forkonsoliderede, og som resultat af deres dannelsesproces har de en særlig unik opførsel, der adskiller sig fra det ideelle, som de CPT-baserede klassifikationsmetoder er udviklet på baggrund af. Formationerne udgør funderingsunderlaget for alt byggeri i Aarhus, hvorfor karakteriseringen af disse aflejringer er altafgørende for en optimal jordbundsundersøgelse ved brug af CPT.

Som et led i at optimere klassificeringen af de særligt karakteristiske plastiske leraflejringer opstillede Professor Peter K. Robertson i 2016 et klassifikationssystem baseret på opførselskarakteristika. Implementeringen af det nye system er et skridt væk fra det fysisk-betonede system, der klassificerer jorde som 'sand', 'silt' eller 'ler', og et skridt mod en mere omfavnende klassifikation, der er i stand til at fange flere aspekter af en in-situ jords opførsel, herunder graden af cementering.

Incitamentet for at stifte bekendtskab med det nye klassifikationssystem er at undersøge muligheden for at identificere de aarhusianske palæogene leraflejringer med henblik på at minimere brugen af konventionelle analysemetoder, hvorved tidsmæssige og økonomiske besparelser kan forventes ved fremtidige projekter i Aarhus by- og havneområde.

Projektet udformes på baggrund af et omfattende litteraturstudie af den danske ingeniørgeologi samt den aarhusianske lokalgeologi. Litteraturstudiet har til hensigt at udbygge den geologiske grundforståelse, hvilket tillader den geotekniske ingeniør at forholde sig kritisk til udfaldet af klassifikationen i softwareprogrammet CPeT-IT. Kendskab til det teoretiske grundlag for klassifikationssystemet og værktøjet CPeT-IT stiftes på baggrund af artiklen '*Cone Penetration Test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update (2016)*' samt manualen '*Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering (2015)*', der begge er publiceret af P. K. Robertson. Tilmed henvises jævnligt til 6. semesters forprojekt '*CPT – Én alternativ analysemetode*', hvori parameterudledningen og udfordringerne ved CPT blev belyst og diskuteret.

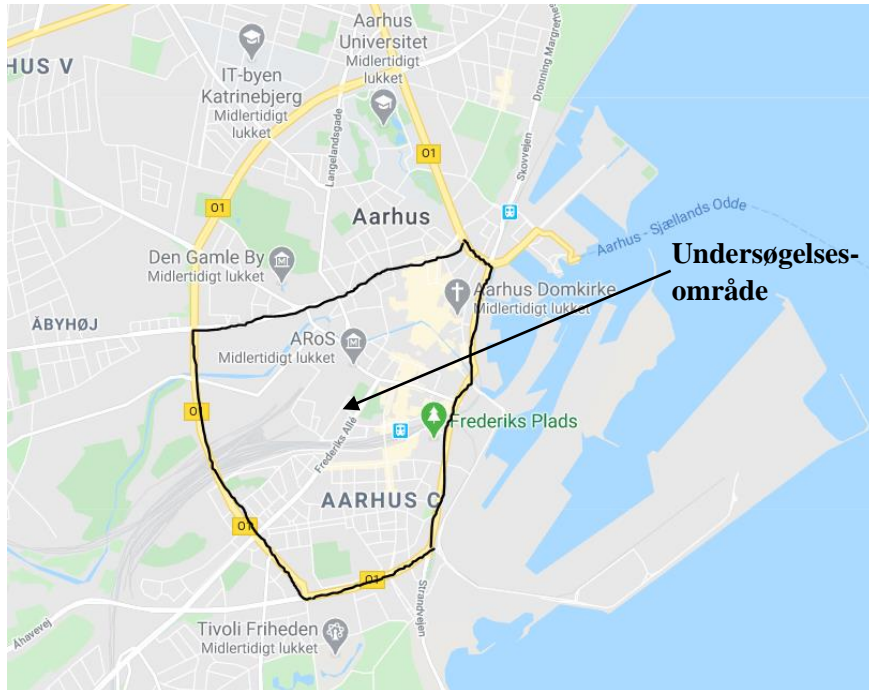
Med afsæt i den gennem projektet erhvervede viden har nærværende rapport til hensigt:

"At optimere tolkningsarbejdet af de aarhusianske palæogene lerarter ved at analysere tendenser ved klassificering i CPeT-IT ud fra et omfattende datagrundlag samt geologisk baggrundsviden".

1.2 Undersøgelsesområde

Bachelorprojektet udformes på baggrund af jordbundsundersøgelser foretaget ved tre lokationer i Aarhus by- og havneområde. Undersøgelsesområdet er som vist på figur 1.1.

De nøjagtige lokationer vil ikke blive offentliggjort.



Figur 1.1: Oversigt over undersøgelsesområdet.

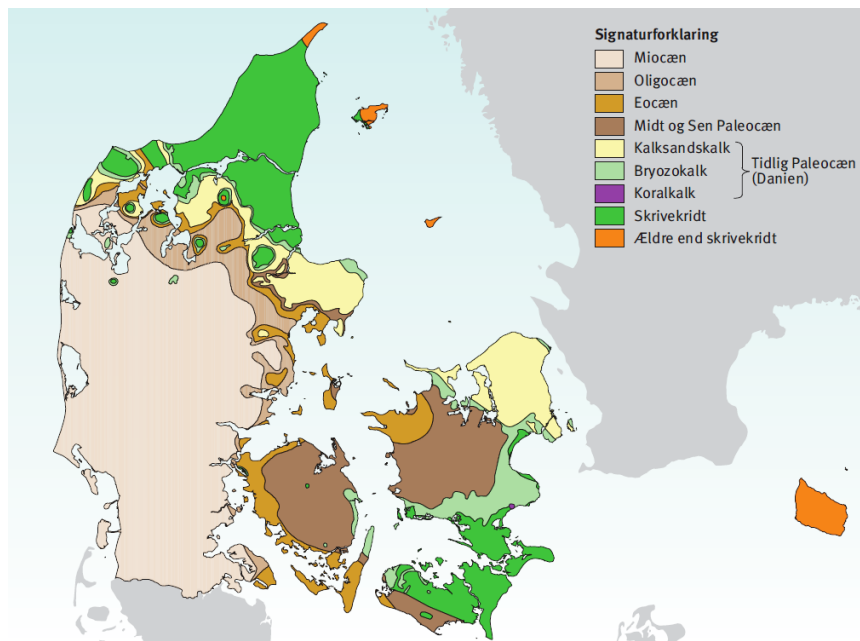
Jordbundsundersøgelserne omfatter konventionelt borearbejde samt CPTu-forsøg, og skal bidrage til at løse projektets problemstilling. De anvendte boreprofiler fremgår af bilagsoversigten i afsnit 11.

2. Danmarks ingeniørgeologi

Det forestående afsnit vil på baggrund af et litteraturstudie søge at redegøre for de processer, der har været med til at skabe de karakteristiske jordarter, vi træffer ved opførelse af geotekniske konstruktioner i Danmark.

Begrebet 'ingeniørgeologi' omfatter de geologiske processer og perioder, der har indflydelse på, hvordan jordlag reagerer i fysisk og mekanisk sammenhæng, når de udsættes for ydre belastninger i form af bygningsværker, o.lign.

Viden om sedimentgeologi og geologiske tidsaldre bidrager til, at den geotekniske ingeniør er bedre stillet med henblik på at kunne tolke og forstå en jordtypes in-situ egenskaber. Dette skal sættes i relation til lettere at kunne forstå hvordan palæogene aflejringer opfører sig ved tolkning i programmet CPeT-IT.



Figur 2.1: Oversigt over den danske undergrund (GEUS 2010).

Litteraturstudiet baseres på viden tilegnet gennem følgende litteratur: *"Ingeniørgeologi i Danmark"* (2009) af Inga Sørensen, *"Træk af Danmarks Geologi"* (1989) af Gunnar Larsen, *"Indføring i Sedimentgeologi"* (1998) af Jens Galsgaard og *"Geoviden nr. 3 – Danmarks geologiske udvikling fra 65 til 2,6 mio. år før nu"* af GEUS (2010).

2.1 Dannelsesproces

De fleste danske jordarter er opstået ved nedbrydning af bjergarter, hvoraf sedimenter transporteres af vand, vind eller is til aflejring. Dannelsesprocessen er som vist på figur 2.2.



Figur 2.2: Oversigt over dannelsesproces.

2.1.1 Produktion

Produktion omfatter den nedbrydende del af grundfjeld ved forvitring og erosion. Ved jordoverfladen vil tilstedeværelsen af ilt, kuldioxid og vand betyde, at den oprindelige bjergart bliver nedbrudt og omdannet til et lag af løst materiale som følge af processer, der samlet kaldes 'forvitring'.

Fysisk forvitring omfatter nedbrydning af klippeoverflader til mindre partikler som resultat af temperatursvingninger, der fører til udvidelser og skrumpninger af klippeoverfladen.

Kemisk forvitring omfatter nedbrydning af klippe til nye mineraler som resultat af kemiske processer.

Ofte vil den fysiske og kemiske forvitring arbejde sammen om at nedbryde grundfjeldet.

Erosion er et udtryk for, at de løse nedbrydningsprodukter skylles væk, nedslides eller afgraves i mindre eller større omfang som følge af vind, bølger, rindende vand i floder eller gletsjere.

2.1.2 Opbygning

Opbygning omfatter den opbyggende proces af sedimentbjergarter ved transport, aflejring og diagenese.

Transport af nedbrydningsprodukterne kan foregå over og under jordoverfladen. Under jordoverfladen vil det kemisk forvitrede materiale sive ned i grundvandet og ad denne vej blive ført ud i havet til aflejring. Over jordoverfladen kan både det kemiske og fysiske forvitrede materiale blive transporteret af løbende vand, vind eller via gletsjeraktivitet til aflejring.

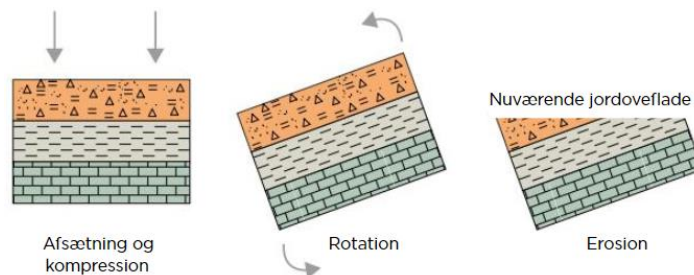
Aflejringen sker typisk i takt med transporten. Størrelsen på kornmaterialet aflejret i vand afhænger af hastigheden i vandet. Det vil altså sige, at det strømmende vand aflejrer grovkornede materialer som grus og sand, hvorimod ler kun aflejres i stillestående vand. Vinden aflejrer finsorteret sand (betegnes 'flyvesand'). Gletsjeraktivitet tager alt materiale med sig og fremstår derfor meget usortet (moræne).

Diagenese er en proces, der indtræffer, efter sedimentet er aflejret. Efter aflejringen undergår sedimentet en række ændringer, der er styret af permeabilitet, porevandskemi samt stigende tryk og temperatur. Diagenese inddeles i 2 grupper; hhv. mekanisk og kemisk diagenese.

- *Mekanisk diagenese* omfatter konsolideringen. Her sammentrykkes sedimentet som konsekvens af et stigende overlejringstryk, og porevandet presses ud.
- *Kemisk diagenese* omfatter cementeringen. Porevandet, der presses ud ved konsolideringen, kan reagere kemisk med omgivelserne pga. en lokal stor ionkoncentration; bl.a. kan der udfældes mineraler som calcit blandt lermineralerne, hvilket vil cementere jorden og dermed reducere plasticiteten. Cementeringen vil tiltage i takt med, at overlejringsstrykket stiger, hvorfor ældre aflejringer er mere præget af diagenese end yngre aflejringer (Galsgaard 1998).

2.1.3 Tektonik og forstyrrelser

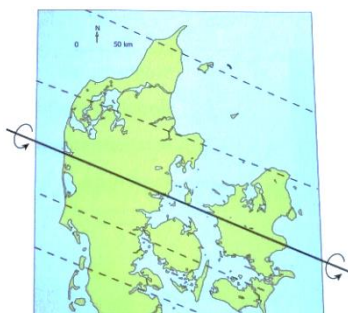
Når man foretager jordbundsundersøgelser i Danmark, vil man træffe en lang række forskellige jordarter som grus, sand, silt, ler, tørv og gytje samt kalk og skrivekridt. Principielt aflejres jordlagene i vandrette lag ovenpå hinanden (figur 2.3).



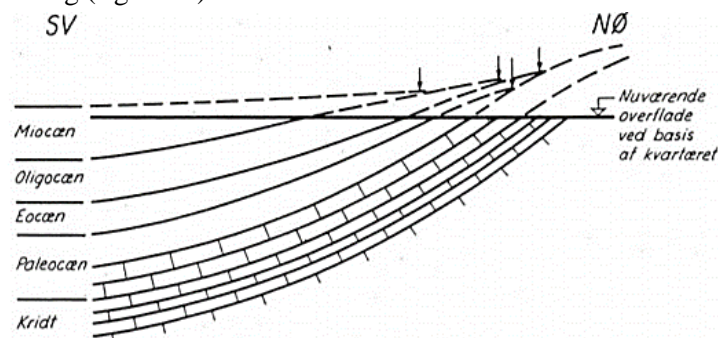
Figur 2.3. Tektonik og forstyrrelser (Sørensen 2009).

Dog er det sjældent, at man ser denne ideelle aflejningsstruktur. Dette skyldes store forskydninger i undergrunden langs forkastninger som resultat af pladetektoniske bevægelser. Den geologiske udvikling er tilmed under indflydelse af salthorste og gletsjeraktivitet.

I Midt Tertiær skete en sådan forskydning af det danske område (figur 2.4). Helt overordnet betød det, at der skete en hævnning af den danske undergrund mod nordøst, hvor de ældre lag blev vippet op. Derimod blev det sydvestlige Danmark vippet ned. Lagene, der blev vippet op, blev udsat for erosion, hvilket medførte, at de kom til at ligge i niveau med yngre aflejringer (figur 2.5).



Figur 2.4: Forskydning af det danske område (Sørensen 2009).



Figur 2.5: Snit af prækvartæret fra SV til NØ (Aarhus Amt 2006).

På baggrund af denne forskydning vil man erfare, at man nogle steder kan bore ganske langt i sand og ler inden man når ned i kalken, hvor kalken andre steder ligger ganske tæt på terræn som i Nordjylland og i Hovedstadsområdet. Tilsvarende kan man ved undersøgelser i Aarhus og langs den jyske østkyst træffe det plastiske ler hurtigt, hvor leret aldrig mødes i Nordjylland og i Hovedstadsområdet (Sørensen 2009).

2.2 Mineralogi

Mineralindholdet i en sedimentæraflejring udgør en vigtig faktor i den fysiske såvel som den mekaniske jordklassifikation. Et minerals egenskaber bestemmes ud fra følgende parametre:

- *Krystalform* omfatter mineralernes ydre form og afspejler krystalstrukturens symmetriforhold.
- *Hårdhed* er et minerals modstandsevne overfor mekanisk slid. Den bestemmes af tætheden af krystalstrukturen og styrken af de bindinger, der holder den sammen.
- *Vægtfylde* bestemmes af den kemiske sammensætning af forskellige grundstoffer.
- *Farve* bestemmes af den kemiske sammensætning, krystalstrukturen og indhold af grundstoffer.
- *Spaltelighed* indikerer, at et mineral kan være svagere i én retning end i andre retninger, og mineralet kan derfor gå i stykker som resultat af trykpåvirkning i denne retning.

Grundfjeldet består af en hård bjergart opbygget af en masse mineraler. Nogle mineraler (som f.eks. lermineraler) dannes ved jordoverfladen ved, at grundfjeldet smuldrer og forvitrer. Størstedelen af mineralerne er dog dannet som bikomponenter i grundfjeldet dybt nede i jorden under varierende tryk- og temperaturforhold, der omfatter en gradvis afkøling af magma i jordens kappe. Mineraler, der udkrystalliserer som de første, har en høj dannelsesstemperatur. Mineraler, der dannes ved lave temperaturer, udkrystalliserer sidst, og er derfor stabile overfor forvitring (Sørensen 2009).

De hyppigst trufne mineraler i de danske tertiære aflejringer er skematiseret nedenfor (tabel 2.1).

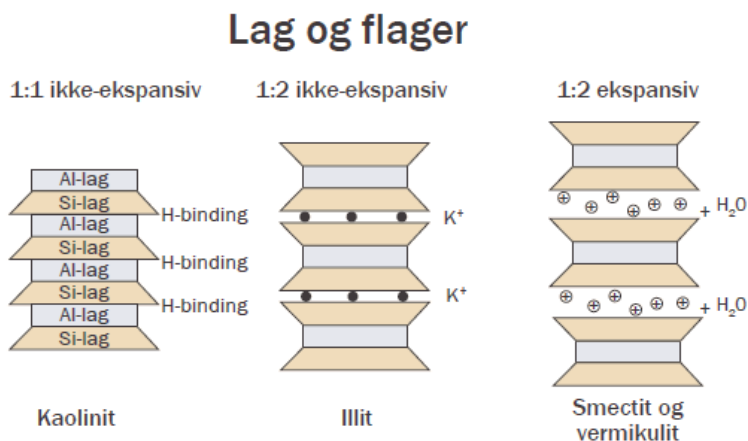
Mineraler	Kemisk formel	Krystalform	Hårdhed Fra 1-10	Vægtfylde [g/m ³]	Farve	Spaltelighed
Kvarts (Silica)	SiO_2	Trigonal	7	2,65	Glasklar til hvid farve	Ingen spaltelighed (muslet brud).
Calcit (kalk)	$CaCO_3$	Trigonal	3	2,7	Glasklar til hvid farve	God spaltelighed
Lermineraler (kaolinit, illit & smectit)	Kaolinit: $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$ Illit: $Al_4(Si_7AlO_{20})(OH)_4$ plus K-ioner Smectit: $(Al, Mg, Fe)_4((Si, Al)_8O_{20})(OH)_4$ plus Ca-, K-, Na-, Mg- og Fe-ioner	Monoklint i pladeformet krystaller	(kan ikke måles)	2,0-2,8	Stor variation	God til perfekt (omdannes til glimmermineraler)
Glaukonit (grønglimmer)	$K(Fe, Mg, Al)_2((Al, Si)_4O_{10})(OH)_2$	Monoklint i pladeformet krystaller	2	2,8-3,4	Grønlig til olivengrøn farve	Spaltes i tynde fleksible flager/skiver.
Muskovit (lysglimmer)	$KAl_2(Si_3AlO_{10})(OH)_2$	Monoklint i pladeformet krystaller	2,5-8 (2,5 er på spaltefladen)	2,8-2,9	Stor variation	Spaltes i tynde fleksible flager/skiver.

Tabel 2.1: Oversigt over mineralernes egenskaber (Sørensen 2009).

2.2.1 Lermineraller

I en naturlig lerprøve skelner man overordnet set mellem 3 forskellige lermineraller: kaolinit, illit og montmorillonit (smectit). I de palæogene aflejringer udgør smectit i gennemsnit 50% af lerminerallerne. Indholdet aftager op gennem de tertiære formationer, hvor illit og kaolinit bliver dominerende i Øvre Oligocæn. Skiftet karakteriserer overgangen fra plastisk ler til mere magre lerarter, og vil blive gennemgået yderligere i delafsnit 2.3.

Lerminerallerne pladeformede struktur er opbygget som bundter af tynde flager, der bliver holdt sammen af forskellige typer bindinger (figur 2.6). Disse bindinger er afgørende for, hvor meget vand, der kan trænge ind mellem flagerne og herved få leret til at svulme op.



Figur 2.6: Ikke-ekspansive og ekspansive lermineraller (Simonsen 2017).

Kaolinit's flager er bundet sammen af brintbindinger (H), der er kendetegnet ved ikke at kunne tiltrække vandmolekyler, hvorfor mineralet ikke er ekspansivt.

Illit's flager er bundet sammen af kaliumioner, der er kendetegnet ved at kunne tiltrække vandmolekyler, men samtidig holde flagerne godt sammen, hvorfor mineralet kun er svagt ekspansivt.

Montmorillonit's (smectit) flager er ikke bundet særlig godt sammen, fordi der mellem de enkelte flager er en blanding af forskellige ioner, der tiltrækker vandmolekyler. Når mineralet tilsættes vand, ekspanderer det voldsomt. Smectit har den højeste ionbytningskapacitet og dermed den største ekspansionssevne. Det er i stand til at kunne udvide sig op til 4-500% af dets volumen. Denne proces medfører således, at leret bliver deformerbart (plastisk). Smectitminerallerne dannes ved forvitring af jern- og magnesiummineraller, feldspat og aske fra voldsomme vulkanudbrud i Nordatlanten, der fandt sted i Nedre Tertiær (Sørensen 2009).

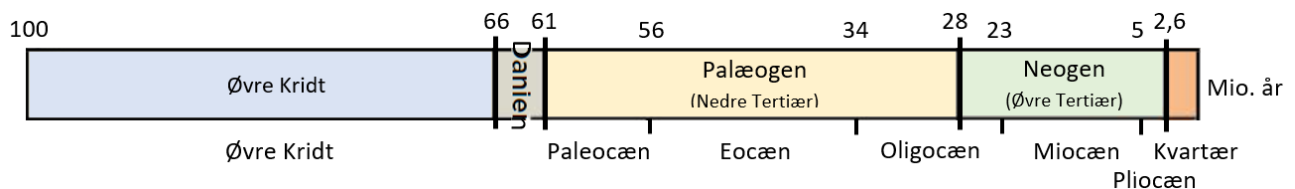
2.3 Tidsperioder

Overordnet set skelner ingeniørgeologien mellem perioderne Kvartær og Prækvartær, der strækker sig over et tidsspand på 100 mio. år (figur 2.7). Perioderne kan inddeles yderligere i følgende:

- Prækvartær:
 - Øvre kridt og Danien
 - Nedre og Øvre Tertiær
- Kvartær:
 - Glacial og Interglacial
 - Senglacial og Postglacial

I det følgende afsnit foretages et litteraturstudie med henblik på at redegøre for de geoteknisk relevante tidsperioder. Med udgangspunkt i afsnit 2.1 og 2.2 omfatter redegørelsen aflejningsmiljøet og de karakteristiske træk, der gør sig gældende for de danske aflejringer.

Den geologiske redegørelse omfatter ikke Bornholm, der adskiller sig fra de øvrige.



Figur 2.7: Oversigt over geologiske tidsperioder (Sørensen 2019), modificeret efter (GEUS 2010).

2.3.1 Prækvarter

I de følgende underafsnit gennemgås tidsperioderne fra 100 mio. år før nu til 2,6 mio. år før nu.

2.3.1.1 Øvre Kridt

Tidsperiode	Underperiode	Aflejringsmiljø	Jord- og bjergarter	Formationer/aflejringer
Øvre Kridt	Øvre Kridt (Ca. 100 mio. til 66 mio. år før nu)	Marint (Danmark er havområde)	Slamkridt	- Skrivekridt

Figur 2.8: Oversigt over aflejringer fra Øvre Kridt.

Kalken fra Øvre Kridt omtales skrivekridt. Kridt er ensartet i udseende (næsten helt hvidt) og er et finkornet, slammet materiale. Skrivekridt er svagt hærtnet til blød og blev dannet, imens Danmark var dækket af et dybhav. Aflejringen af kridt bestod af rester fra mikroskopiske organismer (kokkoliter), der levede i havet.

Slamkalk er et finkornet materiale; typisk lidt grovere end skrivekridtet og mere hærtnet. Knolde af sort flint kan forekomme.

Formationen træffes under de kvartære aflejringer i Nordjylland, langs Køge bugt samt på Sydsjælland og Lolland-Falster (Sørensen 2009).

2.3.1.2 Danien

Tidsperiode	Underperiode	Aflejringsmiljø	Jord- og bjergarter	Formationer/aflejringer
Øvre Kridt - Palæogen	Danien (66 mio. til 61 mio. år før nu)	Marint (Danmark er havområde)	Kalksandskalk, Bryozokalk, koralkalk & slamkalk	- Kalksten

Figur 2.9: Oversigt over aflejringer fra Danien.

I de første 5 mio. år af Palæogen fortsatte aflejringen af kalksedimenter. Perioden omtales Danien og er en overgang fra Øvre Kridt til Palæogen, hvori der blev dannet kalksten med varierende farver og karakter (bryozokalk, slamkalk, koralkalk, kalksandskalk (Københavnerkalk)). Produktionen af kalk stod havet selv for, da kalkskeletter fra mosdyr, koraldyr og bryozoa udgjorde aflejringen. Kalkstenene findes både som uhærtnet og hærtnet, hvoraf særligt Københavnerkalken er stærkt hærtnet. I kalkaflejringerne findes grålig flint, der afviger fra den sorte flint fra Øvre Kridt. Materialet fremgår mere grovkornet som resultat af dets aflejningsproces, der foregik på en relativt lavere havdybde - sammenlignet med Øvre Kridt.

Kalksten fra Danien findes i et bælte fra den vestlige Limfjord ved Thisted over Djursland og Nordsjælland, samt på Sydøstsjælland; bl.a. ved jordoverfladen ved Stevns Klint. Grænsen mellem Øvre Kridt og Tertiær kan her ses markeret ved et tyndt mergellag (fiskeler) (Sørensen 2009).

2.3.1.3 Nedre Tertiær

Tidsperiode	Underperiode	Aflejringsmiljø	Jord- og bjergarter	Formationer/aflejringer
Palæogen (66-28 mio. år før nu)	Eocæn (56-34 mio. år før nu)	Marint (Danmark er hovedsageligt havområde)	Fedt ler og mergel	<ul style="list-style-type: none"> - Søvindmergel - Lillebælts ler - Røsnæs ler
	Paleocæn (61-56 mio. år før nu)		Grønsandskalk, plastisk ler, mergel og moler	<ul style="list-style-type: none"> - Ølst/Moler - Holmehus - Æbelø - Kerteminde Mergel - Lellinge Grønsand og grønsandskalk
	Danien (66-61 mio. år før nu)		Kalk	<ul style="list-style-type: none"> - Bryozokalk - Koralkalk - Københavnerkalk

Figur 2.10: Oversigt over aflejringer fra Nedre Tertiær.

Danien henføres under Nedre Paleocæn, og indgår derfor i perioden Tertiær. Dog ændrede situationen sig først betydeligt ved slutningen af Danien. I overgangen fra Danien til Selandien lå Danmark for 'en stund' over havniveau; her blev de aflejrede kalksten fra Danien så småt nedbrudt af vind og vand. I løbet af Mellem Paleocæn blev vanddybden i det danske område efterhånden ganske stor (flere hundrede meter), hvor der på havbunden blev aflejret kalkrullesten og grønsand af den eroderede kalksten (Lellinge Grønsandskalk). Senere i Selandien skete en hævnning af det nordøstlige skandinaviske område, hvor store mængder skrivekridt blev eroderet og aflejret i det danske område som tykke mergellag (Kerteminde Mergel).

Havstigningen fortsatte i Mellem- og Sen Paleocæn samtidigt med, at de varme vandstrømme fra sydlige have ophørte som resultat af pladetektoniske bevægelser. Dette betød dybere og køligere vande, der medførte, at mergellagene blev afløst af fedt, kalkfrit ler (Æbeløformationen, Holmehusformationen). Det var i denne periode, at de danske have var dybest. Den betydelige vanddybde betød en faldende tilførsel af materiale fra landområder, hvorfor der kun skete en langsom bundfældning af ekstremt farvet og finkornet materiale. Aflejringsprocessen blev tilmed påvirket af voldsomme vulkanudbrud i Nordatlanten, da Amerika og Europa begyndte at glide fra hinanden. Asken fra vulkanudbruddene endte i havet som et finkornet materiale, og med tiden blev det med øvrige forvitrede materialer omdannet til lermineralet smectit. De mange Eocæne lerarter med store indhold af mineralet smectit omtales 'plastiske' (jf. afsnit 2.2.1).

Generelt er Nedre Tertiær præget af en længerevarende sedimentovergang (30-40 mio. år periode) fra den underlejrrede kalk til en række fede ler- og mergellag; hver med deres særlige udseende og kalkindhold, der vidner om vekslende temperaturer, vanddybder og cirkulation i havet samt om ændringer i afstanden til omkringliggende landområder. Hertil hører de karakteristiske og dominerende formationer i Eocæn fra Røsnæs og Lillebælt. Røsnæs Formationen består af rødbrun til gulbrun, kalkholdig og fedt ler. Lillebæltsformationen består af grønligt til grønliggråt, kalkfrit til fattigt og fedt ler. De to plastiske lerarter vil ikke blive berørt yderligere. Derimod vil den yngre Søvindmergel Formation blive gennemgået yderligere i afsnit 3.1.2.2.

Aflejringerne fra Nedre Tertiær ses i et smalt bælte fra den nordvestlige Limfjord til Aarhus-området samt på Vest- og Sydfyn og Nordvest- og Midtsjælland. Disse træffes under aflejringerne fra Øvre Tertiær og Kvartær (GEUS 2010) (Sørensen 2009).

2.3.1.4 Øvre Tertiær

Tidsperiode	Underperiode	Aflejringsmiljø	Jord- og bjergarter	Formationer/aflejringer
Neogen (28-2,6 mio. år før nu)	Pliocæn (5-2,6 mio. år før nu)	Ingen aflejringer på land i Danmark		
	Miocæn (23-5 mio. år før nu)	Flodsystemer og søer Deltamiljøer Kystmiljøer	Glimmerler, -silt og -sand Kvartssand Brunkul	- Gram-, Hodde- og Arnum - Odderup- og Ribe - Vejle Fjord
	Øvre- og Mellem Oligocæn (28-23 mio. år før nu)	Marint (i Vestjylland)	Glimmerler med glaukonit Siltet og finsandet ler	- Brejning - Skive- og Branden
Palæogen (66-28 mio. år før nu)	Sedimentafbrydelse (33 mio. til 28 mio. år før nu)			
	Nedre Oligocæn (34-33 mio. år før nu)	Marint	Fedt ler	- Viborg

Figur 2.11: Oversigt over aflejringer fra Øvre Tertiær.

Slutningen af Eocæn er kendetegnet ved et temperaturskifte. Det blev nu koldere, hvilket medførte, at havvandet blev bundet i iskapper ved polerne. Dette førte til, at vandstanden i verdenshavene faldt. Samtidig med klimaændringen begyndte de skandinaviske landområder at hæve sig som konsekvens af pladetektoniske bevægelser. De mange forandringer betød, at situationen i det danske område nu var helt anderledes. Oligocæn var præget af et vekslende aflejringsmiljø som konsekvens af en gentagen vækst og afsmeltning af polerne.

I den allerældste del af Oligocæn blev Viborg Formationen aflejret. Formationen er hverken fed, som det underlejrrede fede ler fra Eocæn, eller magert som det overlejrrede Glimmerler fra Miocæn. Formationen er kendt som et overgangslag, der markerer grænsen mellem Nedre og Øvre Tertiær, hvor Nedre Oligocæn henføres under Palæogen, og Mellem- og Øvre Oligocæn henføres under Neogen. Viborg Formationen berøres yderligere i afsnit 3.1.2.1.

I tiden efter aflejringen af Viborg Formationen var det globale klima koldest, og perioden er kendetegnet ved en sedimentafbrydelse, da havet var helt eller delvist tørlagt på grund af nedisningen. Der findes ingen formationer fra denne tid. I Mellem- og Øvre Oligocæn blev det globale klima gradvist varmere, hvilket medførte, at det danske område på ny blev oversvømmet. I denne periode blev flere formationer aflejret, der ikke blot var siltet, men også finsandede med et øget glimmerindhold. Aflejringerne betegnes "Glimmerler" og omfatter bl.a. Branden-, Skive- og Brejning Formationen. Tilvæksten i grovkornet- og glimmermateriale i aflejringerne i løbet af Oligocæn vidner om en fortsat hævnning af det skandinaviske landområde samt en kraftig erosion af netop dette. Aflejringerne fra Oligocæn kan findes under de kvartære aflejringer i et smalt bælte over Jylland fra Sydthy ved Limfjorden til Aarhus og videre sydpå langs Jyllands østkyst.

Overgangen fra Oligocæn til Miocæn var atter præget af et temperaturskifte, der betød, at det globale klima blev gradvist koldere og en streng istid efterfulgte for en 'kortvarig stund'. Herefter blev det globale klima i løbet af Neogen på ny varmere, og der blev gradvist land i det danske område. Det danske område var i denne periode et aflejringsbassin for store mængder nedbrydningsmaterialer fra de skandinaviske fjelde, der blev transporteret via floddeltaer. Nedbrydningsmaterialet bestod af eroderede glimmerholdige bjergarter og sandsten. På flodsletterne blev der aflejret glimmerholdige lersedimenter, ofte med et indhold af organisk materiale, der med tiden blev omdannet til brunkul. Ved flodmundingerne blev der aflejret glaukonit-sandsten, glimmersand, -silt og kvartssand. Aflejringerne fra Miocæn er domineret af kvarts og glimmer, som er de eneste, der er stabile mod den kemiske forvitring. Øvrige mineraler blev omdannet til lermineraler. Aflejringerne fra Miocæn kan træffes i det centrale og sydvestlige Jylland (GEUS 2010) (Sørensen 2009).

2.3.2 Kvartær

I det følgende underafsnit gennemgås kort tidsperioderne fra 2,6 mio. år før nu til nu.

2.3.2.1 Glacial, Senglacial & Postglacial

Tidsperiode:	Underperiode:	Aflejringsmiljø:	Jord- og bjergarter	Formationer/aflejringer:
Kvartær	Senglacial og Postglacial (16.000 år før nu til nu)	Marint og fersk vand Flydejord og skred Smeltevand uden for isens opholdslinje	Ler, silt, sand Muld Tørv og gytje	- Ferskvand - Marine - Nedskyl - Smeltevand
	Glacial (2,6-16.000 mio. år før nu)	Gletsjere Smeltevand Flydejord og skred	Ler, silt, sand og grus Kalkholdig under udvaskningszonen	- Moræne - Smeltevand
	Skiftende med interglacialer	Interglacial: Samme som i Post- og Senglacial		

Figur 2.12: Oversigt over aflejringer fra Kvartær.

Mod slutningen af Tertiær var det danske område en del af et stort landområde, der også omfattede det nuværende Norge og Sverige. Kattegat var endnu ikke dannet. I modsætning til Tertiærtidens mere rolige sedimentationsforhold var det danske område i Kvartær præget af hurtige klimasvingninger, der resulterede i skiftende istider (glacialer) og mellemistider (interglacialer). Det medførte en ændring i sedimentationen, hvor transportmediet ikke længere blev udgjort af deltamiljøer og dybhav, men derimod af gletsjere og smeltevand. Under istiderne tog gletsjernes fremadrettede bevægelser alt materiale (sand, sten og klippestykker) med sig, hvorfor aflejringerne fremstår usorteret. De fremadrettede bevægelser langs prækvartæret har tilmed resulteret i, at man kan finde glacialt forstyrrede tertiære aflejringer. Hertil hører, at ældre aflejringer er blevet presset op, og der er heraf skabt randmorænebakker.

I det isfrie område foran gletsjeren opstod smeltevandssletter af floder fra den smeltende is. Her aflejredes groft korn i stærk strøm og finkornet materiale i stille strøm. Smeltevandsaflejringerne er typisk sorteret, hvori mange mineraler (som f.eks. kvarts og pyrit) kan ses. Som følge af varierende temperaturforhold – og dermed isens bevægelser – skifter smeltevandsaflejringer ofte mellem grov- og finkornede lag, samt mellem moræne- og smeltevandsaflejringer. Grundet det bakkede morænelandskab er landskabet stedvist præget af flydejord i bunden af lavninger, som dækker tidligere moser.

Den sidste del af Weichsel-istiden benævnes Senglacial og markerer dermed begyndelsen på istidens afslutning. Senglaciale aflejringer betegnes også 'ekstramarginale aflejringer', der er et udtryk for, at aflejringen er sket udenfor isranden af smeltevand. Aflejringerne er kendetegnet ved at være sorteret og uforstyrret. Ved begyndelsen af Senglacial var Nordjylland delvist oversvømmet af Yoldiahavet, og isen dækkede Østjylland. Afsmeltningen af isen og overgangen til den terrænnære geologi skete over vekslende kulde- og varmeperioder. I kolde perioder (Ældre og yngre Dryas) aflejredes nedskyl og flydejord, hvor gytje og tørv aflejredes i varme perioder (Bølling og Allerød). Istidens endelige afslutning ('Postglacial') blev markeret ved en markant temperaturstigning for 10.000 år siden, der resulterede i, at dele af landet blev oversvømmet, hvori der aflejredes marine aflejringer, samt ferskvandsaflejringer i søer og moser.

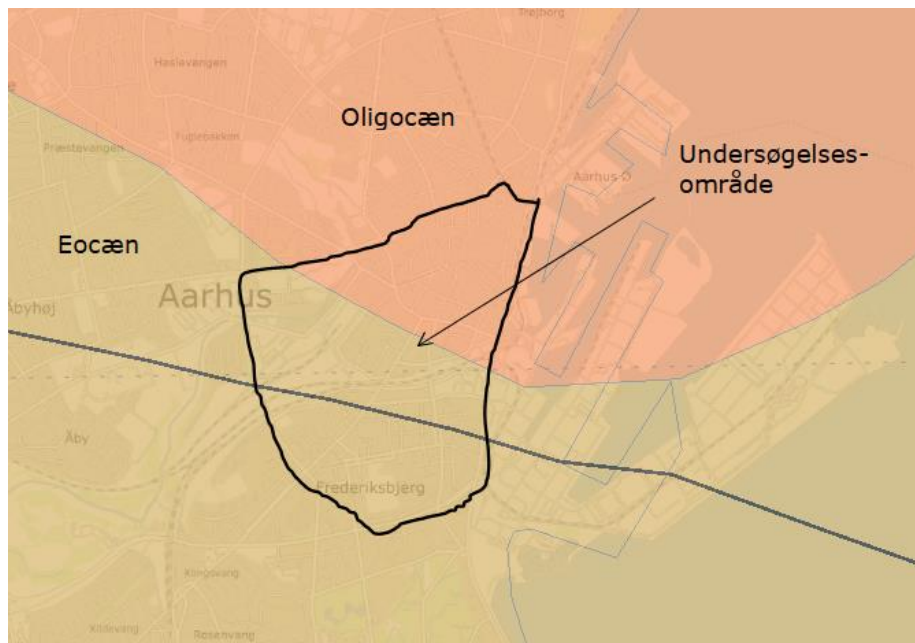
Af Per Smeds landskabskort fremgår det, at de glacialle aflejringer træffes i størstedelen af landet, hvor de strækker sig fra Sjælland over Fyn til hovedopholdslinjen i Jylland (Weichseltidens udbredelse). Vest for hovedopholdslinjen træffes smeltevandsaflejringer og enkelte områder med moræneaflejringer afsat i forrige istider. De sen- og postglaciale aflejringer træffes altid i lavninger, hvor de dækker den ujævne overflade, som gletsjeren har skabt. I Nordjylland træffes marine aflejringer fra Senglacial (Sørensen 2009).

