

# **KRAVSPECIFIKATION**

---

## **JORDBUNDSUNDERSØGELSER TIL ANLÆGSARBEJDE**

**KRAV TIL GEOTEKNISK UNDERSØGELSESRAPPORT, GEOTEKNISK  
DESIGN BASIS OG GEOTEKNISK BASIS RAPPORT (GIR, GDB OG GBR)**

<b>Rev.</b>	<b>Revisionsdato</b>	<b>Emne (ændring)</b>
0	29.09.2022	Første udgivelse

# KRAVSPECIFIKATION

---

## Indholdsfortegnelse

JORDBUNDSUNDERSØGELSER TIL ANLÆGSARBEJDE.....	1
1 Indhold og anvendelse.....	6
1.1 Generelt.....	6
1.2 Gyldighedsområde.....	6
1.3 Konstruktionstyper .....	7
1.4 Jordtyper.....	8
1.5 Normer og standarder .....	9
1.6 Kvalitetsledning.....	9
1.7 Symbolliste .....	10
2 Geoteknisk undersøgelsesrapport (GIR).....	11
2.1 Generelt.....	11
2.2 Indholdsfortegnelse (GIR).....	12
3 Geoteknisk basisrapport (GBR) .....	17
3.1 Generelt.....	17
3.2 Jordbundsforhold der afviger fra grænseværdierne .....	17
3.3 Indholdsfortegnelse (GBR) .....	18
4 Geoteknisk Design Basis (GDB) .....	19
4.1 Generelt.....	19
4.2 Indholdsfortegnelse (GDB) .....	20
5 Geoteknisk udførelsesjournal (GCR).....	21
5.1 Generelt.....	21
5.2 Indholdsfortegnelse (GCR) .....	21
6 Geologisk tolkning og videnbank.....	22
7 Udledning af styrke- og deformationsparametre.....	23
7.1 Generelt.....	23
7.2 Styrkeparametre .....	23
7.3 Deformationsparametre .....	23
8 Hviletrykoefficienter .....	24
8.1 Generelt.....	24
8.2 Fyld og normalkonsolideret jord .....	24
8.3 Overkonsolideret jord.....	24
8.4 København kalk og bryozokalk .....	25
9 Hviletrykoefficient for horisontal aflastning.....	26
9.1 Generelt.....	26

## KRAVSPECIFIKATION

---

9.2	Fyld og normalkonsolideret jord .....	27
9.3	Forkonsolideret jord .....	28
9.4	København kalk og bryozokalk .....	28
10	Materialedata for jord og kalk .....	30
10.1	Fyldaflejninger (sand) .....	30
10.1.1	Generelt.....	30
10.1.2	Styrkeparametre .....	30
10.1.3	Deformationsparametre .....	30
10.1.4	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til sandfyld.....	31
10.2	Fyldaflejninger (ler).....	31
10.2.1	Generelt.....	31
10.2.2	Styrkeparametre .....	31
10.2.3	Deformationsparametre .....	32
10.2.4	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til lerfyld.....	33
10.3	Tørve- og gytjeaflejninger .....	33
10.3.1	Generelt.....	33
10.3.2	Styrkeparametre .....	33
10.3.3	Deformationsparametre .....	33
10.3.4	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til gytjeaflejninger .....	34
10.3.5	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til tørveaflejninger .....	35
10.4	Friktionsaflejninger (sand og grus).....	35
10.4.1	Generelt.....	35
10.4.2	Styrkeparametre .....	36
10.4.3	Deformationsparametre .....	38
10.4.4	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til sand .....	39
10.4.5	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til grus .....	40
10.5	Silt (grov- og finsilt) .....	40
10.5.1	Generelt.....	40
10.5.2	Styrkeparametre (grov- og finsilt).....	41
10.5.3	Deformationsparametre (grov- og finsilt).....	41
10.5.4	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til grovsilt.....	42
10.5.5	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til finsilt .....	43
10.6	Kohæsionsaflejninger (ler og moræneler) .....	43
10.6.1	Generelt.....	43
10.6.2	Styrkeparametre (ler og moræneler) .....	43

## KRAVSPECIFIKATION

---

10.6.3	Deformationsparametre (ler og moræneler) .....	51
10.6.4	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til senglacialt ler .....	56
10.6.5	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til OC smeltevandsler .....	57
10.6.6	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til moræneler .....	58
10.7	Overgangsjordarter (morænesand, -silt og -grus) .....	59
10.7.1	Generelt.....	59
10.7.2	Styrkeparametre (morænesand, -silt og -grus).....	59
10.7.3	Deformationsparametre (morænesand, -silt og -grus).....	61
10.7.4	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til morænesand, -silt og -grus...	61
10.8	Grønsandsaflejring (grønsandssand, -ler -silt og -kalk) .....	62
10.8.1	Generelt.....	62
10.8.2	Styrkeparametre .....	63
10.8.3	Deformationsparametre .....	64
10.8.4	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til grønssandssand.....	64
10.8.5	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til grønssandsler .....	65
10.8.6	Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til grønssandsilt .....	66
10.9	København kalk og bryozokalk .....	66
10.9.1	Generelt.....	66
10.9.2	Styrkeparametre .....	69
10.9.3	Deformationsparametre .....	69
10.9.4	Horisontale deformationsparametre .....	70
10.9.5	Overflademodstand .....	70
10.9.6	Skønsformler/empiriske relationer for parametre til København kalk og bryozokalk...	71
10.10	Skrivekridt .....	72
10.10.1	Generelt .....	72
10.10.2	Styrkeparametre.....	72
10.10.3	Deformationsparametre.....	73
10.10.4	Skønsformler/empiriske relationer for parametre til skrivekridt .....	73
11	Grundvandsforhold og hydrogeologiske vurderinger .....	75
11.1	Generelle hydrologiske forhold .....	75
11.1.1	Projektområdets forskellige jordlags permeabilitet/hydraulisk konduktivitet/transmissivitet med angivelse af variabilitet .....	75
11.1.2	Designgrundvandsspejl.....	75
11.1.3	Geologisk model .....	76
11.1.4	Numerisk grundvandsmodel .....	76

## KRAVSPECIFIKATION

---

11.1.5	Grundvandskvalitet .....	76
11.1.6	Myndighedsforhold .....	76
11.1.7	Risikoområder .....	76
11.1.8	GIR (HIR) – Ground investigation report / Hydrological investigation report .....	77
11.1.9	GBR - Geotechnical basis report .....	77
11.1.10	GDB – Geotechnical design basis .....	77
12	Udførelsesmæssige forhold. ....	78
12.1	Stenforekomster .....	78
12.1.1	Volumenprocent og antal sten og blokke .....	78
12.1.2	Mineralogi .....	78
12.2	Slidegenskaber .....	79
12.3	Slake durability .....	81
12.4	Klæbrighed .....	81
12.5	Gravbarhed (styrke) og hærdningsgrader .....	82
13	Referencer .....	83

### Bilag

Bilag 1 Udledning af styrkeparametre

# KRAVSPECIFIKATION

---

## 1 Indhold og anvendelse

### 1.1 Generelt

Denne kravspecifikation JOR 103 indgår i HOFOR serie af kravspecifikationer for:

#### **Geotekniske undersøgelser for anlægsarbejde**

Serien omhandler følgende:

*Tabel 1 – Liste med HOFOR JOR-kravspecifikationer*

JOR 101 – Krav til udførelse
JOR 102 – Krav til planlægning af undersøgelser
<b>JOR 103 – Krav til Geoteknisk undersøgelsesrapport (GIR, GDB og GBR)</b>
JOR 104 – Krav til Geoteknisk videnbank

### 1.2 Gyldighedsområde

Denne kravspecifikation beskriver krav og retningslinjer for udarbejdelse af følgende geotekniske dokumenter:

- Geoteknisk undersøgelsesrapport – GIR (*Ground Investigation Report*)
- Geoteknisk projekteringsgrundlag – GDB (*Geotechnical Design Basis*)
- Geoteknisk basisrapport – GBR (*Geotechnical Baseline Report*)

Ovennævnte baseres på geotekniske, hydrogeologiske og miljøtekniske forundersøgelser samt på god praksis og erfaringer opsamlet fra sammenlignelige projektforhold.