3. Lokalgeologi, Aarhus by- og havneområde

Nærværende afsnit omhandler en redegørelse for den aarhusianske lokalgeologi i undersøgelsesområdet, hvortil et øget fokus lægges på Viborg- og Søvindmergel Formationerne.

3.1 De overordnede geologiske forhold

I størstedelen af undersøgelsesområdet (figur 3.1) består prækvartæret af lerede lag af Tertiær oprindelse. Lagene er afsat forud for de overlejlrede kvartære aflejringer, der er deporteret af gentagne nedisninger og tilbagesmeltninger af gletsjere, som har formet det nuværende landskab. De geologiske omgivelser i undersøgelsesområdet bærer præg af tektoniske pladebevægelser, erosion og gletsjeraktivitet.

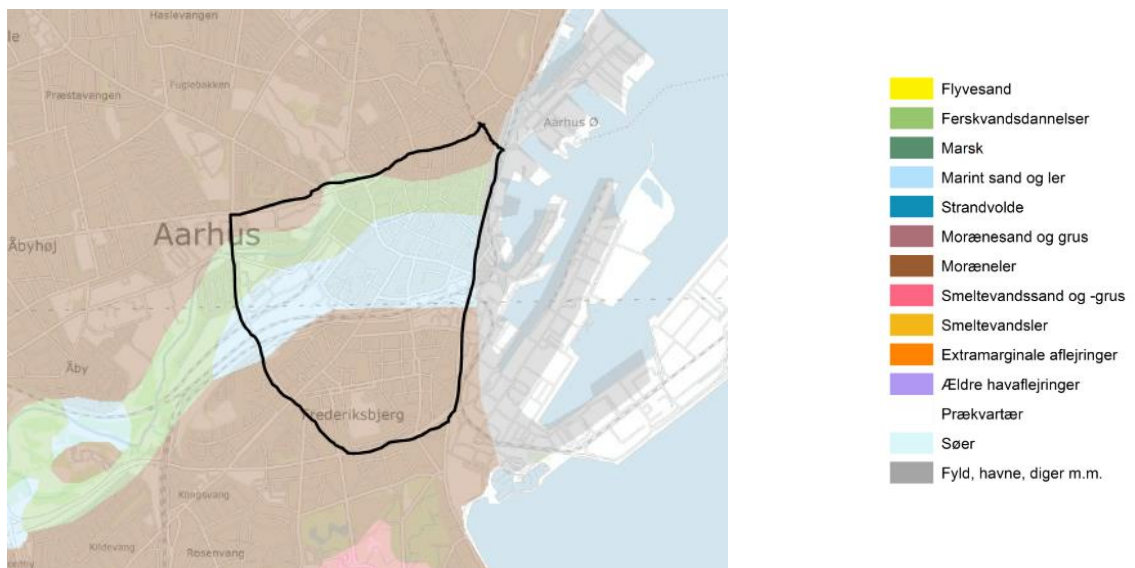


Figur 3.1: Oversigt over prækvartæret i undersøgelsesområdet (GEUS).

Den by- og havnenære placering gør, at der vil træffes recente aflejringer af varierende tykkelse i de øvre lag; tiltagende mod havneområdet.

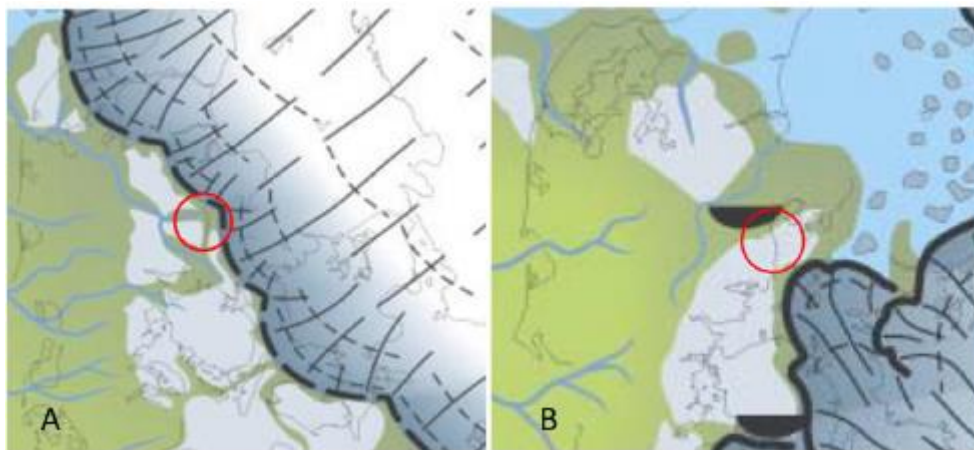
3.1.1 Kwartære aflejringer

Foruden de recente aflejringer afspejler de mest overfladenære aflejringers struktur, at området har været isdækket under sidste istid; Weichsel-istiden (117.000-11.700 år før nu).



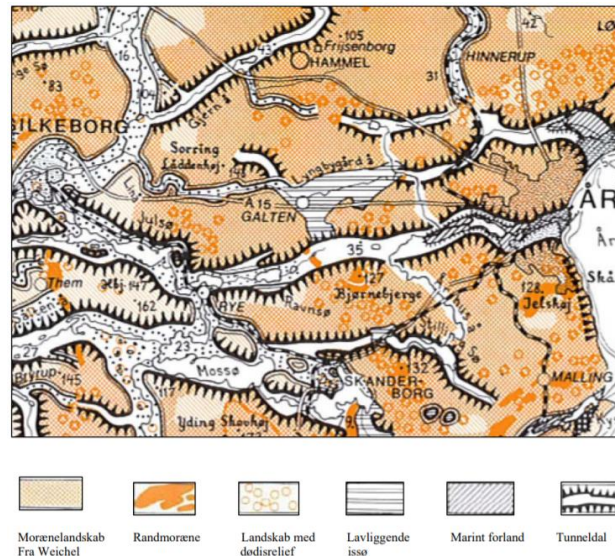
Figur 3.2: Jordartskort for undersøgelsesområdet (GEUS).

Det var i Sen Weichsel, at gletsjeraktiviteten var størst, og her fandt en omfattende nedisning sted i det skandinaviske område. Nedisningen dannede 2 fremstød fra hhv. Norge/Sverige og Baltikum mod det danske område, som formede størstedelen af det nutidige østjyske landskab (figur 3.3).



Figur 3.3: A) Isfremstød fra Norge/Sverige. B) Isfremstød fra Baltikum (GEO 2018).

Det første isfremstød deporterede lag af glaciære sedimenter, og smeltevandsstrømme eroderede dybe kanaler i prækvartæret. Kanalerne blev derefter delvist eller komplet dækket til af glaciære sedimenter fra det baltiske isfremstød. Yngre aflejringer kan tilmed træffes i disse dale. Fra Århus by og mod vest til Galten-området findes et komplekst system af begravede dale, som vist illustreret nedenfor.



Figur 3.4: Landskabskort over begravede dale i Aarhus amt (Miljøcenter 2009).

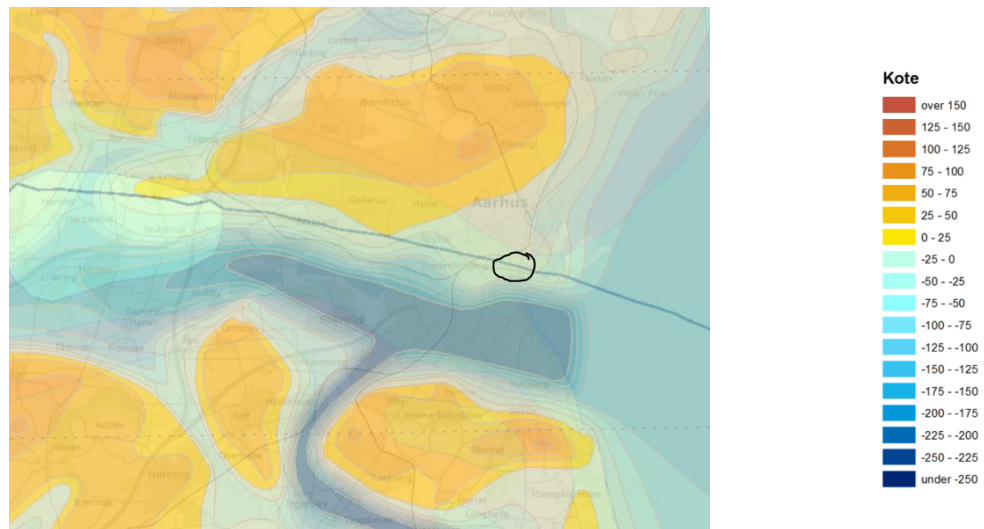
Den begravede dal i undersøgelsesområdet har dens udmundning i Aarhus havneområde. Her er den bl.a. fyldt op med marine- og ferskvandsaflejringer. Aflejringerne træffes i varierende mægtighed langs Aarhus Å samt i kystområdet og dele af Aarhus centrum.

Senglaciale aflejringer som smeltevandssand, -grus og -ler ses også i området, men er af mindre dominerende mægtighed (1,0-2,0 m).

I størstedelen af området veksler de overfladenære lag af aflejringer mellem glaciale moræne- og smeltevandsaflejringer af varierende mægtighed (2,0-10,0 m). Moræneaflejringerne er karakteriseret ved et vist silt-, grus- og kalkindhold. Disse er hovedsageligt af ler eller sand som hovedtype. Smeltevandsaflejringerne er fede, kalkholdige og indeholder enkelte sandlag (GEO 2018).

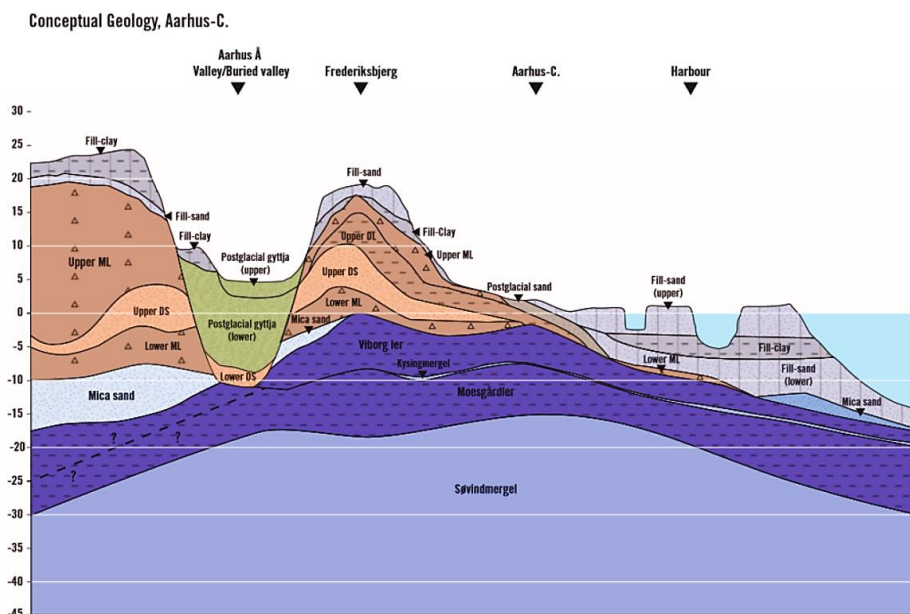
3.1.2 Prækvarter aflejringer

Prækvarteroverfladen i undersøgelsesområdet er præget af forskydninger i jorden (forkastninger), som har medført, at prækvartæroverfladen kan findes i varierende koter (figur 3.5).



Figur 3.5: Prækvarter højdeforhold. Linje viser forkastning (GEUS).

Forkastningen har tilmed været udsat for erosion i løbet af Tertiær og Kvartær, hvilket har skabt dalsystemer i prækvartæroverfladen – sammenfaldende med de begravede dale i Aarhusegnen; løbende fra Aarhus by og mod vest til Galten. Forstyrrelsernes indflydelse på prækvartæret kan tilmed ses af figur 3.6.



Figur 3.6: Oversigt over den aarhusianske undergrund (GEO 2018).

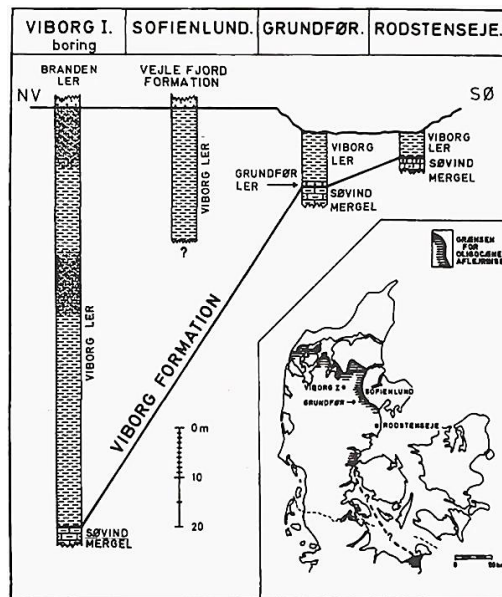
De tertiære sedimenter i undersøgelsesområdet er alle aflejret i det marine miljø og består af fedt til meget fedt ler. Aflejringerne er afsat i Oligocæn og Eocæn. Glacialt forstyrrede tertiære aflejringer er truffet.

Stedvist i undersøgelsesområdet kan der træffes mørkt glimmerler fra Vejle Fjord Formationen med en omtrent tykkelse på 10,0 meter. Leret er meget fedt, sandet, glimmerholdigt, lignitholdigt og svagt kalkholdigt.

I undersøgelsesområdet overlejres Søvindmergel Formationen af Viborg Formationen (GEO 2018).

3.1.2.1 Viborg Formationen (Nedre Oligocæn)

Det generelle mønster for Viborg Formationen er, at den tiltager mod V-NV (Viborg, ca. 85 meter tykt) (figur 3.7). Tykkelsen i Aarhus-området er omtrent 5,0-12,0 meter.



Figur 3.7: Viborg Formationens udbredelse (Kronborg 1994).

Formationen er et overgangslag fra Nedre- til Øvre Tertiær, hvorfor den inddeles i 3 lag:

- *Den nedre del* består af grågrønt, fedt til meget fedt ler med et basalt glaukonitlag. Denne del minder meget om det underlejrrede plastiske ler, men adskiller sig idet, den indeholder tynde silt- og finsandsslirer samt lys glimmer. Den er tilmed kalkfattig og sprækket med blanke glideflader.
- *Den mellemste del* består af en mere afdæmpet, neutralgrå farve, og besidder mange af de samme karakteristika som den nedre del; dog med et tiltagende indhold af silt og finsand.
- *Den øvre del* består af gråbrun silt og siltet ler. Denne del er kalkfrit og rigere på organisk materiale.

I det aarhusianske område er det meste af den mellemste og øvre del eroderet væk i løbet af Kvartær, hvorfor det hovedsageligt kun er den nedre del, der træffes ved jordbundsundersøgelser. Viborg leret er generelt vanskelig at skelne fra Moesgård leret fra Eocæn (Heilmann-Clausen 1995).

3.1.2.2 Søvindmergel Formationen (Mellem- til Sen Eocæn)

I Aarhus-egnen er aflejringerne fra Eocæn så tykke, at de stedvist differentierer lithologisk fra hinanden, hvilket tillader en underopdeling af Søvindmergel Formationen i 3 lag; hhv. Søvindmergel, Moesgård ler og Kysingmergel. Variationen tilskrives, at formationen er afsat over en længere periode (10-15 mio. år), hvori forskellige aflejringsmiljøer har eksisteret. Dette omfatter klimaforandringer såsom varierende havniveau, temperaturer og indhold af biologisk materiale i vandet.

Søvindmergel Formationen er sprækket med blanke glideflader. Stedvist i formationen er sprækkerne af så stor hyppighed og gennemløbende i flere retninger, at formationen fremstår 'brokket'. Denne brudstruktur vil påvirke lerjordens geotekniske egenskaber, som vil blive uddybet i afsnit 4.2.3 og 6.2.3 (Galsgaard 2020).

Inddelingen af formationen er som defineret nedenfor:

- *Den nedre del* er den 'klassiske' Søvindmergel. Mergelen består af en hvidlig-grå farve, der tilskrives dets høje kalkindhold (30-65%). Laget er stærkt bioturberet, dvs. gennemgravet af dyr, og uden egentlig lagdeling. Mergelen har en lagtykkelse på omtrent 70,0 meter, og underlejres af Lillebæltsler.
- *Den mellemste del* er Moesgård leret, som adskiller sig fra de øvrige lag i formationen, idet det er betydeligt mørkere og grovere og indeholder kun små til ingen mængder kalk. Leret stammer fra det sydlige Aarhus (Moesgård) og kan findes med varierende tykkelse i det aarhusianske by- og havneområde på 5,0-10,0 meter.
- *Den øvre del* er Kysingmergelen, som minder betydeligt meget om den ældste del af formationen; karakteriseret ved en lysegrå farve, der vidner om et højt kalkindhold. Fra den overlejlrede Viborg ler går der glaukonitholdige grave gange ned i mergelen, hvorfor den til tider kan have et grønligt skær. Mergelen stammer fra Kysing (nordøst for Odder) og kan tilmed findes i dele af det aarhusianske by- og havneområde med en omtrent tykkelse på 1,0-2,0 meter (Heilmann-Clausen 1995) (GEO 2018).

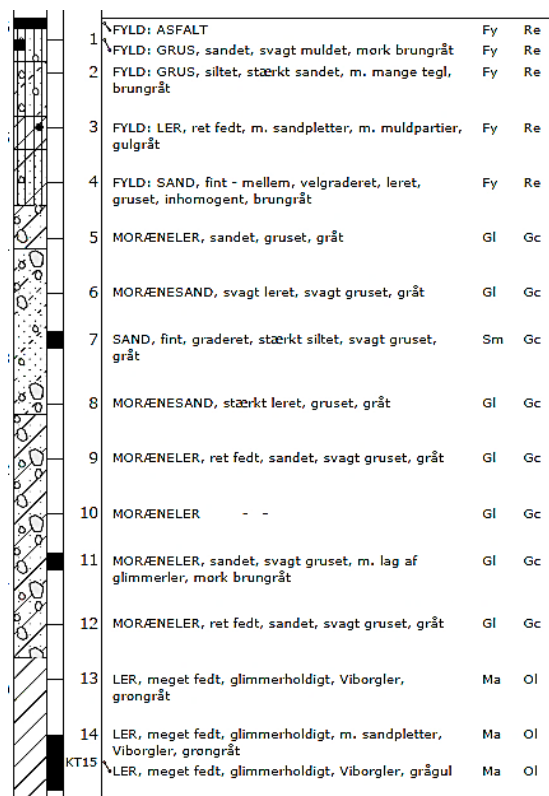
Formationens varierende kalkindhold formodes at skyldes havvandets varierende temperaturer. De kalkholdige lag afspejler perioder med gode passager af varmere havvand til det danske område, hvorimod det modsatte gør sig gældende for de kalkfattige aflejringer (Okkels 2009).



Figur 3.8: Eocæne jordprøver (Gillibrand).

3.1.3 Geologiens indflydelse på prækvartæret

De palæogene aflejringer i Aarhus er løbende blevet udsat for spændingsændringer i deres levetid. Viborg- og Søvindmergel Formationerne blev efter deres aflejring overlejret af yngre aflejringer fra Mellem- og Øvre Oligocæn, samt Miocæn i en periode, der strækker sig over 20-25 mio. år. Aflejringerne fra Oligocæn opnåede en lagtykkelse på op til 1000 meter, hvilket har resulteret i en betydelig konsolidering af de underlejede palæogene aflejringer (GEUS 2010). I løbet af Kvartær eroderede aflejringerne væk, hvorfor man i Aarhus typisk træffer Viborg- og Søvindmergel Formationen lige under de kvartære aflejringer (figur 3.9).



Figur 3.9: Viborg ler træffes lige under de kvartære aflejringer i Aarhus (GEO).

Foruden borteroeringen af de yngre aflejringer fra Tertiær, har gentagne nedisninger og tilbagesmeltninger af gletsjere i løbet af Kvartær tilmed haft indflydelse på strukturen. Den gradvise aflastning af det plastiske ler har resulteret i sprækkedannelse som resultat af lerets kvæledegenskaber. Tilsvarende har gletsjernes fremadrettede bevægelser i løbet af Kvartær forplantet sig dybt i de tertiære aflejringer, bidragende til sprækkedannelse. Desuden træffes glacialt forstyrrede tertiære aflejringer som følge af, at gletsjerne har presset rene flager af prækvartæret op og efterladt dem indlejede i moræneaflejringerne (Galsgaard 2020).

4. Soil Behaviour Type (SBT) klassifikationssystem

I det følgende afsnit foretages et litteraturstudie af P. K. Robertsons opdatering af SBTn (2016).

Afsnittet udarbejdes med udgangspunkt i artiklen ”*Cone Penetration Test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system – an update*” og Webinar #14. Hertil er der fundet supplerende litteratur.

4.1 Generelt

CPT-baserede klassifikationssystemer (SBT) karakteriserer jorde ud fra deres mekaniske egenskaber (styrke, stivhed og kompressionsevne), men anvender fysisk-baserede beskrivelser såsom ’sand’, ’silt’ og ’ler’ til at definere dem, hvorfor korrelationen mellem SBT og de fysisk-baserede beskrivelser vil resultere i fejltolkninger ved sondering i Viborg- og Søvindmergel Formationerne.

Som et led i at optimere karakteriseringen af disse typer af aflejringer, opstillede Robertson i 2016 et klassifikationssystem baseret på opførselskarakteristika for hver jordart.

4.2 Teoretisk grundlag

Det opførselsbaserede klassifikationssystem baseres på en række grundlæggende observationer og egenskaber for, hvordan en jord opfører sig. Disse er som opstillet af P. K. Robertson (2016).

- 1) Jord er i stand til at ændre volumen, når udsat for forskydningspåvirkninger.
- 2) Jord er grundlæggende friktionel; styrke og stivhed forøges med overlejringsstrykket og dybden, hvorfor normaliserede parametre bør anvendes.
- 3) Jord er grundlæggende ikke-elastisk, når tøjninger overstiger en initial grænseværdi ($\gamma < 0,001 \%$).

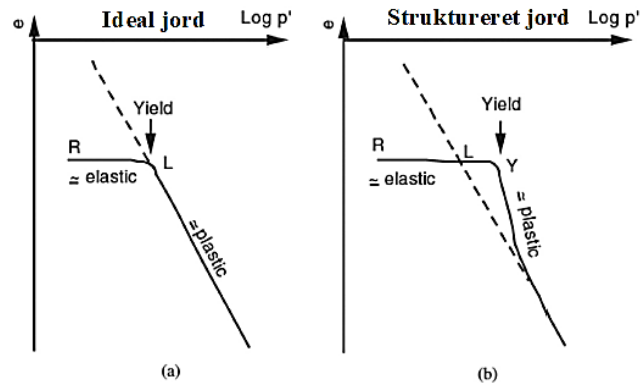
Jords in-situ opførsel er under stærk indflydelse af en lang række faktorer, der udover at omfatte ovenstående egenskaber, samtidigt omfatter dens struktur (Robertson 2016b).

4.2.1 Struktur

Klassifikationsmetoderne bygger på princippet ’*Critical-state soil mechanics (CSSM)*’, der omfatter observationen af en ung, uhærdnet, ’ideal’ jords opførsel, når udsat for forskydningspåvirkning. Dog har mange jorde en form for struktur, der kan medføre, at deres opførsel adskiller sig fra det ’ideelle’. Hertil benyttes begreberne ”mikro- og makrostruktur” til at beskrive hvordan en jord er blevet omstruktureret som følge af dens aflejringshistorie. Mikro- og makrostruktur inddeles efter, hvad man vil kunne ’se’ med øjet.

- Makrostruktur omfatter den synlige struktur som dannet af f.eks. lagdeling og sprækker.
 - CPT-sonden er for det meste i stand til at registrere disse (berøres i underafsnit 6.2.3)
- Mikrostruktur omfatter den sjældent synlige struktur som dannet af f.eks. spændingshistorik, diagenese og mineralogi.
 - CPT-sonden er ofte ikke i stand til at registrere disse; dog kan SCPTu-forsøg være behjælpelig med karakteriseringen af mikrostruktur i aflejringeres in-situ tilstand.

Forskellen på en 'ideal' og tilsvarende 'struktureret' jord er defineret ved, hvornår den plastiske deformation i jorden indtræffer (figur 4.1). En 'ideal' jord i kritisk tilstand er udelukkende afhængig af hulrumforholdet (e) og den effektive middelspænding (p') (figur 4.1a). Sammenlignet med en tilsvarende 'struktureret' jord har denne en højere styrke og stivhed end 'ideal' jorden (figur 4.1b) grundet indhold af mikrostruktur. Ved større spændinger vil effekten af mikrostrukturen blive ødelagt, hvorefter jorden vil falde til den kritiske tilstand.



Figur 4.1: Arbejdskurver for 'ideal' og 'struktureret' jorde (Robertson 2016a).

Anvendelse af de empiriske klassifikationsmetoder og korrelationer i jorde, der hverken er unge eller uhærdnede, vil resultere i fejltolkninger. Det er derfor vigtigt at identificere jorde med mikrostruktur for en optimal klassifikation (Robertson 2016a).

4.2.2 Plasticitet

Idriss & Boulanger (2006) definerede, at 'ideal' jords opførsel klassificeres ud fra plasticitetsindekset (PI) som enten sandlignende eller lerlignende. Klassifikationen tager udgangspunkt i, om en jord vil opnå en flydende tilstand ('liquefaction') ved cyklisk belastning, hvorved der sker et væsentlig styrketab i jorden.

På baggrund af ovenstående betragtning kan jord opdeles i 3 overordnede grupper:

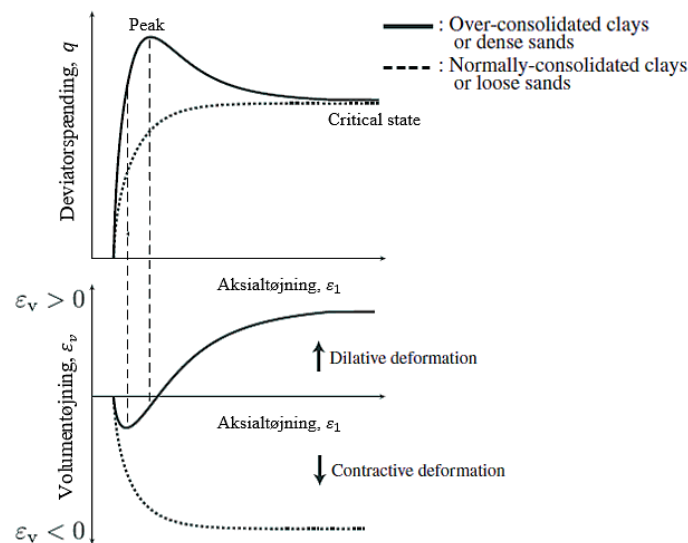
- Sandlignende jorde ($PI < 10\%$)
 - Grovkornet materiale kan opnå cyklisk belastning, hvor de effektive spændinger vil være lig nul. Under den cykliske belastning opnås store positive poretryk grundet jordens kontraktive respons (jf. afsnit 4.2.3), samt store deformationer opnås pga. materialets manglende plastiske egenskaber.
- Lerlignende jorde ($PI > 18\%$)
 - Finkornet materiale kan ikke opnå cyklisk belastning pga. dets plastiske egenskaber. Under den cykliske belastning vil deformationerne generelt være meget små.
- Overgangslignende jord ($10\% < PI < 18\%$)
 - Jordprøver bør udtages for yderligere undersøgelser (Robertson 2016b).

4.2.3 Spænding-tøjning relation

Udgangspunktet for volumenændringer i kritisk tilstand er, at jord er i stand til at ændre volumen ved omstrukturering af korn, når udsat for forskydningspåvirkning. Volumenændringerne betegnes 'dilatancy' og er dybt afhængig af den givne jords tilstand:

- For friktionsmateriale beskrives volumenændringen ved den relative lejringstæthed (D_r) og afhænger af, om jorden er løs- eller fastlejret.
- For kohæsionsmateriale beskrives volumenændringen ved overkonsolideringsgraden (OCR) og afhænger af, om jorden er normalt- eller forkonsolideret.

Nedenstående spænding-tøjning relation (figur 4.2) er baseret på forsøg udført i forskellige jorde, hvori det blev vist, at lers in-situ opførsel i store træk kunne sammenlignes med sands opførsel, afhængigt af tilstanden.



Figur 4.2: Spænding-tøjning relation (Yuki Yamakawa 2009).

Af figur 4.2 ses, at fastlejret sand og forkonsolideret ler vil dilatere, når udsat for forskydningspåvirkning. Dette sker, fordi kornene i deres tætpakkede tilstand er forhindret i at flytte sig ift. hinanden. Når jorden forskydningspåvirkes, vil der ske en 'løfte-bevægelse' mellem nabokornene, således at disse lejres ovenpå hinanden, hvilket resulterer i en volumenudvidelse (dilatation) og negative poretryk. Derimod vil løslejret sand og normalt konsolideret ler kontrahere og generere positive poretryk. Alle jorde vil undergå en initial kontraktion, hvormed øget forskydningspåvirkninger kan ændre denne opførsel. OCR har afgørende betydning for lers volumenændringer, hvor bl.a. mineralogien og kemisk diagenese har stor betydning for udfaldet.

Spænding-tøjning relationen gør sig gældende for let forkonsoliderede leraflejringer og korrigerer ikke for cementeringens indflydelse på stærkt forkonsoliderede leraflejringer in-situ opførsel (Yuki Yamakawa 2009).

Når stærkt forkonsoliderede aflejringer forskydes forbi deres 'peak' styrke, vil de udvise 'strain softening' adfærd, der betyder, at interaktionen mellem de cementerede partikler ikke længere vil kunne generere den nødvendige modstand. Som følge heraf, vil der ske et volumentab i brudzonen (mikrostruktur ødelægges), hvilket resulterer i en kontraktiv opførsel og positive poretryk.

I de plastiske lere ($PI > 50\%$) vil forskydningspåvirkningen samtidig få de løse pladeformede lerpartikler til at orientere sig i samme retning. Dette kommer til udtryk af de blanke glideflader, der ofte ses i de palæogene leraflejringer. Som konsekvens heraf vil lerets forskydningsstyrke reduceres til residualstyrken ved store forskydningspåvirkninger. Denne volumenændring vil ske uden materialet har undergået større deformationer.

Tilstedeværelsen af blanke glideflade i de palæogene leraflejringer er en indikator på ugunstige geotekniske egenskaber som bl.a. ringe styrke- og stivhedsegenskaber samt stort kvældepotentiale (Galsgaard 2020).

På baggrund af det teoretiske grundlag henføres de palæogene leraflejringer til kategorien 'strukturerede' jorde og besidder dermed en form for mikrostruktur. Tilmed forventes det, at aflejringeres klassifikation vil variere afhængig af graden af mikrostruktur i jorden.

Den omtalte teori kommer til udtryk af det opstillede $Q_{tn} - U_2$ -diagram, der vil blive redegjort for i afsnit 4.3.4.2.

4.3 Metodeudvikling

I forprojektet (bilag 1 – delafsnit 3.4) blev retningslinjerne (ISSMFE) for CPT-sondens udformning og anvendelse listet. Det er fundamentalt, at disse efterleves, så CPT-forsøg udføres ens.

En struktureret jords in-situ opførsel er kompleks og afhænger af mange flere parametre, end hvad der gør sig gældende for den ideelle jord. Dette understøtter behovet for en omfattende klassifikation, hvori de mange forskellige aspekter af en jords in-situ opførsel fanges. Som et led heri bør in-situ forsøg involvere så mange målinger som muligt.

Af tabel 4.1 fremgår en oversigt over parametermålingerne ved de forskellige CPT-forsøg. De målte parametre skal være behjælpelige med at skabe et simpelt og troværdigt klassifikationssystem, der kan rumme mange forskellige slags jorde og derved bidrage til at tyde jorde, der adskiller sig fra det 'ideelle'.

Målinger:	CPT	CPTu	SCPTu
Spidsmodstand (q_t)	✓	✓	✓
Kappemodstand (f_s)	✓	✓	✓
Poretryk (u_2)	✗	✓	✓
Inklinometer (i)	✓	✓	✓
Tidsfaktor for $U = 50\%$ (t_{50})*	✗	✓	✓
In-situ poretryk (u_0)*	✗	✓	✓
Forskydningshastighed (V_s)	✗	✗	✓

Tabel 4.1: Oversigt over parametermålinger ved CPT, CPTu & SCPTu.

* u_0 og t_{50} udføres ved stop af forsøg ifm. PPDT – jf. bilag 1 – delafsnit 7.5.

Ideelt set bør ethvert klassifikationssystem inkludere alle af de ovenstående målinger for at være effektivt. I tilfælde af at alle målinger ikke foretages, er anvendeligheden begrænset til 'ideal' jorde, og klassifikationen kan kun bruges som vejledende og til at belyse tendenser i 'strukturerede' jorde (Robertson 2016a).

I de følgende underafsnit beskrives, hvordan viden om jords in-situ opførsel implementeres i SBT-klassifikationen. Udgangspunktet er det nyeste led i metodeudviklingen; SCPTu.

4.3.1 Seismisk CPTu

Seismic Cone Penetration Test (SCPT/SCPTu) er udviklet med henblik på at fastlægge jords forskydningsmodul ved små tøjninger (G_0) (figur 4.4), ud fra måling af jords forskydnings hastighed (V_s). Dette skal ses i relation til bedre at kunne identificere mikrostruktur.

SCPTu-sonden er en CPTu-sonde, hvorpå der er tilføjet én eller flere seismiske sensorer, der registrerer de udsendte bølger, genereret ved jordoverfladen af en hammer (figur 4.3). Hammerforsøget udføres én gang pr. meter og sammenholdes med gennemsnitsværdier af de kontinuert målte parametre. Forsøget placeres 1,0-2,0 meter fra udgangspunktet. Sammenfaldende med forsøget kan der passende udføres PPDT.

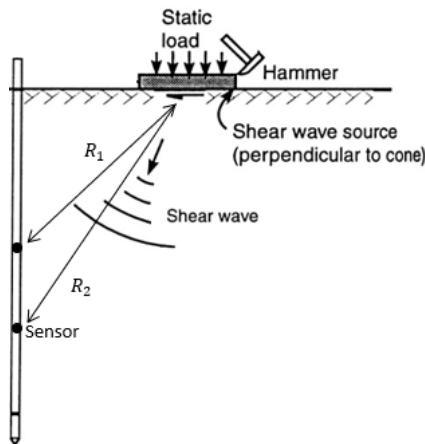
I takt med at sensorerne registrerer de seismiske bølger, transporteres data fra sonden til jordoverfladen gennem strenge, der løber inde i trykstængerne. Herfra fastlægges V_s , der beskriver hastigheden på de seismiske bølger fra de genereres, til de registreres af sensorerne.

V_s beregnes som følgende:

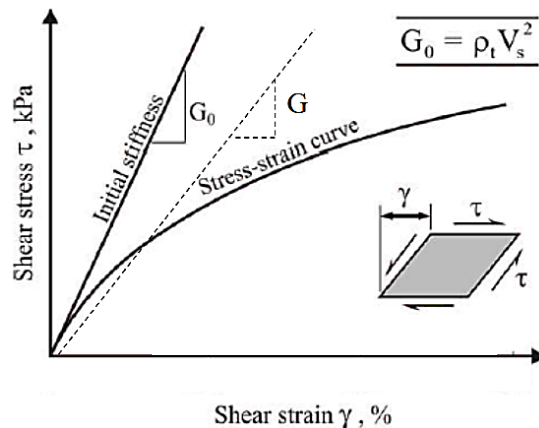
$$V_s = \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \tag{4-1}$$

Hvor:

- R_1 og R_2 er længden fra de genererede seismiske bølger i terræn til sondens seismiske sensorer.
- T_1 og T_2 er tiden det tager for de genererede seismiske bølger at nå sensorerne i jorden.



Figur 4.3: SCPT-sonde og setup (Robertson 1997).



Figur 4.4: Forskydningsmodul ved små tøjninger (Robertson 2014).

På baggrund af V_s kan G_0 fastlægges ud fra følgende:

$$G_0 = V_s^2 \cdot \rho \quad ; \quad \rho = \frac{\gamma}{g} \tag{4-2}$$

Elasticitetsteorien definerer en sammenhæng mellem Young's modul (E_0) og G_0 :

$$E_0 = 2 \cdot G_0 \cdot (1 + \nu) \tag{4-3}$$

Hvor ν er 0,1-0,3 for jord (Robertson 2014).

Deformationsparametrene anvendes ved SLS-beregninger ifm. dimensionering.

4.3.2 Identifikation af mikrostruktur vha. SCPTu

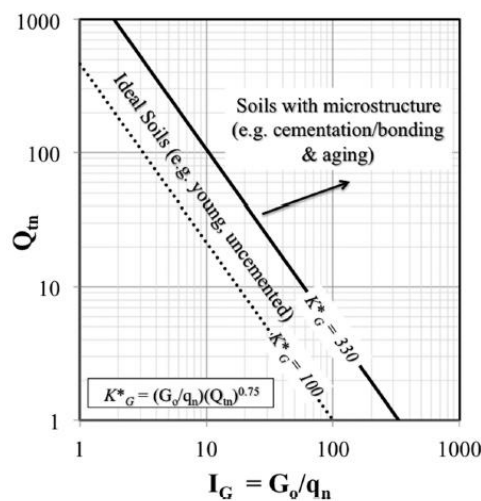
Robertson (2015) påpegede et potentiale i at identificere mikrostruktur ved måling af:

- Jords normaliserede spidsmodstand (q_t) – styret af 'peak' forskydningsstyrke.
- Jords forskydningshastighed (V_s) – styret af stivhed ved små tøjninger.

Potentialet kom af en relation mellem Q_{tn} (formel 4-7) og stivhedsindekset $I_G = \left(\frac{G_0}{q_t}\right)$, der blev bevist af Robertson (1996) og eftervist af Schnaid (2009). Relationen kan anvendes i både sand- og lerjorde, og er defineret som et modificeret, normaliseret stivhedsindeks ved små tøjninger:

$$K_G^* = \left(\frac{G_0}{q_n}\right) \cdot (Q_{tn})^{0,75} \quad ; \quad q_n = (q_t - \sigma_{v0}) \quad (4-4)$$

K_G^* angiver den empiriske skillelinje mellem 'ideal' og 'struktureret' jord (figur 4.5).



Figur 4.5: Identificering af jorde med mikrostruktur (Robertson 2016a).

Det ses af figur 4.5:

- Hvis $K_G^* \leq 330$, er jorden 'ideel' og besidder derfor meget lidt til ingen mikrostruktur.
 - De hidtidige SBT-diagrammer (1986-2010) kan passende anvendes, evt. med lokale modifikationer.
- Hvis $K_G^* > 330$, er jorden 'struktureret' og besidder dermed mikrostruktur.
 - Modificeret SBTn (2016) bør anvendes, evt. med lokale modifikationer (Robertson 2016a).

4.3.3 SBTn-diagrammer (1986-2016)

Gennemgangen af SBT-diagrammets udvikling omfatter det mest anvendte diagram i praksis; suppleret med P. K. Robertsons forslag til en opførselsbaseret klassifikation ud fra in-situ egenskaber (afsnit 4.2).

4.3.3.1 SBTn-diagram (Robertson, 1986-2010)

Det første SBT-diagram *Robertson (1986)* var baseret på ikke-normaliserede parametre (q_c, R_f) samt opbygget ud fra USCS-kategoriseringer. For at tage højde for overlejringsstrykkets betydning, normaliserede *Robertson (1990-2010)* SBT-diagrammet (figur 4.6 og 4.7).

De normaliserede parametre er som følger:

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \tag{4-5}$$

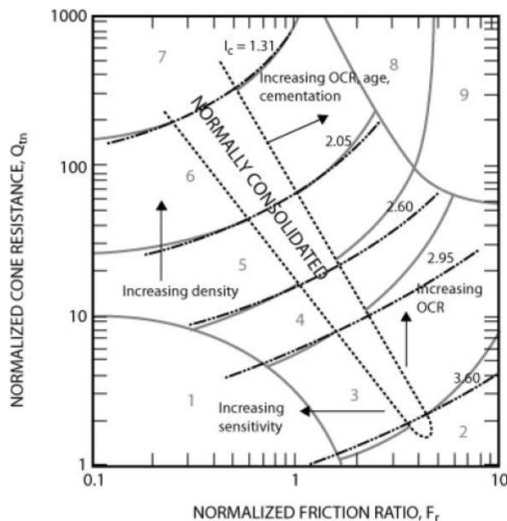
$$F_r = \frac{f_s}{Q_t} \tag{4-6}$$

Den normaliserede spidsmodstand udtrykkes ved spændingsekspONENTEN (n):

$$Q_{tn} = \left(\frac{q_t - \sigma_{v0}}{p_a} \right) \cdot \left(\frac{p_a}{\sigma'_{v0}} \right)^n \tag{4-7}$$

I de fleste finkornede jordarter, hvor $I_c > 2,6$, vil $n \sim 1$, og heraf medføre at $Q_{tn} \sim Q_t$. SpændingsekspONENTEN er derfor kun gældende for sandaflejringer, og er defineret ved:

$$n = 0,381 \cdot I_c + 0,05 \cdot \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right) - 0,15 \quad ; \text{ hvor } n \leq 1 \tag{4-8}$$



Figur 4.6: Normaliseret SBTn-diagram (Robertson 1990, opdateret Robertson 2010).

Zone	Soil Behavior Type	I_c
1	Sensitive, fine grained	N/A
2	Organic soils – clay	> 3.6
3	Clays – silty clay to clay	2.95 – 3.6
4	Silt mixtures – clayey silt to silty clay	2.60 – 2.95
5	Sand mixtures – silty sand to sandy silt	2.05 – 2.6
6	Sands – clean sand to silty sand	1.31 – 2.05
7	Gravelly sand to dense sand	< 1.31
8	Very stiff sand to clayey sand*	N/A
9	Very stiff, fine grained*	N/A

Figur 4.7: Zoneinddeling. N/A = ikke tilgængelig (Robertson 1990).

Jordtyperne zoneinddeles ud fra jordtypeindekset (I_c), givet ved:

$$I_c = ((3,47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1,22)^2)^{0,5} \tag{4-9}$$

I_c gælder ikke for zonerne 1, 8 og 9, da de ikke følger den samme koncentriske inddeling.

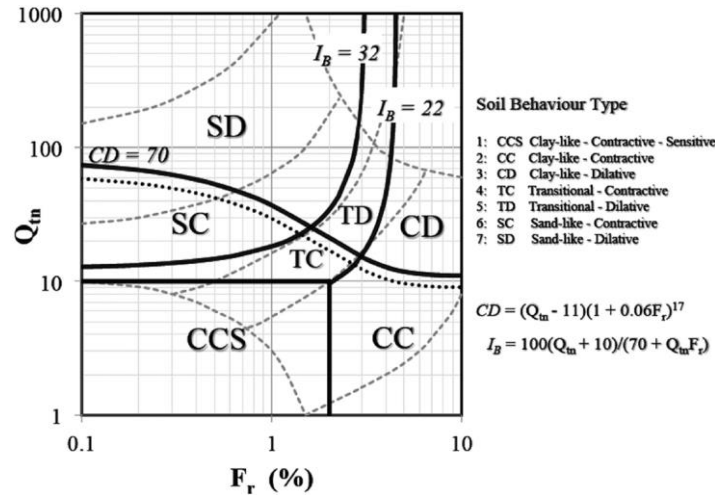
SBTn kan være behjælpelig med at identificere generelle tendenser i 'struktureret' jord som øgende OCR, alder, hærtningsgrad, densitet og sensitivitet. Overlap af zoner kan forekomme, hvorfor modifikationer ud fra lokal geologi bør foretages (Robertson 1997).

4.3.3.2 SBTn (Robertson, 2016)

I forlængelse af SBT-diagrammets udvikling (1986-2010) samt *Schneiders SBTn fra 2012 (ikke medtaget)* udarbejdede *Robertson (2016)* et nyt, modificeret SBTn-diagram. Metodeudviklingen afspejles tydeligt i diagrammet (figur 4.8); CD-grænsen opdeler efter, om jord vil dilatere eller kontrahere, og er defineret ved:

$$CD = 70 = (Q_{tn} - 11) \cdot (1 + 0,06 \cdot F_r)^{17} \tag{4-10}$$

Det ses, når $CD > 70$ vil en 'ideal' jord dilatere:



Figur 4.8: Opdateret SBTn-diagram Q_{tn} - F_r (Robertson 2016a).

Diagrammet er zoneinddelt (fede linjer) ud fra et modificeret jordtypeindeks (I_B):

$$I_B = 100 \cdot \frac{Q_{tn} + 10}{(Q_{tn} \cdot F_r + 70)} \tag{4-11}$$

I_B repræsenterer inddelingen ud fra sand-, overgangs- og lerlignende 'ideal' jorde (jf. underafsnit 4.2.2):

- $I_B > 32$ angiver grænsen for sandlignende-jorde ($PI < 10\%$).
- $22 < I_B < 32$ angiver intervallet for overgangslignende-jorde ($10\% < PI < 18\%$).
- $I_B < 22$ angiver grænsen for lerlignende-jorde ($PI > 18\%$).

Diagrammet indeholder mange af de samme træk som SBTn (2010); sammenlignes de 2 diagrammer kan mange tendenser for 'ideal' jorde i kritisk tilstand defineres ud fra CD-egenskaberne:

- Ler vil gå fra kontraktiv til dilatativ opførsel ved $Q_{tn} \sim 10$.
- Sand vil gå fra kontraktiv til dilatativ opførsel ved $Q_{tn} \sim 30$.
- Sensitive leraflejringer, hvor $Q_{tn} < 10$ og $F_r < 2$, vil kontrahere.
- Overgangslignende jord vil dilatere ved stigende Q_{tn} og F_r og kontrahere ved aftagende Q_{tn} og F_r .

Diagrammet er gældende for jorde med lidt til ingen mikrostruktur. I tilfælde af at ingen valide poretrykmålinger foreligger kan diagrammet være behjælpelig, da $q_c \sim q_t$ for de fleste jorde med undtagelse af finkornet jordarter med $Q_{tn} < 10$.

Ved stærkt cementerede jorde, hvor $U_2 > 4$, vil diagrammet ikke gælde og kan kun bruge til at belyse tendenser (Robertson 2016a).

4.3.4 SBTn- U_2 -diagrammer (1990-2016)

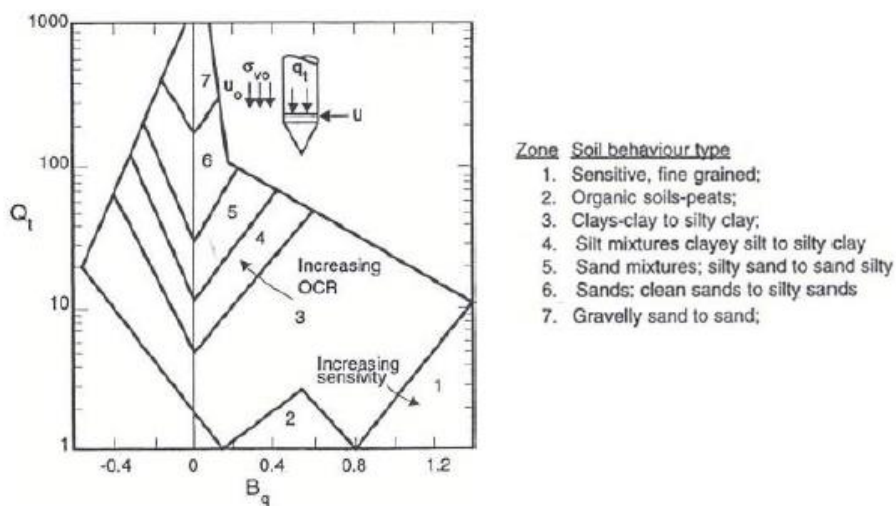
Ved CPTu/SCPTu kan jordklassificeringen forbedres vha. SBTn- Q_t - B_q (bilag 1 – underafsnit 6.2.1) og SBTn- $Q_{tn} - U_2$. Diagrammerne forudsætter, at jorden er vandmættet (under GVS, offshore), så valide poretryk målinger kan registreres.

4.3.4.1 SBTn- $Q_t - B_q$ -diagram (Robertson, 1990)

Sammenfaldende med udgivelsen af SBTn-diagrammet, fremlagde *Robertson 1990* et $Q_t - B_q$ -diagram (figur 4.9), hvor jordtypen kan fastlægges ud fra den normaliserede poretrykparameter (B_q) og Q_t . B_q bestemmes som følgende:

$$B_q = \frac{\Delta u}{q_t - \sigma_{v0}} \quad ; \quad \Delta u = u_2 - u_0 \quad (4-12)$$

Diagrammet kan forbedre karakteriseringen af sensitive, finkornede aflejringer, hvor de overskydende poretryk kan være store.



Figur 4.9: SBTn- Q_t - B_q -diagram (Robertson, 1990).

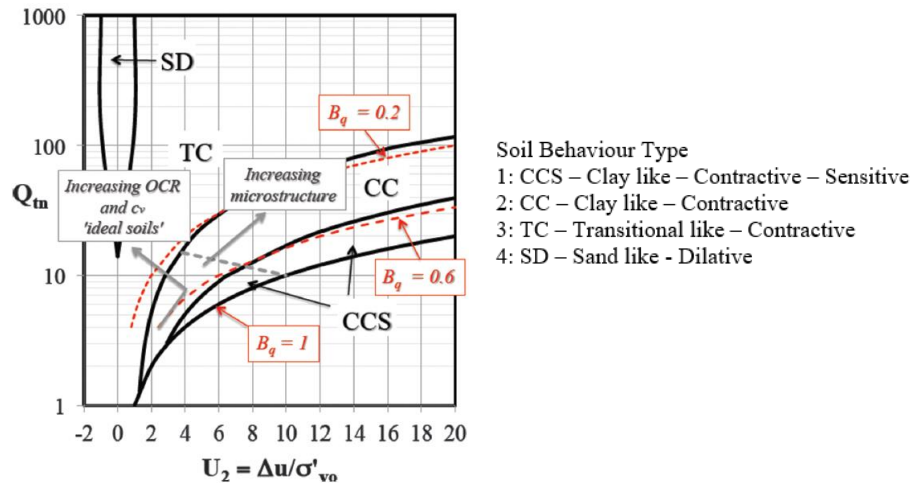
I samspil med SBTn (2010) kan diagrammet bruges til at identificere øgende OCR og sensitivitet for kohæsiive 'ideal' jorde (Robertson 2015).

Diagrammet vil ikke blive brugt i nærværende projekt.

4.3.4.2 SBTn- U_2 -diagram – Schneider (2012), modificeret af Robertson (2016)

Robertson (2016) tilpassede det tidligere Q_{tn} - U_2 -diagram - opstillet af Schneider (2012 (ikke medtaget)) - til in-situ egenskaberne; anvendt ved $Q_{tn} - F_r$ (2016).

Det modificerede Schneider Q_{tn} - U_2 -diagram (figur 4.10) er mest anvendeligt i lerlignende aflejringer, eftersom U_2 vil være lig 0 grundet et hydrostatisk tryk i sandlignende aflejringer.



Figur 4.10: Opdateret Q_{tn} - U_2 -diagram (Schneider et al, 2012).

Det normaliserede poretryk (U_2) er defineret ved:

$$U_2 = \frac{\Delta u}{\sigma'_{vo}} \quad ; \quad \Delta u = u_2 - u_0 \quad (4-13)$$

U_2 reflekterer direkte jords opførsel ved penetrering af sonden. Generelt reflekterer positive U_2 -værdier en kontraktiv opførsel, og negative U_2 -værdier reflekterer en dilatativ opførsel.

Q_{tn} - U_2 -diagrammet benytter B_q som zoneinddeling, hvor:

- $0,2 < B_q < 0,6$ indikerer lerlignende, kontraktive jorde (CC).
- $0,6 < B_q < 1,0$ og $Q_{tn} > 4$ indikerer lerlignende, kontraktive, sensitive jorde (CCS).

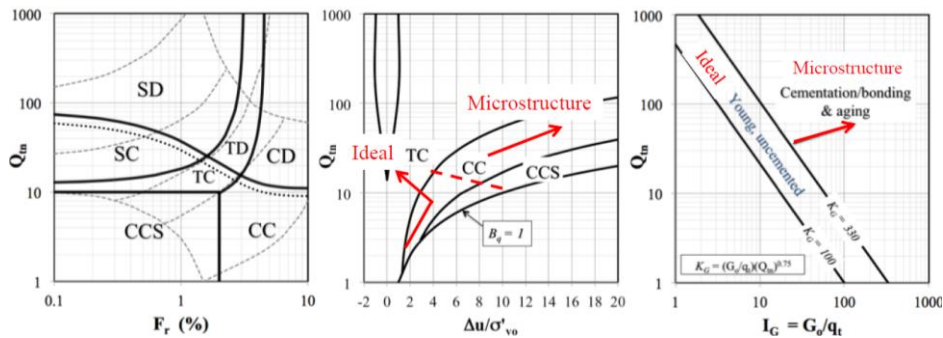
Tilmed kan følgende tendenser betragtes:

- $Q_{tn} = 12$ og $U_2 = 4$ definerer i store træk skillegrænsen for en jord med og uden mikrostruktur.
 - Ved $Q_{tn} > 12$ og $U_2 < 4$ klassificeres jorden som 'ideal' jord med stigende OCR og c_v .
 - Ved $Q_{tn} > 12$ og $U_2 > 4$ samt $0,2 < B_q < 0,6$ klassificeres jorden som 'struktureret' jord. De positive poretryk genereres som følge af den kontraktive respons, der sker, når strukturen ødelægges ved penetrering, som omtalt i afsnit 4.2.3 (Robertson 2016a).

Det ovenstående $Q_{tn} - U_2$ -diagram bygger på indsamling af data fra SCPTu-forsøg udført i forskellige 'strukturerede' jorde i udlandet. To af disse forsøg vil blive analyseret i delafsnit 5.2, hvortil paralleller kan drages til de palæogene leraflejringer i Aarhus.

4.3.5 Fremgangsmåde for klassifikation ud fra opførselsbaserede egenskaber

Metodeudviklingen afspejles i de modificerede SBTn-diagrammer (figur 4.11).



Figur 4.11: Kombination af de tre klassifikationsdiagrammer (Robertson 2016a).

Udviklingen bør ikke erstatte grundlæggende viden om undersøgelsesområdets geologi, og enhver SBT-klassifikation bør være en kombination af empiri og geologisk baggrundsviden.

Ideelt bør alle 3 diagrammer anvendes for at opnå en optimeret jordklassifikation. I tilfælde af at der er udført SCPTu, bør I_G -diagrammet til enhver tid anvendes som det første led i at identificere mikrostruktur ($K_G^* > 330$).

Den forestående analyse bygger dog kun på CPTu-forsøg, hvilket betyder, at klassifikationen baseres på normaliserede parametre. Fremgangsmåden er som følger:

- Grovkornede aflejringer:
 - Klassifikation ud fra CD-egenskaber i Q_{tn} - F_r -diagrammet bør gælde.
 - Ved 'ideal' jord bør SBTn (1986-2010) tilmed være gældende.
 - Ved 'struktureret' jord bør lokale modifikationer foretages.
- Normalt konsoliderede til let forkonsoliderede aflejringer:
 - Klassifikation ud fra CD-egenskaber i Q_{tn} - F_r -diagrammet bør gælde.
 - Q_{tn} - U_2 kan anvendes under forudsætning af valide poretrykmålinger.
 - Ved 'ideal' jord bør SBTn (1986-2010) tilmed være gældende.
- Let til stærkt forkonsoliderede aflejringer:
 - SBTn (2016) kan anvendes med henblik på at identificere tendenser:
 - Under forudsætning af valide poretrykmålinger er Q_{tn} - U_2 bedst anvendeligt til identificering af mikrostruktur i lerjorde.
 - Hvis ingen valide poretrykmålinger foreligger er Q_{tn} - F_r bedst anvendeligt, da $q_c \sim q_t$ for de fleste jorde (jf. afsnit 4.3.3.2).
 - Lokale modifikationer bør foretages (Robertson 2016a).

De aarhusianske palæogene leraflejringer er stærkt forkonsoliderede, hvorfor mikrostruktur vil være tilstede i aflejringerne. Dette besværliggør klassifikationen alene ud fra SBTn og CPTu. Dermed er det med udgangspunkt i kendskab til sedimentgeologi nødvendigt at identificere tendenser for, hvordan aflejringerne vil opføre sig i SBTn (2010) og SBTn (2016).

5. Forventede korrelationer mellem geologi og SBT

Det forestående afsnit søger at redegøre for forventede korrelationer mellem geologisk kendskab til de aarhusianske palæogene leraflejringer og SBTn (2010-2016).

5.1 Generelt

In-situ opførslen af de aarhusianske palæogene leraflejringer i SBTn (2016) er et forholdsvis uberørt emne. Med henblik på at kunne optimere tolkningsarbejdet af disse aflejringer, er det fordelagtigt at udbygge kendskabet til $Q_{tn}-U_2$. Dette skal ses i relation til at få en bedre forståelse for skillegrænsen ($Q_{tn} = 12$ og $U_2 = 4$), der i store træk definerer, om en jord besidder mikrostruktur.

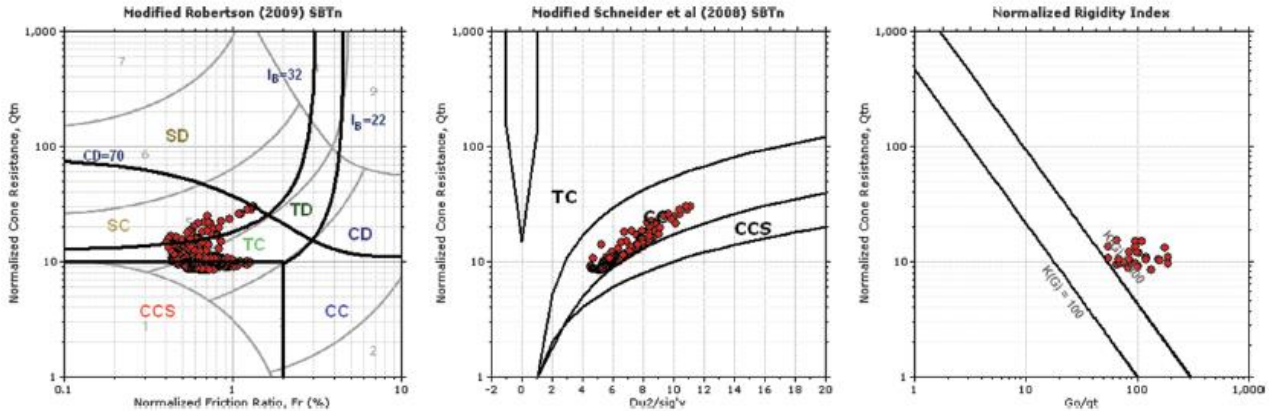
5.2 Case-studier

På dette grundlag inddrages 2 case-studier, der omfatter SCPTu-forsøg i:

- Cooper Marl (South Carolina (USA), 30-40 mio. år gammel), der er en plastisk ler, karakteriseret som stærkt kalkholdig med gennemsnitsværdier på 60-80% (Benedetto 2005).
- Gault Clay (Cambridge (UK), 66-110 mio. år gammel), der er en stærkt sprækket, plastisk ler, karakteriseret ved et kalkindhold på op til 30% (Simons 2004).

Af figur 5.1 fremgår det, at mergelen er stærkt cementeret ($K_G^* > 330$). Det ses af $Q_{tn}-U_2$ -diagrammet, at mergelen viser tegn på kontraktiv respons og positive poretryk, som resultat af øgende cementering (mikrostruktur) stammende fra dens høje kalkindhold.

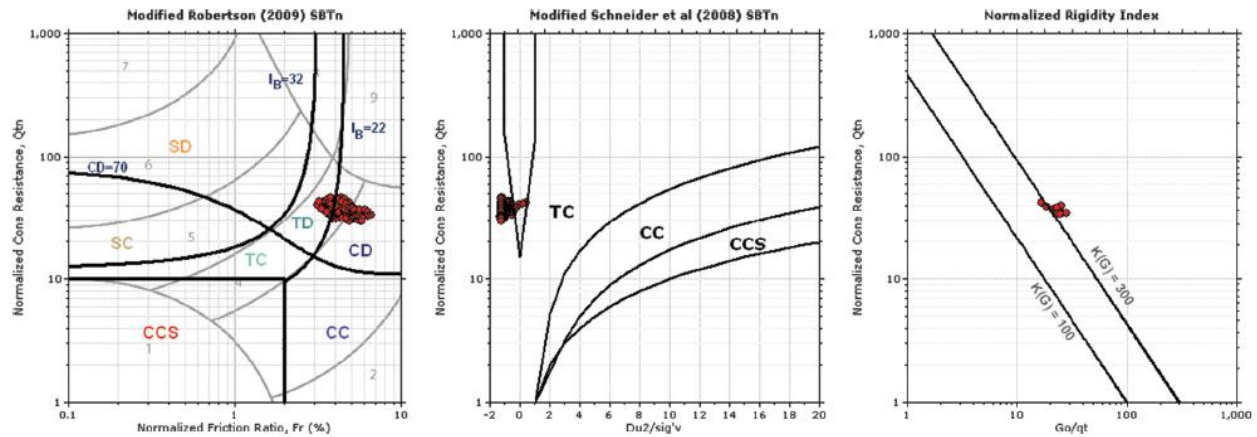
Mergelen klassificeres som en 'struktureret' jord og vurderes derfor ikke sammenlignelig med den type jord, som spænding-tøjning relationen afspejler (jf. figur 4.2).



Figur 5.1: SCPTu forsøg (22,0-50,0 mut) i Cooper Marl (Robertson 2016a).

Sammenholdes mergelen med Gault Clay ses det (figur 5.2), at leret vurderes som svagt cementeret ($K_G^* \leq 330$) som et resultat af dets betydeligt lavere kalkindhold. Af $Q_{tn}-U_2$ fremgår det, at leret viser overvejende dilatativ respons og små til negative poretryk ved penetrering, hvilket resulterer i en klassifikation som 'ideal' jord (Robertson 2016a).

Leret vurderes mere sammenlignelig med den type jord, som spænding-tøjning relationen afspejler (jf. figur 4.2).



Figur 5.2: SCPTu-forsøg (2,0-12,0 mut) i Gault Clay (Robertson 2016a).

På baggrund af ovenstående tendenser for de stærkt forkonsoliderede leraflejringer kan det formodes, at kalkindholdet er af afgørende betydning for den opførselsbaserede klassifikation.

Ud fra case-studiet i Gault Clay tyder det tilmed på, at en forkonsolideret ler skal være ret kalkholdig ($Ka > 30\%$), før den klassificeres som cementeret, hvorfor skillegrænsen ($Q_{tn} = 12$ og $U_2 = 4$) forventes ret høj for de palæogene leraflejringer. Det kunne give en indikation på, at hverken Viborg- eller Moesgård leret samt dele af Kysing- og Søvindmergelen vil blive klassificeret som cementeret.

Det er en antagelse, der bør understøttes, eftersom sprækkestrukturer også vil have indflydelse på nedpresningsmodstanden og klassifikationen (berøres i afsnit 6.2.3).

Aflejringerne vil blive brugt til at opstille hypoteser for in-situ opførslen af de aarhusianske palæogene leraflejringer i delafsnit 5.4.

5.3 Lokale undersøgelser

Undersøgelser i Aarhus by- og havneområde (udført af GEO) har vist, at Søvindmergel Formationens geotekniske egenskaber varierer usædvanligt meget som resultat af tilsvarende store variationer i formationens kalkindhold. Hertil blev plasticitetsindekset undersøgt, der viste variationer mellem 50% (stærkt kalkholdigt, $ka \sim 65\%$) og 200% (kalkfrit, $ka \sim 1\%$) med en middelværdi på ca. 105% (kalkholdigt til stærkt kalkholdigt, $ka \sim 30\%$), hvorfor mergelen altid karakteriseres som meget fed, plastisk ler – uanset kalkindholdet. Undersøgelserne dokumenterede en invers korrelation mellem mergelens plasticitetsindeks og kalkindhold (Okkels 2009).

På baggrund af undersøgelserne forventes det, at de store variationer i formationens kalkindhold vil blive reflekteret i den målte CPTu-data, hvilket vil resultere i en stor spredning af klassifikationen i SBTn (2010-2016).

5.4 Hypoteser

Med afsæt i de belyste case-studier og lokale undersøgelser foretaget i Aarhus by- og havneområder samt viden tilegnet i afsnittene 2 - 4 kan hypoteser for de fire palæogene aflejrings klassifikation opstilles:

- Aflejringerne forventes stærkt forkonsoliderede ($OCR > 4$).
- Viborg- og Moesgård leret forventes at opføre sig magen til hinanden:
 - Aflejringerne er kendetegnet ved at være meget homogene og kalkfattige- til holdige med høje plasticitetsindekser.
 - Aflejringerne forventes at besidde lidt til ingen mikrostruktur i $Q_{tn}-U_2$, hvilket vil resultere i en 'SD'- eller 'TC'-klassifikation og $U_2 \leq 4$.
 - Aflejringerne vil klassificeres som overvejende 'ideal' jord, hvortil det formodes, at $K_G^* \leq 330$.
- Kysing- og Søvindmergelen forventes at opføre sig magen til hinanden:
 - Aflejringerne er kendetegnet ved at være meget inhomogene som resultat af et varierende kalkindhold og høje plasticitetsindekser.
 - Det varierende kalkindhold og plasticitetsindeks forventes reflekteret som "flimmer" i rådata, hvilket vil resultere i en stor spredning af klassifikationen i SBTn (2010-2016).
 - Aflejringerne forventes at besidde lidt til meget mikrostruktur i $Q_{tn}-U_2$, hvilket vil resultere i en 'CC'- eller 'TC'-klassifikation og $U_2 > 4$.
 - Aflejringerne vil klassificeres som 'struktureret' jord, hvortil det formodes, at $K_G^* > 330$.
 - Udfald i Søvindmergelens klassifikation vil forekomme ved dybere sonderinger, eftersom laget har stor tykkelse og er stærkt lagdelt (jf. afsnit 3.1.2.2).

Den forestående tolkning i afsnit 7 foretages udelukkende på baggrund af CPTu-forsøg, hvorfor K_G^* ikke kan fastlægges (jf. afsnit 4.3.2). På trods af dette er det stadig muligt at trække information ud af $Q_{tn}-U_2$ -diagrammet med henblik på at identificere mikrostruktur. Hertil kan en formodning om graden af mikrostruktur (K_G^*) foretages. Antagelserne er på den usikre side, og bør understøttes og verificeres af supplerende SCPTu-forsøg.

Klassifikationsmetoderne vil kategorisere aflejringerne på baggrund af graden af cementering og indhold af bikomponenter, hvorfor uoverensstemmelser mellem empiri og geologi forventes.

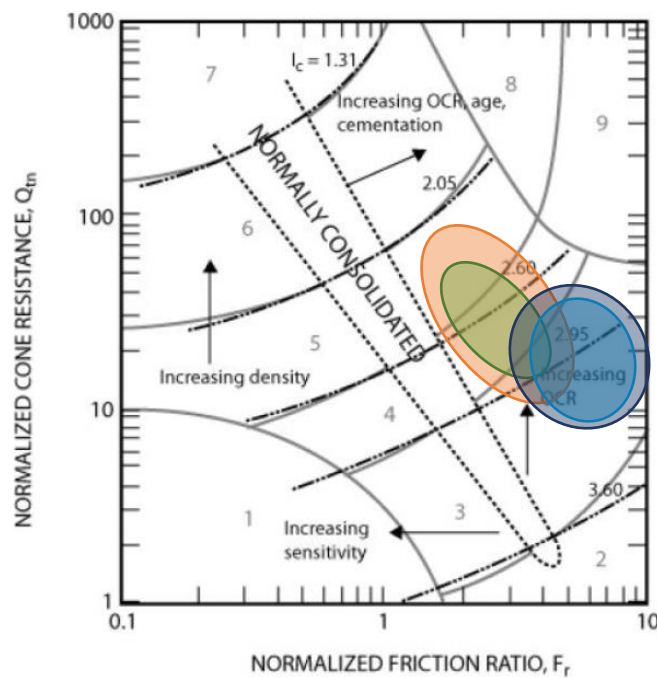
5.5 Forventet fordeling

I nærværende delafsnit er de ovenstående hypoteser vist i relation til klassifikationsdiagrammerne, hvortil den forventede fordeling fremgår.

Fordelingen er defineret ved følgende farver:

- Viborg ler
- Kysingmergel
- Moesgård ler
- Søvindmergel
- Alle fire palæogene aflejringer

Forventet fordeling i $Q_{tn}-F_r$ (2010) (figur 5.3):

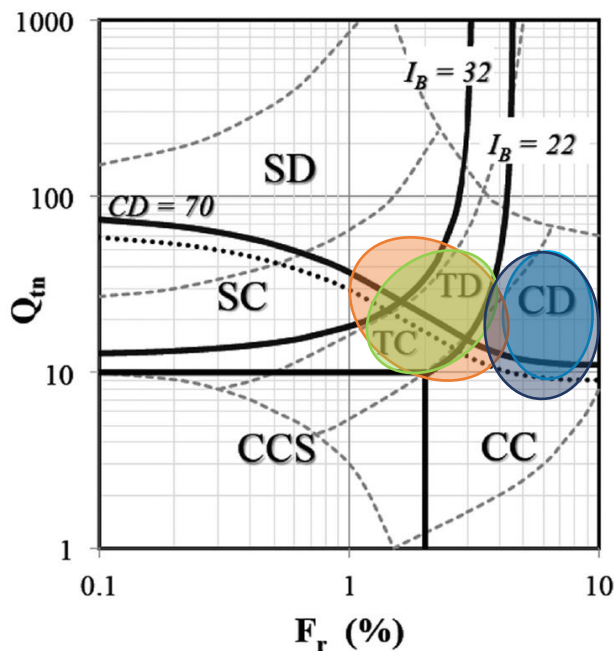


Figur 5.3: Forventet inddeling i $Q_{tn}-F_r$ (2010).

Følgende observationer forventes i $Q_{tn}-F_r$ (2010):	
●	Alle fire palæogene aflejringer vil have $I_c > 2,05$, hvor $2,05 < I_c < 2,95$ indikerer indhold af "silt" i lerjorden som et udtryk for et stort indhold af bikomponenter. Alle fire palæogene aflejringer vil plote over det normalt konsoliderede område ($OCR > 4$). For alle fire aflejringer vil $\varphi' \neq 0$ og $s_u \neq 0$.
●	Viborg leret vil klassificeres som 'siltet ler til ler' ($2,95 < I_c < 3,6$). Udfald vil forekomme.
●	Kysingmergelen vil klassificeres som 'leret silt til siltet ler' ($2,6 < I_c < 2,95$) og/eller 'siltet sand til sandet silt' ($2,05 < I_c < 2,6$). Udfald vil forekomme.
●	Moesgård leret vil klassificeres som 'siltet ler til ler' ($2,95 < I_c < 3,6$). Udfald vil forekomme.
●	Søvindmergelen vil klassificeres som 'leret silt til siltet ler' ($2,6 < I_c < 2,95$) og/eller 'siltet sand til sandet silt' ($2,05 < I_c < 2,6$). Udfald vil forekomme.

Figur 5.4: Forventede observationer i $Q_{tn}-F_r$ (2010).

Forventet fordeling i $Q_{tn}-F_r$ (2016) med opførselsbaserede beskrivelser (figur 5.5):



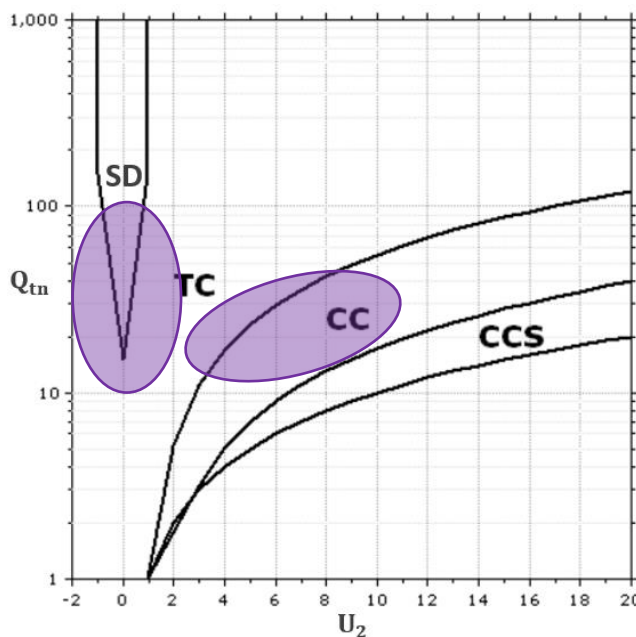
Figur 5.5: Forventet inddeling i Q_m-F_r (2016).

Følgende observationer forventes i $Q_{tn}-F_r$ (2016):	
●	CD-grænsen vil ikke være definitivt ift. at identificere in-situ opførslen af de fire palæogene leraflejringer. Aflejringerne vil ikke blive klassificeret som sensitive ($Q_{tn} < 10$ og $F_r < 2$).
●	Viborg leret vil klassificeres som 'CD' og/eller 'CC'; $I_B < 22$ og $PI > 18\%$.
●	Kysingmergelen vil klassificeres indenfor overgangszonen 'TC' og 'TD'; $22 < I_B < 32$ og $10 < PI < 18\%$. Udfald vil forekomme.
●	Moesgård leret vil klassificeres som 'CD' og/eller 'CC'; $I_B < 22$ og $PI > 18\%$.
●	Søvindmergelen vil klassificeres indenfor overgangszonen 'TC' og 'TD', $22 < I_B < 32$ og $10 < PI < 18\%$. Udfald vil forekomme.

Figur 5.6: Forventede observationer i $Q_{tn}-F_r$ (2016).

Diagrammet forventes bedst anvendeligt ved $q_c \sim q_t$ (jf. afsnit 4.3.3.2).

Foventet fordeling i $Q_{tn}-U_2$ (2016) (figur 5.7):



Figur 5.7: Forventet inddeling i $Q_{tn}-U_2$.

Følgende observationer forventes i $Q_{tn}-U_2$ (2016):

Viborg- og Moesgård leret vil have lidt til ingen mikrostruktur ($K_G^* \leq 330$), hvilket resulterer i en dilatativ ('SD') og/eller kontraktiv ('TC') opførelse.

Øgende U_2 forventes ved øgende kalkindhold.

Kysing- og Søvindmergelen vil have lidt til meget mikrostruktur ($K_G^* > 330$), hvilket resulterer i en kontraktiv ('CC') og/eller 'TC') opførelse.

Aftagende U_2 forventes ved aftagende kalkindhold.

Figur 5.8: Forventede observationer i $Q_{tn}-U_2$ (2016).

Diagrammet forventes bedst anvendeligt til identificering af mikrostruktur, under forudsætning af valide poretrykmålinger (jf. afsnit 4.3.4.2). På dette grundlag forventes uoverensstemmelser i klassificeringen af opførelseskarakteristika mellem $Q_{tn}-F_r$ og $Q_{tn}-U_2$.