Formål med de enkelte dokumenter samt krav og retningslinjer for udarbejdelsen er indeholdt i kapitlerne 2 – 5 nedenfor.

GIR'en skal præsentere de tilgængelige resultater fra de geotekniske undersøgelser som planlagt iht. JOR102 og arkiveret iht. JOR104 sammen med de afledte geotekniske parametre.

Tolkning af geotekniske parametre præsenteret i GIR'en skal udgøre basis for udarbejdelsen af den geotekniske design basis (GDB) og den geotekniske design rapport (GDR).

Valget af karakteristiske værdier og geotekniske parametre, den geotekniske design model, tilsyn og monitoring samt vedligehold skal inkluderes i den geotekniske design rapport (GDR). Minimum krav til indholdet af den geotekniske design rapport kan findes i EC7 samt HOFORs kravspecifikationer TUN101 (tunneler), TUN102 (skakte og byggegruber), TUN103 (grundvands håndtering) og TUN104 (monitoring).

## KRAVSPECIFIKATION

GDB'en skal dokumentere designbasis for alle midlertidige og permanente geotekniske elementer på projektet. GDB skal indeholde et resumé af de karakteristiske geotekniske og hydrogeologiske parametre, den geotekniske designmodel og de designprincipper, der er præsenteret i den geotekniske designrapport (GDR) som aftalt med HOFOR.

GBR'en indeholder klart definerede, kortfattede, kvantificerbare grænseværdier, der definerer relevante jord- og grundvandsforhold i projektområdet, som entreprenøren kan finde under udførelsen. GBR definerer de variationer af jord- og grundvandsforhold som kontraktuelt ligger indenfor projektet.

### 1.3 Konstruktionstyper

De konstruktionstyper, som er omfattet af denne kravspecifikation, er anført herunder.

Tabel 2. Permanente konstruktioner

<b>Permanente konstruktioner</b>
Underjordiske bygværker for bassiner, pumpestationer, tilløbsbygværker, adgangsskakte til tunneler, mv. Disse kan have mange udformninger og størrelser både horisontalt og i dybden. Kan være mindre bygværker (< 5 m dybe) og større (>5-15 m). Som bygværker i forbindelse med tunnelprojekter, kan de være endnu dybere. Ofte med opdriftsstabilisering (forankring).
NO-DIG og mikrotunnelering (i dimensioner <1200 mm) ved f.eks. styret boring, pilotrørsmetode og mikrotunnelering (AVN og lignende).
Presserørstunneler (i dimensioner >Ø1200 – Ø3200mm) med jorddækning >4 m /minimum 2 x ydre diameter.
Segmenttunneler (i dimensioner >Ø3600 mm) i minimum dybde 2 x ydre diameter.
Åbne bassiner, kan have mange udformninger og størrelser, ofte med opdriftsstabilisering (dræning eller forankring), og kan have støttevægge eller stabiliserede skrånninger eller diger/dæmninger.
Pælefunderede ledninger og bygværker, fx indenfor blødbundsområder, med kvadratiske jernbetonpæle (dimensioner 25x25 cm – 35x35 cm) eller stålrørspæle (dimensioner Ø400 mm – Ø3000 mm) i dybder >5-25 m.u.t. Rammede, nedvibrerede eller borede pæle.
Direkte funderede bygninger, i form af små kvadratiske enkeltfundamenter (dimensioner >1x1 m – 3x3 m), stribefundamenter og hele bundplade (stift eller slapt armerede, i dybder >0-10 m.u.t.).
Genindbygning af afgravede masser som ledningsfyld (dybder <5 m).

## KRAVSPECIFIKATION

Tabel 3. Midlertidige/permanente støttekonstruktioner/udgravninger

<b>Midlertidige/permanente støttekonstruktioner/udgravninger</b>
Udgravning med skråninger. Kan være i forbindelse med etableringen af ledningsgrave (< 5 m dybe), mindre bygværker (< 5 m dybe) og kældre under bygninger (< 5 m dybe).
Midlertidige spunsvægge. Kan være korte spunsvægge (københavnervægge, gensidigt afstivede) i forbindelse med etableringen af ledningsgrave (< 5 m dybe) med ingen eller et enkelt ankerniveau, dybe spunsvægge i forbindelse med byggegruber / tunnelskakte (>5-15 m) med et eller flere ankerniveauer og dybe kældre under bygninger (>5 m dybde).
Sekantpælevægge i forbindelse med tunnelskakte
Slidsevægge i forbindelse med tunnelskakte

### 1.4 Jordtyper

I JOR 103 er behandlet traditionelle jord- og kalkarter, der træffes i København og omegn, se listen i Tabel 4.

Det skal fremhæves, at denne kravspecifikation ikke omhandler parametervurderinger for tertiært ler eller dynamiske egenskaber for jordarter.

Tabel 4. Analyserede jord- og kalkarter for opstilling af tolkningsmetoder og materialedata i JOR 103

Lag	Beskrivelse
1	Fyld (sand)
2	Fyld (ler)
3	Tørveaflejringer
4	Gytjeaflejringer
5	Sand
6	Grus
7	Grovsilt
8	Finsilt
9	Senglaciale ler
10	Smeltevandsler
11	Moræneler
12	Morænesand, -silt og -grus
13	Grønsandssand
14	Grønsandsler
15	Grønsandssilt
16	Grønsandskalk (behandles som København kalk)
17	København kalk: Knust kalk og kalk domineret af H1
18	København kalk: Glaciale forstyrret kalk domineret af H2
19	København kalk Uforstyrret, intakt kalk domineret af H3/H4
20	Bryozokalk (geotekniske egenskaber som for København kalk)
21	Skrivekridt: Slamkalk, hvor H1 er dominerende (slap)
22	Skrivekridt: Glaciale forstyrret, domineret af H1/H2



## KRAVSPECIFIKATION

---

Lag	Beskrivelse
23	Skrivekridt: Intakt, domineret af H2/H3

Der skelnes for de forskellige jordtyper og jordlag ikke mellem alder og aflejningsmiljø.

Dog kan kalkindhold samt indhold af organisk materiale have indflydelse på de geotekniske parametre, som præsenteres i denne kravspecifikation. Ved påvist væsentligt kalkindhold samt væsentligt indhold af organisk materiale skal korrelationer/geotekniske parametre benyttes med forsigtighed.

### 1.5 Normer og standarder

Følgende rangorden over de styrende dokumenter skal benyttes:

- a) HOFOR Kravspecifikationer\*
- b) Det danske annekst til Eurocode (DS/EN)
- c) Eurocode (DS/EN)
- d) Internationale Normer og Standarder

Ved jernbanekrydsninger er Banedanmarks BN1-59-4 det styrende dokument.

\* HOFOR Kravspecifikationer følger Eurocode, men kan have regler, der er strammere end de, der fremgår af Eurocode. I tilfælde af at reglerne er strammere i HOFOR Kravspecifikationer skal disse regler følges.

### 1.6 Kvalitetsledelse

Det påhviler den projekterende at udføre intern kvalitetssikring af arbejder inden leverance til HOFOR. Uafhængigt af rådgivers egen kvalitetssikring er HOFOR berettiget til at indhente en uvildig bedømmelse hos en tredje part.