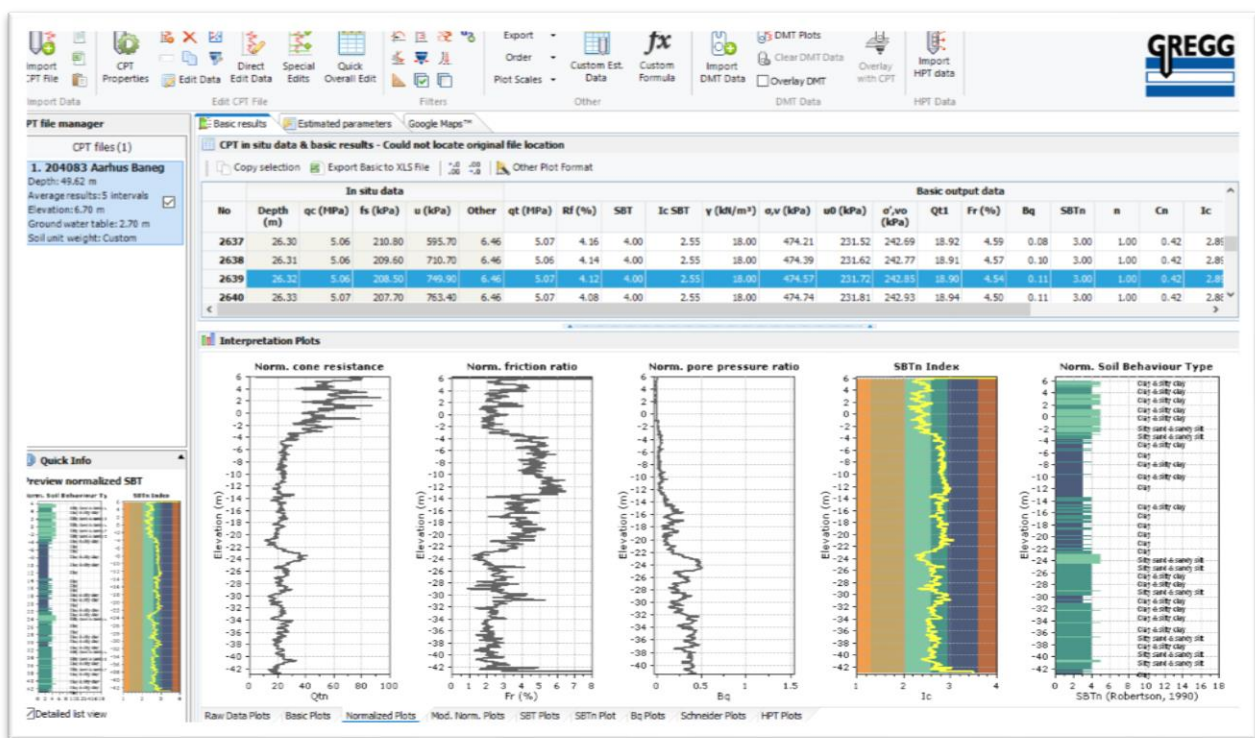
6. Manual til klassificering af palæogene lerarter i CPeT-IT

Nærværende afsnit udarbejdes med henblik på at:

- Udbygge kendskabet til software-programmet CPeT-IT og tolkningsmetoden.
- Fastlægge beregningsforudsætninger til klassificering i CPeT-IT.

På dette grundlag udformes afsnittet med henblik på at optimere klassifikationen af de aarhusianske palæogene lerarter i CPeT-IT for at be- eller afkræfte de opstillede hypoteser i afsnit 5.

Udgangspunktet tages i GeoLogismiki's brugermanual (v. 1.4) fra 2014 samt de foregående litteraturstudier, herunder forprojektet (bilag 1).



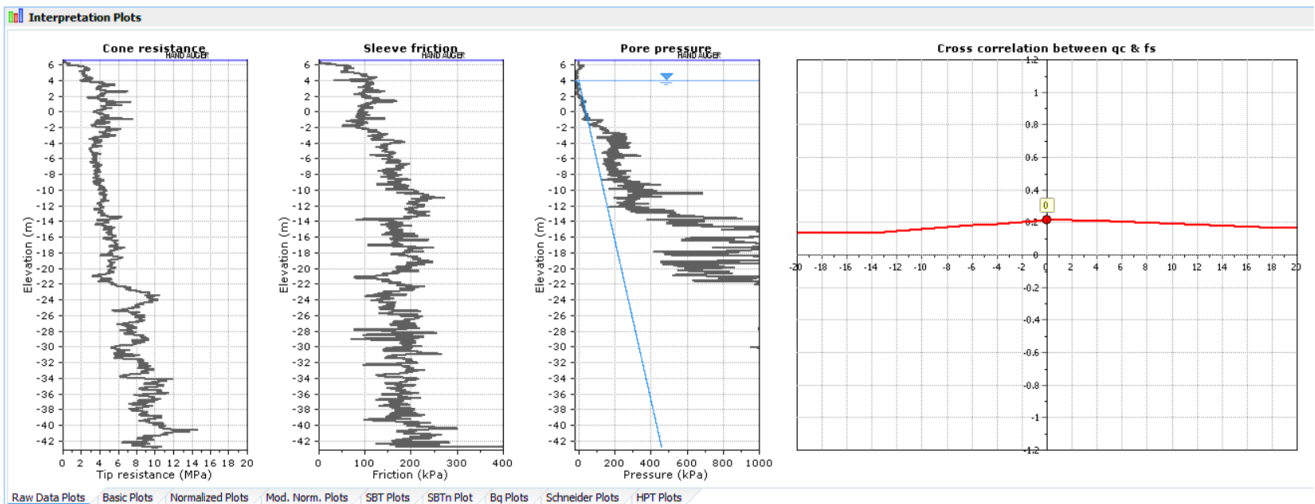
Figur 6.1: Udklip af programmet, CPeT-IT.

6.1 Databehandling i CPeT-IT

Det forestående delafsnit udfærdiges i forlængelse af forprojektet (bilag 1), hvori den overordnede brugerflade for software-programmet CPeT-IT blev gennemgået. Formålet med nærværende afsnit er at udbygge kendskabet til software-programmet CPeT-IT, således at en optimal klassifikation af de palæogene lerarter kan overskueliggøres ved fremtidige projekter.

6.1.1 Tilpasning af plots

Den CPTu-målte rådata overføres til behandling i CPeT-IT. Ved importering af data, vil programmet som default foretage en automatisk skala-tilpasning af de horisontale og vertikale akser for graferne. Softwaren tillader en manuel ændring af akserne, så udgangspunktet for visning af data i de geotekniske rapporter er ens.



Figur 6.2: Importeret rådata plottes.

Datasættet bør altid tjekkes for uregelmæssigheder inden tolkningen fortsættes. Uregelmæssigheder kan bl.a. komme til udtryk ved:

- Måling af q_c og f_s , eftersom sensorerne er placeret forskellige steder på sonden.
 - o *Cross correlation* skal være 0, dvs. der korrigeres for forskellen i dybden mellem sensorerne. Det er særligt relevant for inhomogene jorde, hvor variationerne i de mekaniske egenskaber er hyppige (f.eks. Kysing- og Søvindmergel).
- PPDT, hvor q_c og f_s vil falde betydeligt som resultat af, at nedpresningen stopper.
 - o *Spike Filter* kan let korrigeres for disse udfald ved at øge 'smoothing factor'.
- Anden placering af poretryksmåler end u_2 .
 - o *Pore Pressure Converter* kan foretage en teoretisk konvertering til u_1 -placeringen.

Efter at have tjekket for uregelmæssigheder indtastes beregningsforudsætningerne under 'CPT Properties' (GeoLogismiki 2014).

Beregningsforudsætningerne vil blive gennemgået i delafsnit 6.2 for de palæogene lerarter.

6.1.2 Brugerflade

Software er karakteriseret ved en overskuelig brugerflade, der gør det let at vælge det ønskede klassifikationssystem (figur 6.3). Den gennemgåede metodeudvikling (jf. delafsnit 4.3) afspejles tydeligt af brugerfladen, som tillader en hurtig sammenligning og differentiering mellem rådata og SBT-klassifikationsmetoderne.

Af figur 6.3 fremgår hvilke klassifikationsmetoder, der vil bidrage til klassifikationen af de palæogene aflejringer i afsnit 7.



Figur 6.3: De forskellige klassifikationsmetoder fremgår af brugerfladen i CPeT-IT.

6.1.3 Afledte parametre

Én af CPeT-IT-programmets klare fordele er inddragelsen af en række empiriske korrelationer til udledning af geotekniske parametre; præsenteret i bilag 1, afsnit 3.3.

På trods af de mange empiriske korrelationer, der er præsenteret i løbet af årene, benytter CPeT-IT dog kun én korrelation for hver afledt parameter. Der henvises til bilag 2 for en oversigt over de væsentligste afledte parametre for klassificering af de palæogene aflejringer styrke- og stivhedsforhold i CPeT-IT.

Det er vigtigt at understrege, at de empirisk afledte parametre er estimeret baseret på forsøg i 'ideal' jord, og anvendelsen af disse i 'struktureret' jorde gøres med stor usikkerhed, hvis ingen lokale modifikationer foretages.

Tilmed anbefales det ved projekter med stor risiko for personskaade og kollaps, at de afledte parametre anvendes udelukkende til screening med henblik på at evaluere og kortlægge kritiske områder. Hertil bør yderligere undersøgelser foretages på baggrund af konventionelle in-situ metoder som f.eks. lagfølgeboringer med jordprøver, suppleret med vingeforsøg og laboratorieforsøg.

6.1.4 Gennemgang af tolkningsarbejdet i CPeT-IT

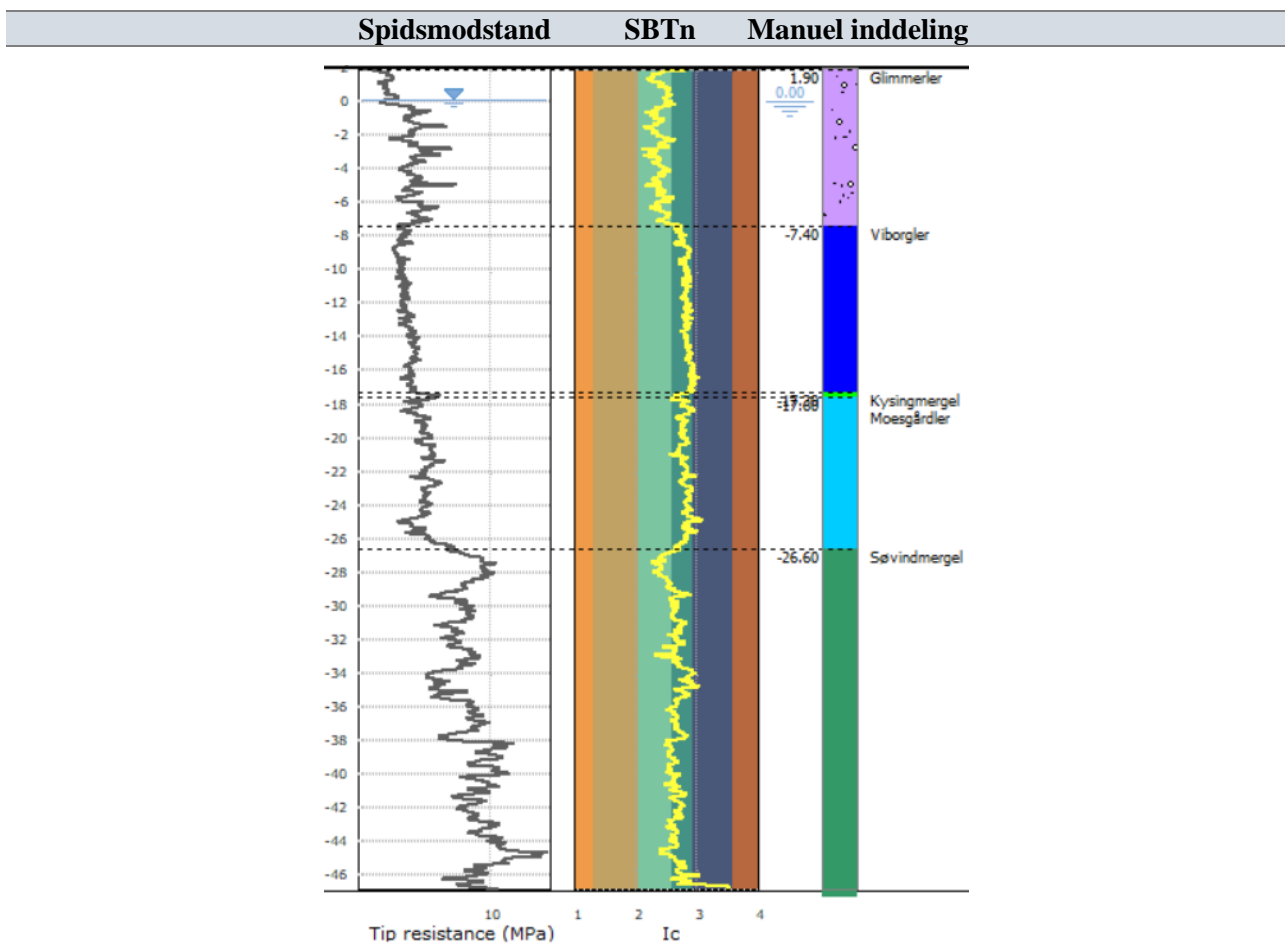
Det er vigtigt at påpege, at den overskuelige brugerflade og de mange klare fordele ved anvendelse af CPeT-IT ikke bør ses som en erstatning for den sunde fornuft. Programmet bør ikke anvendes hovedløst, hvorfor kendskab til lokalgeologi er en væsentlig forudsætning for en optimal klassifikation. Dette tillader tilmed muligheden for at forholde sig kritisk til udfaldet af klassifikationen i programmet.

Med kendskab til lokalgeologien vil den målte spidsmodstand bidrage med den første indikation på en mulig lagdeling af den aarhusianske undergrund.

Den målte spidsmodstand er styret af styrken og stivheden i jorden, hvortil mineralogiske processer har stor betydning for udfaldet af denne. Som gennemgået i afsnit 2 og 3 tillader mineralogien differentiering mellem lerjorde og deres målte spidsmodstande:

- Indeholder den grove indblandinger af kvarts, kaldes den 'mager'.
 - Resulterende i en øgende q_c og øgende f_s .
- Indeholder den mange lermineraller, kaldes den 'fed'.
 - Resulterende i en aftagende q_c og aftagende f_s .
- Indeholder den mere end 15% kalk, kaldes den 'mergel'.
 - Resulterende i en øgende q_c og øgende f_s .

På dette grundlag kan stratigrafien skønnes for den aarhusianske undergrund, som vist på figur 6.4. Af figuren fremgår ovenikøbet det omtalte "flimmer" i datasættet, der indikerer varierende mekaniske egenskaber.

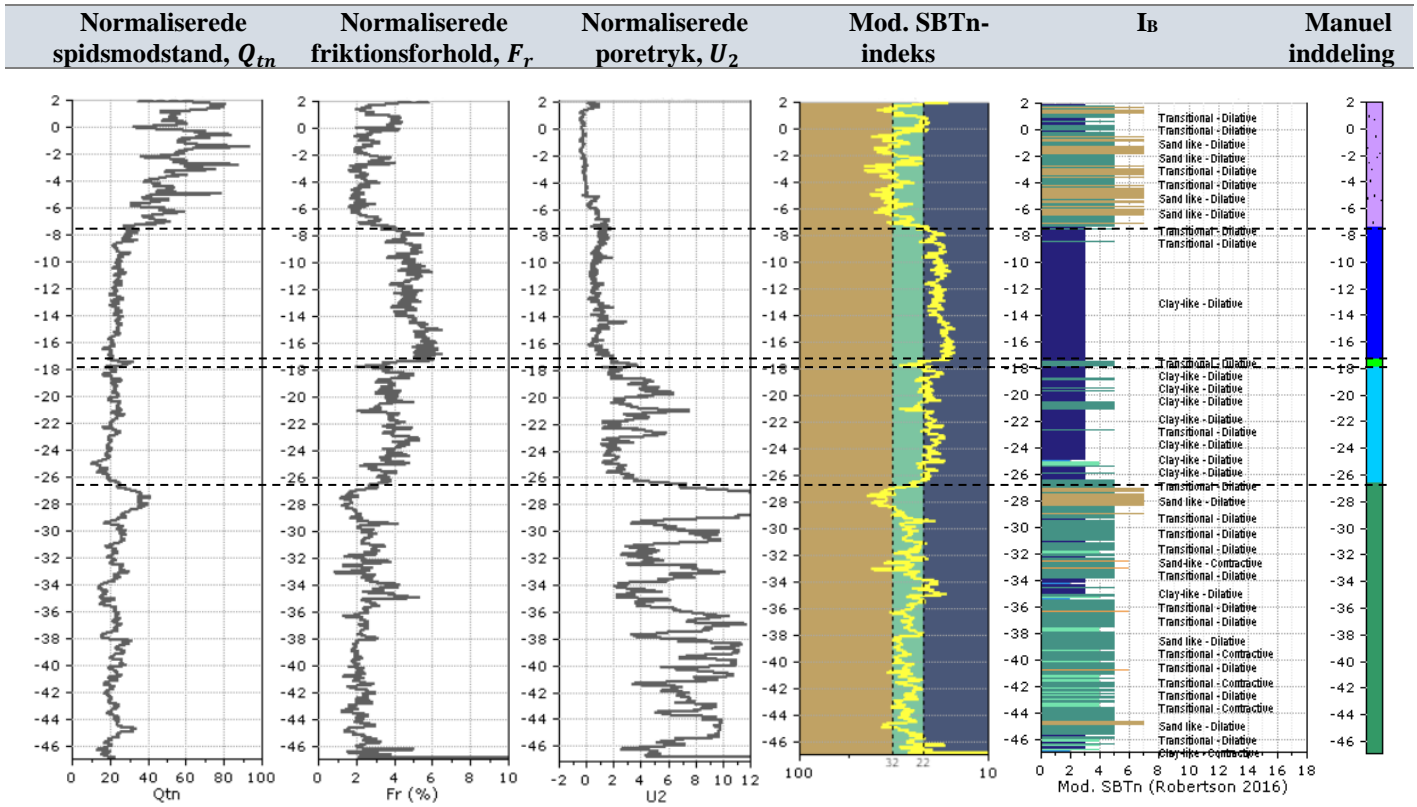


Figur 6.4: Eksempel på databehandling i CPeT-IT ud fra q_c .

Den manuelle inddeling af stratigrafien ud fra CPTu-data tillader en bedre korrelation med sammenfaldende lagfølgeboringer.

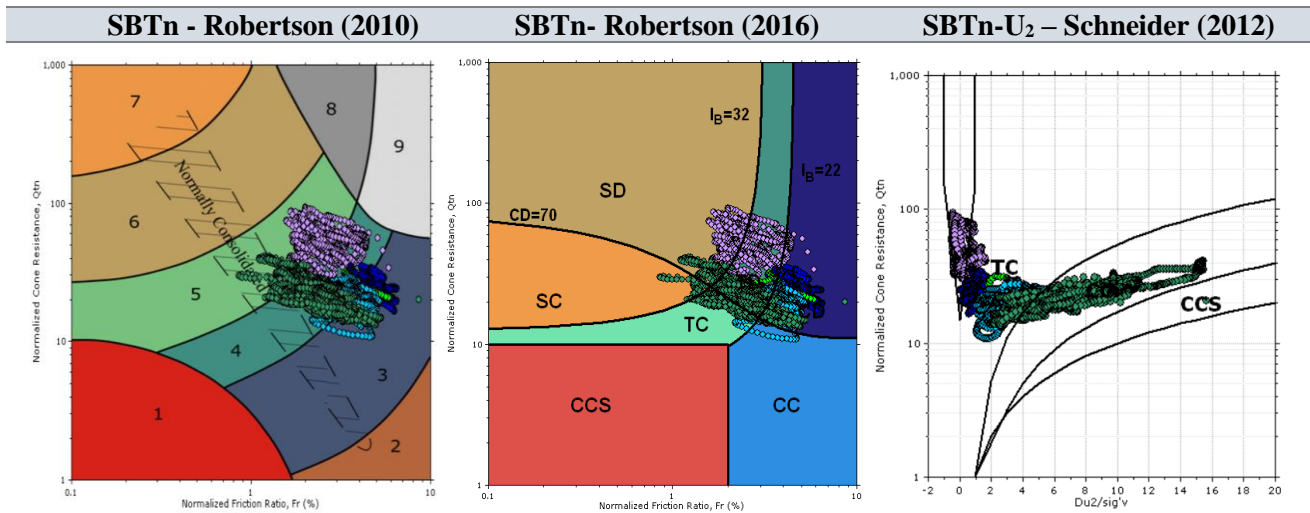
På baggrund af den manuelle inddeling af stratigrafien i CPeT-IT, er det muligt at sammenholde denne med de forskellige SBT-klassifikationsmetoder, som gennemgås i afsnit 4.3. For en optimal klassifikation bør der differentieres mellem de udvalgte klassifikationsmetoder (jf. figur 4.12).

Et eksempel herpå er vist af nedenstående figur 6.5.



Figur 6.5: Eksempel på grafisk opstilling af de normaliserede parametre og mod. SBTn-klassifikation (2016).

Hertil undersøges hvilke faktorer, der ligger til grund for den gældende jordkarakterisering, suppleret med en sammenligning af øvrige diagrammer med henblik på at se mulige forskelle og ligheder mellem disse (figur 6.6).



Figur 6.6: Eksempel på databehandling af SBTn-Robertson (2016).

Når den endelige inddeling af stratigrafien er valgt, bestemmes middelværdier af de afledte parametre for hver laginndeling. Udvalgte parametre er præsenteret i bilag 2. Et eksempel herpå ses for Glimmerleret truffet ved lokation 1:

:: Layer No: 1 ::		
Code: 1	Start depth: 0.80 (m), End depth: 10.10 (m)	
Description: Glimmerleret		
Basic results		
Total cone resistance:	3.99 ±1.14 MPa	
Sleeve friction:	88.14 ±331.77 kPa	
Ic:	2.39 ±0.14	
SBT _n :	5	
SBT _n description:	Silty sand & sandy silt	
Estimation results		
Permeability:	6.34E-07 ±5.33E-07 m/s	Constrained Mod.: 56.70 ±21.87 MPa
N ₆₀ :	13.79 ±3.40 blows	Go: 71.73 ±16.24 MPa
Es:	58.57 ±11.93 MPa	Su: 0.00 ±0.00 kPa
Dr (%):	40.18 ±4.39	Su ratio: 0.00 ±0.00
φ (degrees):	37.79 ±0.92 °	O.C.R.: 0.00 ±0.00
Unit weight:	18.00 ±0.03 kN/m ³	

Figur 6.7: Eksempel på middelværdi for de afledte parametre.

Den gennemgåede databehandlingsmetode for CPTu-forsøg opstilles med henblik på at skønne mulige laggrænser samt at differentiere mellem disse og tyde variationer i stratigrafien.

Databehandlingsmetoden vil udgøre udgangspunktet for tolkningsarbejdet i afsnit 7.

6.2 Beregningsforudsætninger

Forudsætningen for at opnå en optimal klassifikation af de palæogene aflejringer bygger på en korrekt fastlæggelse af beregningsforudsætningerne indtastet i CPeT-IT.

6.2.1 Rumvægt

Rumvægten vil variere som resultat af variationer i indholdet af bikomponenter samt grundvandsforhold. Den optimale metode at fastlægge jords rumvægt på er ved prøveudtagning i uforstyrret jord. I tilfælde af, at ingen prøver udtages, kan intervaller i DS 415 anvendes:

- For tørt sand og grus: $\gamma = 15 - 18 \left[\frac{kN}{m^3} \right]$
- For vandmættet sand og grus: $\gamma = 19 - 22 \left[\frac{kN}{m^3} \right]$
- For vandmættet moræneler: $\gamma = 19 - 23 \left[\frac{kN}{m^3} \right]$
- For vandmættet, fedt ler: $\gamma = 16 - 20 \left[\frac{kN}{m^3} \right]$

I CPeT-IT er der indtastet middelværdier af ovenstående intervaller.

6.2.2 Vandspejl (VSP)

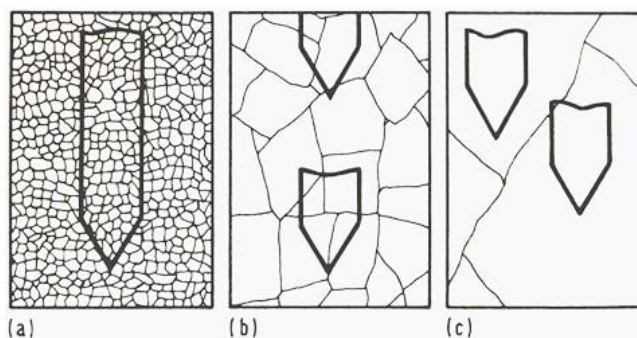
Vandspejlets placering har stor betydning for udfaldet af klassifikationen og de afledte parametre, eftersom de bygger på normaliserede værdier. Det er derfor vigtigt, at det er det rigtige VSP, der indtastes i CPeT-IT. Ofte er pejlingen og sonderingen udført på forskellige tidspunkter, hvorfor korrelationen mellem de to ikke altid stemmer overens. På trods af dette bør pejlinger aldrig udelades ifm. jordbundsundersøgelser.

Uafhængig af VSP-placering måles u_2 , som kan bidrage med at tyde, om VSP er til stede eller ikke. I tilfælde af u_2 registreres til ~ 0 konstant gennem sonderingen, vil dette resultere i både B_q og $U_2 \sim 0$, hvilket tyder på, at VSP ikke er truffet. Som konsekvens heraf vil $Q_{tn} - U_2$ -diagrammet ikke være anvendeligt, hvilket vil bidrage til en rigtig stor usikkerhed ved identificering af mikrostruktur.

6.2.3 Sprækkestrukturers indflydelse på q_c og de afledte parametre

De palæogene aflejringer er præget af en post-sedimentationsstruktur, hvor tilstedeværelsen af mikrostruktur generelt har en øgende effekt på stivheden og styrken af jorden. Til gengæld vil aflejringerens sprækkede struktur modvirke denne effekt, idet de har betydning for fastlæggelse af forbelastningsspændingen (σ'_{pc}) og den udrænedede forskydningsstyrke (s_u), eftersom aflejringerne vil være mere tilbøjelige til at forskydes langs sprækkerne. Fastlæggelsen af disse parametre ved CPT er udfordrende, hvorfor korrelationer med felt- og laboratorieforsøg aldrig bør undgås. Ved CPT bygger parameterudledningen på måling af q_c , der er et udtryk for jords styrke og stivhed. Den sprækkede struktur har en indflydelse på q_c alt afhængig af hyppigheden af sprækkerne (figur 6.8).

- For en stærkt sprækket ler, vil q_c være i stand til at registrere effekten af den sprækkede struktur på styrken af leret.
- For en sprækket ler, vil q_c i nogen grad være i stand til at registrere effekten af den sprækkede struktur på styrken af leret.
- For en svagt sprækket ler, vil q_c ikke være i stand til at registrere effekten af den sprækkede struktur på styrken af leret.



Figur 6.8: Sprækkestrukturer i forkonsolideret ler relateret til sondens spidsmodstand.

Dette understøtter behovet for anvendelsen af empiriske korrelationer, der er i stand til at korrigere for post-sedimentationsstrukturers indflydelse på styrke- og stivhedsparametrene, udtrykt ved hhv. k_{OCR} for OCR og N_{kt} for s_u . Tilmed skal korrelationsfaktorerne også korrigere for bl.a. belastningsretningen og anisotropi, eftersom aflejringerne ofte er inhomogene (Meigh 1987).

6.2.3.1 Fastlæggelse af k_{OCR}

En lerjords mekaniske egenskaber er dybt influeret af dens spændingshistorie. Spændingshistorien udgør ét af de mest udfordrende problemer ved tolkning af forkonsoliderede aflejringer ud fra SBT-diagrammer, da disse jorde vil have en øget styrke og stivhed grundet mikrostruktur, hvorfor høje spidsmodstande ofte vil opstå, bidragende til fejltolkninger.

En lerjords spændingshistorie måles som forholdet mellem dens forbelastningsspænding (σ'_{pc}) og dens in-situ spænding (σ'_{v0}), defineret ved OCR :

$$OCR = \frac{\sigma'_{pc}}{\sigma'_{v0}} \quad (6-1)$$

- Lerjorde, som ikke har været belastet af større spændinger end dem, de er udsat for nu, er defineret som normalt konsoliderede jorde ($OCR = 1$).
- Lerjorde, som har været belastet af større spændinger end dem, de er udsat for nu, er defineret som forkonsoliderede jorde ($OCR > 1$).

OCR vil variere i størrelse alt afhængig af hvilke processer, lerjorden er undergået efter sedimentationen. Den mest almindelige proces er erosion af øvre lag (jf. afsnit 3.1.3), men omfatter også andre post-sedimentære processer som f.eks. kemisk diagenese, istryk, ionbytning o.lign. (Barnes 2016).

En nøjagtig fastlæggelse af σ'_{pc} er vanskelig, idet makro- og mikrostrukturen har stor betydning for udfaldet af denne. Den mest almindelige metode til at fastlægge σ'_{pc} er ved konsolideringsforsøg, hvor en tommelfingerregel for de danske tertiære leraflejringer σ'_{pc} er op til 3-5 MPa (Krebs Ovesen 2014).

I CPeT-IT benyttes formel (2) - (jf. bilag 2) til fastlæggelse af OCR ud fra Q_{tn} og k_{OCR} . Den empiriske relation gør sig gældende for 'ideal' jorde og begrænses yderligere af gyldighedsområdet: $Q_{tn} < 20$, hvilket bidrager til en større usikkerhed ved anvendelse i 'struktureret' jorde. *Robertson (2015)* påpeger, at lokale modifikationer af k_{OCR} bør foretages ud fra erfaringer (Robertson 2015).

Det vil altså sige, at OCR er dybt afhængig af Q_{tn} – og vil variere som resultat af variationer i denne. Klassifikationen af leraflejringer i SBT har vist, at disse kategoriseres som alt fra 'sand' til 'ler' grundet indhold af bikomponenter, der bidrager til en varierende Q_{tn} . Dette medfører, at Moesgård leret og Søvindmergelen vil klassificeres vidt forskellig på trods af, at begge jorde er sprækkede, plastiske lerarter. Som resultat heraf bør k_{OCR} dermed også antage forskellige værdier for de forskellige aflejringer, således et optimalt OCR-profil opnås.

De empiriske værdier for σ'_{pc} udledt fra CPT-data er sammenholdt med en estimeret øvre-værdi for $\sigma'_{pc} = 5 \text{ MPa}$. Udgangspunktet er to forskellige lokationer i Aarhus med forsøg i Moesgård ler og Søvindmergel med varierende plasticitetsindeks og kalkindhold. Der henvises til bilag 3 for parameteranalysen af σ'_{pc} .

Argumentet for at foretage en sådan analyse er at belyse, at mange faktorer har en betydning for udfaldet af OCR , hvormed empirien har sine begrænsninger. Som resultat af at Moesgård leret og Søvindmergelen opfører sig vidt forskelligt, vil en valgt værdi for k_{OCR} altid være på den usikre side, eftersom det ikke er muligt at indtaste denne i intervaller i CPeT-IT.

Generelt bliver OCR -værdien i CPeT-IT underestimeret, under forudsætning af $\sigma'_{pc} = 5 \text{ MPa}$. Empirien er ikke i stand til at analysere den cementerede jord ordentligt, hvorfor et optimalt OCR -profil ikke vil kunne opnås. Anbefalingen af *Robertson (2015)* om at vælge en øvre-værdi for $k_{OCR} = 0,5$ viser den bedste korrelation mellem CPeT-IT og den aktuelle OCR på trods af rigtig store afvigelser (jf. bilag 3). OCR -profilet kan derfor kun betragtes som et vejledende estimat.

6.2.3.2 Fastlæggelse af N_{kt}

Den udrænedede forskydningsstyrke er en hyppigt udledt parameter, defineret ved:

$$s_u = \mu \cdot c_{fv} \quad (6-2)$$

Faktoren μ afhænger af aflejringsens struktur.

- For fede, sprækkede lerarter sættes den til 1/3.
- For øvrige, yngre lerarter sættes den typisk til 1.

CPT er ikke i stand til at måle vingestykken (c_{fv}) direkte, og den skal derfor udledes ud fra empiriske korrelationer, der er korreleret med tilhørende in-situ- eller laboratorieforsøg (jf. bilag 1 - formel 7-5).

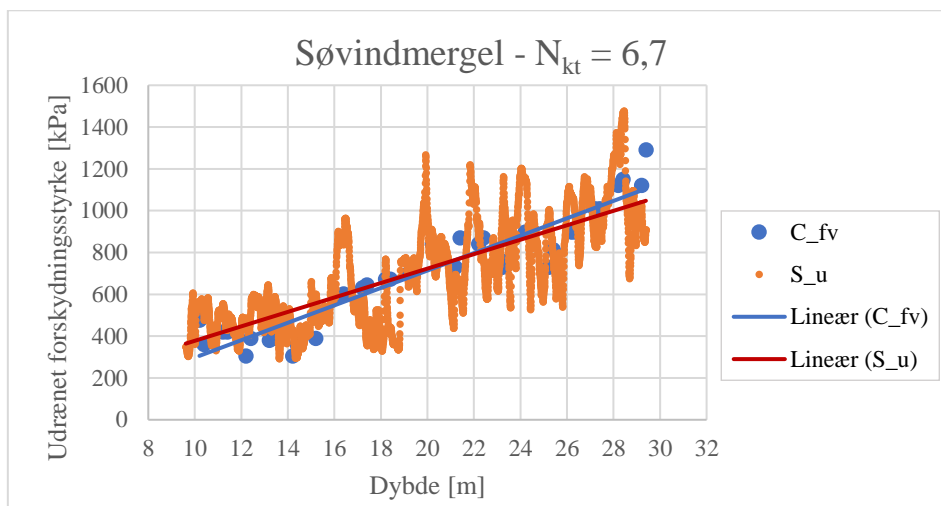
Korrelationsfaktoren (N_{kt}) er bestemt for de fire palæogene lerarter i forbindelse med geotekniske undersøgelser i Aarhus by- og havneområde. Ud fra tilgængeligt data er der ved hver lokation nøje udvalgt to repræsentative borer med tilhørende CPT-sonderinger til fastlæggelse af N_{kt} . Det er med visse forbehold, at disse værdier anvendes, eftersom tilsvarende undersøgelser i området har vist, at 5-6 korrelationsboringer bør foretages for at finde optimale værdier for N_{kt} (Okkels).

N_{kt} er bestemt ved at sammenligne nedpresningsmodstande fra CPT og vingeforsøg fra nærliggende borer.

På baggrund af de målte vingestykker fastlægges en middelværdi for disse. Tilsvarende gøres for nedpresningsmodstandene, hvorefter en N_{kt} kan fastlægges ud fra følgende formel:

$$N_{kt} = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{c_{fv}} \quad (6-3)$$

De målte vingestykker og de empirisk afledte forskydningsstyrker plottes som funktion af dybden, hvortil en ret linje fundet ved lineær regression illustrerer udviklingen af kohæsiensstyrken over dybden (figur 6.9).



Figur 6.9: c_{fv} og s_u plot.

Beregningsarkene for de udledte korrelationsfaktorer er ikke medtaget, men en oversigt over resultaterne kan ses på næste side.

Resultater for N_{kt} :

Aflejringer	Lokation 1	Lokation 2	Lokation 3
Viborg ler	6,2	6,1	-
Viborg ler	6,1	5,1	-
Kysingmergel	6,5	7,8	-
Kysingmergel	6,5	7,8	-
Moesgård ler	6,5	6,5	6,3
Moesgård ler	-	6,2	7,1
Søvindmergel	8,3	8,7	6,7
Søvindmergel	-	-	6,8

Tabel 6.1: Resultater for N_{kt} .

At fastlægge en nøjagtig N_{kt} for en leraflejring, som er kendetegnet ved et varierende plasticitetsindeks og kalkindhold inden for korte strækninger - og dermed varierende styrke og stivhed, hvilket har en direkte indflydelse på q_c - er en umulig opgave. Medmindre man vil gå med en konservativ default-værdi på 14, så ligger der altså altid et forarbejde i at fastlægge den nøjagtige N_{kt} .

De ovenstående værdier for N_{kt} anvendes til estimering af s_u i afsnit 7. CPeT-IT opererer ikke med decimaler for N_{kt} , hvorfor øvre-værdier anvendes. Generelt ses en N_{kt} på 6-9 for aflejringerne.

7. Tolkning af palæogene lerarter i CPeT-IT

Med baggrund i det udbyggede kendskab til tolkningsprogrammet CPeT-IT samt fastlæggelsen af beregningsforudsætningerne for de palæogene leraflejringer, kan tolkningen påbegyndes.

I nærværende afsnit ses eksempler på tolkning af CPTu-forsøg udført i Aarhus by- og havneområde. Afsnittet har til hensigt at be- eller afkræfte de opstillede hypoteser i afsnit 5.

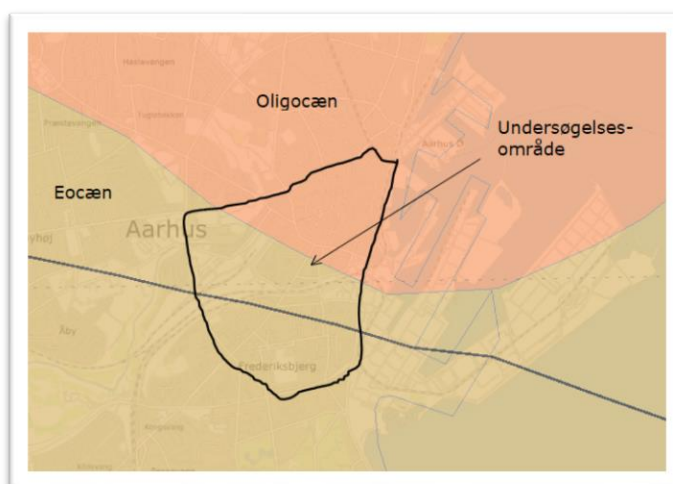
Dette skal ses i relation til at kunne belyse tendenser og korrelationer mellem kendskab til lokalgeologien og SBT-klassifikationsmetoderne, så klassifikationen af det plastiske ler kan overskueliggøres ved fremtidige projekter i Aarhus by- og havneområde.

Af DS 415 fremhæves det, at sonderinger i sig selv ikke er en tilstrækkelig jordbundsundersøgelse uden tilhørende boringer, der muliggør en geologisk, geoteknisk kalibrering af sonderingsresultaterne. CPT-resultaterne kan kun tolkes pålideligt, når der er etableret en korrelation til lagfølgen. På dette grundlag vil CPTu-forsøgene sammenholdes med lagfølgeboringer (Byggedata 1999).

Tolkningen tager udgangspunkt i 3 CPTu-forsøg; én fra hver lokation i undersøgelsesområdet (figur 7.1). De udvalgte sonderinger adskiller sig fra hinanden, hvorfor variationer i tolkningsresultaterne må forventes.

Det tolkede CPTu-forsøg ved hver lokation har følgende variabler:

- Lokation 1:
 - Alle fire palæogene aflejringer træffes.
 - VSP er registreret.
- Lokation 2:
 - Alle fire palæogene aflejringer træffes.
 - VSP er ikke registreret.
- Lokation 3:
 - Glacialt forstyrret Viborg- og Moesgård ler træffes.
 - Kysingmergel er ikke truffet.
 - VSP er registreret.



Figur 7.1: Oversigt over prækvartæret i undersøgelsesområdet (GEUS).

7.1 Lokation 1

I det følgende delafsnit behandles ét CPTu-forsøg med tilhørende lagfølgeboring. Eksemplet er udvalgt ud fra en omfattende jordbundsundersøgelse af den givne lokation.

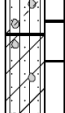





Tolkningen målrettes de palæogene aflejringer, hvorfor fokus fjernes fra yngre aflejringer. Dog undersøges muligheden for at tyde overgangen til prækvartæret.

Klassifikationsmetoden er som gennemgået i afsnit 6.

7.1.1 Terræn- og jordbundsforhold

Terræn- og jordbundsforholdene for lokation 1 er som følger:

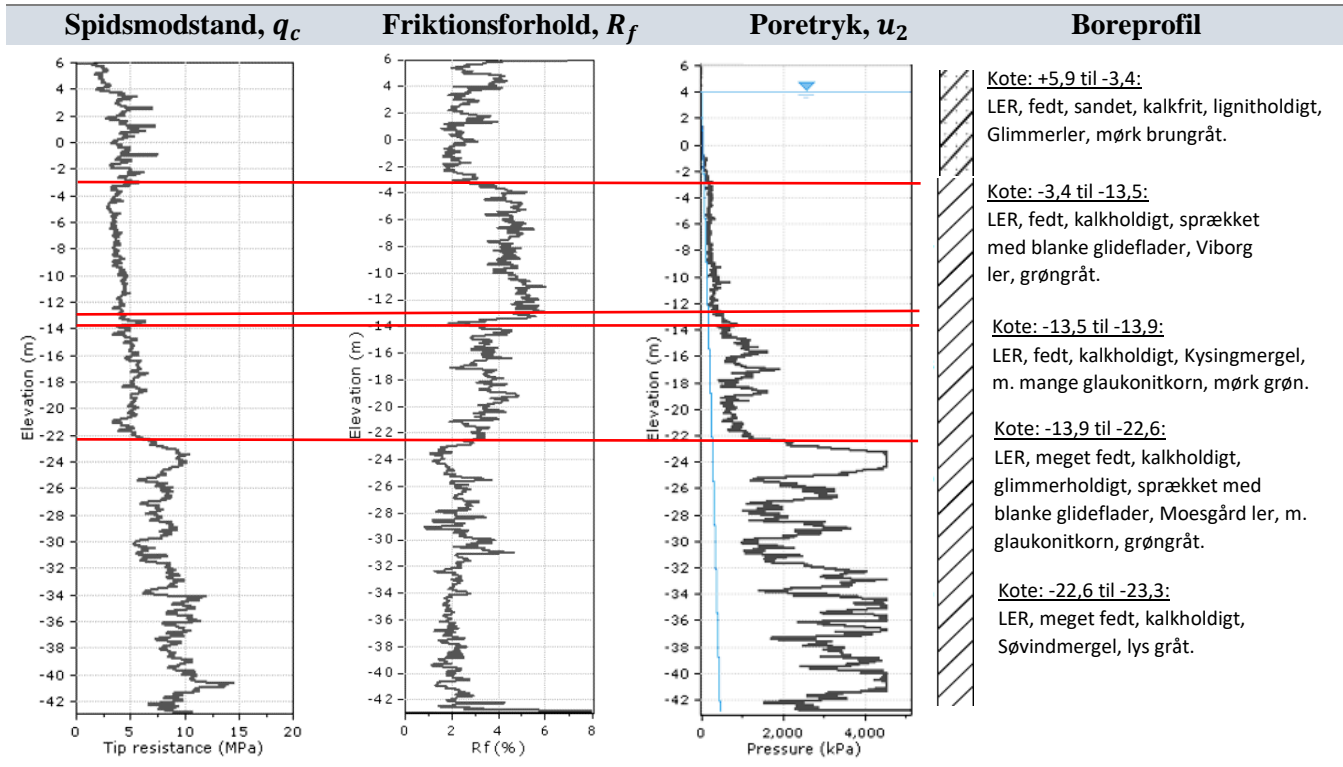
- Terræn ved undersøgelsespunktet er indmålt i kote +6,7 (DVR90). Der er forgravet til kote +5,9.
- Grundvandspejlet er indmålt i kote +4,0.
- CPTu-forsøget sammenholdes med en sammenfaldende lagfølgeboring, suppleret med vingeforsøg.
- Lagfølgeboringen er udført til kote -23,3 og fremgår af figur 7.2 samt bilag 4.
- Sondringen er udført til kote -42,5.

Kote (m)	Geologi Prøve Nr.	Jordartsbeskrivelse	Aflejring Alder
+6,7 til +5,9		1 FYLD: GRUS, svagt siltet, stærkt sandet, kalkholdigt, mørk brungråt	Fy Re
		2 FYLD: LER, ret fedt, sandet, svagt gruset, svagt kalkholdigt, glimmerholdigt, lignitholdigt, m. enk. tegl, mørk gråbrunt	Fy Re
+5,9 til -3,4		5 LER, fedt, sandet, kalkfrit, lignitholdigt, Glimmerler, m. sandpletter, mørk brungråt	Ma Ol
		6 LER, fedt, sandet, kalkfrit, lignitholdigt, Glimmerler, m. enk. sandpletter, m. glaukonit korn, mørk brungråt	Ma Ol
-3,4 til -13,5		35 LER, meget fedt, kalkholdigt, glimmerholdigt, Viborgler, grøngråt	Ma Ol
		36 LER, meget fedt, kalkholdigt, glimmerholdigt, sprækket med blanke glideflader, Viborgler, grøngråt	Ma Ol
-13,5 til -13,9		41 LER, fedt, kalkholdigt, Kysingmergel, m. mange glaukonit korn, mørk grøn	Ma Eo
-13,9 til -22,6		56 LER, meget fedt, kalkholdigt, glimmerholdigt, sprækket med blanke glideflader, moesgaardler, m. glaukonit korn, grøngråt	Ma Eo
		57 LER, meget fedt, kalkholdigt, glimmerholdigt, sprækket med blanke glideflader, moesgaardler, m. glaukonit korn, gråt	Ma Eo
-22,6 til -23,3		60 LER, meget fedt, stærkt kalkholdigt, Sovindmergel, lys gråt	Ma Eo
		61 LER - -	Ma Eo

Figur 7.2: Udklip af lagfølgeboring fra lokation 1 (GEO).

7.1.2 Rådata

På baggrund af variationer i CPTu rådata foretages en skønnet inddeling af laggrænserne. Inddelingen er sammenholdt med en nærliggende lagfølgeboring.



Figur 7.3: Grafisk opstilling af skønnede laggrænser ud fra rådata. Tilhørende lagfølge ses t.h.

Følgende observationer og tolkning af rådata for de skønnede laggrænser opstilles, suppleret med kendskab til lokalgeologien:

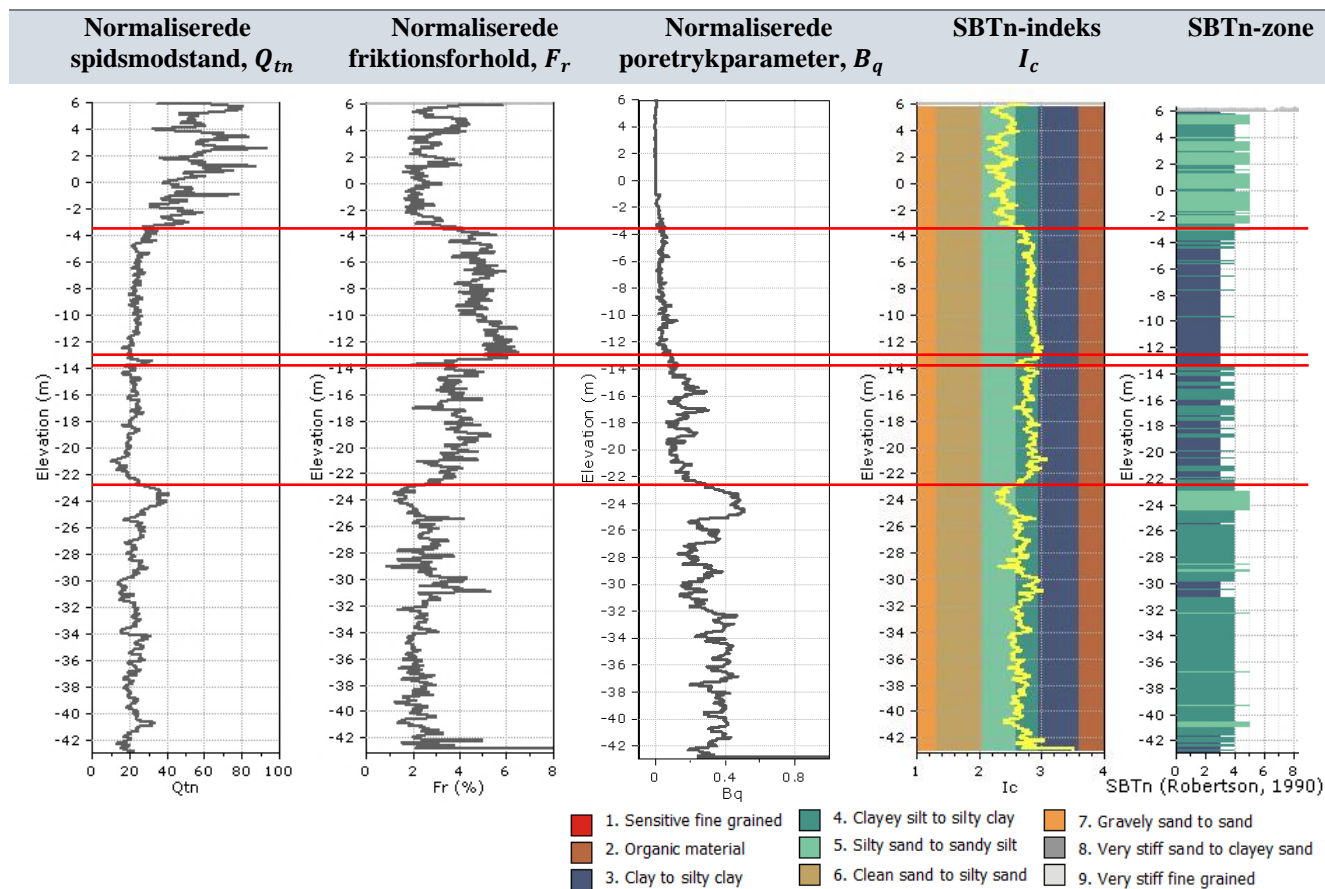
Lag	Kote	Observationer
1	+5,9 til -3,4	Middel q_c og R_f med flimner indikerer lerjord med et stort indhold af grovkornet materiale; formentligt fra Øvre Tertiær eller Kvartær, geologisk bedømt som Glimmerler. $u_2 = u_0$.
2	-3,4 til -13,5	Fald i q_c og øgende R_f indikerer aftagende indhold af grovkornet materiale i lerjorden; formentligt overgang til Nedre Tertiær (Viborg ler). $u_2 = u_0$.
3	-13,5 til 13,9	Peak q_c -værdi og aftagende R_f indikerer lerjord med indhold af bikomponenter; formentligt fra Nedre Tertiær (Kysingmergel). $u_2 > u_0$.
4	-13,9 til -22,6	Aftagende q_c og F_r med begrænset flimner indikerer dominerende lerjord; formentligt fra Nedre Tertiær (Moesgård ler). $u_2 > u_0$.
5	-22,6 til -42,5	Øgende q_c og aftagende F_r med øget flimner indikerer lerjord med varierende indhold af bikomponenter; formentligt fra Nedre Tertiær (Søvindmergel). $u_2 \gg u_0$.

Tabel 7.1: Observationer ud fra den grafiske opstilling af rådata for de skønnede laggrænser.

Bemærk, at det øvre lag ikke entydigt kan defineres på baggrund af rådata, hvorfor laget både kan være Oligocænt eller Kvartært. Det skyldes sammenligneligheden i Glimmerlerets og f.eks. morænelerets mekaniske egenskaber, der begge kan fremstå 'fed' og er under indflydelse af sand og silt.

7.1.3 Normaliserede data (2010)

Af nedenstående ses CPTu normaliserede data og SBTn-kategorisering – Robertson (2010):



Figur 7.4: Grafisk opstilling af skønnede laggrænser ud fra normaliserede data. SBTn klassifikation ses t.h.

Ud fra de skønnede laggrænser kan SBTn-klassifikationen inddeles som følgende:

Lag	Kote	SBTn-kategorisering
1	+5,9 til -3,4	'Siltet sand til sandet silt'
2	-3,4 til -13,5	'Ler til siltet ler' til 'leret silt til siltet ler'
3	-13,5 til 13,9	'Ler til siltet ler' til 'leret silt til siltet ler'
4	-13,9 til -22,6	'Ler til siltet ler' til 'leret silt til siltet ler'
5	-22,6 til 42,5	'Ler silt til siltet ler' og 'siltet sand til sandet silt'

Tabel 7.2: Observationer ud fra den grafiske opstilling af normaliserede data for de skønnede laggrænser.

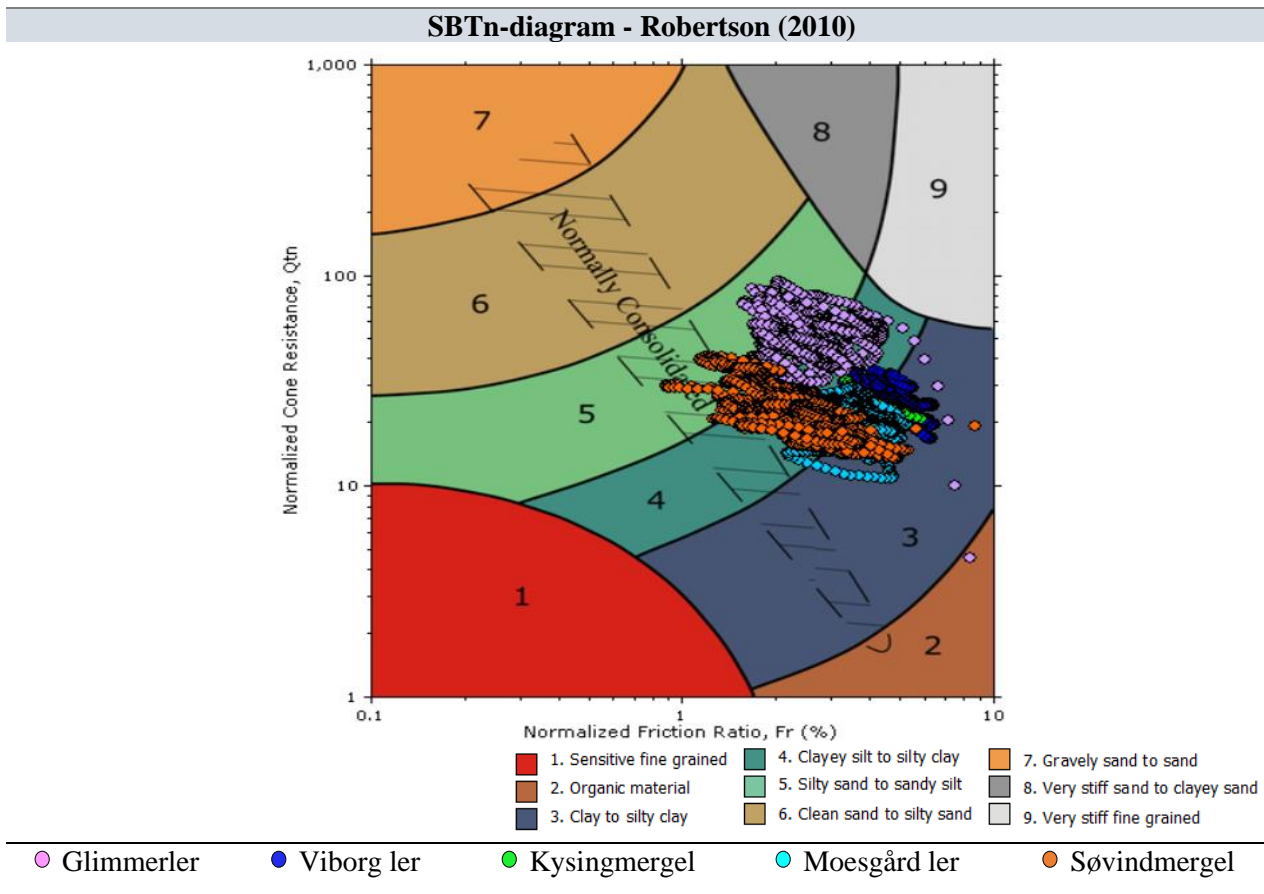
Begrænsningerne ved brug af SBTn (2010) til klassifikation af de palæogene lerarter illustreres af ovenstående. SBTn (2010) vurderer ret konsekvent Viborg- og Moesgård leret samt Kysingmergelen som hhv. 'leret til siltet ler' og 'leret silt til siltet ler' ($2,6 < I_c < 3,6$), hvorimod Søvindmergelen klassificeres som 'leret silt til siltet ler' og 'siltet sand til sandet silt' ($2,05 < I_c < 2,95$). Aflejringerne vurderes som 'siltholdige' er ikke samstemmende med deres aflejringshistorie, men derimod et udtryk for indhold af bikomponenter som empirien ikke er i stand til at tolke. Misklassificeringen bekræfter den manglende korrelation mellem den fysiske klassifikation af jorden og dens mekaniske egenskaber. Overgangen til prækvartæret er ikke tydelig ud fra data og kan ikke tolkes, hvis ingen korrelation til lagfølgen etableres.

Fordelingen vises illustreret på næste side.

7.1.4 Fordeling i SBTn (2010)

Af nedenstående ses CPTu-datasættets fordeling i SBTn – Robertson (2010).

Aflejringerne farveinddeles for bedre visualisering:



Figur 7.5: CPTu-data plottet i SBTn (2010).

Der ses ikke en entydig differentiering mellem de palæogene aflejringer. Observationerne listet i tabel 7.2 afbildes i SBTn-diagrammet, hvor variationer i zone-klassificeringen vidner om tilsvarende variationer i aflejringerens mekaniske egenskaber.

Spredningen i Kysing- og Søvindmergelen er som forventet og er et resultat af "flimmer" registreret i de målte parametre (figur 7.3). Tilsvarende gør sig gældende for Glimmerleret. Den mere homogene Viborg- og Moesgård ler plottes som forventet ret konsekvent som 'ler til siltet ler' med udfald i 'leret silt til siltet ler'.

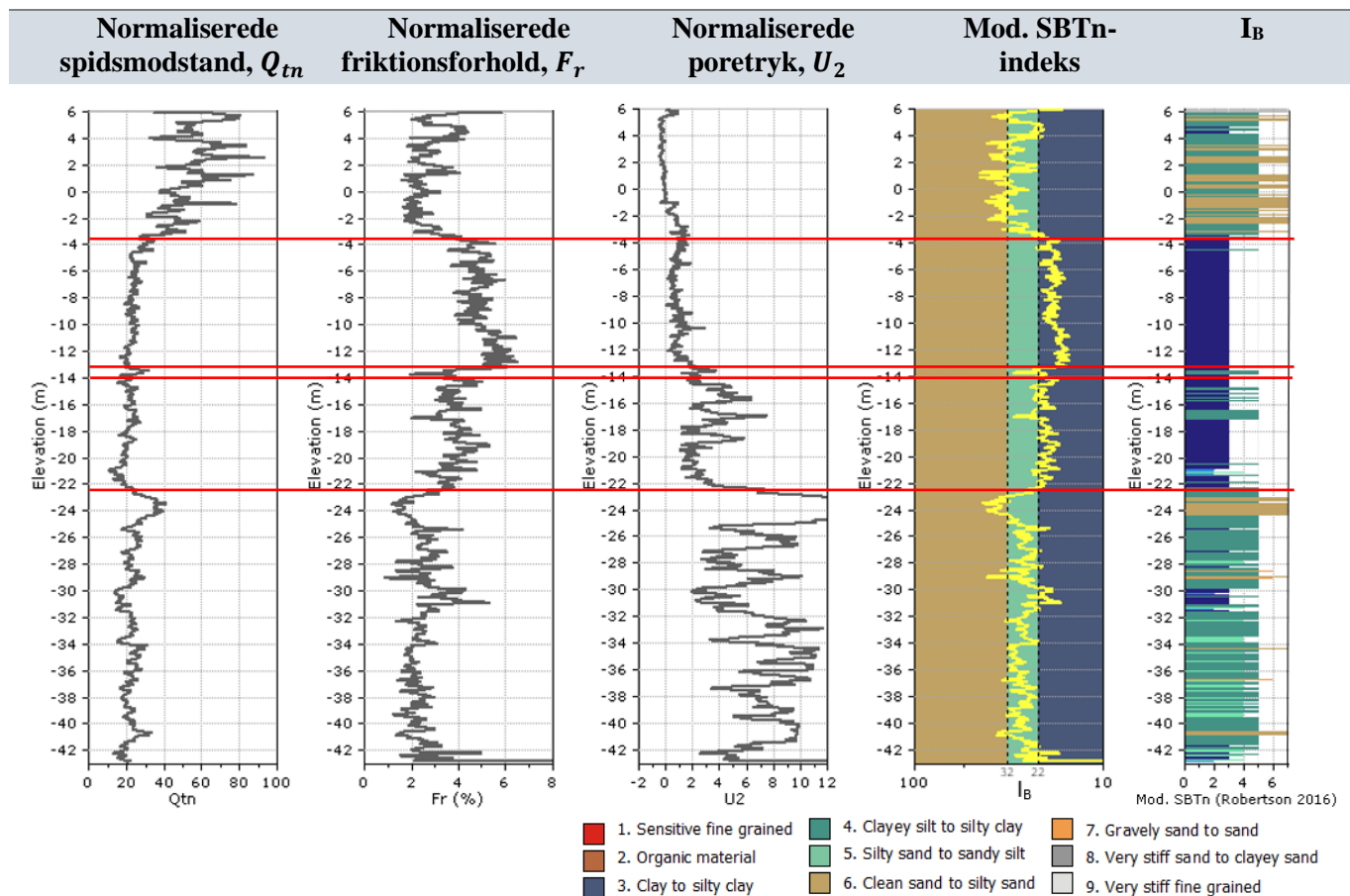
Af klassifikationen fremgår en øgende OCR ($Q_{tn} > 10$ og $F_r > 2$) for aflejringerne, samstemmende med deres respektive spændingshistorier.

Anvendelsen af diagrammet er begrænset af, at de normaliserede data plottes som punkter, hvorfor en egentlig visualisering af rækkefølgen/lagdelingen ikke fremgår. På trods af udfald i klassifikationen, er det stadig muligt at hente information ud fra SBTn (2010), herunder øgende OCR og særligt "flimmer".

På dette grundlag bør tolkningen fortsættes og sammenholdes med øvrige klassifikationsdiagrammer.

7.1.5 Modificerede normaliserede data (2016)

Af nedenstående ses de normaliserede data og modificeret SBTn (2016):



Figur 7.6: Grafisk opstilling af skønnede laggrænser ud fra modificerede normaliserede data. Mod. SBTn klassifikation ses t.h.

Ud fra de skønnede laggrænser kan den modificerede SBTn-klassifikation inddeles som følgende:

Lag	Kote	SBTn-kategorisering
1	+5,9 til -3,4	'Sandlignende - dilativ' og 'overgangslignende - dilativ'
2	-3,4 til -13,5	'Lerlignende - dilativ'
3	-13,5 til 13,9	'Overgangslignende - dilativ'
4	-13,9 til -22,6	'Lerlignende - dilativ' med enkelte udfald
5	-22,6 til 42,5	'Overgangslignende – dilativ/kontraktiv' med enkelte udfald

Tabel 7.3: Observationer ud fra den grafiske opstilling af modificerede normaliserede data for de skønnede laggrænser.

Udfaldene i de øvrige klassifikationsmetoder kommer også til udtryk i SBTn (2016). Viborg- og Moesgård leret klassificeres ret konsekvent som 'lerlignende, dilativ' ('CD'), samstemmende med lerets mineralogiske sammensætning og egenskaber. Klassifikationen af Glimmerleret, Kysing- og Søvindmergelen er derimod noget tvetydig, hvor en vekslende opførsel registreres ('TC' og 'TD').

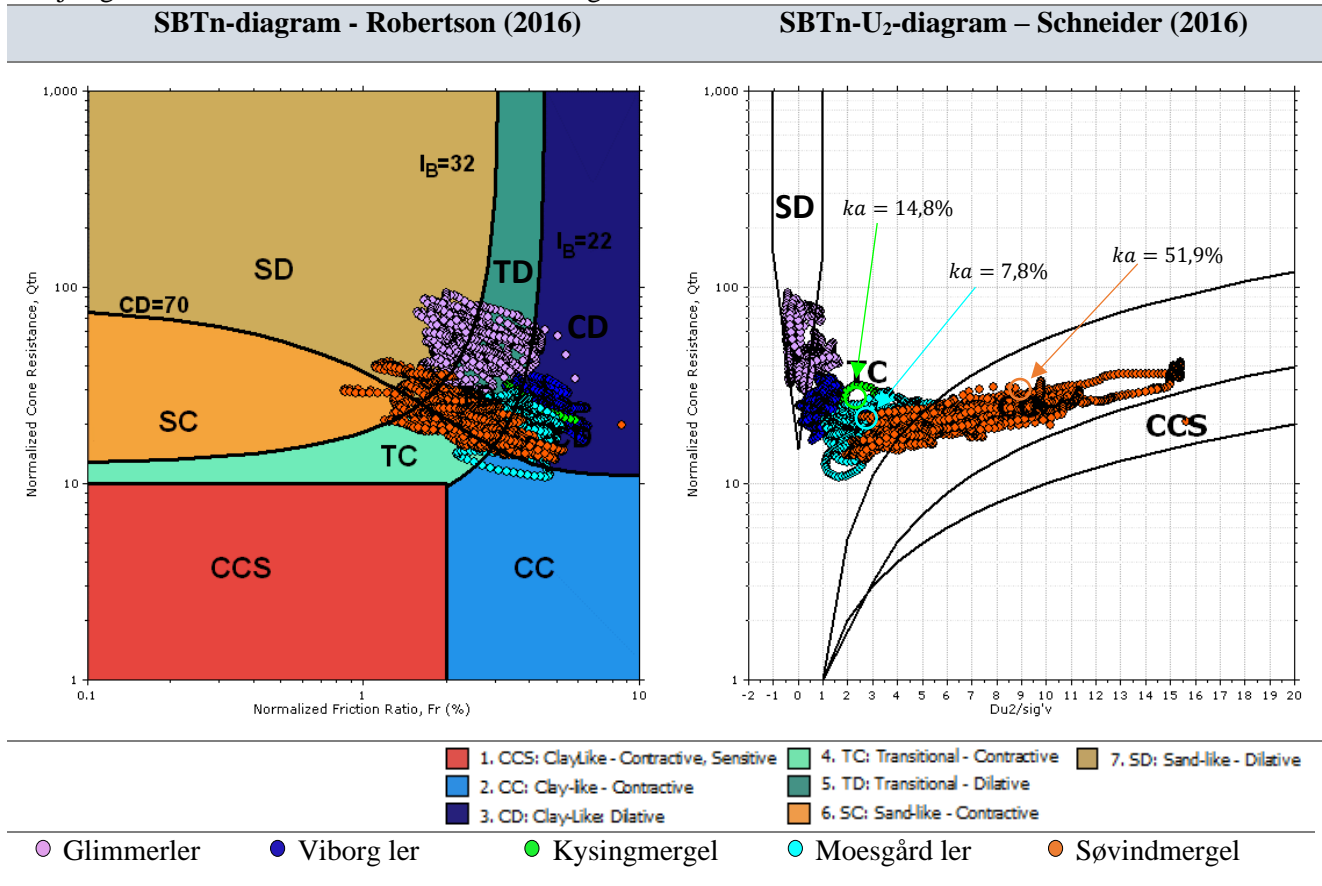
Overgangen til prækvartæret er ikke tydelig ud fra data, og kan ikke tolkes, hvis ingen korrelation til lagfølgen etableres.

Fordelingen vises illustreret på næste side, hvor I_B og PI tilmed kommenteres.

7.1.6 Fordeling i modificeret SBTn (2016)

Af nedenstående ses CPTu-datasættets fordeling i de modificerede SBTn-diagrammer (2016).

Aflejringerne farveinddeles for bedre visualisering:



Figur 7.7: CPTu-data plottet i de modificerede SBTn-diagrammer (2016). Kalkindhold for tre prøver er indtegnet (GEO, bilag 4).

Af fordelingen i de modificerede SBTn-diagrammer (2016) ses, at de palæogene aflejringer dækker flere zoner, og uoverensstemmelser i klassifikationen mellem de 2 diagrammer fremgår som forventet.

Af figur 7.7.tv., kan følgende tendenser betragtes:

- Viborg- og Moesgård leret klassificeres som 'CD' og 'CC' ($I_B < 22$) og giver en god indikation på lerets plastiske egenskaber, hvor $PI > 18\%$.
- Store dele af Kysing- og Søvindmergelen klassificeres indenfor overgangszonen 'TC' og 'TD' ($22 < I_B < 32$), svarende til et $PI < 18\%$, hvilket ikke er samstemmende med deres aflejringshistorie, hvor selv de stærkt kalkholdige aflejringer i Aarhus har vist $PI > 50\%$ (jf. afsnit 5.3).

Af figur 7.7.th., kan følgende tendenser betragtes:

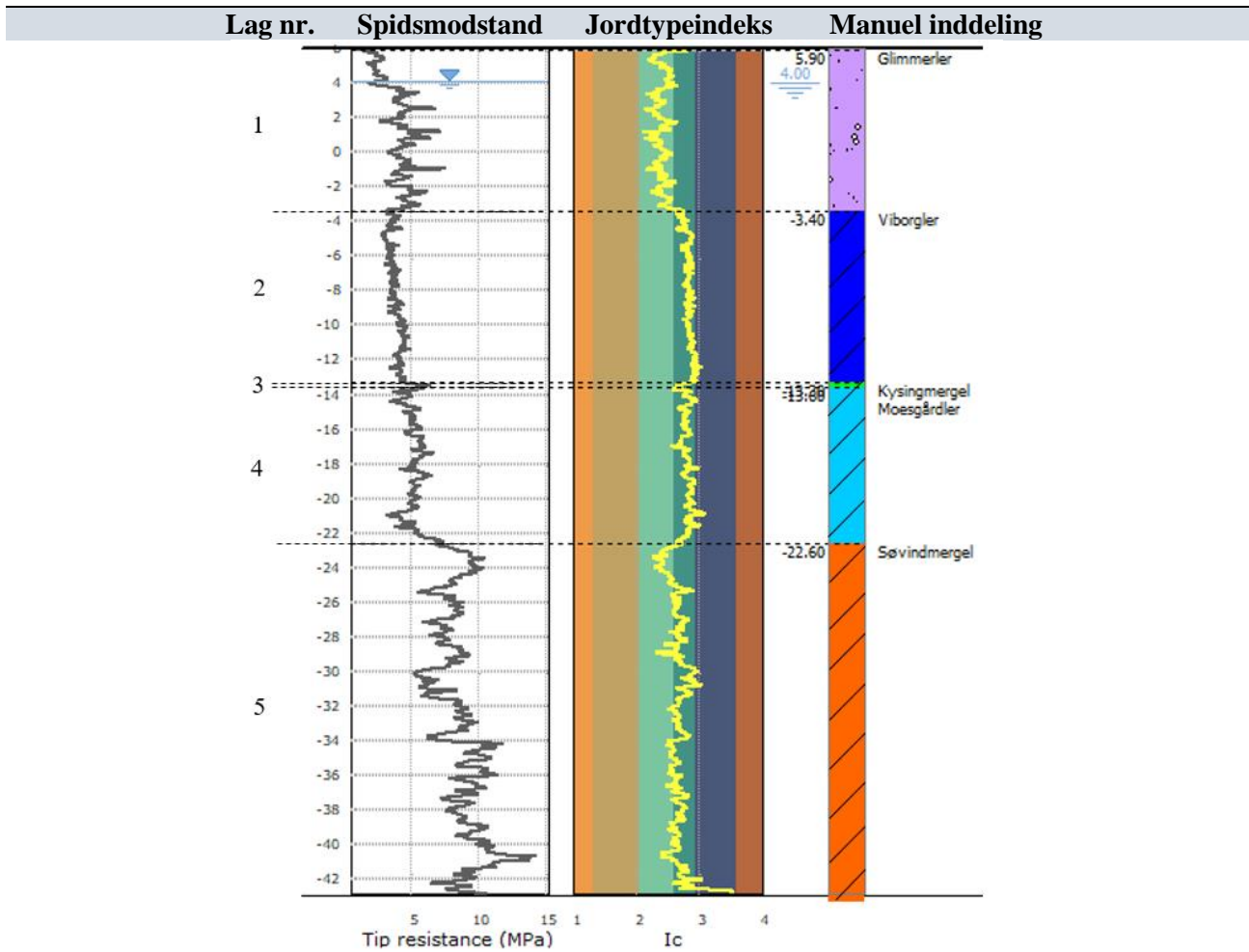
- De høje Q_{tn} -værdier for aflejringerne tyder på en relativ høj OCR ($Q_{tn} > 10$ svr. til $OCR > 4$), hvilket stemmer godt overens med aflejringerens spændingshistorie.
- Den høje U_2 -værdi for Søvindmergelen indikerer som forventet mikrostruktur som resultat af en høj grad af cementering stammende fra aflejringsens høje kalkindhold ($ka = 51,9\%$) (kote -23,0, bilag 4). Spredningen af Søvindmergelens data tilskrives variationer i kalkindholdet.
 - Søvindmergelen klassificeres 'CC' med få udfald i 'TC' som forventet.
 - Det formodes, at $K_G^* > 330$ for hoveddelen af Søvindmergelen.

- Små til negative U_2 -værdier for de øvrige aflejringer tilskrives deres relative lave kalkindhold og begrænsede mikrostruktur.
 - Moesgård leret ($ka = 7,8\%$) (kote -17,5, bilag 4) og Kysingmergelen ($ka = 14,8$) (kote -13,0, bilag 4) viser små tegn på mikrostruktur og klassificeres hovedsageligt 'TC'. Det formodes, at $K_G^* \leq 330$.
 - Viborg leret viser begrænset tegn på mikrostruktur og klassificeres hhv. 'TC' og 'SD'. Det formodes, at $K_G^* \leq 330$.
 - Det skal bemærkes, at 'CD' ikke findes, hvorfor klassifikationen i $Q_{tn}-U_2$ begrænses.

De opstillede hypoteser om kalkindholdets betydning for klassifikationen i $Q_{tn}-U_2$ understøttes af de enkeltstående kalkindholdsprøver. Yderligere undersøgelser bør dog foretages, hvilket vil blive berørt i afsnit 8.2.1.

7.1.7 Estimerede parametre

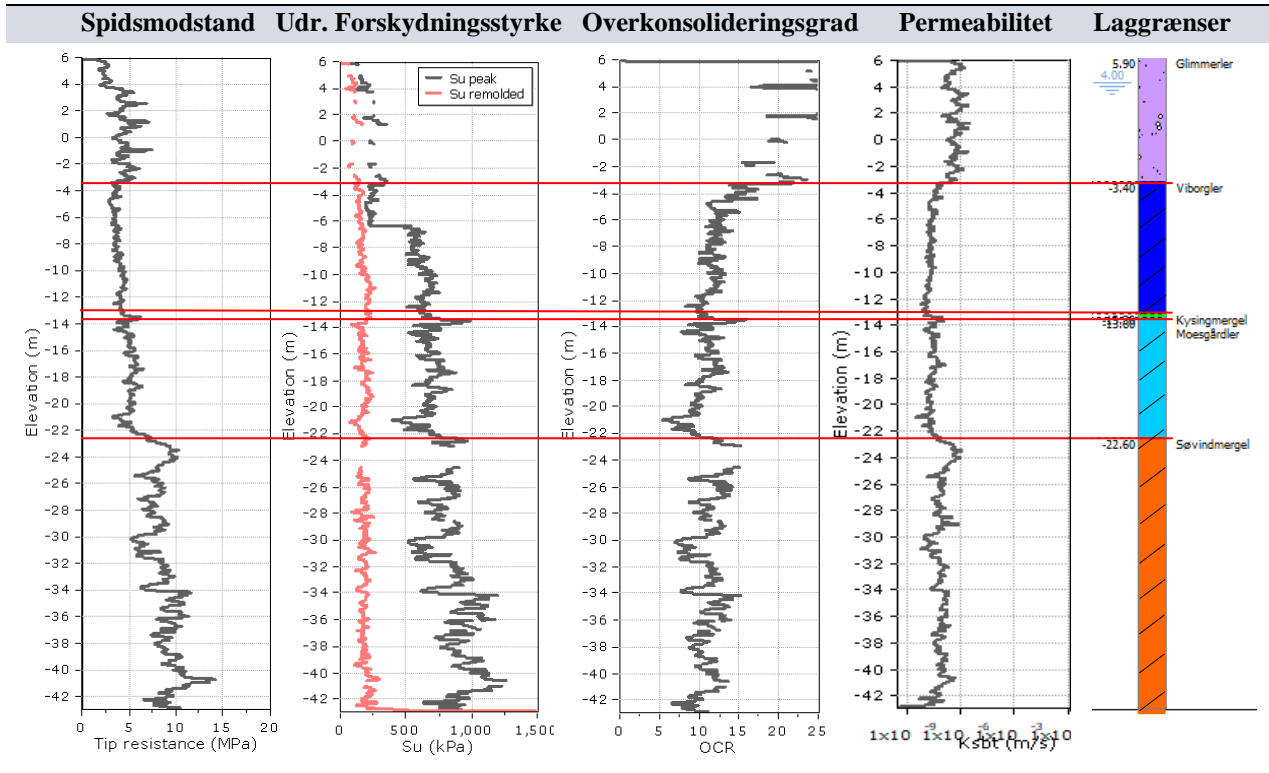
På baggrund af det ovenstående tolkningsarbejde kan stratigrafien defineres som vist nedenfor:



Figur 7.8: Stratigrafien defineres i CPeT-IT.