# KRAVSPECIFIKATION

## 1.7 Symbolliste

Tabel 5. Symbolliste

Symbol	Forklaring
$\alpha$ [-]	EkspONENT der varierer mellem 0,5 (for SP = 96%) og 0,9 f(or SP = 90%)
$\phi'_{tr}, \phi'_{pl}$ [°]	Triaksial- og plan friktionsvinkel
$\phi'_M$ [°]	Triaksial friktionsvinkel for kalkmassen
$\tau_{max}$ [MPa]	Overflademodstanden i kalk for vurdering af bæreevnen for jordankre
$\sigma'_{v0}$ [kPa]	Effektiv vertikal in situ-spænding
$\sigma'_{pc}$ [kPa]	Forkonsolideringsspændingen (største effektive vertikale spænding som jorden har været udsat for).
$\sigma'_0$ [kPa]	Største effektive hovedspænding
$\sigma'_3$ [kPa]	Største horisontale spænding
$\sigma'_{red}$ [kPa]	Mindste effektive vertikale hovedspænding som jorden har været udsat for
$c_u$ [kPa]	Udrænet forskydningsstyrke
$c_v$ [kPa]	Vingestyrken målt ved feltvinge
$c'$ [kPa]	Effektive kohæsion
$c'_M$ [kPa]	Effektive kohæsion for kalkmassen
$E_{M,50}$ [MPa]	Deformationsmodul for kalkmassen svarende til 50% brudtøjning og vertikal belastning, $\sigma'_0$
$E_{M,50,0}$ [MPa]	Initialværdi af deformationsmodul for kalkmassen svarende til 50% brudtøjning og vertikal belastning = 0 kPa
$E_{M,X}$ [MPa]	Deformationsmodul for kalkmassen svarende til X% brudtøjning og vertikal belastning
$E_{M,max}$ [MPa]	Deformationsmodul for kalkmassen ved små tøjninger (mindre end 0,5% brudtøjning)
$E_{h,M,50}$ [MPa]	Horisontale deformationsmodul for kalkmassen svarende til 50% brudtøjning og vertikal belastning, $\sigma'_0$
$E_{h,M,50}$ [MPa]	Horisontale deformationsmodul for kalkmassen svarende til 50% brudtøjning og vertikal belastning, $\sigma'_0$
GSI [-]	Geologisk styrke indeks
GSI <sub>M</sub> [-]	Geologisk styrke indeks for kalkmassen
H1,H2,H3,H4,H5 [-]	Hærdningsgrader for kalk
$I_p$ [%]	Plasticitetsindeks
$k$ [-]	Korrektionsfaktor for bestemmelse af $c'$ : $k = c'/c_u = (N_{c,0}/N_{c,\phi})$
$k_2$ [-]	Korrektionsfaktor for bestemmelse af $c_u$ : $k_2 = c_u/N$
$K_{0,a}$ [-]	Hviletrykkoeficient for horisontal aflastning
$n$ [%]	Porøsiteten
$N = N_{SPT}$	Antal SPT-slag pr. 300 mm's nedsynkning

# KRAVSPECIFIKATION

Symbol	Forklaring
$\alpha$ [-]	Eksponent der varierer mellem 0,5 (for SP = 96%) og 0,9 (for SP = 90%)
$N_{60}$	$N$ korrigeret for felt procedure
$(N_1)_{60}$	$N_{60}$ korrigeret for in situ-spænding
$N_{c,0}$ [-]	Bæreevnefaktor i udrænet tilstand
$N_{c,\varphi}$ [-]	Bæreevnefaktor for $c'$ -led
OCR [-]	Overkonsolideringsgraden = $(\sigma'_{pd}/\sigma'_{v0})$
$p_a$ [kPa]	Atmosfærisk tryk = 100 kPa
$q_c$ [MPa]	Spidsmodstanden af tryksonden i et CPT-forsøg
$q_{uc}$ [MPa]	Den enaksede trykstyrke
$q_{M,uc}$ [MPa]	Den enaksede trykstyrke for kalkmassen
$Q$ [%]	Dekadehældningen
$K$ [MPa]	Konsolideringsmodulen
$K_t$ [MPa]	Tangentværdi af konsolideringsmodul for genbelastning
$K_{t,0}$ [MPa]	Konsolideringsmodul in situ for stærkt forkonsolideret jord, som er aflastet til $\sigma'_{red}$
$\Delta K_t$ [-]	Tillæg til $K_t$ pr. spændingsenhed
SP [%]	Standard Proctor værdi
$w$ [%]	Vandindhold

## 2 Geoteknisk undersøgelsesrapport (GIR)

### 2.1 Generelt

Her præsenteres minimumskravene til indholdet af den geotekniske undersøgelsesrapport (forkortet GIR fra den engelske titel "Ground Investigation report"). Krav i EC7 gengives ikke her medmindre det er nødvendigt for sammenhæng. Normhierarkiet er som følger:

- EC7 – Krav til udførelse
- **JOR 103 – Krav til Geoteknisk undersøgelsesrapport (GIR, GDB og GBR)**
- JOR 104 – Krav til Geoteknisk videnbank

Krav til den geotekniske undersøgelsesrapport i JOR103 og JOR104 gælder som stramninger af Eurocode 7.

GIR'en skal præsentere:

1. En opsummering af de tilgængelige geotekniske informationer med fokus på faktuelle målte resultater både historiske såvel som planlagte (se JOR102)
2. Udlægning af karakteristiske geotekniske parametre i overensstemmelse med EC7 og JOR103

# KRAVSPECIFIKATION

---

3. Begrænsninger og forudsætninger til de udledte og målte geotekniske parametre
4. Den geologiske model

For større projekter kan det være nødvendigt at udarbejde specifikke GIR rapporter for enten hver konstruktion eller lokation. De enkelte rapporter bør suppleres af en projekt GIR, der opsummerer disse i en samlet rapport.

Den geotekniske rapport skal accepteres af HOFOR inden design arbejdet opstartes.

## 2.2 Indholdsfortegnelse (GIR)

Overskrifterne i dette afsnit beskriver minimum krav tiltænkt til at assistere udarbejderen af GIRen og at tilføje konsistens mellem forskellige kontrakter og projekter. Det er op til forfatteren at vurdere hvorvidt de anbefalede afsnit i denne rapport er relevant for det aktuelle projekt, og om en anden opbygning af rapporten er nødvendig.

1. Introduktion
  - 1.1 Formål og omfang
  - 1.2 Projektbeskrivelse  
*Denne sektion skal inkludere en kort præsentation af de planlagte arbejder, oversigtsplan, linjeføring af tunnel, placering af konstruktioner, dimensioner af de planlagte arbejder.*
  - 1.3 Geoteknisk kategori
  - 1.4 Yderligere relevant information
  - 1.5 Ikke inkluderede arbejder
  - 1.6 Relevante tegninger  
*Tegninger skal gøres tilgængelige i et format, der aftales med HOFOR (fx \*.dgn, \*.dxf) for at hjælpe udarbejdelsen af den geotekniske design model.*
2. Eksisterende information  
*Heri præsenteres designerens gennemgang af relevant eksisterende information, samt en opsummering af skrivebordsstudier som beskrevet i JOR102. Hvis skrivebordsstudiet er beskrevet i en separat rapport, kan en reference og en kort opsummering samt konklusion være tilstrækkelig.*
  - 2.1 Lokation
  - 2.2 Historik
  - 2.3 Geologi
    - 2.3.1 Regionale geologiske forhold  
*Inkl. en figur der præsenterer et kort og en beskrivelse med de regionale geologiske forhold (det norsk/danske bassin)*
      - 2.3.1.1 Geologiske struktur
    - 2.3.2 Geologiske profiler  
*Inkluder generelle geologiske profiler fra relevante kilder (fx sdfekort.dk)*
    - 2.3.3 Topografi og geomorfologi  
*Inkluder figurer af topografi og geomorfologi baseret på GEUS kort.*
    - 2.3.4 Overfladenær geologi  
*Figurer af overfladenær geologi baseret på GEUS kort.*
  - 2.4 Historiske borer  
*Beskrivelse af mark arbejde fra andre projekter herunder HOFOR projekter og fx Jupiter databasen og GeoAtlas Live. Relevante detaljer såsom: projekt navn, dato for borerne, koordinater, diameter, dybde, boremetode med mere, bør i videst mulig udstrækning inkluderes.*