Ud fra hver laginddeling estimeres de geotekniske parametre på baggrund af de empiriske korrelationer, fremlagt i bilag 2. Det undersøges, om de afledte parametre stemmer overens med lokalt kendskab til aflejringerens geologiske historie.

Af nedenstående figur ses en grafisk afbildning af udvalgte afledte parametre:



Figur 7.9: Grafisk afbildning af de afledte parametre.

Af tabel 7.4 er middelværdier for aflejringeres afledte parametre skematiseret:

Lag	Aflejrning	q_t [MPa]	f_s [kPa]	R_f	s_u [kPa]	OCR [÷]	k [$\frac{m}{s}$]
1	Glimmerler	4,0	98,5	2,5	-	-	$6,3 \cdot 10^{-7}$
2	Viborg ler	3,8	177	4,7	501	12,1	$2,5 \cdot 10^{-8}$
3	Kysingmergel	5,4	206	3,8	842,2	13,3	$4,8 \cdot 10^{-8}$
4	Moesgård ler	5,2	176	3,4	687,4	10,4	$3,2 \cdot 10^{-8}$
5	Søvindmergel	8,6	202	2,4	860	11,0	$1,3 \cdot 10^{-7}$

Tabel 7.4: Oversigt over middelværdier for de afledte parametre.

Som forventet reflekterer q_t variationer i jordlagenes mekaniske egenskaber og afledte parametre. f_s er som forventet størst i de kalkholdige aflejringer, der øger lerjordens friktionsmodstand.

s_u er korreleret med nærliggende boringer, hvortil N_{kt} er anvendt (jf. tabel 6.1). Iht. DS 415 bør en yderligere reduktion ($c_u \sim \frac{1}{3} \cdot s_u$) foretages af denne for de sprækkede aflejringer, da q_t kun i nogen grad er i stand til at registrere sprækkernes indflydelse på styrken af leret (jf. underafsnit 6.2.3).

Det generelle billede viser $OCR > 4$, hvilket stemmer overens med aflejringeres spændingshistorie. Størrelsen på OCR estimeres med stor usikkerhed, da den begrænses af k_{OCR} , som gennemgås i afsnit 6.2.3.1. OCR -profilen bør ses som vejledende og verificeres af yderligere undersøgelser.

k indikerer meget lavpermeable lerjorde, hvilket kendetegner de plastiske aflejringer. Små variationer i denne tillægges indhold af kalk- og grovkornet materiale.

På baggrund af de belyste tendenser og egenskaber for aflejringerne ud fra SBT og geologisk baggrundsviden, kan der drages paralleller mellem sonderingen og øvrige sonderinger udført ved undersøgelsen. Disse ses illustreret i bilag 5 – tværsnit 1 for 3 sonderinger udført ved lokation 1. Tilmed åbnes muligheden for at differentiere mellem sonderingerne og tyde variationer i stratigrafien samt fastlægge prækvartæroverfladen for øvrige sonderinger.

7.2 Lokation 2

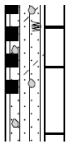
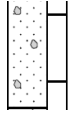
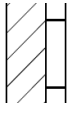
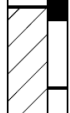
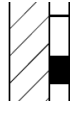
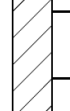
Lokation 1 vil udgøre referencepunktet for tolkningen, hvorfor paralleller vil blive draget til denne.

Dele af tolkningen er forsimplet, hvis tendenserne er tilsvarende lokation 1.

7.2.1 Terræn- og jordbundsforhold

Terræn- og jordbundsforholdene for lokation 2 er som følger:

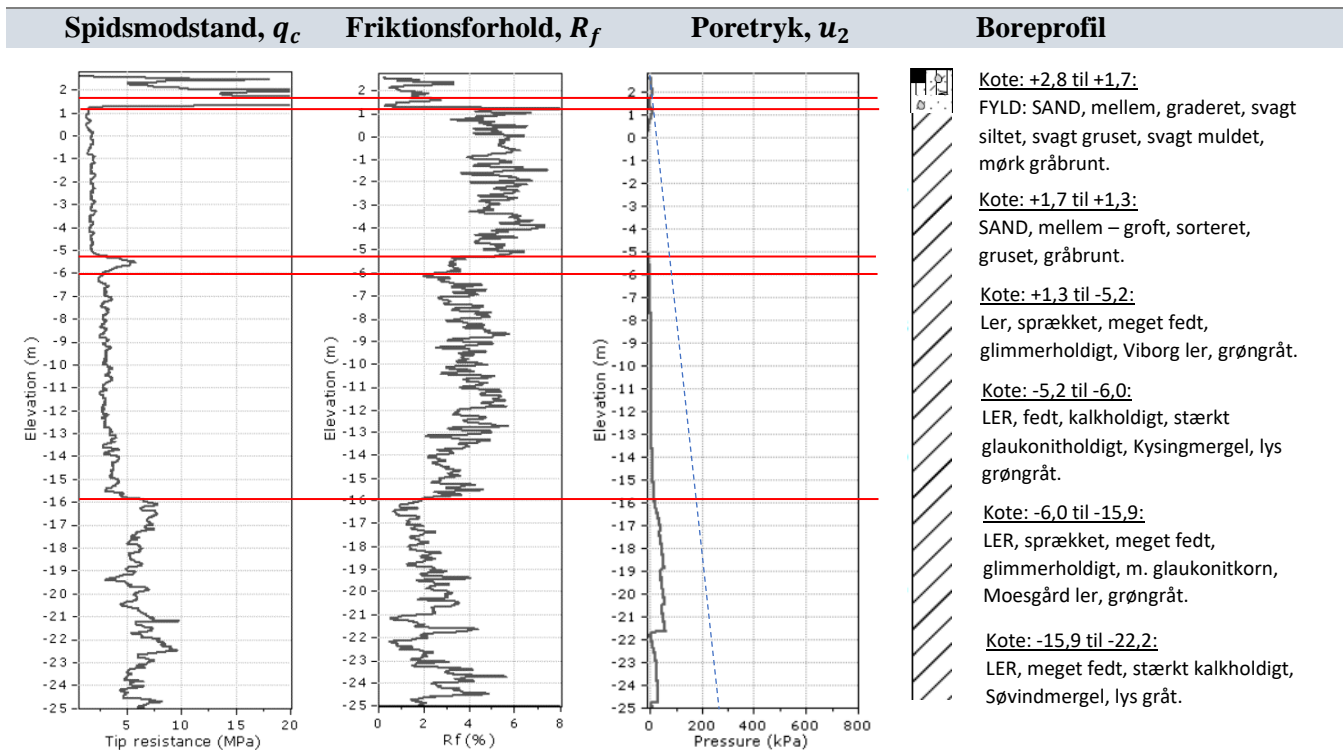
- Terræn ved undersøgelsespunktet er indmålt i kote +2,8 (DVR90).
- Der er ikke registreret et grundvandsspejl ved borearbejdet.
- CPTu-forsøget sammenholdes med en sammenfaldende lagfølgeboring, suppleret med vingeforsøg.
- Lagfølgeboringen er udført til kote -22,2, og fremgår af figur 7.10 samt bilag 6.
- Sondringen er udført til kote -25,0.

Kote (m)	Geologi	Prøve Nr.	Jordartsbeskrivelse	Aflejning	Alder
+2,8 til +1,7		1	FYLD: SAND, mellem, graderet, siltet, svagt gruset, svagt muldet, m. enk. lerpartier, m. muldpartier, mørk gråbrunt	Fy	Re
		2	FYLD: SAND, mellem, ringe graderet, svagt siltet, svagt gruset, svagt muldet, m. enk. lerpartier, mørk gråbrunt	Fy	Re
+1,7 til +1,3		4	SAND, mellem - groft, sorteret, gruset, gråbrunt	Sm	Sg
		5	SAND, mellem - groft, sorteret, gruset, m. enk. lerpartier, gråbrunt	Sm	Sg
+1,3 til -5,2		12	LER, sprækket, meget fedt, glimmerholdigt, Viborgler, grøngråt	Ma	OI
		13	LER - -	Ma	OI
-5,2 til -6,0		17	LER, meget fedt, stærkt glaukonitholdigt, kysingmergel m. grave gange udfyldt med viborgler, grøngråt	Ma	Eo
		18	LER, fedt, kalkholdigt, stærkt glaukonitholdigt, Kysingmergel, lys grøngråt	Ma	Eo
-6,0 til -15,9		32	LER, sprækket, meget fedt, glimmerholdigt, m. glaukonitkorn, moesgaardler, grøngråt	Ma	Eo
		33	LER, meget fedt, glimmerholdigt, m. glaukonitkorn, moesgaardler, grøngråt	Ma	Eo
-15,9 til -22,2		47	LER, sprækket, meget fedt, kalkholdigt, m. glaukonitkorn, Søvindmergel, gråt	Ma	Eo
		48	LER, meget fedt, stærkt kalkholdigt, Søvindmergel, lys gråt	Ma	Eo

Figur 7.10: Udklip af lagfølgeboring fra lokation 2 (GEO).

7.2.2 Rådata

På baggrund af variationer i CPTu rådata foretages en skønnet inddeling af laggrænserne. Inddelingen er sammenholdt med en nærliggende lagfølgeboring:



Figur 7.11: Grafisk opstilling af skønnede laggrænser ud fra rådata..Tilhørende lagfølge ses t.h.

Af de registrerede poretryk ses, at disse ligger langt under det hydrostatiske tryk under hele sonderingen, hvorfor poretrykmålingerne ikke kan anvendes ved tolkningen.

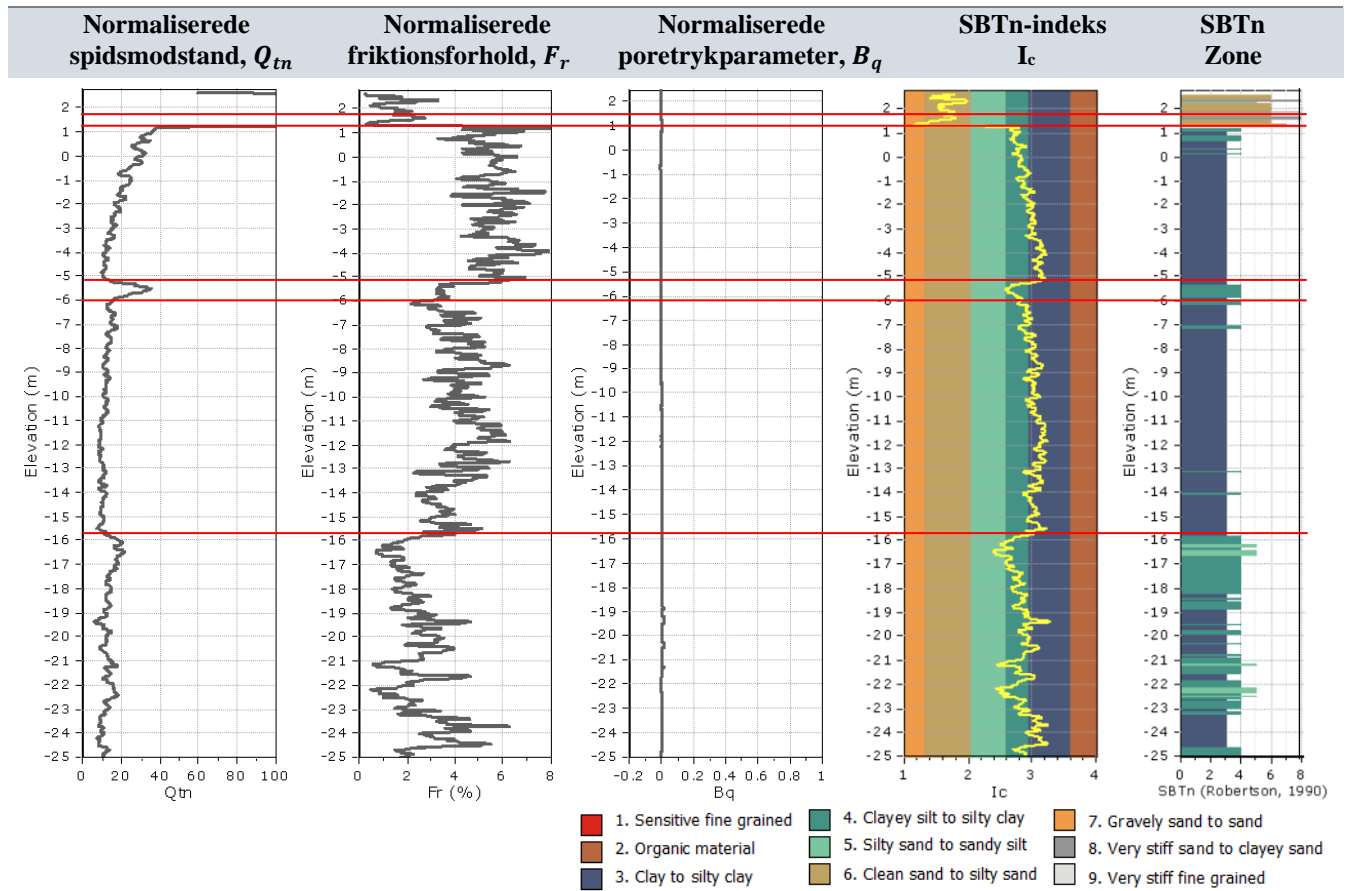
Følgende observationer og tolkning af rådata for de skønnede laggrænser opstilles, suppleret med kendskab til lokalgeologien:

Lag	Kote	Observationer
1	+2,8 til +1,7	Høj q_c og lille R_f indikerer sandjord; formentligt fyld.
2	+1,7 til +1,3	Øgende q_c og aftagende R_f indikerer sandjord; formentligt overgang til Kvartær.
3	+1,3 til -5,2	Aftagende q_c og øgende R_f med flimmer indikerer lerjord med indhold af bikomponenter; formentligt overgang til Nedre Tertiær (Viborg ler).
4	-5,2 til -6,0	Peak q_c -værdi og aftagende R_f indikerer lerjord med indhold af bikomponenter; formentligt fra Nedre Tertiær (Kysingmergel).
5	-6,0 til -15,9	Aftagende q_c og øgende R_f med begrænset flimmer indikerer lerjord med indhold af bikomponenter; formentligt fra Nedre Tertiær (Moesgård ler).
6	-15,9 til -25,0	Øgende q_c og aftagende R_f med øget flimmer indikerer lerjord med stort indhold af bikomponenter; formentligt fra Nedre Tertiær (Søvindmergel).

Tabel 7.5: Observationer ud fra den grafiske opstilling af rådata for de skønnede laggrænser.

7.2.3 Normaliserede data (2010)

Af nedenstående ses CPTu normaliserede data og SBTn-kategorisering – Robertson (2010):



Figur 7.12: Grafisk opstilling af skønnede laggrænser ud fra normaliserede data. SBTn klassifikation ses t.h.

Der ses bort fra B_q -profilet.

Ud fra de skønnede laggrænser kan SBTn-klassifikationen inddeles som følgende:

Lag	Kote	SBTn-kategorisering
1	+2,8 til +1,7	'Sand til sandet silt'
2	+1,7 til +1,3	'Gruset sand til sand'
3	+1,3 til -5,2	'Ler til siltet ler' til 'leret silt til siltet ler'
4	-5,2 til -6,0	'Leret silt til siltet ler'
5	-6,0 til -15,9	'Ler til siltet ler' til 'leret silt til siltet ler'
6	-15,9 til -25,0	'Ler til siltet ler', 'leret silt til siltet ler' og 'siltet sand til sandet silt'

Tabel 7.6: Observationer ud fra den grafiske opstilling af normaliserede data for de skønnede laggrænser.

Sammenlignet med lokation 1 viser de palæogene aflejringer (lag 3-6) tendens til at være mere 'leret' ($2,95 < I_c < 3,6$), men klassificeres stadig i stor grad som siltet ($2,6 < I_c < 2,95$).

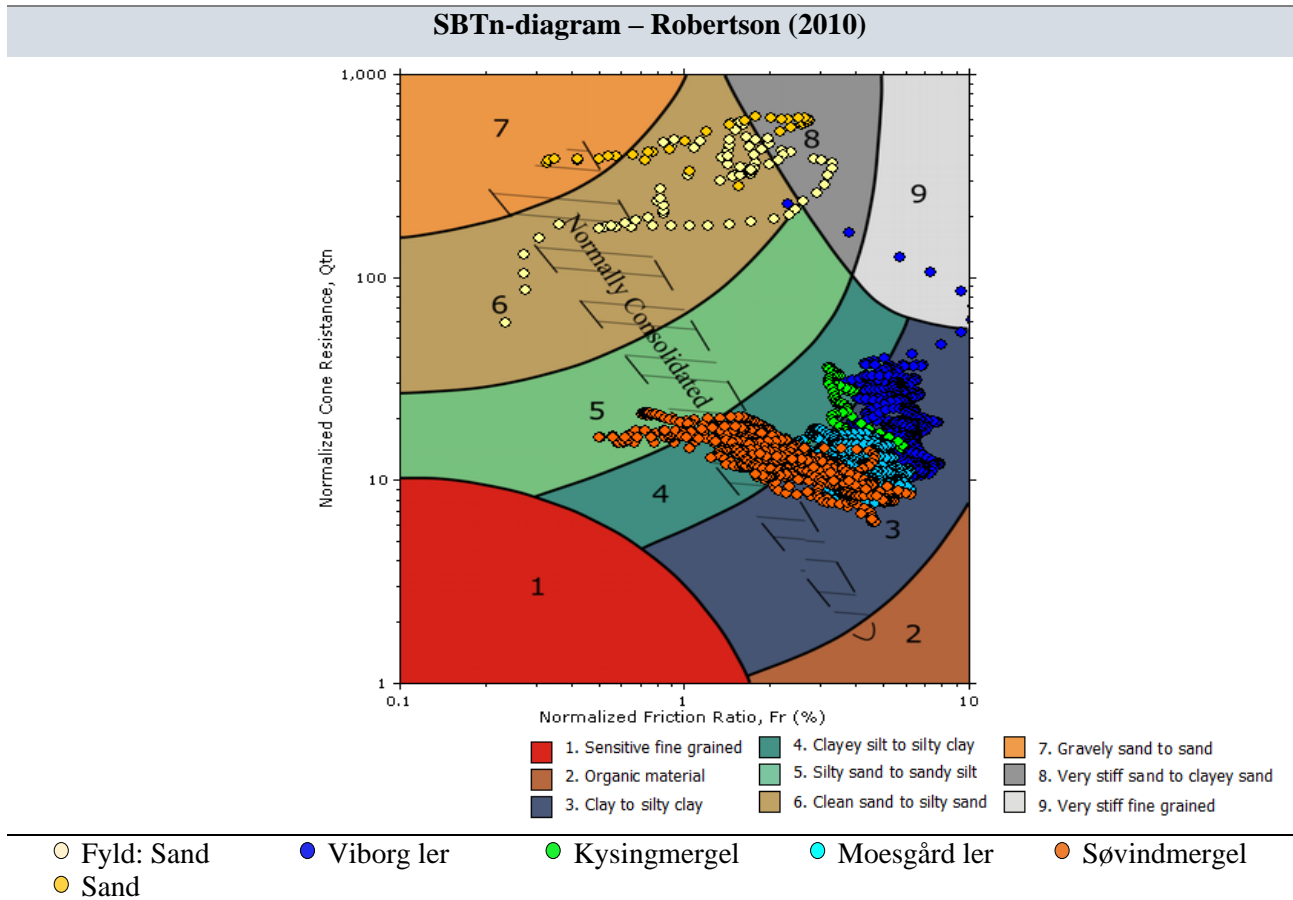
Overgangen til prækvartæret er tydelig.

Fordelingen vises illustreret på næste side.

7.2.4 Fordeling i SBTn (2010)

Af nedenstående ses CPTu-datasættes fordeling i SBTn – Robertson (2010).

Aflejringerne farveinddeles for bedre visualisering:



Figur 7.13: CPTu-data plottet i SBTn (2010).

Af fordelingen i SBTn (2010) ses, at dele af Søvindmergelen plottes skævt (under normalt konsolideret grænsen), hvorimod der indikeres øgende OCR for de øvrige aflejringer.

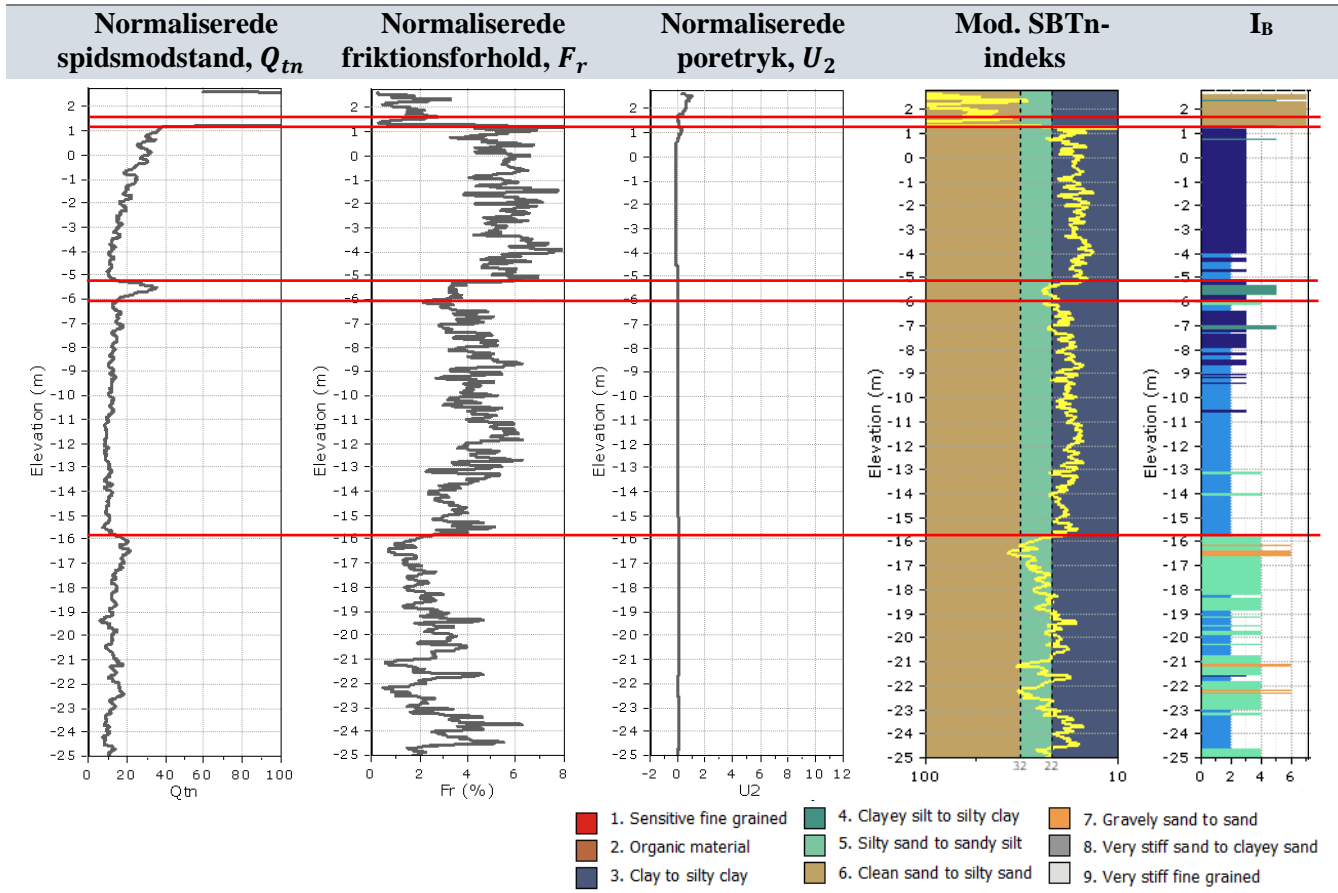
Sammenholdes lokation 2 med lokation 1, fremgår poretrykkets betydning for de normaliserede værdier i SBTn (2010). Det manglende vandspejl ($u_2 \sim 0$) resulterer i en mere 'leret'-klassifikation som resultat af lavere Q_{tn} -værdier og højere F_r -værdier.

På trods af dette kan mange tilsvarende tendenser ses for aflejringerne, som ved lokation 1. Viborg- og Moesgård leret plottes ret konsekvent, hvor Kysing- og Søvindmergelen spreder sig over flere zoner.

På dette grundlag bør tolkningen fortsættes og sammenholdes med øvrige klassifikationsdiagrammer.

7.2.5 Modificerede normaliserede data (2016)

Af nedenstående ses de normaliserede data og modificeret SBTn (2016):



Figur 7.14: Grafisk opstilling af skønnede laggrænser ud fra modificerede normaliserede data. Mod. SBTn klassifikation ses t.h.

Ud fra de skønnede laggrænser kan den modificeret SBTn-klassifikation inddeles som følgende:

Lag	Kote	SBTn-kategorisering
1	+2,8 til +1,7	'Sandlignende – dilatativ'
2	+1,7 til +1,3	'Sandlignende – dilatativ'
3	+1,3 til -5,2	'Lerlignende – dilatativ' med enkelte udfald
4	-5,2 til -6,0	'Overgangslignende – dilatativ'
5	-6,0 til -15,9	'Lerlignende – kontraktiv' med udfald
6	-15,9 til -25,0	'Overgangslignende – kontraktiv' med mange udfald

Tabel 7.7: Observationer ud fra den grafiske opstilling af modificerede normaliserede data for de skønnede laggrænser.

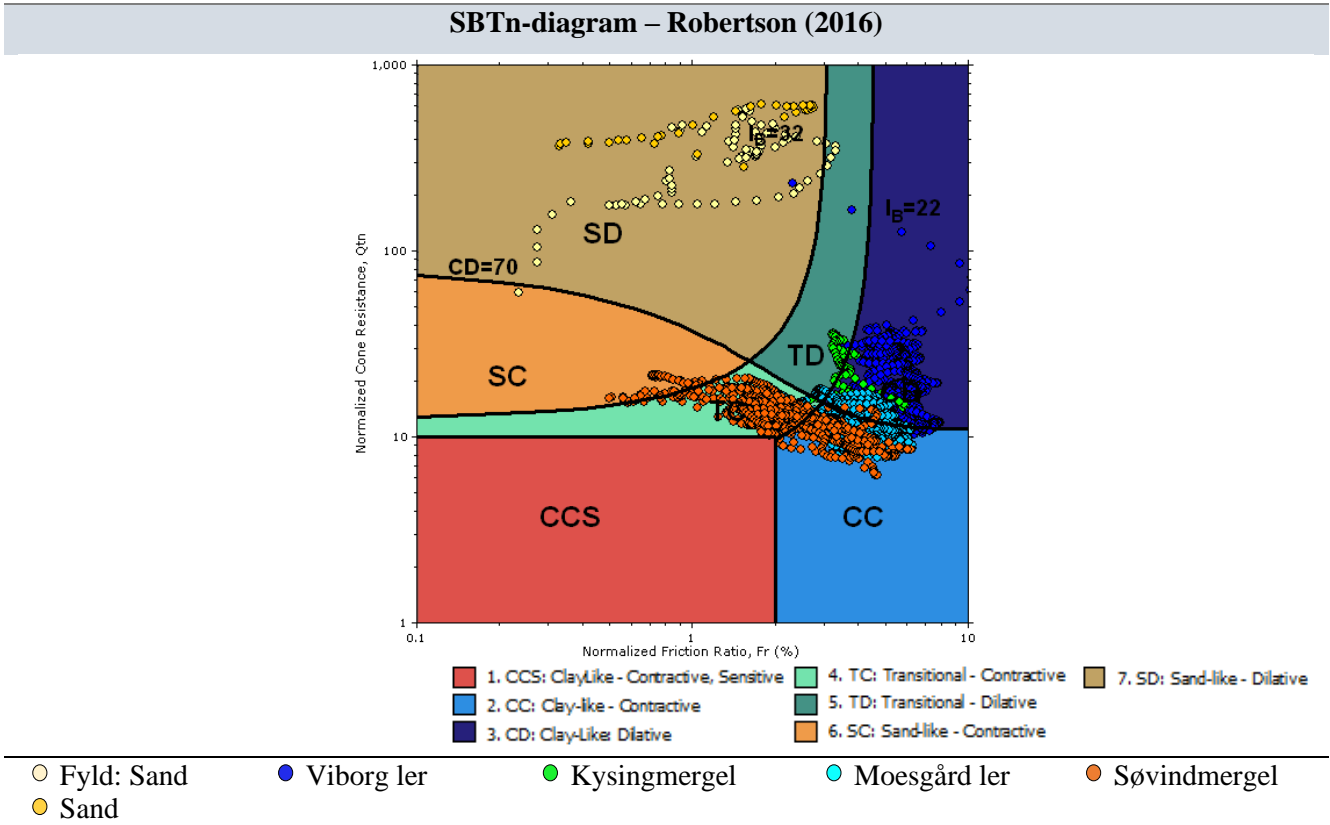
Sammenholdes opførselskarakteristika for lokation 2 med lokation 1, kan det ses, at 'CD' går igen for Viborg leret. Da der ikke korrigeres for poretryk, og der regnes med totalspændinger, vil klassifikationen for de øvrige aflejringer differentiere i dybden ift. lokation 1. Som et resultat af lavere Q_{tn} -værdier, vil klassifikationen nærme sig CD-grænsen, bidragende til overvejende kontraktive egenskaber for Moesgård leret og Søvindmergelen ('CC', 'TC').

Fordelingen vises illustreret på næste side, hvor I_B og PI tilmed kommenteres.

7.2.6 Fordeling i modificeret SBTn (2016)

Af nedenstående ses CPTu-datasættes fordeling i det modificeret SBTn-diagram (2016).

Aflejringerne farveinddeles for bedre visualisering:



Figur 7.15: CPTu-data plottet i det modificeret SBTn-diagram (2016).

De ovennævnte betragtninger kommer til udtryk i fordelingen i SBTn (2016), hvor aflejringerne dækker flere zoner, og særligt Søvindmergelen og Moesgård leret viser kontraktiv respons.

Pga. manglende VSP vil $Q_{tn} - U_2$ ikke tages i betragtning.

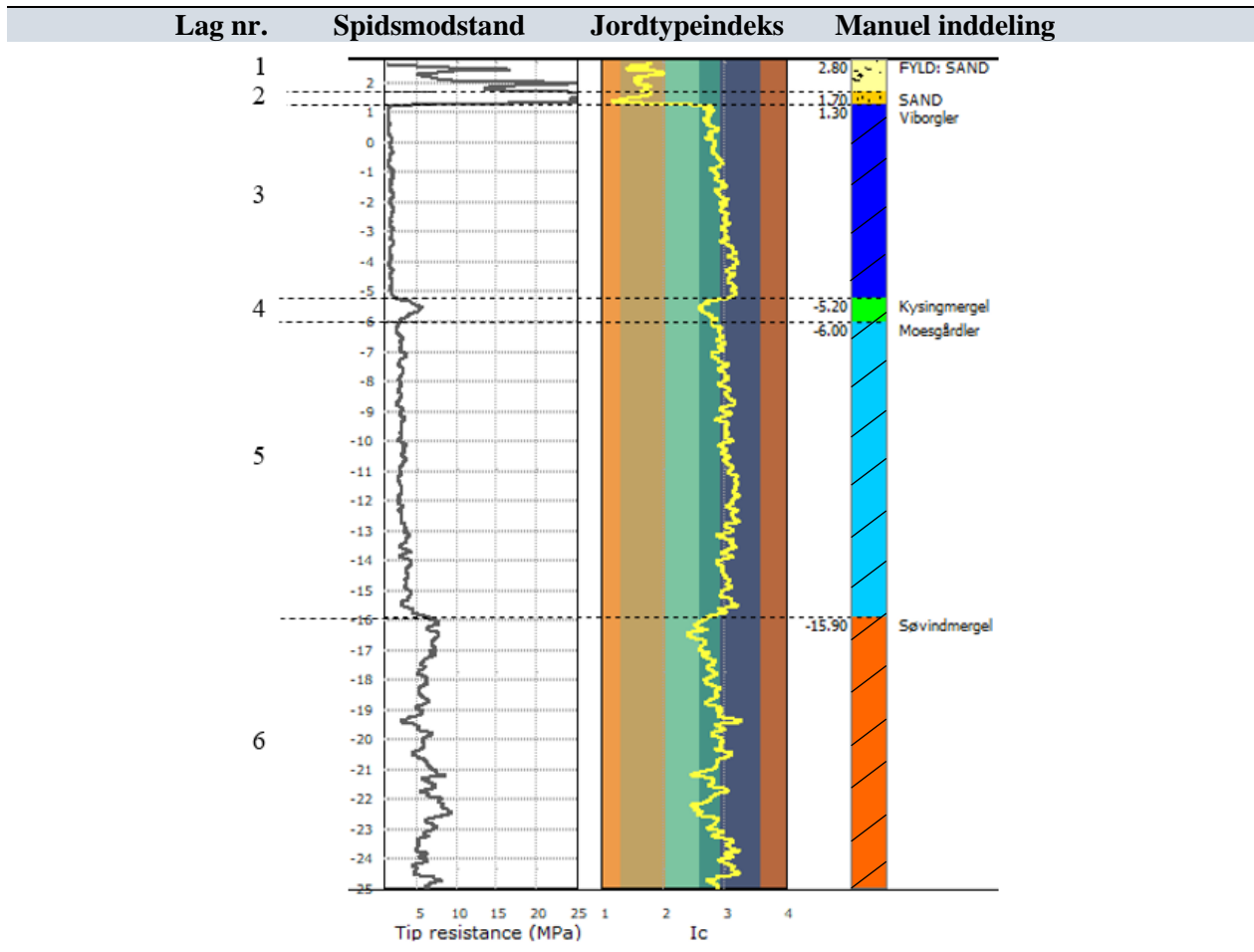
Af figur 7.15, kan følgende tendenser betragtes:

- Viborg- og Moesgård leret klassificeres hovedsageligt som hhv. 'CD' og 'CC' ($I_B < 22$), og giver derfor en god indikation på lerets plastiske egenskaber $PI > 18\%$.
- Kysingmergelen viser varierende opførselskarakteristika; 'TD' ($22 < I_B < 32$) og 'CD' ($I_B < 22$).
- Søvindmergelen viser hovedsageligt kontraktive egenskaber ('CC' og 'TC'), hvor:
 - 'TC'-klassifikationen ($22 < I_B < 32$) skyldes en høj grad af cementering stammende fra et højt kalkindhold, hvor $10 < PI < 18$.
 - 'CC'-klassifikationen ($I_B < 22$) indikerer en lavere grad af cementering, hvor $PI > 18\%$.

Identificeringen af mikrostruktur begrænses af manglende valide poretrykmålinger.

7.2.7 Estimerede parametre

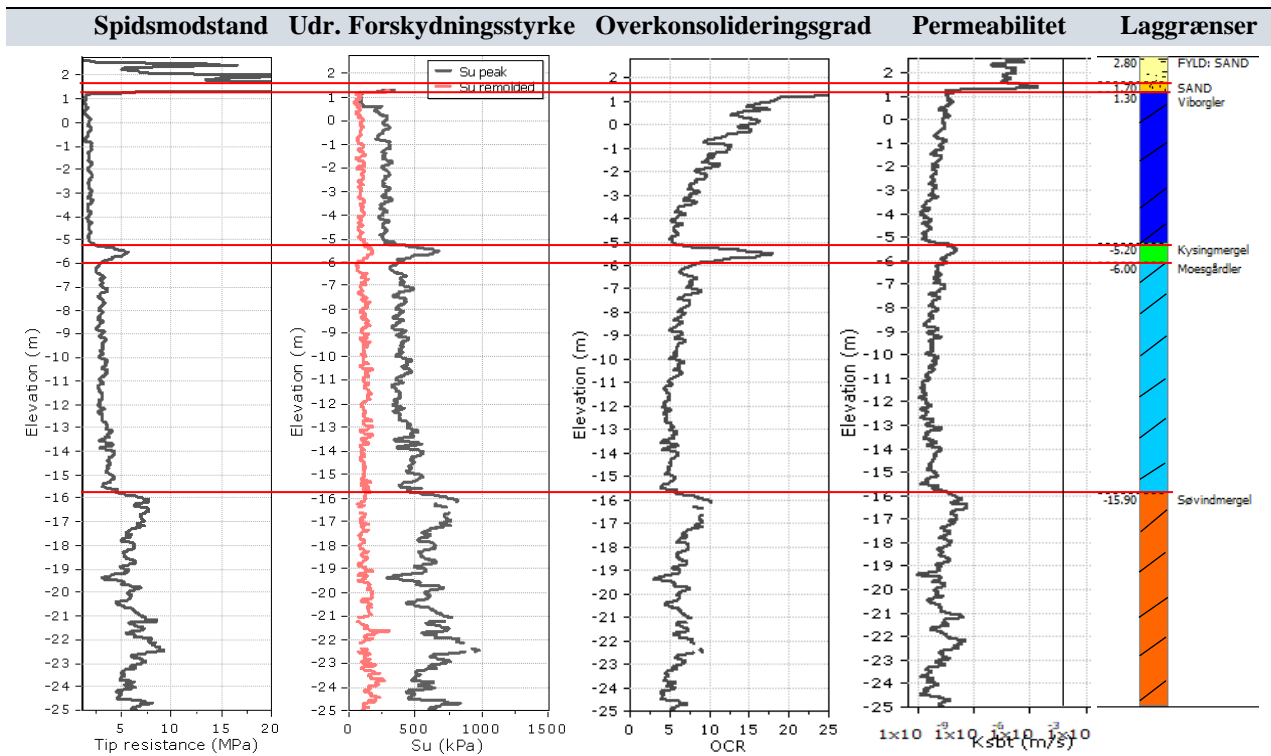
På baggrund af det ovenstående tolkningsarbejde kan stratigrafien defineres som vist nedenfor:



Figur 7.16: Stratigrafien defineres i CPeT-IT.