# KRAVSPECIFIKATION

---

- 2.4.1 Geotekniske in-situ forsøg  
*Oversigt over geotekniske in-situ forsøg I historiske borer.*
- 2.4.2 Geotekniske laboratorieforsøg  
*Oversigt over geotekniske laboratorie forsøg i historiske borer*
- 2.5 Hydrogeologiske forhold  
*Inkluder figurer af potentialekort fra relevante kilder fx sdfekort.dk*
- 3. Mark- og laboratoriearbejde  
*Denne sektion skal beskrive de projekt specifikke undersøgelser, der danner baggrund for det videre design i overensstemmelse med EC7-2.*
  - 3.1 Besigtigelse
  - 3.2 Projektspecifikke undersøgelser  
*Beskrivelse af mark arbejde udført eller planlagt for det aktuelle projekt*
    - 3.2.1 Geotekniske in-situ forsøg  
*Oversigt over geotekniske in-situ forsøg I historiske borer.*
    - 3.2.2 Geotekniske laboratorieforsøg  
*Oversigt over geotekniske laboratorie forsøg i historiske borer*
  - 3.3 Geofysiske undersøgelser
  - 3.4 Hydrogeologiske undersøgelser  
*Oversigt over hydrogeologiske undersøgelser. Alternativt kan denne sektion erstattes af en Hydrogeologisk undersøgelses rapport (HIR).*
- 4. Miljøtekniske undersøgelser  
*Oversigt over miljøtekniske undersøgelser. Alternativt kan denne sektion erstattes af en Miljøteknisk undersøgelses rapport (EIR).*
- 5. Afvigelser fra de planlagte geotekniske undersøgelser  
*Angivelse af afvigelser mellem den planlagte og den faktisk udførte undersøgelse og årsager hertil*
- 6. Resultater fra mark- og laboratorie arbejde  
*Denne sektion præsenterer resultater fra projekt specifikke forsøg. Hvor det er relevant inddrages resultater fra de historiske borer som beskrevet i afsnit 2. En kritisk tilgang bør benyttes ved inddragelse af historiske resultater, da disse kan være forbundet med usikkerhed.  
Opsummeringstabeller skal præsentere antal af prøver for forskellige geologiske aflejringer samt gennemsnitsværdier og standard afvigelser.*
  - 6.1 Geologiske forhold  
*Beskrivelse af geologiske laggrænser, koter, lagtykkelser og spredning.*
  - 6.2 Præsentation af laboratorie forsøgsresultater (klassifikations- og styrkeforsøg)
    - 6.2.1 Kornkurver  
*Præsentation af korn kurver inddelt i geologiske enheder*
    - 6.2.2 Atterberg grænser  
*Præsentation af Atterberg grænser og Casagrande Diagram opdelt i jordarter. Opsummering af plasticitets indeks, flydegrænse i tabel form.*
    - 6.2.3 Vandindhold  
*Figurer med vandindhold som funktion af dybden inddelt I jordarter samt opsummeringstabeller.*
    - 6.2.4 Rumvægt  
*Figurer med rumvægt som funktion af dybden samt opsummeringstabeller.*
    - 6.2.5 Vingestykkeforsøg  
*Vingestykkeforsøg som funktion af dybden inddelt I jordarter samt opsummeringstabeller. Præsentation af begrænsninger og ignorerede forsøgsresultater (hvis relevant).*
    - 6.2.6 Standard Penetration Test (SPT)  
*Figurer med SPT resultater som funktion af dybden samt opsummeringstabeller.*

# KRAVSPECIFIKATION

---

*Præsentation af begrænsninger og ignorerede forsøgsresultater (hvis relevant).*

## 6.2.7 Resultater fra Triaxial forsøg

*Resultater præsenteres i tabel form sammen med klassifikationsforsøg, spænding og vertikal tøjning ved brud, udrænet forskydningsstyrke, friktions vinkel og effektiv kohæsion.*

*Præsentation af spændingsveje eller de antagne brudpunkter samt brudflade defineret af tilhørende friktion og kohæsion; eventuelle kommentarer til testdetaljerne.*

*Præsentation af udrænet styrke som funktion af dybden.*

*Præsentation af effektiv kohæsion som funktion af udrænet styrke*

*Diskussion om begrænsninger og eventuelt kasserede resultater.*

## 6.2.8 Resultater fra oedometer forsøg

*Resultater i tabel form med klassifikationsdata oedometer modul, forkonsolideringspænding, OCR og koefficient for sekundær konsolidering,  $\alpha$ .*

*Figurer med oedometer modul som funktion af aflastningsspænding for genbelastningskurver. Sammenligning med HOFOR anbefalede værdier.*

*Diskussion om begrænsninger og eventuelt kasserede resultater.*

## 6.3 Testresultater for kalk og kridt

### 6.3.1 Hærdningsgrad

*Hærdningsgrad i tabel form*

### 6.3.2 Vandindhold

*Fordeling af målt vandindhold som funktion af dybden.*

*Opsummering i tabel form.*

### 6.3.3 Rumvægt

*Præsentation af rumvægt og hærdningsgrad som funktion af dybden baseret på laboratorie forsøg og geofysisk logning.*

### 6.3.4 Enakset trykstyrke (UCS)

*Resultater af UCS forsøg og hærdningsgrad præsenteret i figurer som funktion af hhv. dybden, rumvægt og vandindhold.*

*Opsummeringer af UCS styrker og hærdningsgrad i tabel form.*

### 6.3.5 Trækstyrke

*Resultater af UCS forsøg og hærdningsgrad præsenteret i figurer som funktion af hhv. dybden, rumvægt og vandindhold.*

*Opsummeringer af UCS styrker og hærdningsgrad i tabel form.*

### 6.3.6 Stivhed

*Præsentation af Youngs modul  $E_{50}$  baseret på UCS forsøg og hærdningsgrad præsenteret i figurer som funktion af hhv. dybden, aksial tøjning og hærdningsgrad.*

*Opsummeringer af Youngs modul  $E_{50}$  og hærdningsgrad i tabel form.*

### 6.3.7 Rock Quality Designation (RQD)

*RQD præsenteret i figurer som funktion af dybden.*

*Opsummering i tabel form*

### 6.3.8 Cerchar forsøg

*Præsentation af Cerchar Abrasivity Index (CAI) præsenteret i figurer som funktion af hhv. dybden, hærdningsgrad og UCS værdier.*

### 6.3.9 Slidstyrke Index (SDI)

*Inkluder tabel med slidstyrke indeks opdelt efter antal cyklusser.*

*Præsenter figurer med slidstyrke index som funktion af cyklus, hærdningsgrad, vandindhold.*

### 6.3.10 Rock abrasivity (LCPC)

*Tabel med LCPC abrasivitets koefficient (LAC) værdier for kalk*

*Figurer med sammenhængende værdier mellem kalk abrasivitet og hærdningsgrad*

### 6.3.11 Fuldudsyringsforsøg (Full acid test)

*Resultater af syre forsøg på kalk præsenteret i tabel form*

## 6.4 Beskrivelse af de trufne kalk- og kridtaflejringer

# KRAVSPECIFIKATION

---

- 6.5 Geofysiske forsøgsresultater
  - 6.5.1 Televiwer logging
  - 6.5.2 Naturlig gamma, resistivitet, porøsitet og densitet logging
  - 6.5.3 Flowlogs
- 6.6 Hydrogeologiske testresultater og resultater fra overvågning af grundvandspejl
  
- 7. Basis for geoteknisk tolkning
  - Der skal henvises til specifikke afsnit af JOR103. Grundlag for udledning af de geotekniske parametre for jord og bjergarter, sammen med deres begrænsninger, skal klart angives i dette afsnit i tilfælde af afvigelser fra JOR103. Det skal oplyses, om korrelationerne, der anvendes ved parameterudledning, er beregnet til at give gennemsnitlige, øvre eller nedre værdier af specifikke egenskaber.*
  - 7.1 Styrkeparametre i jord
    - 7.1.1 Udrænede styrkeparametre
    - 7.1.2 Drænede styrkeparametre
      - 7.1.2.1 SPT (for friktionsaflejring)
      - 7.1.2.2 Klassifikationsforsøg (for kohæsive aflejring)
      - 7.1.2.3 Klassifikationsforsøg (for friktionsaflejring)
      - 7.1.2.4 Avancerede laboratorieforsøg
  - 7.2 Deformationsparametre for jord
    - 7.2.1 Forkonsolideringsspænding
      - 7.2.1.1 In situ forsøg
      - 7.2.1.2 Laboratorieforsøg
    - 7.2.2 Oedometer modul
    - 7.2.3 Elasticitetsmodul for kohæsive aflejring
    - 7.2.4 Elasticitetsmodul for friktionsaflejring
    - 7.2.5 Vurdering af hviletrykkoeficient,  $K_0$ 
      - 7.2.5.1 Jordtrykkoeficient ved forventede tøjninger
  - 7.3 Klassifikationsparametre for kalk og kridt
    - 7.3.1 Rock mass model
    - 7.3.2 Hærdningsgrad og sprækker
    - 7.3.3 Rock Mass Ratio, RMR
    - 7.3.4 Geologisk Styrke Index, GSI
    - 7.3.5 Rumvægtsmålinger
  - 7.4 Styrkeparametre for kalk og kridt
    - 7.4.1 Enakset tryk- og trækstyrke
      - 7.4.1.1 Sammenligning med kendt viden; Malmø City tunnel, Cityringen og lign.
    - 7.4.2 Drænede styrkeparametre og materiale model
  - 7.5 Deformationsparametre for kalk og kridt
    - 7.5.1 Stivhedsmodul af kalk
    - 7.5.2 Stivhedsmodul af kalkmassen
    - 7.5.3 Vurdering af hviletrykkoeficient,  $K_0$ 
      - 7.5.3.1 Jordtrykkoeficient ved forventede tøjninger
  - 7.6 Hydrogeologiske parametre for jord og kalk
    - 7.6.1 Vurdering af flowlogging
    - 7.6.2 Vurdering af pumpeforsøg
    - 7.6.3 Vurdering af slug tests
  
- 8. Afledte jordbundsforhold og materialeegenskaber – hele projektet/konstruktionspecifik
  - Dette afsnit skal opfylde kravene i EC7. Dette er vurderingen af jordbundsforholdene på relevante strækninger langs projektet og skal præsentere den jordmodel, der skal bruges som grundlag for evaluering af den*

# KRAVSPECIFIKATION

---

geotekniske designmodel for projektering på hver relevant udsnit af projektets linjeføring. Jordmodellen skal sammen med resultater af in-situ-forsøg og observation af grundvandsniveauet være angivet i Appendiks B. Detaljer og beskrivelser af de forskellige materialer, skal inkluderes sammen med en fuldstændig begrundelse for de parametre, der er afledt for det geotekniske design, herunder eventuelle begrænsninger som beskrevet i kapitel 5.

En beskrivelse af potentiel forurening bør om nødvendigt inkluderes under et separat afsnit.

## 8.1 Jordmodel

Beskrivelse af de vigtigste geologiske aflejringer, der fundet i projektets indflydelseszone, sammen med afledte tykkelser og forventede niveauer, der tager højde for variabilitet og usikkerhed af geologiske, hydrogeologiske og geotekniske forhold.

Oplysninger om potentiel tilstedeværelse og niveau for toppen af kalk, diskontinuiteter og forvitrede zoner skal inkluderes.

Geoteknisk model udarbejdet i overensstemmelse med kravene i EC7 i et format der aftales med HOFOR (GeoGIS, GeoScene 3D, gINT eller leapfrog) skal vedhæftes GIR'en.

## 8.2 Afledte jordparametre

### 8.2.1 Underafsnit for hver aflejring

#### 8.2.1.1 Styrkeparametre

#### 8.2.1.2 Deformationsparametre

### 8.2.2 Jordtrykskoefficienter for jord

### 8.2.3 Opsummering

## 8.3 Afledte parametre for kalk og kridt

### 8.3.1 Geoteknisk styrkeindeks

### 8.3.2 Styrkeparametre

#### 8.3.2.1 Enakset trykstyrke

#### 8.3.2.2 Mohr Coulomb parametre

#### 8.3.2.3 Sammenligning med relevante projekter

### 8.3.3 Rock Mass Modulus

### 8.3.4 Jordtrykskoefficienter for kalk og kridt

### 8.3.5 Opsummering

## 8.4 Afledte hydrogeologiske forhold og parametre – hele projektet/konstruktionsspecifik

Hydrogeologiske forhold skal præsenteres, herunder tilstedeværelsen af eventuelle overfladevandforekomster, grundvand og dets variation med tiden.

Afledte hydrogeologiske parametre skal opsummeres i en tabel.

Alternativt kan dette afsnit være dækket af den Hydrogeologiske undersøgelsesrapport rapport (HIR).

## 9. Geoteknisk risikoregister

Dette afsnit gennemgår geotekniske risici og mulige afbødende foranstaltninger relateret til projektets konstruktion og livscyklus. Designeren skal sikre, at afværgeforanstaltningerne tages videre i det projekt, der er skitseret i den geotekniske design rapport.

For enhver skaktkonstruktion skal designeren som minimum overveje risikoen for høj vandtilstrømning, forekomst af grønsands aflejringer og eventuelle sten og blokke.

For enhver tunnelkonstruktion skal projekterende som minimum tage højde for risikoen for at støde på 'mixed face conditions', sprækker/højstrømningszoner, tilstedeværelse af sten, der er stærkere end forventet, og kalk abrasivitet.

## 10. Liste over akronymer og forkortelser

## 11. Referencer

## 12. Appendiks A – Geoteknisk situationsplan med konstruktionselementer markeret



## KRAVSPECIFIKATION

---

13. Appendiks B – Jordmodel inklusiv resultater af tilgængelige forsøg opdelt for specifikke elementer af projektet

### 3 Geoteknisk basisrapport (GBR)

#### 3.1 Generelt

Den geotekniske basisrapport (GBR) definerer de variationer af jord- og grundvandsforhold som kontraktuelt ligger indenfor projektet.

Dette afsnit fastsætter minimumskrav til indholdet af den geotekniske basisrapport (GBR) GBR udgør en del af udførelseskontraktgrundlaget.

GBR'en indeholder klart definerede, kortfattede, kvantificerbare grænseværdier, der definerer relevante jord- og grundvandsforhold i projektområdet, som entreprenøren kan finde under udførelsen.

Grænseværdierne er relateret til de målte faktuelle data for projektet og dækker kun elementer, der kan have en negativ indvirkning på projektet (tid, omkostninger og konstruktion). Der skal fremlægges data og fortolkning for at vise klart, hvordan hver enkelt grundlag er blevet udledt, da opgørelserne ikke behøver at afspejle grænserne for de fuldstændige faktuelle datasæt. Hvor det er relevant, kan der tages hensyn til erfaringer med lignende materials egenskaber og adfærd under sammenlignelige omstændigheder.

Det er ikke tilladt at anvende begreber, som ikke klart kan måles eller defineres i overensstemmelse med geotekniske standarder og HOFOR-kravene i den geotekniske basis rapport.

GBR er ikke et konstruktionsdokument, og de præsenterede parametre skal derfor ikke betragtes som konstruktions designparametre.

Projektbeskrivelse og andre oplysninger, der er dækket andetsteds i kontraktmæssig dokumentation, bør ikke gentages i GBR.

GBR udarbejdes enten af HOFOR eller af dennes konsulent.