Ud fra hver laginddeling estimeres de geotekniske parametre på baggrund af de empiriske korrelationer, fremlagt i bilag 2. Det undersøges, om de afledte parametre stemmer overens med lokalt kendskab til aflejringerens geologiske historie.

Af nedenstående figur ses en grafisk afbildning af udvalgte afledte parametre:



Figur 7.17: Grafisk afbildning af de afledte parametre.

Af tabel 7.8 er middelværdier for aflejringernes afledte parametre skematiseret:

Lag	Aflejring	q_t [MPa]	f_s [kPa]	R_f	s_u [kPa]	OCR [÷]	k [$\frac{m}{s}$]
1	Fyld: Sand	11,3	172,7	1,5	-	-	$1,0 \cdot 10^{-4}$
2	Sand	25,5	384,9	1,5	-	-	$5,6 \cdot 10^{-4}$
3	Viborg ler	1,8	92,5	5,1	253,3	10,4	$1,2 \cdot 10^{-7}$
4	Kysingmergel	4,1	140,7	3,4	496,3	12,6	$5,5 \cdot 10^{-8}$
5	Moesgård ler	3,2	117,5	3,7	416,5	5,8	$7,6 \cdot 10^{-9}$
6	Søvindmergel	6,2	128,4	2,1	618,5	6,4	$5,0 \cdot 10^{-8}$

Tabel 7.8: Oversigt over middelværdier for de afledte parametre.

Tendenserne er tilsvarende lokation 1.

Paralleller mellem sonderingen og øvrige sonderinger udført ved undersøgelsen ses illustreret i bilag 7 – tværsnit 2.

7.3 Lokation 3

Lokation 1 og 2 vil udgøre referencepunkterne for tolkningen, hvorfor paralleller vil blive draget til dem.

Dele af tolkningen er forsimplet, hvis tendenserne er tilsvarende lokation 1 eller 2.

7.3.1 Terræn- og jordbundsforhold

Terræn- og jordbundsforholdene for lokation 3 er som følger:

- Terræn ved undersøgelsespunktet er indmålt i kote +3,4 (DVR90). Der er forgravet til kote +2,0.
- Grundvandsspejlet er indmålt i kote +0,6.
- CPTu-forsøget sammenholdes med en nærliggende lagfølgeboring, suppleret med vingeforsøg.
- Lagfølgeboringen er udført til kote -26,6, og fremgår af figur 7.18 samt bilag 8.
- Sondringen er udført til kote -42,0.

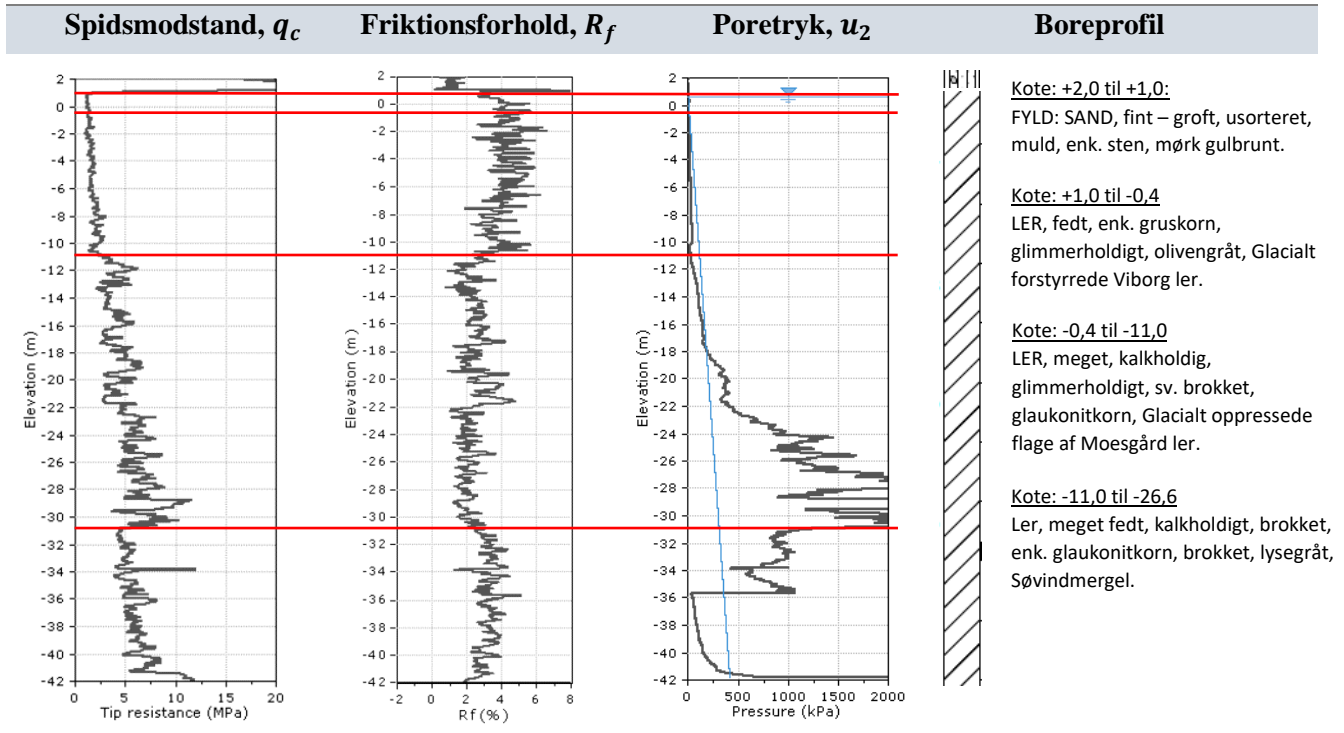
Ved lagfølgeboringen er der truffet glacialt forstyrrede Viborg ler (kote +1,0 til -0,4) og en glacialt oppressede flage af Moesgård ler (kote -0,4 til -11,0).

Kote (m)	Geologi	Prøve	Nr.	Jordart - Karakterisering	Miljø	Alder	Frost	Kalk
+3,4 til +1,0			3	FYLD: SAND, fint - groft, usorteret, gruset, mørk gulbrunt	Fy	Re		-
			4	FYLD: SAND, fint - groft, usorteret, gruset, enk. sten, mørk gulbrunt	Fy	Re		-
+1,0 til -0,4			5	LER, fedt, enk. sandslirer og gruskorn, glimmerholdigt, olivengråt	Gl	Gc		(+)
-0,4 til -11,0			21	LER, meget fedt, glimmerholdigt, olivengråt	Gl	Gc		+
			22	LER, meget fedt, enk. glaukonitkorn, glimmerholdigt, sv. brokket, grønliggråt	Gl	Gc		+
-11,0 til -26,6			40	LER, meget fedt, sv. brokket, lys brungråt, Søvind mergel	Gl	Gc		+
			41	LER, meget fedt, lysegråt, Søvind mergel	Gl	Gc		++

Figur 7.18: Udklip af lagfølgeboring fra lokation 3 (GEO).

7.3.2 Rådata

På baggrund af variationer i CPTu rådata foretages en skønnet inddeling af laggrænserne. Inddelingen er sammenholdt med en nærliggende lagfølgeboring:



Figur 7.19: Grafisk opstilling af skønnede laggrænser ud fra rådata..Tilhørende lagfølge ses t.h.

Følgende observationer og tolkning af rådata for de skønnede laggrænser opstilles, suppleret med kendskab til lokalgeologien:

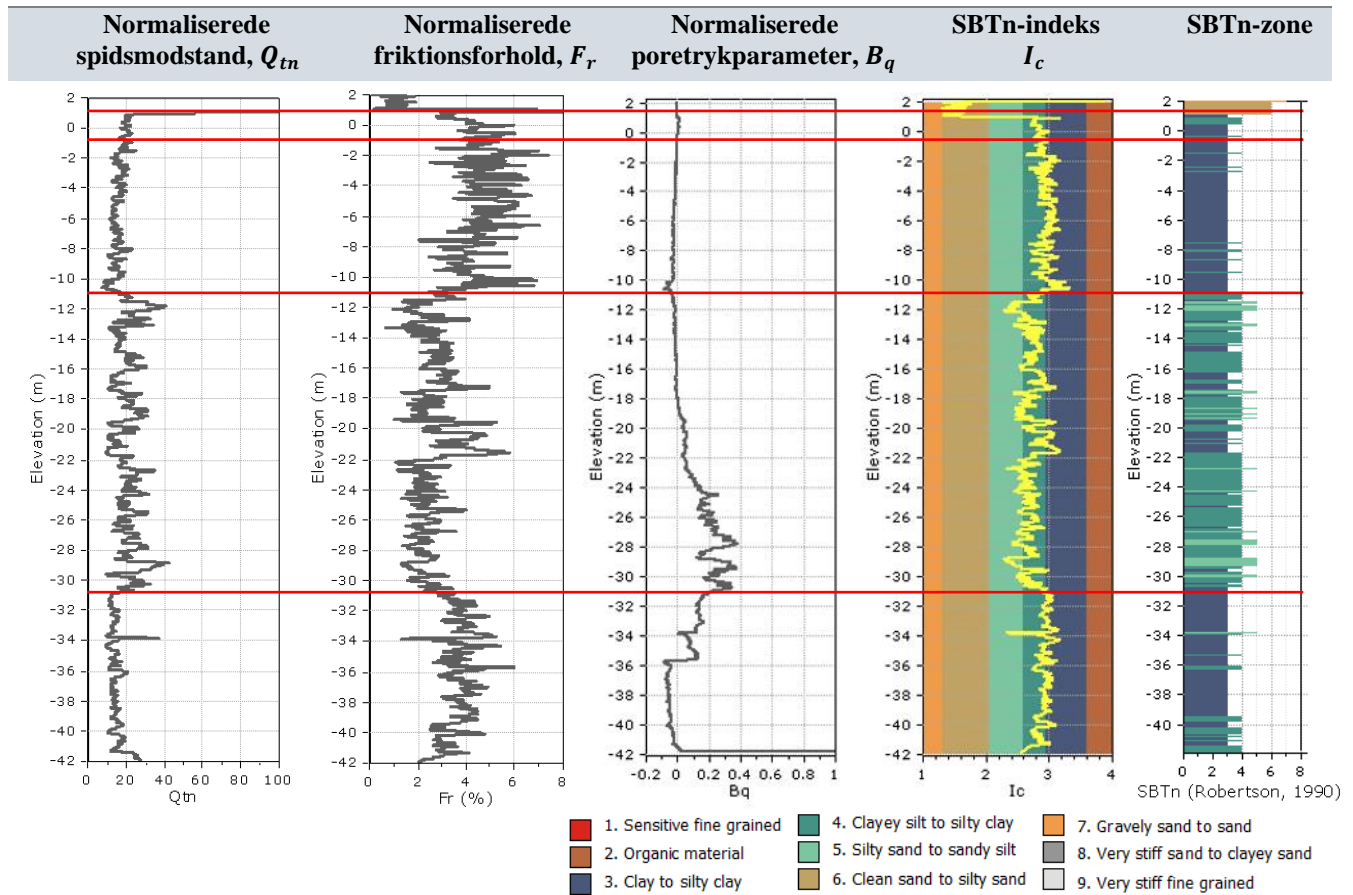
Lag	Kote	Observationer
1	+2,0 til +1,0	Høj q_c og lille R_f indikerer sandjord; formentligt fyld. $u_0 = u_2$
2	+1,0 til -0,4	Fald i q_c og øgende R_f indikerer lerjord; formentligt fra Kvartær eller Tertiær, geologisk bedømt til glacialt forstyrret Viborg ler. $u_0 = u_2$.
3	-0,4 til -11,0	Øgende q_c og øgende R_f med begrænset flimmer indikerer dominerende lerjord med indhold af bikomponenter; formentligt fra Nedre Tertiær, geologisk bedømt til glacialt forstyrret Moesgård ler. $u_2 < u_0$.
4	-11,0 til -31,0	Øgende q_c og aftagende R_f med øget flimmer indikerer lerjord med øgende indhold af bikomponenter; formentligt fra Nedre Tertiær (Søvindmergel). $u_2 > u_0$.
5	-31,0 til -42,0	Aftagende q_c og øgende R_f med begrænset flimmer indikerer lerjord med faldende indhold af bikomponenter; formentligt fra Nedre Tertiær (Søvindmergel). Både $u_2 > u_0$ og $u_2 < u_0$.

Tabel 7.9: Observationer ud fra den grafiske opstilling af rådata for de skønnede laggrænser.

Bemærk, at overgangen fra den glacialt forstyrrede Viborg ler til den glacialt oppressede flage af Moesgård ler ikke er definerbar, da Kysingmergelen ikke træffes. Tilmed er Søvindmergelen valgt opdelt i 2 lag.

7.3.3 Normaliserede data (2010)

Af nedenstående ses CPTu normaliserede data og SBTn-kategorisering – Robertson (2010):



Figur 7.20: Grafisk opstilling af skønnede laggrænser ud fra normaliserede data. SBTn klassifikation ses t.h.

Ud fra de skønnede laggrænser kan SBTn-klassifikationen inddeles som følgende:

Lag	Kote	SBTn-kategorisering
1	+2,0 til +1,0	'Sand til siltet sand'
2	+1,0 til -0,4	'Ler til siltet ler' med enkelte udfald.
3	-0,4 til -11,0	'Ler til siltet ler' med enkelte udfald.
4	-11,0 til -31,0	'Leret silt til siltet ler' med udfald
5	-31,0 til -42,0	'Ler til siltet ler' med udfald

Tabel 7.10: Observationer ud fra den grafiske opstilling af normaliserede data for de skønnede laggrænser.

Tendenserne for aflejringerne i SBTn (2010) er tilsvarende lokation 1.

SBTn (2010) vurderer ret konsekvent det glacialt forstyrrede Viborg- og Moesgård ler som 'ler til siltet ler' ($2,95 < I_c < 3,6$). Søvindmergelens tydelige lagdeling ses også af SBTn (2010), hvor den øvre del (lag 4) klassificeres som 'leret silt til siltet ler' og den nedre del (5) klassificeres som 'ler til siltet ler'.

Overgangen til prækvartæret er tydelig. Der ses ikke tegn på glacielle forstyrrelser af Viborg- og Moesgård leret i de normaliserede data.

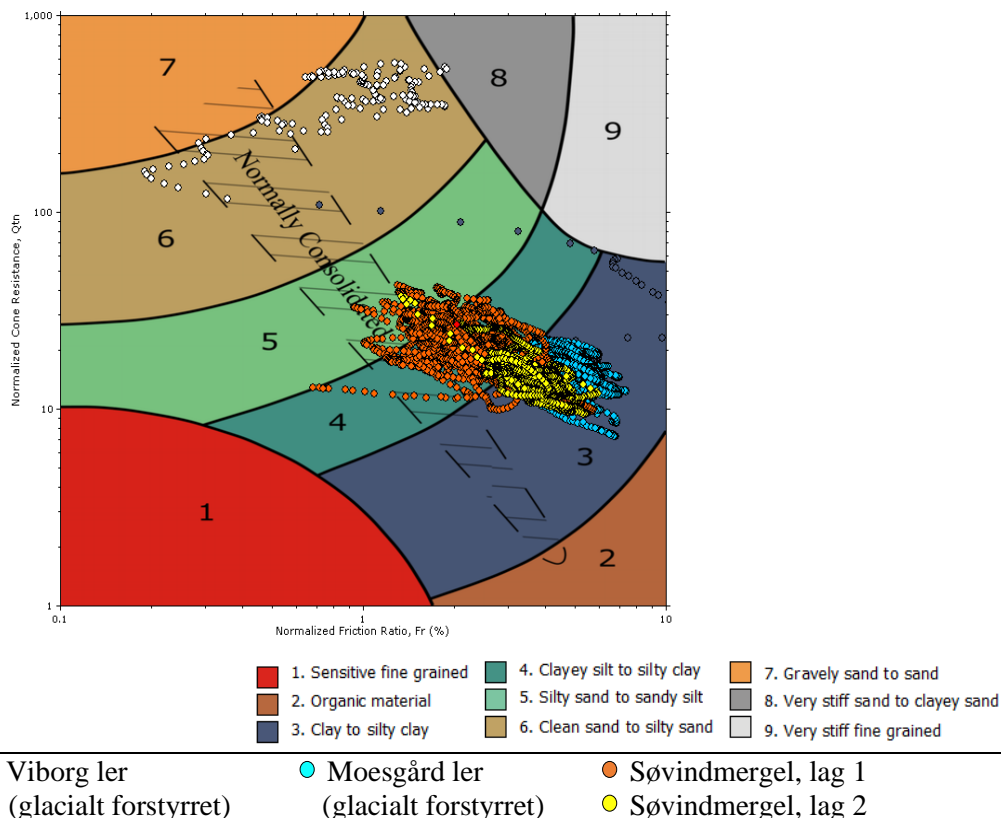
Fordelingen vises illustreret på næste side.

7.3.4 Fordeling i SBTn (2010)

Af nedenstående ses CPTu-datasættets fordeling i SBTn – Robertson (2010).

Aflejringerne farveinddeles for bedre visualisering:

SBTn-diagram – Robertson (2010)



Figur 7.21: CPTu-data plottet i SBTn (2010).

Der ses ikke en entydig differentiering mellem de palæogene aflejringer i SBTn (2010), tilsvarende lokation 1 og 2. Det er ikke muligt at se en adskillelse af det glacialt forstyrrede Viborg- og Moesgård ler.

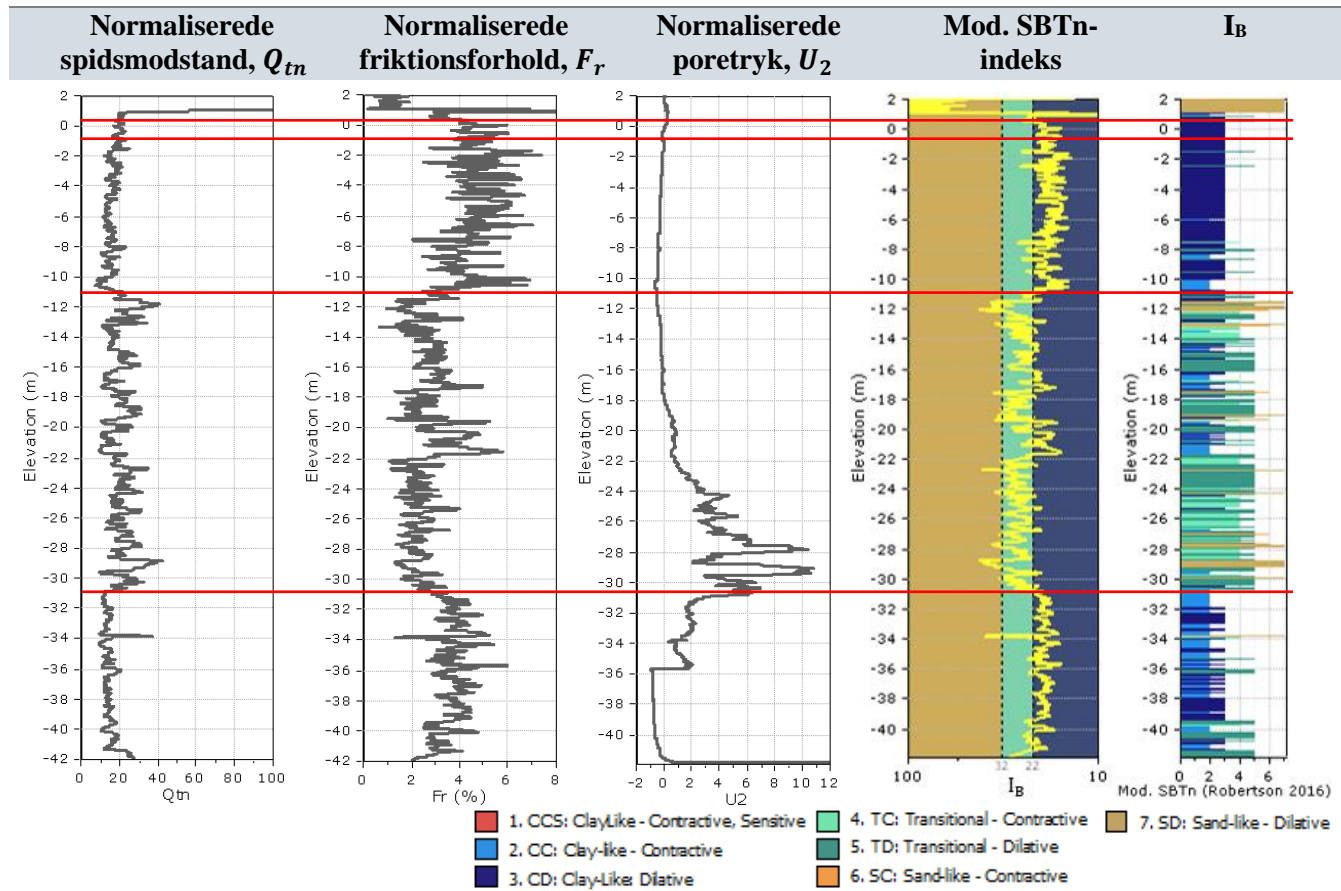
Den øvre Søvindmergel (lag 1) klassificeres overvejende som 'siltet', hvorimod den nedre del (lag 2) nærmer sig en mere 'leret'-jord. Overlap mellem lagene ses som resultat af "flimmer" i det målte data.

Af klassifikationen fremgår en øgende OCR ($Q_{tn} > 10$ og $F_r > 2$) for aflejringerne, samstemmende med deres respektive spændingshistorier.

På dette grundlag bør tolkningen fortsættes og sammenholdes med øvrige klassifikationsdiagrammer.

7.3.5 Modificerede normaliserede data (2016)

Af nedenstående ses det normaliserede data og modificeret SBTn (2016):



Figur 7.22: Grafisk opstilling af skønnede laggrænser ud fra modificerede normaliserede data. Mod. SBTn klassifikation ses t.h.

Ud fra de skønnede laggrænser kan den modificerede SBTn-klassifikation inddeles som følgende:

Lag	Kote	SBTn-kategorisering
1	+2,0 til +1,0	'Sandlignende – dilativ'
2	+1,0 til -0,4	'Lerlignende – dilativ'
3	-0,4 til -11,0	'Lerlignende – dilativ' med enkelte udfald
4	-11,0 til -31,0	'Overgangslignende – dilativ/kontraktiv' med mange udfald
5	-31,0 til -42,0	'Lerlignende – dilativ/kontraktiv' med enkelte udfald

Tabel 7.11: Observationer ud fra den grafiske opstilling af modificerede normaliserede data for de skønnede laggrænser.

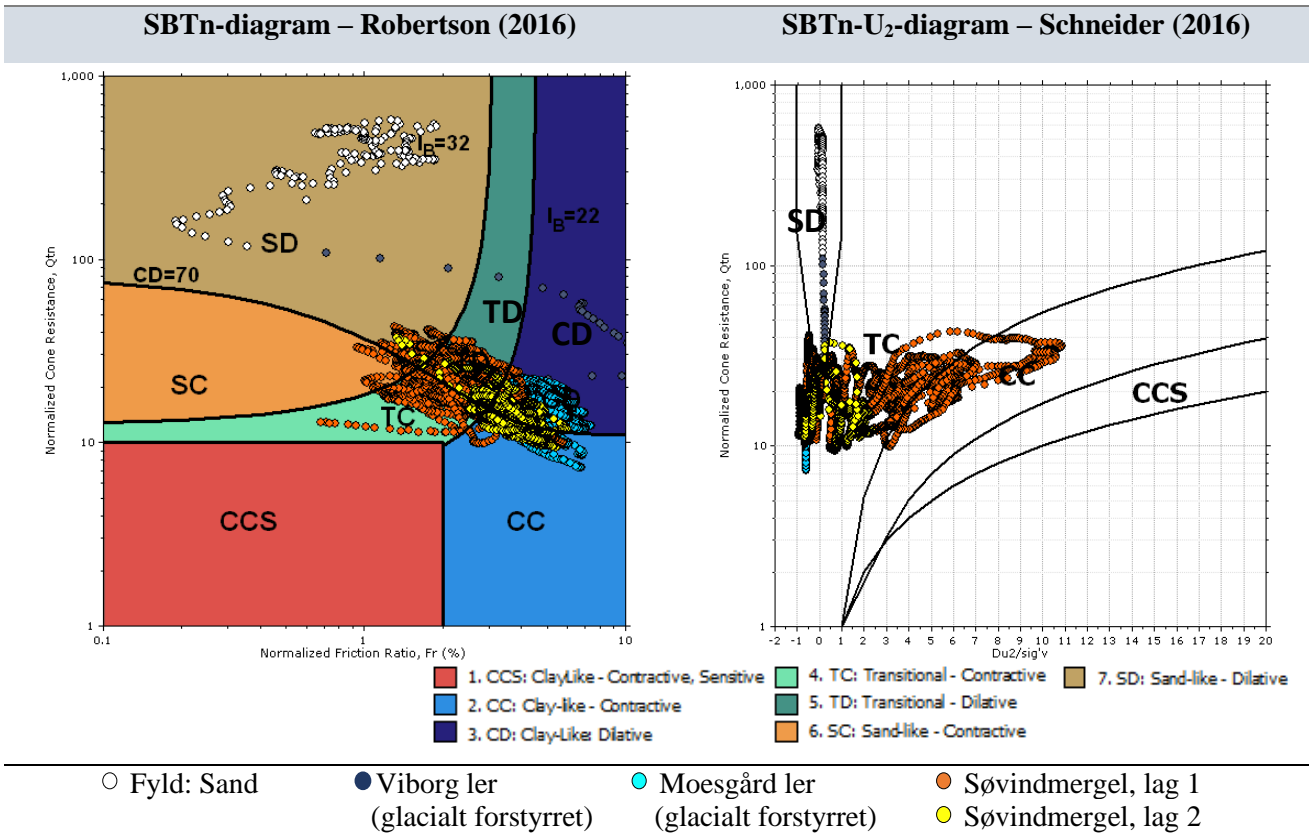
SBTn (2016) klassificerer Viborg- og Moesgård leret som 'CD', samstemmende med deres mineralogiske sammensætning og egenskaber; begyndende kontraktiv opførsel for Moesgård leret vidner om øgende cementering. Den øvre del af Søvindmergelen viser varierende opførsel ('TC', 'TD') og differentierer fra den nedre del af Søvindmergelen, der viser mere 'lerlignende' opførsel ('CC', 'CD'). De tydelige variationer i spredningen i lag 1 og 2 vidner om, at Søvindmergelen er stærkt lagdelt som resultat af, at den er afsat i forskellige aflejringsmiljøer, der omfatter varierende havniveau, temperaturer og indhold af biologisk materiale i vandet.

Fordelingen vises illustreret på næste side, hvor I_B og PI tilmed kommenteres.

7.3.6 Fordeling i modificeret SBTn (2016)

Af nedenstående ses CPTu-datasættes fordeling i de modificerede STBn-diagrammer.

Aflejringerne farveinddeles for bedre visualisering:



Figur 7.23: CPTu-data plottet i de modificerede SBTn-diagrammer (2016).

Af fordelingen i de modificerede SBTn-diagrammer (2016) ses, at de palæogene aflejringer dækker flere zoner, og uoverensstemmelser i klassifikationen mellem de to diagrammer fremgår som forventet.

Af figur 7.23.tv., kan følgende tendenser betragtes:

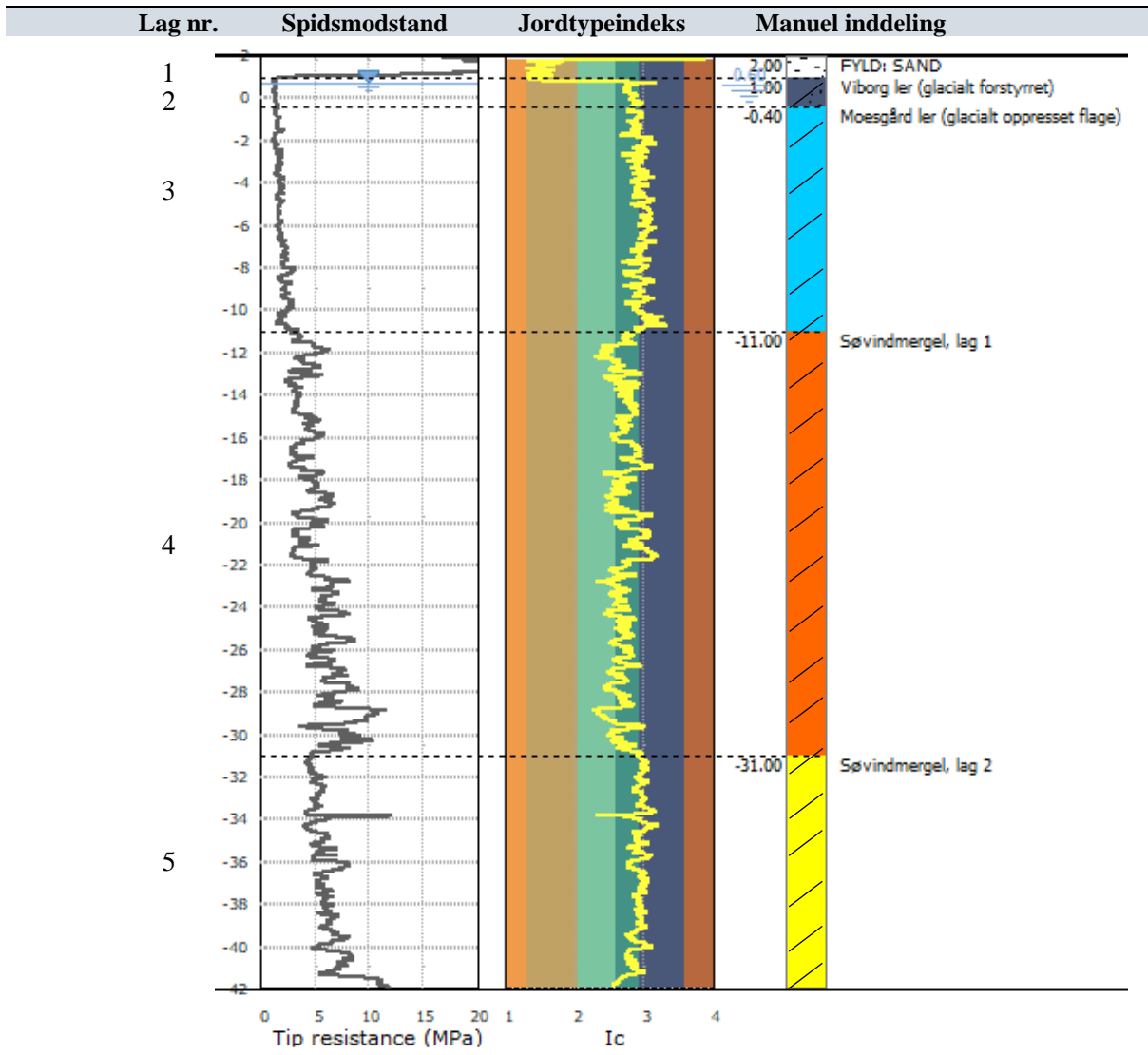
- Viborg- og Moesgård leret samt Søvindmergelen klassificeres tilsvarende lokation 1.
- Indflydelsen af pladetektoniske forstyrrelser og gletsjeraktivitet fremgår ikke af klassifikationen.

Af figur 7.23.th., kan følgende tendenser betragtes:

- Den høje U_2 -værdi for den øvre del af Søvindmergelen (lag 1) indikerer mikrostruktur. Laget klassificeres overvejende 'CC' som forventet.
- De små til negative U_2 -værdier for Moesgård leret og den nedre del af Søvindmergelen (lag 2) indikerer lidt til ingen mikrostruktur. Lagene klassificeres 'TC' som forventet.

7.3.7 Estimerede parametre

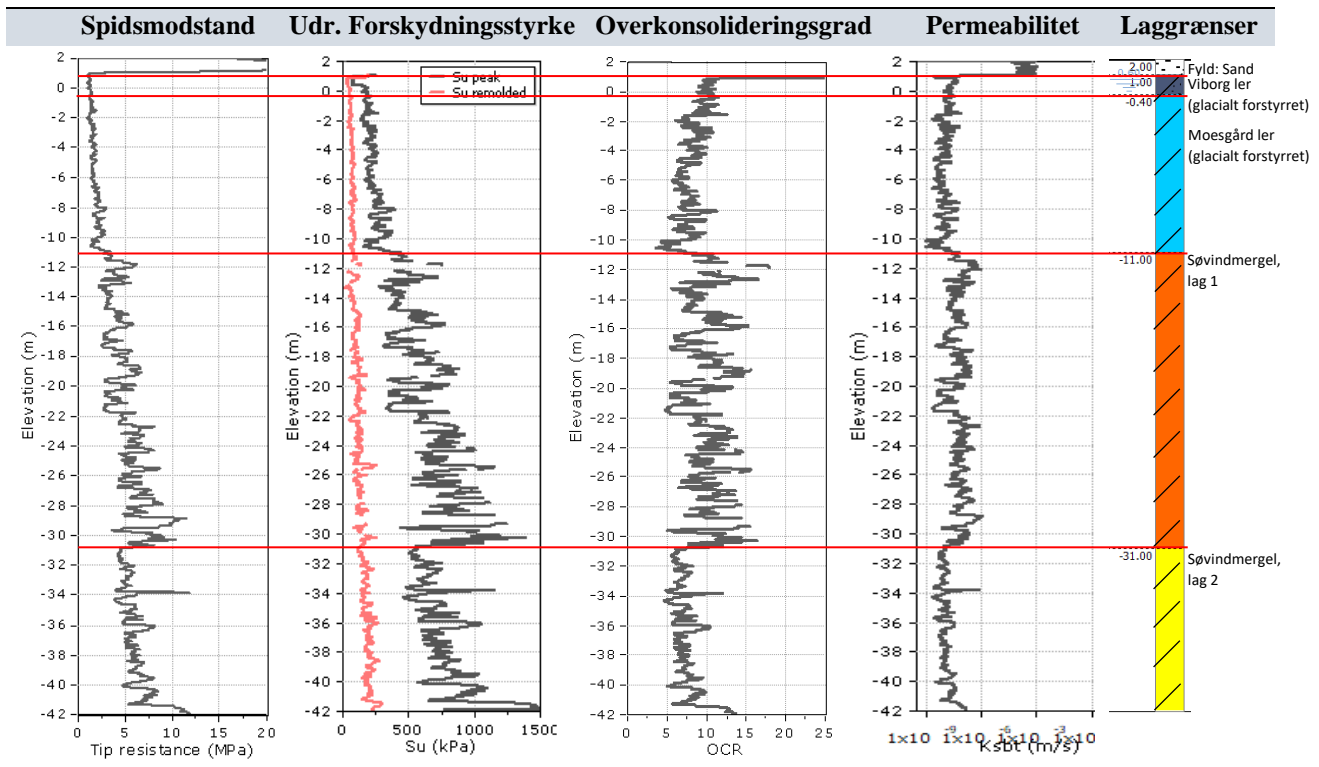
På baggrund af det ovenstående tolkningsarbejde kan stratigrafien defineres som vist nedenfor:



Figur 7.24: Stratigrafien defineres i CPeT-IT.

Ud fra hver laginddeling estimeres de geotekniske parametre på baggrund af de empiriske korrelationer, fremlagt i bilag 2. Det undersøges, om de afledte parametre stemmer overens med lokalt kendskab til aflejringerens geologiske historie.

Af nedenstående figur ses en grafisk afbildning af udvalgte afledte parametre:



Figur 7.25: Grafisk afbildning af de afledte parametre.

Af tabel 7.12 er middelværdier for aflejringerens afledte parametre skematiseret:

Lag	Aflejring	q_t [MPa]	f_s [kPa]	R_f	s_u [kPa]	OCR [÷]	k [$\frac{m}{s}$]
1	Fyld: Sand	23,9	252,3	1,1	-	-	$3,3 \cdot 10^{-4}$
2	Viborg ler	1,4	58,3	4,4	138,4	9,4	$6,6 \cdot 10^{-7}$
3	Moesgård ler	1,8	72,6	4,0	232,5	6,1	$1,3 \cdot 10^{-8}$
4	Søvindmergel, lag 1	5,1	112,6	2,2	630,3	9,3	$1,0 \cdot 10^{-7}$
5	Søvindmergel, lag 2	6,0	188,3	3,1	751,7	5,9	$1,9 \cdot 10^{-8}$

Tabel 7.12: Oversigt over middelværdier for de afledte parametre.

Som forventet reflekterer q_t variationer i jordlagenes mekaniske egenskaber og afledte parametre. f_s er som forventet størst i Søvindmergelen.

Ved betragtning af q_t og s_u er disse generelt stigende med dybden, hvoraf et 'dyk' med en fortsat stigning ses ved overgangen mellem de to Søvindmergel lag. Som gennemgået i afsnit 7.3.6 ses den nedre del (lag 2) at være mindre cementeret, hvilket afspejler en variation af styrkeegenskaber gennem formationen.

For de glacialt forstyrrede lag ses ud fra begrænset dataundersøgelse ingen tydelige indflydelser på de geotekniske egenskaber, som viser tendenser tilsvarende lokation 1.

Paralleller mellem sonderinger udført ved undersøgelsen ses illustreret i bilag 9 – tværsnit 3.

8. Sammenfatning

Nærværende rapport har haft til hensigt at optimere tolkningsarbejdet af de aarhusianske palæogene lerarter ved at analysere tendenser ved klassificeringen i CPeT-IT ud fra et omfattende datagrundlag samt geologisk baggrundsviden.