#### 3.2 Jordbundsforhold der afviger fra grænseværdierne

Entreprenøren skal dokumentere afvigelser fra grundlaget, der påvirker byggeriet negativt, ved at planlægge, udføre og dokumentere yderligere undersøgelser og/eller byggeaktiviteter i overensstemmelse med kravene beskrevet i HOFOR Kravspecifikationer:

- JOR 102 Jordbundsundersøgelser Til Anlægsarbejde, Geoteknisk Projekteringsgrundlag
- TUN 101 Tunnelering – Kapitel 3.8.4 (Udgravet materiale, massekontrol og prøvetagning)
- TUN 102 Byggegruber og skakte– Kapitel 3.13 (Excavation and facelog)
- JOR 104 Videnbank

# KRAVSPECIFIKATION

---

## 3.3 Indholdsfortegnelse (GBR)

Overskrifterne i dette afsnit er en liste over minimumskrav, der har til formål at hjælpe forfatteren med at udarbejde en GBR og at sikre ensartethed i leverancerne på tværs af forskellige kontrakter. Efter aftale med HOFOR kan forfatterne dog efter eget skøn tilføje eller markere afsnit, som ikke er relevante for at opfylde de særlige krav, der stilles til den specifikke rapport, de er ved at udarbejde.

1. Indledning
  - 1.1 Formål med rapport
  - 1.2 Risikofordeling
  - 1.3 Beskrivelse af undergrunden

*Kort projektbeskrivelse med opdeling af de strukturer, der er omfattet af den specifikke GBR Topografi, geologiske og hydrogeologiske forhold Jordbunds- og bjergartsenheder, der er fundet i projektområdet*
  - 1.4 Begrænsninger
  
2. Grænseværdier – stratigrafi
  - 2.1 Metode til at udlede grundlag
  - 2.2 Grænseværdier

*Der skal defineres forskellige grænseværdier for forskellige konstruktioner og/eller konstruktionstyper. For skakte skal der defineres basis-niveauer for den øverste og nederste overflade af en specifik aflejring. For tunneler skal der defineres en procentdel af de udgravede jord- og bjergartsenheder, herunder oplysninger om eventuelle 'mixed face conditions'. Bemærk, at grundlag med hensyn til forekomst af sten og blokke og hård jordbund præsenteres i yderligere afsnit.*
  
3. Grænseværdier – hydrogeologiske forhold
  - 3.1 Grundvandsniveau
    - 3.1.1 Metode til fastlæggelse af grundlag
    - 3.1.2 Grænseværdier

*Basislinjerne for grundvandsniveauer skal henviser til primære, sekundære og eventuelle andre grundvandsmagasiner i projektområdet med opdeling i planlagte konstruktioner*
  - 3.2 Zoner med grundvandstilstrømning
    - 3.2.1 Metode til fastlæggelse af grundlag
    - 3.2.2 Grænseværdier
  - 3.3 Permeabilitet
    - 3.3.1 Metode til fastlæggelse af grundlag
    - 3.3.2 Grænseværdier
  
4. Grænseværdier – geotekniske egenskaber

*Grundlag for jord- og bjergegenskaber skal kun vedrøre de egenskaber, der kan måles. Der skal opstilles grænseværdier for specifikke jord- og bjergarter, der er fundet i projektområdet, og som kan have en negativ indvirkning på projektet.*

  - 4.1 Metode til at udlede grundlag og grænseværdier for jord
    - 4.1.1 Naturligt vandindhold
    - 4.1.2 Indhyldningskurver for kornstørrelsesfordeling
    - 4.1.3 Udrænet forskydningsstyrke fra vingestyreforsøg ( $c_v$ )

## KRAVSPECIFIKATION

---

- 4.1.4 Plasticitetsindeks
- 4.1.5 Konsistensindeks ( $I_c$ )
- 4.1.6 Standard penetration test (SPT) – N værdier
- 4.1.7 Abrasivitet
- 4.1.8 Mineralogi med fokus på kvartsindhold
- 4.2 Metode til at udlede grundlag og grænseværdier for kalk og kridt
  - 4.2.1 Naturligt vandindhold
  - 4.2.2 Densitet
  - 4.2.3 Rock Quality Designation (RQD)
  - 4.2.4 Hærdningsgrad
  - 4.2.5 Graden af sprækker
  - 4.2.6 Enakset trykstyrke (UCS)
  - 4.2.7 Rock abrasivitet
  - 4.2.8 Mineralogi med fokus på kvarts- og flintindhold
- 4.3 Metode til at udlede grundlag og grænseværdier for sten, blokke og grundfjeld
  - 4.3.1 Definition af sten og blokke
  - 4.3.2 Grænseværdier
    - F.eks. størrelse (i forhold til den længste dimension), antal blokke, % af det udgravede volumen begrænset inden for væggenes/foringens indre overflade, % af det udgravede volumen begrænset af væggenes tykkelse, styrke og slidstyrke.*
- 4.4 Metode til at udlede grundlag og grænseværdier – hårde aflejringer (flint og grønsand)
  - 4.4.1 Definition af hårde aflejringer
  - 4.4.2 Grænseværdier
    - F.eks. forekomst, tykkelse, udbredelse, styrke og slibeevne*
- 5. Grænseværdier – andet
  - Der kan om nødvendigt opstilles grundlag for andre jordbundsrelaterede elementer, f.eks. brud-/skævhedszoner, diskontinuiteter, farlige materialer, forurening, giftige gasser osv.*
- 6. Måling af jordbundsforhold for kompensationsanmodninger
  - 6.1 Metodologi og krav til dokumentering
- 7. Referencer

## 4 Geoteknisk Design Basis (GDB)

### 4.1 Generelt

Dette afsnit fastsætter minimumskrav til indholdet af den geotekniske designbasis (GDB). GDB'en fastlægger fremgangsmåden for designet af et bestemt konstruktionselement eller en bestemt type konstruktionselementer. GDB'en skal dokumentere designbasis for alle midlertidige og permanente geotekniske elementer på projektet. GDB indeholder et resumé af de karakteristiske geotekniske og hydrogeologiske parametre, den geotekniske designmodel og de designprincipper, der er præsenteret i den geotekniske designrapport (GDR). Formålet med dokumentet er at samle de vigtigste oplysninger, der er nødvendige for den geotekniske projektering. Efter aftale med bygherren kan den foreløbige GDB dog udarbejdes før GDR'en.

# KRAVSPECIFIKATION

---

Hvorvidt GDB'en fremlægges som et selvstændigt dokument eller som en del af den samlede design basis aftales med HOFOR.

## 4.2 Indholdsfortegnelse (GDB)

Overskrifterne i dette afsnit er en liste over minimumskrav, der har til formål at hjælpe forfatteren med udarbejdelsen af GDB'en og at sikre ensartethed i leverancerne på tværs af forskellige kontrakter. Efter aftale med HOFOR kan forfatterne dog efter eget skøn tilføje eller markere specifikke afsnit som ikke relevante for at opfylde de særlige krav til den rapport, de skriver til det specifikke projekt/den specifikke konstruktion.