Med afsæt i den gennem projektet erhvervede viden foretages en sammenfatning af:

- Fundne tendenser og korrelationer mellem de palæogene aflejringer og SBT.
- Begrænsninger og fejkilder.
- CPT set ud fra et bæredygtigt perspektiv.
- Projektets helhed set i relation til dets problemformulering.

Hertil tilknyttes mulige interesseområder for videreundersøgelser.

8.1 Palæogene leraflejringer i CPeT-IT

I nærværende delafsnit foretages en opsummering af de analyserede tendenser i afsnit 7. Opsummeringen har til hensigt at foretage en samlet be- eller afkræftelse af de opstillede hypoteser i afsnit 5. Hertil vurderes årsager til, at udfaldet af klassifikationen ikke stemmer overens med hypoteserne.

Fordelingen er defineret ved følgende farver:

- Viborg ler
- Kysingmergel
- Moesgård ler
- Søvindmergel
- Alle fire palæogene aflejringer

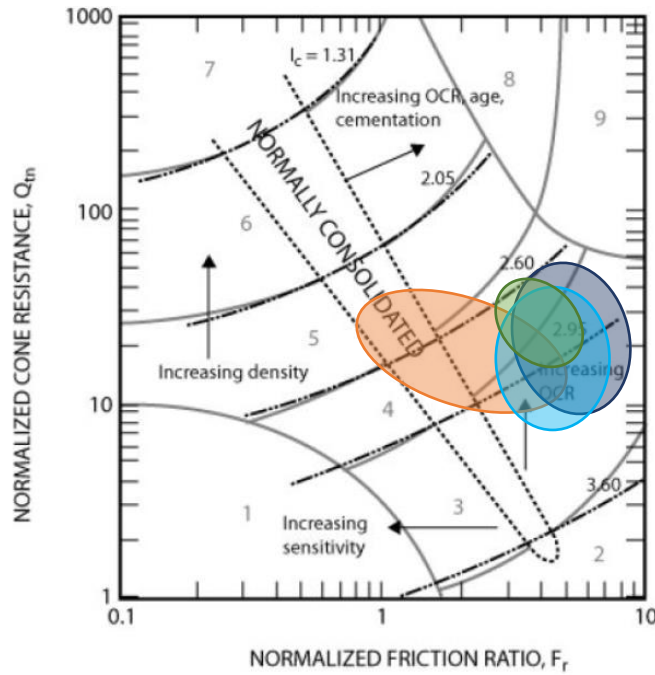
8.1.1 Rådata

Geologien afspejles i de målte parametre for alle 3 eksempler, hvor dannelsesprocesser tillader differentiering mellem de fire palæogene leraflejringer:

- Søvindmergelens varierende sedimentationsforhold (jf. afsnit 3.1.2.2) fremgår af ”flimmer” i rådata. ”Flimmeret” er et udtryk for, at aflejringeren er stærkt lagdelt, hvilket resulterer i varierende mekaniske egenskaber stammende fra dens varierende kalkindhold.
- Viborg- og Moesgård lerets rolige sedimentationsforhold (jf. afsnit 3.1.2.1 og 3.1.2.2) fremgår af den mere homogene adfærd, reflekteret i rådata. Grænsen mellem de 2 lag defineres af en ’peak’ q_c -værdi, som indikerer en variation i sedimentationsforholdene for en ’kort stund’, hvor det kalkholdige Kysingmergel blev afsat. Ved lokation 3 er overgangen ikke definerbar, hvorfor en etableret korrelation til lagfølgen er nødvendig.
- f_s er størst i mergelerne som resultat af, at kalken øger lerjordens friktionsmodstand.
- u_2 afspejler lerets opførselsegenskaber, hvor poretrykkene er størst i de cementerede aflejringer (jf. afsnit 4.2.3).

Overgangen til prækvartæret drøftes i afsnit 8.2.5.

8.1.2 Fysisk-betonet klassifikation (SBTn 2010):



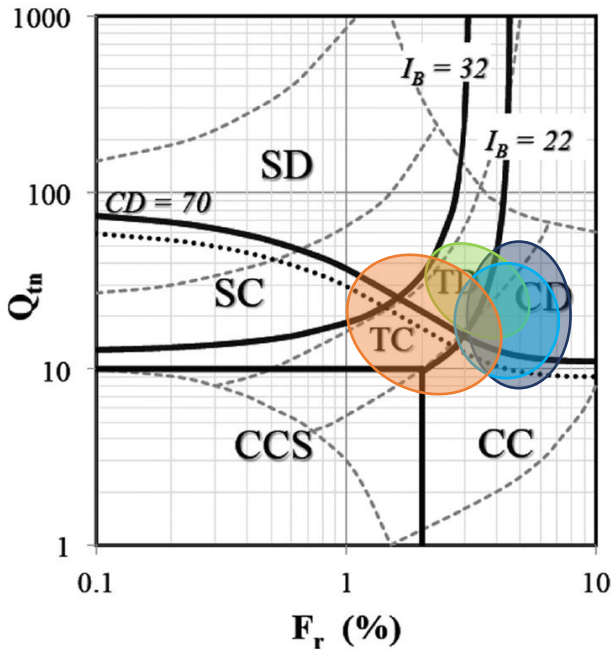
Figur 8.1: Målt inddeling i SBTn-diagram Q_m-F_r (2010).

Følgende tendenser er observeret i SBTn (2010):

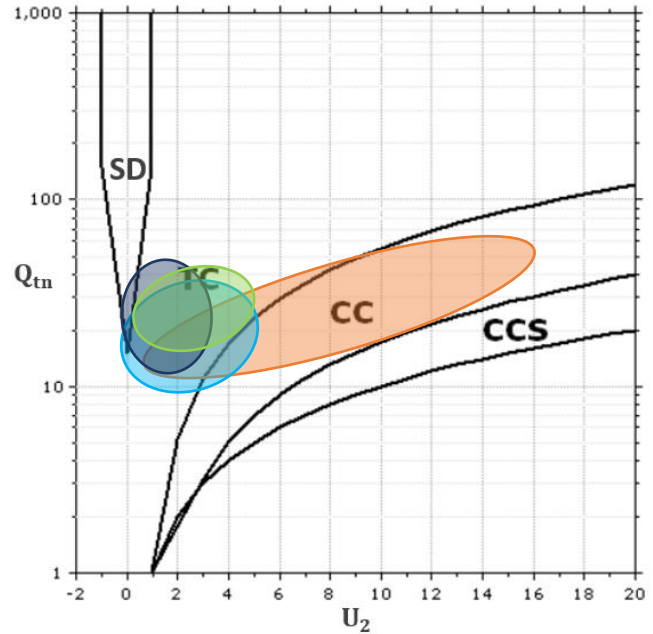
●	<p>Alle fire palæogene aflejringer har generelt $I_c > 2,05$, hvor en $2,05 < I_c < 2,95$ er en god indikator på en mere cementeret jord.</p> <p>$F_r > 1$ (uagtet tilstand) med meget få udfald og $Q_{tn} > 8$.</p> <p>Alle fire palæogene aflejringer plotter over det normalt konsoliderede område. $\varphi' \neq 0$ og $S_u \neq 0$.</p>
●	<p>Viborg leret klassificeres overvejende som 'siltet ler til ler' ($2,95 < I_c < 3,6$) med udfald i 'leret silt til siltet ler' ($2,6 < I_c < 2,95$).</p>
●	<p>Kysingmergelen klassificeres overvejende som 'leret silt til siltet ler' ($2,6 < I_c < 2,95$) med udfald i 'siltet ler til ler' ($2,95 < I_c < 3,6$).</p>
●	<p>Moesgård leret klassificeres overvejende som 'siltet ler til ler' ($2,95 < I_c < 3,6$) med udfald i 'leret silt til siltet ler' ($2,6 < I_c < 2,95$).</p>
●	<p>Søvindmergelen klassificeres overvejende som 'leret silt til siltet ler' ($2,6 < I_c < 2,95$), 'siltet ler til ler' ($2,95 < I_c < 3,6$) og 'siltet sand til sandet silt' ($2,05 < I_c < 2,6$).</p>

Tabel 8.1: Observerede tendenser i SBTn (2010).

8.1.3 Opførselsbaseret klassifikation (SBTn 2016):



Figur 8.2: Målt inddeling i SBTn-diagram $Q_{tn}-F_r$ (2016).



Figur 8.3: Målt inddeling i opdateret Schneider et al (2012) $Q_{tn}-U_2$.

Følgende tendenser er observeret i modificeret SBTn (2016):

Aflejring	Klassifikation* ($Q_{tn} - F_r$)	I_B ($Q_{tn} - F_r$)	PI ($Q_{tn} - F_r$)	U_2^{**} og K_G^{***} ($Q_{tn} - U_2$)
●	'CD' og 'CC'	$I_B < 22$	$PI > 18\%$	$-2 < U_2 < 4$ $K_G^* \leq 330$
●	'TD' og 'CD'	Ucementerede del: $I_B < 22$ Cementerede del: $22 < I_B < 32$	Ucementerede del: $PI > 18\%$ Cementerede del: $10\% < PI < 18\%$	Ucementerede del: $-2 < U_2 < 4$ $K_G^* \leq 330$ Cementerede del: $U_2 > 4$ $K_G^* > 330$
●	'CD' og 'CC'	$I_B < 22$	$PI > 18\%$	$-2 < U_2 < 4$ $K_G^* \leq 330$
●	'TC', 'TD', 'CD' og 'CC' med få udfald i 'SD'.	Ucementerede del: $I_B < 22$ Cementerede del: $22 < I_B < 32$	Ucementerede del: $PI > 18\%$ Cementerede del: $10\% < PI < 18\%$	Ucementerede del: $-2 < U_2 < 4$ $K_G^* \leq 330$ Cementerede del: $U_2 > 4$ $K_G^* > 330$

Tabel 8.2: *Under forudsætning af intet VSP er $Q_{tn} - F_r$ bedst anvendeligt idet $q_c \sim q_t$.

**Under forudsætning af indmålt VSP er $Q_{tn} - U_2$ bedst anvendeligt idet $U_2 \neq 0$.

*** Antagelse om K_G^* . Bør verificeres af SCPTu-forsøg.

8.1.4 Afledte parametre

Det generelle billede viser $OCR > 4$ for alle fire palæogene leraflejring, hvilket stemmer godt overens med, at aflejringerne er stærkt forkonsoliderede.

s_u er korreleret med nærliggende boringer, hvortil N_{kt} er fastlagt for hvert jordlag. k indikerer som forventet meget lavpermeable lerjorde.

Størrelsen på OCR og N_{kt} drøftes i 8.2.2.

8.1.5 Korrelation mellem de aarhusianske palæogene lerarter og SBT

De ovenstående tendenser er observeret på baggrund af dataeksempler fra tre forskellige lokationer i Aarhus by- og havneområde.

Under tolkningsarbejdet blev det pointeret, at $Q_{tn}-F_r$ -diagrammerne (2010-2016) viser stor spredning af data, hvorfor en entydig klassifikation af aflejringerne ikke fremgår. Dette gør sig særligt gældende for mergelerne, der er karakteriseret som stærkt lagdelte. Derimod plotter Viborg- og Moesgård leret mere konsekvent i diagrammerne. Diagrammerne er kun gældende for 'ideal' jorde, og bør derfor anvendes ud fra dette grundlag.

I $Q_{tn}-F_r$ (2010-2016) bliver de normaliserede data plottet som punkter, hvorfor en egentlig visualisering af rækkefølgen ikke fremgår af diagrammerne. Benyttes diagrammerne i samspil med SBTn-indekserne (I_c og I_p) er det muligt at opnå en meget bedre differentiering mellem aflejringerne; herunder hente information om begyndende lagdelinger, plasticitet, øgende OCR og særligt "flimmer".

Bedømmelser som hhv. 'siltet' og 'overgangsjorde' understreger de empiriske begrænsninger ved klassifikationssystemerne. Bedømmelserne relateres til aflejringernes dominerende indhold af bikomponenter og ikke ift. deres egentlige hovedbetegnelse, hvilket kan skabe forvirring ved bedømmelsen. Lokalt kendskab til geologi er derfor en nødvendighed for en optimal klassifikation.

Det vurderes, at den største gevinst at hente ved Robertsons opdatering af SBT-klassifikationssystemet i 2016 er $Q_{tn} - U_2$ -diagrammet. Sammenholdes diagrammet med geologisk viden om de palæogene lerarter, betragtes en begyndende differentiering mellem de ucementerede til let cementerede og stærkt cementerede aflejring. En differentiering som hidtil ikke har været mulig på baggrund af SBTn (2010) - grundlaget. De stærkt cementerede palæogene leraflejring plottes ud fra betingelsen $Q_{tn} > 12$ og $U_2 > 4$ i diagrammet som en indikation på et betydeligt indhold af mikrostruktur.

Muligheden for at identificere mikrostruktur og registrere de stærkt cementerede aflejringers komplekse opførsel betyder, at $Q_{tn} - U_2$ -diagrammet er et yderst brugbart værktøj for den geotekniske ingeniør, eftersom jordlag med en høj grad af cementering stammende fra et højt kalkindhold ofte indikerer gunstige styrke- og stivhedsegenskaber.

I de kommende delafsnit vil faktorer, der har betydning for udfaldet af klassificeringen af de aarhusianske palæogene leraflejring, blive drøftet og diskuteret. Dette skal ses i sammenhæng med at kunne opnå en optimeret klassifikation ved fremtidige projekter i disse særligt karakteristiske leraflejring.

8.2 Begrænsninger og fejlkilder

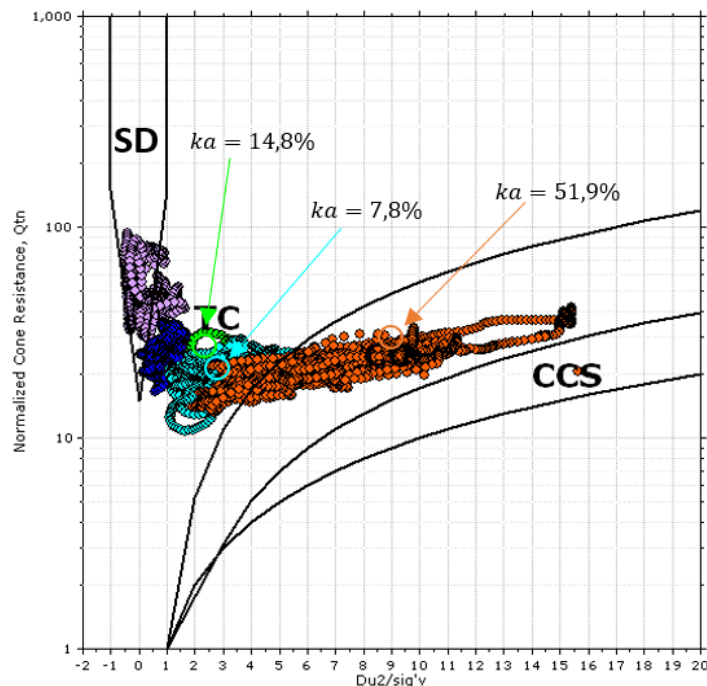
I nærværende delafsnit drøftes begrænsninger og fejlkilder, der kan have indflydelse på udfaldet af klassifikationen og de afledte parametre.

8.2.1 Grad af cementering

Med henblik på at opnå en optimeret jordklassifikation vurderes det, at skillegrænsen for mikrostruktur ($Q_{tn} = 12$ og $U_2 = 4$) bør undersøges yderligere for de palæogene leraflejringer. Et udgangspunkt for videreundersøgelse bør være udførelsen af SCPTu-forsøg med henblik på fastlæggelsen af K_G^* , hvortil denne sammenholdes med plasticitetsindekser og kalkindholdsprøver udført på jordprøver af de plastiske lerarter.

I nærværende rapport er klassifikationen af de palæogene aflejringer foretaget på baggrund af CPTu-forsøg, hvortil hypoteser er opstillet ud fra case-studier samt kendskab til lokalgeologi (jf. afsnit 5). Ved lokation 1 blev Q_{tn} - U_2 -klassifikationen sammenholdt med enkeltstående kalkindholdsprøver i hhv. Kysingmergel (kote -13,0), Moesgård ler (kote -17,5) og Søvindmergel (kote -23,0). Kalkindholdsbedømmelserne fremgår af figur 8.4 og giver en god indikation på, at hypoteserne opstillet i delafsnit 5.4 er forholdsvist godt begrundet. Som illustreret, vil Moesgård leret med lidt til ingen mikrostruktur ($U_4 < 4$) klassificeres overvejende som en 'ideal' jord, hvilket er understøttet af det lave kalkindhold ($ka = 7,8\%$). Søvindmergelen besidder derimod meget mikrostruktur ($U_2 > 4$) og klassificeres som 'struktureret' jord, understøttet af det høje kalkindhold ($ka = 51,9\%$).

Hvor skillegrænsen mellem en ucementeret og cementeret jord i Q_{tn} - U_2 ligger, bør understøttes af yderligere undersøgelser. Dette har ikke været muligt at definere ud fra datagrundlaget i nærværende projekt.



Figur 8.4: Q_{tn} - U_2 -diagram med kalkindholdsbedømmelser.

Ucementerede aflejrings klassifikation begrænses i Q_{tn} - U_2 . Som resultat af det snævre interval på $-2 < U_2 < 4$ vil disse kategoriseres overvejende som 'ideal' jorde under betegnelsen 'SD' og/eller 'TC'.

8.2.2 Sprækkestrukturers indflydelse på de afledte parametre

At optimere og fastlægge nøjagtige afledte geotekniske parametre for en lerjord, der er karakteriseret ved at have varierende styrke- og stivhedsegenskaber, har vist sig at være en til dels udfordrende opgave i CPeT-IT. De palæogene leraflejringer er dybt influeret af deres sprækkestrukturer. CPT-sonden, der måler jords styrke og stivhed ud fra spidsmodstanden, er kun i et begrænset omfang i stand til at registrere sprækkernes indflydelse på styrken af leret. De afledte parametre bør derfor altid udledes på baggrund af en etableret korrelation til vinge- eller laboratorieforsøg.

8.2.2.1 Overkonsolideringsgrad

Den udførte parameteranalyse (jf. afsnit 6.2.3.1) vurderede, at et optimalt OCR -profil ikke er opnåeligt, eftersom k_{OCR} ikke er i stand til at antage forskellige værdier i CPeT-IT for de varierende aflejringer.

Den empirisk afledte værdi for OCR blev sammenholdt med en estimeret forbelastningsspænding på $\sigma'_{pc} = 5 \text{ MPa}$, og viste på dette grundlag, at CPeT-IT generelt underestimerer OCR . Forbelastningsspændingen blev vurderet til at være ens for de palæogene aflejringer, hvilket i store træk er en realistisk vurdering, eftersom aflejringerne tidligere har været dækket af op til 1000 m tykke lag af aflejringer fra Oligocæn og Miocæn, der i løbet af Kvartær eroderede væk (jf. afsnit 3.1.3). På dette grundlag udgør overlejringsstrykket variabelen, hvorfor OCR ideelt set bør aftage med dybden. Det er selvfølgelig med visse forbehold, at denne antagelse gøres, eftersom mange parametre har indflydelse på størrelsen af OCR , herunder sprækkestrukturer, diagenese mv.

8.2.2.2 Udrænet forskydningsstyrke

CPT er ikke i stand til at måle vingestykker direkte, hvorfor den skal udledes ud fra empiriske korrelationer, der er korreleret med tilhørende in-situ eller vingeforsøg (jf. afsnit 6.2.3.2).

På dette grundlag blev en række korrelationsfaktorer bestemt for de fire palæogene aflejringer (jf. tabel 6.1). Sammenholdes disse med korrelationsfaktorer bestemt i Aarhus-området af GEO (tabel 8.3), kan tendenser ses for de palæogene leraflejringer (figur 8.3).

Jordart og lokation	N_{kt}
Søvindmergel på Århus Havn	6,7
Søvindmergel på nordlig del af Århus Havn	7,6
Septarieler og Søvindmergel fra Århus C	6,0

Tabel 8.3. Korrelationsfaktorer for aarhusianske leraflejringer, bestemt af GEO (Okkels).

På baggrund af de samlede undersøgelser vurderes det, at korrelationsfaktorer for de palæogene aflejringer i Aarhus-området generelt ligger i intervallet 6-9.

Fra eksterne parter erfares det, at korrelationsfaktoren for Kysingmergel ofte sættes højere (~10,0) som konsekvens af, at der kun kan foretages få vingeforsøg i det tynde lag.

På trods af de fundne tendenser for de palæogene leraflejringer i Aarhus-området, vurderes det, at det fortsat er nødvendigt at fastlægge den nøjagtige korrelationsfaktor ved hver jordbundsundersøgelse. Det bør gøres med henblik på at korrigere for vingeforsøgenes overvurdering af lerets styrke i de sprækkede aflejringer, der kan variere med stor hyppighed. Fastlæggelsen af en nøjagtig korrelationsfaktor er tilmed af økonomisk og miljømæssig interesse, så under- eller overdimensionering af geotekniske konstruktioner undgås.

8.2.3 Vandspejl

I den geotekniske disciplin er det kutyme at regne med VSP i terræn, så funderingskonstruktionen dimensioneres ud fra den mest kritiske tilstand. I forbindelse med CPT vil denne konservative betragtning bidrage til en usikker klassifikation i SBTn (2010-2016), eftersom systemet baseres på normaliserede værdier og valide poretrykmålinger. Som gennemgået i bilag 1, afsnit 7.5, tillader PPDT-forsøg at fastlægge VSP-placering ud fra måling af u_0 . Testen kan være tidskrævende i lavpermeable jorde, men bidrage til en mere nøjagtig placering af in-situ VSP og klassificeringen.

Det er op til den geotekniske ingeniør at vurdere poretrykkets validitet.

Ved lokation 2 er intet VSP truffet, hvilket begrænser identificeringen af mikrostruktur, eftersom $Q_{tn}-U_2$ (2016) ikke kan benyttes. Sammenholdes lokation 1 og 2 med hinanden, ses et fald i Q_{tn} i $Q_{tn}-F_r$ (2010-2016) for lokation 2. Overlejringstrykket korrigeres ikke for opdrift, hvilket bidrager til en overvejende kontraktiv opførsel i systemet. Ved valide poretrykmålinger vil $Q_{tn}-U_2$ være bedst anvendeligt, hvorimod ved et manglende VSP kan $Q_{tn}-F_r$ (2016) være anvendeligt, da $q_c \sim q_t$ gør sig gældende for de fleste jorde.

8.2.4 Prækvartæroverfladen

Med kendskab til geologiens indflydelse på prækvartæret i Aarhus, er den geotekniske ingeniør umiddelbart godt stillet ift. at kunne definere prækvartæroverfladen ud fra rådata suppleret med yderligere klassifikationssystemer, hvis vurderet nødvendigt. Særligt i havneområdet, hvor prækvartære aflejringer ofte kun overlejres af sandfyld eller sand, vil prækvartæroverfladen fremgå tydeligt (som set ved lokation 2 og 3). Dog kan en etableret korrelation til lagfølgen være nødvendig (som set ved lokation 1).

Kendskab til prækvartæroverfladen er af geoteknisk interesse, eftersom det giver en indikation på, hvornår de ugunstige styrke- og stivhedsegenskaber indtræffer, som ofte gør sig gældende for de plastiske lere.

8.2.5 Geologiske forstyrrelser

Glacialt forstyrrede tertiære aflejringer er ofte svære at klassificere ved fysisk bedømmelse og tilsvarende har vist sig gældende ved CPT, hvor lokation 3 ikke adskiller sig fra lokation 1. Glacialt forstyrrede aflejringer udgør ofte funderingsmæssige problemer, eftersom de kan forekomme stærkt sprækket og brokket. CPT-sondens begrænsninger ift. at definere hyppigheden af sprækker gør, at en etableret korrelation til lagfølgen ofte er nødvendig.

Funderingsmæssige problemer kan også komme til udtryk ved det høje smectit-indhold i de plastiske lere. Lerarternes kvældeegenskaber gør, at de er i stand til at løfte konstruktioner, hvilket kan resultere i sætningsskader - eller i værste tilfælde - skred. I $Q_{tn}-F_r$ -diagrammet (2016) vil et dominerende smectit-indhold kunne tydes fra klassificeringen 'lerlignende' ($PI > 18\%$); uden direkte at definere graden af plasticiteten. Betegnelser som 'fedt' eller 'meget fedt' vil ikke kunne defineres ud fra $Q_{tn}-F_r$ (2016), hvorfor nærmere fysiske undersøgelser af plasticitetsindekset bør udføres.

Særligt klassificeringen 'overgangslignende' ($10\% < PI < 18\%$), som både Kysing- og Søvindmergelen ofte henføres under, er ikke overensstemmende med dét faktum, at der er tale om stærkt plastiske lerjorde. Misklassificeringen skyldes mergelernes høje kalkindhold. $Q_{tn}-F_r$ (2016) har altså vist sig begrænset ift. at tyde både de plastiske egenskaber samtidig med de høje kalkindhold, som Kysing- og Søvindmergelen ofte er karakteriseret ved. Det understreger diagrammets begrænsede anvendelse ved 'struktureret' jorde.

8.3 Bæredygtighed

I nærværende del-afsnit drøftes CPT som et led i en bæredygtig udvikling.

Bæredygtighed er et bredtfaende udtryk for, hvordan vi kan passe på jorden, så den ikke tager skade af den måde, vi lever og agerer på. Byggebranchen er ansvarlig for en stor del af jordens samlede energi- og ressourceforbrug, hvorfor det er afgørende, at et øget fokus lægges på en bæredygtig udvikling af byggeriet i Danmark for at imødekomme fremtidige klima- og miljøudfordringer.

I byggebranchen omfatter en bæredygtig udvikling en reduktion af drifts- og anlægsomkostninger samt udledning af CO₂ og forurening af jorden. Som gennemgået i forprojektet (bilag 1, afsnit 3) kan CPT-forsøg bidrage til en reduktion af de tidskrævende konventionelle lagfølgeboringer ved større anlægsprojekter, dvs. i takt med at kendskabet til lokalgeologien udbygges, vil tilbøjeligheden til at udskifte lagfølgen med CPT øges. Tilmed kan CPT tilkobles specialsonder, der er i stand til at registrere temperaturer, kemisk aktivitet og forureningszoner. Miljø og geoteknik går ofte hånd i hånd i praksis, da forurening af jord, udover at have betydning for grundvandet, også kan medføre nedbrydning af geotekniske konstruktioner, hvorved styrken af det dimensionerede profil kan forringes (bilag 1, afsnit 3).

CPeT-IT kan fastlægge samtlige styrkeparametre ud fra empiriske korrelationer, som kan bidrage til en optimering af langsommelige arbejdsprocesser. Dyre og tidskrævende laboratorieforsøg vil kunne minimeres, hvis en tilpasning af korrelationerne til de danske jorde blev foretaget, hvormed programmet i større grad vil kunne implementeres som et geoteknisk værktøj. På nuværende tidspunkt ligger der dog en stor usikkerhed forbundet til mange af disse empirisk afledte parametre, hvorfor de bør korreleres med felt- og laboratorieforsøg.

Ydermere kan CPT tilkobles et magnetometer, der er i stand til at detektere magnetiske felter i jorden, der genereres af magnetiske genstande. Ved etablering af et magnetometer kan pæledybder, spunslængder samt højspændingskabler og gamle havnekonstruktioner identificeres i jorden. Dette skal ses i relation til at undgå materialespild ved nedramning af spuns eller pæle, så deformationer af disse undgås (bilag 1, afsnit 3).

På disse grundlag kan inddragelsen af CPT ifm. jordbundsundersøgelser bidrage til en bæredygtig udvikling.

8.4 Konklusion på problemformulering

Med henblik på at kunne optimere den geologiske kortlægning og stratigrafiske analyse af prækvartæret i Aarhus ved brug af *Cone Penetration Testing* som analyseværktøj vurderes det på baggrund af nærværende rapport, at geologisk baggrundsviden samt forståelse for in-situ jords opførsel er grundlæggende forudsætninger for tolkning i SBTn-diagrammerne (2010-2016).

Klassifikationsmetoderne bygger på 'ideal' jord, hvilket vanskeliggør anvendelsen af disse i særligt karakteristiske aflejringer som Viborg- og Søvindmergel Formationerne. Med afsæt i datagrundlaget konkluderes det, at $Q_{tn}-U_2$ -diagrammet er bedst anvendeligt i de aarhusianske palæogene aflejringer, som ofte har små til store positive poretryk. Aflejringerne viser generelt kontraktiv overgangs- eller lerlignende respons ved penetrering.

I CPeT-IT uddrages det, at Kysing- og Søvindmergelens vekslende sedimentationsforhold reflekteres som "flimmer" i klassifikationssystemerne. "Flimmer" er et udtryk for, at aflejringerne er stærkt lagdelte og inhomogene som resultat af et varierende kalkindhold, reflekteret i de mekaniske egenskaber. Viborg- og Moesgård lerets rolige sedimentationsforhold afspejles i den ensartede klassifikation, der er et udtryk for mere begrænsede kalkindhold. På baggrund af kendskab til lokalgeologien kunne en differentiering mellem de fire lerarter foretages.

På ovenstående grundlag konkluderes det, at en optimeret klassificering er blevet opnået og belyst.

Det konkluderes tilmed, at optimeringsgrundlaget for videreundersøgelser af de palæogene leraflejringer i CPeT-IT er stort. De trufne tendenser indikerer et potentiale i at udbygge tilpasningsgraden til de aarhusianske leraflejringer for en bedre implementering af CPeT-IT som et geoteknisk værktøj. Dette skal også ses i relation til en bedre tilpasning af empiriske korrelationer for de østjyske lerarter, som i skrivende stund er meget begrænset.

8.5 Områder til videreundersøgelse

I nærværende afsnit listes mulige emner til videreundersøgelse på baggrund af problemstillinger samt interesseområder truffet ifm. udarbejdelse af dette bachelorprojekt:

- Videreundersøgelse af optimeringsmulighederne for klassifikationen af de fire palæogene leraflejringer i Aarhus by- og havneområde.
- Undersøgelse af cementseringsgraden defineret i $Q_{tn} - U_2$ til $Q_{tn} = 12$ og $U_2 = 4$ ud fra et omfattende datastudie, hvor plasticitetsindeks og kalkindhold målt i laboratoriet sammenlignes med SCPT-forsøg for at definere grænsen mellem en uementeret og cementseret forkonsolideret ler.
- Tilpasning af analysemetoden til de danske plastiske leraflejringer ud fra en omfattende dataundersøgelse, hvor Lillebæltsler og Røsnæs ler inddrages med henblik på at sammenligne tendenser og opførselsegenskaber i SBTn (2016).
- Videreundersøgelse af SCPTu, hvor fokus lægges på deformationsparametrene (G_0, E_0), og muligheden for at anvende disse ifm. geoteknisk design.
- Sammenligning af de empirisk bestemte korrelationer udledt ved CPeT-IT med felt- og laboratorie fastlagte parametre i de palæogene aflejringer. Dette skal ses i relation til bl.a. at kunne fastlægge et mere nøjagtigt OCR-profil.
- Videreundersøgelse for klassificeringen af jordens opførselsegenskaber i CPeT-IT for stærkt forkonsoliderede jordarter sammenlignet med CD-forsøg. Herunder vil kalkindholdets indflydelse på opførselsegenskaber blive analyseret for at undersøge om de to metoder er samstemmende.

9. Refleksionsnotat

Projektet er udarbejdet i perioden d. 23. marts til d. 25. maj 2020.

Projektemne og datagrundlag er leveret af den rådgivende ingeniørvirksomhed, GEO. CPT har ikke været en del af uddannelsens pensum, men undersøgelsesmetoden, der kontinuerligt udvikles, rummer mange geotekniske aspekter, som begge projektdeltagere har vist stor interesse for siden forprojektets opstart i efteråret 2019.

Igennem projektføreløbet har der været mulighed for at vinkle problemstillingen både ift. det faglige niveau og interesse. Begge projektdeltagere har været enige om, hvordan projektet skulle udformes, hvorfor problemstillingen blev nedskrevet forholdsvis tidligt i projektfasen. Ligeledes blev datagrundlaget stillet til rådighed af GEO tidligt i projektfasen, hvilket bidrog til en god start på projektet.

På trods af de særlige omstændigheder, som nærværende bachelorprojekt er udarbejdet under, har arbejdet forløbet gnidningsløst. Arbejdsbyrden har været ligeligt fordelt.

Overgangen fra 6. semesters forprojekt til 7. semesters bachelorprojekt har været tydelig, hvor forprojektet blev udarbejdet med henblik på at stifte bekendtskab med CPT som en alternativ analysemetode til fastlæggelse af stratigrafi og geotekniske parametre. Det indledende arbejde klædte os godt på til at behandle bachelorprojektets problemstilling.

Problemstillingen bærer præg af, at vi begge har haft et ønske om at udbygge vores geologiske grundforståelse og tilkoble dette et relevant ingeniørfagligt område. Gennem et omfattende litteraturstudie indledningsvist i rapporten, har vi tilegnet os en bred geologisk viden og kendskab til en in-situ jords opførsel, hvilket har gjort os i stand til at forstå jord i en geoteknisk sammenhæng; herunder hvordan aflejrings dannelsesproces og mineralogiske sammensætning har indflydelse på den CPT-baserede klassifikation. Tolkning af palæogene leraflejringer i CPeT-IT er som sådan ikke en ny metode, men at tilpasse de opførselsbaserede klassifikationsdiagrammer til aflejringerne er et forholdsvis uberørt emne. Som et led i at gøre dette, har det været nødvendigt at udbygge vores kendskab til analyseværktøjet CPeT-IT, hvortil den geologiske baggrundsviden har bidraget til, at vi har kunnet forholde os kritisk til udfaldet af klassifikationen i programmet.

I takt med at projektet blev udviklet, opstod interesseområder for videreundersøgelser. Dette omfattede bl.a. SCPT-forsøg og CPTu-forsøg i Lillebæltsler. Vi må fra vor side erkende, at initiativet til at få behandlet disse interesseområder først blev taget sidst i projektet, og for projektets helheds skyld – samt i korrespondance med vores vejleder – blev det vurderet, at videreundersøgelse af disse områder ville blive for tidskrævende. Hertil hører muligheden for at definere 'graden af cementering' ud fra K_G^* , som vi har manglet i denne rapport.

Tilmed blev det arrangeret tidligt i projektets forløb, at vi skulle i felten og se et SCPT-forsøg blive udført, men på grund af omstændighederne blev det aflyst, hvilket ærgrer os meget, eftersom det ville have bidraget til vores helhedsindtryk af analysemetoden.

Overordnet set har det været spændende og udfordrende at fordybe sig i et helt nyt emne over en længere periode, hvor vi har skulle forholde os kildekritisk til den anvendte empiri og fra starten af haft et fastlagt mål om at kunne besvare den definerede problemstilling fyldestgørende.

10. Litteraturliste

- Barnes, Graham. 2016. 'Soil Mechanics: Principles and Practice', 4th Edition: 109-28.
- Benedetto, Di. 2005. 'Deformation Characteristics of Geomaterials': 161.
- Byggedata. 1999. 'Parametre fra CPT (tryksonderinger) ', *DS415 - Norm for fundering*: 13.
- Galsgaard, Jens. 1998. 'Indføring i Sedimentgeologi', *DGF Bulletin*, 12.
- . 2020. *Vejledning i Ingeniørgeologisk prøvebeskrivelse* (DGF Bulletin 1, høringsudgave).
- GEO. 2018. 'Overview of geological conditions in the central part of Aarhus and Harbour area'.
- GeoLogismiki. 2014. 'CPeT-IT User's Manual', 1.4: 54-60.
- GEUS. 2010. 'Danmarks geologiske udvikling Fra 65 til 2,6 mio. år før nu', *Geoviden*, 3.
- Gillibrand, Camilla. 'Influence of structure on high plasticity eocene clay'.
- Heilmann-Clausen, Claus. 1995. *Palæogene aflejringer over danskekalken*.
- Krebs Ovesen, Niels. 2014. 'Lærebog i Geoteknik', 2. udgave: 1-415.
- Larsen, Gunnar. 1994. 'Geologisk set - Det mellemste af Jylland'.
- Meigh, Alan. C. 1987. *Cone penetration testing : methods and interpretation* (Butterworths: London).
- Miljøcenter, Aarhus. 2009. 'Resumérapport for Trin-1 Aarhus Vest': 1-12.
- Okkels, Nik. 'Conefaktor i Søvindmergel, Septarieler og fedt moræner': 1-8.
- . 2009. 'Søvindmergel': 1-5.
- Robertson, Peter K. 1997. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice* (Blackie Academic and Professional).
- . 2014. 'Webinar #12: Use and Interpretation of the Seismic CPT', GreggCPTWebinar.
<https://www.youtube.com/watch?v=KGgpxdkmViA&t=1112s>.
- . 2015. 'Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering', 6th edition.
- . 2016a. 'Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system - an update', *NRC Research Press*.
- . 2016b. 'An update of the CPT-based Classification System using Behaviour-based Descriptions'.
<http://www.greggdrilling.com/webinars/an-update-of-the-cpt-based-classification-system-using-behavior-based-descriptions/>.
- Simons, Noel. 2004. *Soil-structure Engineering of Deep Foundations, Excavations and Tunnels* (Thomas Telford Publishing).
- Simonsen, Thomas. 2017. 'Danmarks lumske ler', *Aktuel Naturvidenskab*, 6.
- Sørensen, Inga. 2009. *Ingeniørgeologi i Danmark* (Nørsø EDB/Film: Horsens).
- . 2019. *Ingeniørgeologi* (Praxis).
- Yamakawa, Yuki. 2009. 'Implicit stress-update algorithm for isotropic Cam-clay model based on the subloading surface concept at finite strains'.
- Aarhus Amt, Natur og Miljø. 2006. 'Redegørelse for grundvandsressourcerne i Aarhus Syd-området': 1-291.

11. Bilagsoversigt

Bilag 1	Forprojekt ”CPT – én alternativ analysemetode”
Bilag 2	Empiriske korrelationer anvendt i CPeT-IT
Bilag 3	Fastlæggelse af k_{OCR} og OCR
Bilag 4	Boreprofil, lokation 1
Bilag 5	Tværsnit, lokation 1
Bilag 6	Boreprofil, lokation 2
Bilag 7	Tværsnit, lokation 2
Bilag 8	Boreprofil, lokation 3
Bilag 9	Tværsnit, lokation 3