1. Indledning
2. Referencedokumenter
  - 2.1 Kontraktmæssige krav
  - 2.2 Normer og standarder
  - 2.3 Standarder fra tredjeparter
  - 2.4 Andre dokumenter
3. Forudsætninger
  - 3.1 Geometrisk udformning/restriktioner
  - 3.2 Levetid
  - 3.3 Geoteknisk kategori
  - 3.4 Design for grænsetilstande
  - 3.5 Partialkoefficienter
  - 3.6 Typiske lasttilfælde
  - 3.7 Andet
4. Designprincipper for projektets konstruktioner
  - 4.1 Byggegrubeindfatning/skaktvægge (skakte og byggegruber dybere end 5 m)
  - 4.2 Udgravninger mindre end 5 m dybe
  - 4.3 Tunnelering og no-dig løsninger
  - 4.4 Ledninger med bygværker og brønde
  - 4.5 Fundering af konstruktioner
  - 4.6 Andre designovervejelser herunder jordankre og sikring mod opdrift
5. Geotekniske og hydrogeologiske parametre
  - 5.1 Geotekniske designparametre for designelement 1
    - 5.1.1 Designelement 1  
*Dette afsnit indeholder en liste over alle karakteristiske parametre og en karakteristisk geoteknisk designmodel for det specifikke designelement 1*
  - 5.2 Geotekniske designparametre for designelement 2
    - 5.2.1 Designelement 2  
*Dette afsnit indeholder en liste over alle karakteristiske parametre og en karakteristisk geoteknisk designmodel for det specifikke designelement 2*
  - 5.3 Geotekniske designparametre for jernbanekrydsninger
    - 5.3.1 Krydsning mellem specifik jernbane og tunnel  
*Dette afsnit indeholder en liste over alle karakteristiske designparametre og den karakteristiske geotekniske designmodel for den specifikke jernbaneoverskæring*
  - 5.4 Geotekniske designparametre for andre konstruktioner ved specifikke design elementer
    - 5.4.1 Anden konstruktion ved det specifikke designelements placering

## KRAVSPECIFIKATION

---

*Dette afsnit indeholder en liste over alle karakteristiske designparametre og den karakteristiske geotekniske designmodel for den anden struktur ved den specifikke placering af designelementet.*

### 5.5 Hydrogeologiske designparametre for alle konstruktioner

#### 5.5.1 Design grundvandsniveauer

*Dette afsnit indeholder en liste over design grundvandsniveauer og design vandtryksprofiler for forskellige grundvandsmagasiner og grænsetilstande med opdeling i midlertidige og permanente forhold.*

#### 5.5.2 Hydrogeologiske parametre

*Dette afsnit indeholder en liste over alle de karakteristiske hydrogeologiske designparametre, der er nødvendige for designet (f.eks. transmissivitet, hydraulisk ledningsevne, grundvandskemi) for den specifikke struktur.*

6. Appendiks A – Geotekniske designmodeller for skakte
7. Appendiks B – Geotekniske designmodeller for tunneler
8. Appendiks C – Geotekniske designmodeller for andre konstruktioner

## 5 Geoteknisk udførelsesjournal (GCR)

### 5.1 Generelt

Dette afsnit fastsætter krav til indholdet af den geotekniske udførelsesjournal (GCR- forkortet GCR fra den engelske titel "Geotechnical construction record".) i forbindelse med geotekniske arbejder. Kravene i udkastet til EC7-1 fra oktober 2020 er gentaget, da det ikke er klart, hvornår det vil blive offentliggjort.

GCR skal dokumentere alle faser af opførelsen, tilsyn, overvågning og inspektion af den specifikke konstruktion for at hjælpe med fremtidig vedligeholdelse, design af yderligere arbejder og nedlukningsarbejder.

Omfanget af GCR skal aftales med HOFOR.

### 5.2 Indholdsfortegnelse (GCR)

Overskrifterne i dette afsnit er en liste over minimumskrav, der har til formål at hjælpe forfatteren med at udarbejde GCR og at sikre ensartethed i leverancerne på tværs af forskellige kontrakter. Efter aftale med HOFOR kan forfatterne dog efter eget skøn tilføje eller udelade afsnit for at opfylde de særlige krav, der stilles til den rapport, de udarbejder til det specifikke projekt/den specifikke struktur.

1. Projektinformation
  - 1.1 Indledning

*Projektets navn, oplysninger om den færdige konstruktion, dens planlagte anvendelse og placering (koordinater og referencesystem)*
  - 1.2 Normative referencer
  - 1.3 Henvvisninger til projektdokumentation

*GIR, geoteknisk designrapport (GDR), konstruktionstegninger og specifikationer*
2. Udførelsesjournal

*Udarbejdes af entreprenøren*

## KRAVSPECIFIKATION

---

- 2.1 Rækkefølge af byggeoperationer, der er forudsat i designet, herunder eventuelle afvigelser herfra under udførelsen
- 2.2 Konstaterede afvigelser fra konstruktionsgrundlaget, herunder den geotekniske konstruktionsmodel
- 2.3 Indførte korrigerende foranstaltninger
- 2.4 Afvigelser fra konstruktionspecifikation og konstruktionsspecifikation, der er foretaget under udførelsen, herunder begrundelser
- 2.5 Midlertidige arbejder
- 2.6 Krav til løbende overvågning
- 2.7 Tegninger af det udførte arbejde
3. Inspektionsrapport
  - Vedrørende kvalitetssikring af de udførte arbejder (f.eks. materialer, dimensioner, jordbundsforhold). Udarbejdes af entreprenøren på grundlag af inspektionsplanen.*
  - 3.1 Evaluering af inspektionsrapporter, herunder kontrolprøvning af konstruktion og supplerende jordbundsundersøgelser i byggefasen
  - 3.2 Revision af jordmodellen og den geotekniske designmodel
  - 3.3 Indførte korrigerende foranstaltninger
  - 3.4 Afvigelser fra planen
4. Tilsynsrapport
  - I forbindelse med kvalitetssikring af arbejdets udførelsesproces. Udarbejdes af konsulenten.*
  - 4.1 Evaluering af resultaterne fra tilsynet
  - 4.2 Indførte korrigerende foranstaltninger
  - 4.3 Afvigelser fra planen
5. Monitoreringsrapport
  - Vedrører verifikation af den forventede adfærd af jorden og/eller strukturer og byggeriets indvirkning på konstruktioner inden for indflydelseszonen. Skal udarbejdes af konsulenten.*
  - 5.1 Evaluering af monitoreringsresultaterne
  - 5.2 Indførte korrigerende foranstaltninger
  - 5.3 Afvigelser fra planen
6. Overvejelser om fremtidig overholdelse af funktions- og driftskrav
  - Udarbejdes af projekterende.*
  - 6.1 Sammenfatning af de observationer, der er gjort under anlægsarbejdet
  - 6.2 Optegnelse af områder, hvor der skal tages særligt hensyn til fremtidig vedligeholdelse
  - 6.3 Indførte korrigerende foranstaltninger
  - 6.4 Afvigelser fra planen

## 6 Geologisk tolkning og videnbank

Der henvises til HOFOR kravspecifikation JOR104. Denne kravspecifikation skal anvendes i forbindelse med afrapportering og arkivering af geotekniske, hydrogeologiske og miljøtekniske undersøgelser for HOFORs projekter. Kravspecifikationen sikrer, at data fra grundundersøgelser indsamles og lagres på en konsekvent måde velegnet til visualisering, databehandling og deling på tværs af projekter.

# KRAVSPECIFIKATION

---

## 7 Udledning af styrke- og deformationsparametre

### 7.1 Generelt

I bestræbelserne for at effektivisere geoteknikken ved HOFOR's projekter er der i denne kravspecifikation henvist til opsamlet generel viden om egenskaber af jordbundsforhold (jord- og kalkbjergarter) der rutinemæssigt træffes i Københavnsområdet.

Der er søgt nyttiggjort dels forarbejdet til nye Bulletiner i Geoteknisk Forening og dels udenlandske erfaringsdatabaser, primært Kulhawy og Mayne (1990) og Burt G. Look (2007).

Formålet er at opstille og udlede konsistente relationer (erfaringsregler) mellem indeksparametre og in situ-forsøgene og de heraf udledte styrke- og deformationsegenskaber, til brug for projektering af vægge, skakter og tunnelrør etc., se konstruktionsliste i afsnit 1.3. Valg af relation afhænger af hvilken klassifikationsparameter, der er til rådighed i det konkrete tilfælde.

De anbefalede empiriske udtryk skal anvendes af rådgiverne for udledning af karakteristiske styrke- og deformationsparametre for opstilling af GIR'en for et givet projekt indenfor de nævnte rammer.

Ved særlige bundforhold, der måtte ligge uden for erfaringsreglerne, eller særlige projekteringsmæssige behov, skal den generelle viden suppleres med avancerede laboratorieforsøg (ALAB) jf. HOFORs kravspecifikation JOR102.

### 7.2 Styrkeparametre

Generelt udledes styrkeparametrene (den udrænede forskydningsstyrke,  $c_u$ , den effektive friktionsvinkel,  $\varphi'$ , og den effektive kohæsion,  $c'$ ) for kohæsionsaflejringer ud fra udrænede triaksialforsøg ( $CAU_{u=0}$  alternativt som  $CIU_{u=0}$ ), jf. dansk praksis, se fx DS415:1965, dgf-Bulletin 15 (2001), side 91-92 og dgf-Bulletin 22 (2013), Kap. 7. Jords styrke.

I de følgende afsnit for kohæsionsaflejringer er opstillet empiriske relationer mellem styrkeparametre og af resultater af in situ-forsøg, dvs. resultater af feltvingeforsøg,  $c_v$ , resultater af SPT-forsøg ( $N_{SPT}$ -værdier) og resultater af klassifikationsforsøg ( $w$  og  $I_p$ ).

For friktionsaflejringer bestemmes den effektive friktionsvinkel med baggrund i tolkning af SPT-forsøgsresultater,  $N_{SPT}$ -værdier (antal slag pr. 300 mm's nedsynkning). Her indgår det effektive overlejringsstryk og det korrigerede slagantal pr. 300 mm's nedsynkning ( $N_1$ )<sub>60</sub>.

### 7.3 Deformationsparametre

Efter dansk praksis bestemmes forbelastningsspændingen,  $\sigma'_{pc}$ , ud fra konsolideringsforsøg, jf. dgf-Bulletin nr. 15.

## KRAVSPECIFIKATION

---

Poisson's forhold,  $\nu$ , kan skønnes som anført i Tabel 6, men der er ikke nogen faste regler for fastsættelsen, ligesom FEM-programmer kan forskrive valg, der ikke synes rimelige, når der skal modelleres geotekniske beregninger i fx udrænnet tilstand.

Tabel 6. Anbefalede værdier af Poisson's forhold,  $\nu$ , for forskellige jordtyper (efter Look, 2007).

	Udrænnet tilstand	Drænnet tilstand
	[-]	[-]
Sand, grus og andre friktionsjordarter	0,30	0,30
Lav $I_p$ (<12%)	0,35	0,25
Medium $I_p$ (12% < $I_p$ < 22%)	0,40	0,30
Høj $I_p$ (22% < $I_p$ < 32%)	0,45	0,35
Meget høj $I_p$ ( $I_p$ > 32%)	0,45	0,40

Ved konsolideringsforsøg bestemmes konsolideringsmodulen for aflastning til  $\sigma'_{red}$  og derefter ved genbelastning.

Empiriske relationer for deformationsegenskaber under kapitel 10 bygger på erfaringstal fra tidligere projekter, f.eks. Storebæltsforbindelsen og projekter udført af Geo og Rambøll.

## 8 Hviletrykskoefficienter

### 8.1 Generelt

Hviletrykskoefficienten for éndimensional konsolidering og efterfølgende éndimensional aflastning benævnes,  $K_0^{NC}$  for normalkonsolideret jord, NC (OCR = 1,0) og  $K_0^{OC}$  for overkonsolideret jord, OC (OCR > 1,0).

### 8.2 Fyld og normalkonsolideret jord

For fyldaflejninger og normalkonsolideret jord er hviletrykskoefficienten, jf. Jáky (1944), bestemt som:

$$K_0^{NC} = (1 - \sin \phi'_{tr}) \quad (\text{Ligning 1})$$

### 8.3 Overkonsolideret jord

For overkonsolideret jord er hviletrykskoefficienten bestemt som, jf. Mayne og Kulhawy (1982):

$$K_0^{OC} = K_0^{NC} \left( \frac{\sigma'_{pc}}{\sigma'_{vo}} \right)^{\sin \phi'_{tr}} = K_0^{NC} (OCR)^{\sin \phi'_{tr}} \quad (\text{Ligning 2})$$



## KRAVSPECIFIKATION

Formlerne som anført (afsnit 8.2) og (afsnit 8.3) giver værdier af hviletrykskoefficienten, som er forbundet med en del usikkerhed.

Efter sædvanlig dansk praksis bestemmes forkonsolideringsspændingen,  $\sigma'_{pc}$ , ud fra konsolideringsforsøg, jf. dgf-Bulletin nr. 15, side 61-64 for stærkt overkonsolideret materiale.

For moræneaflejringer antages (dgf-Bulletin 15) skønsmæssigt følgende relation mellem forkonsolideringsspændingen,  $\sigma'_{pc}$ , og den udrænedede forskydningsstyrke,  $c_u$ :

$$\sigma'_{pc} \approx 4 - 5 c_u \quad (\text{Ligning 3})$$

Som alternativ til bestemmelse af  $\sigma'_{pc}$  ved udførelse af konsolideringsforsøg eller skønsmæssigt ved (5.3.2) fås ved at benytte SHANSEP en bedre tilnærmelse med kendskab til  $c_u = c_v$  og det effektive overlejringstryk,  $\sigma'_{v0}$ , se Sørensen, Steenfelt og K. Mortensen (1995):

$$\sigma'_{pc} = \sigma'_{v0} \cdot OCR = \sigma'_{v0} \cdot [c_u / (0,42 \cdot \sigma'_{v0})]^{1/0,85} \quad (\text{Ligning 4})$$

Af tabel 7 ses anbefalede værdier af hviletrykskoefficienten,  $K_0^{OC}$ , for forkonsolideret jord (NIRAS/Geo, 2017 & Geo, 2014)

Tabel 7: Anbefalede værdier af hviletrykskoefficienten,  $K_0^{OC}$ , for forkonsolideret jord (NIRAS/Geo, 2017 & Geo, 2014).

	$K_0^{OC}$ -nedreværdi	$K_0^{OC}$ -øvre værdi	$\sigma'_{pc}$
	[-]	[-]	[kPa]
Smeltevandsler og -silt	0,43 (OCR) <sup>0,33</sup>	0,50 (OCR) <sup>0,50</sup>	300 - 1200
Moræneler	0,33 (OCR) <sup>0,33</sup>	0,43 (OCR) <sup>0,43</sup>	600 - 2400
Morænesand, -silt og -grus	0,33 (OCR) <sup>0,20</sup>	0,43 (OCR) <sup>0,43</sup>	600 - 2400
Smeltevandssand og -grus	0,33 (OCR) <sup>0,20</sup>	0,43 (OCR) <sup>0,43</sup>	600 - 2400
Grønsandsaflejringer	0,33 (OCR) <sup>0,20</sup>	0,43 (OCR) <sup>0,43</sup>	2400

### 8.4 København kalk og bryozokalk

Geo har ved laboratorieforsøg vurderet at hviletrykskoefficienten for H2 kalk kan udtrykkes ved formlen:

$$K_0^{OC} = 0,43 (OCR)^{0,60} \quad (\text{Ligning 5})$$

Geo tilføjer, at for kalk af hårdhed H3 er  $K_0^{OC}$  markant lavere, hvor forsøg på H4 og H5 indikerer værdier på ca. 0,1.

For kalkmassen vurderer Geo at man kan antage følgende værdier for  $K_0^{OC}$ , som anført i Tabel 8.

Tabel 8: Anbefalede værdier af hviletrykskoefficienten,  $K_0^{OC}$ , for København Kalk og Bryozokalk (NIRAS/Geo, 2017 og Geo, 2014).

	$K_0^{OC}$ -nedreværdi	$K_0^{OC}$ -øvre værdi	$\sigma'_{pc}$
	[-]	[-]	[kPa]

## KRAVSPECIFIKATION

---

	$K_0^{OC}$ -nedreværdi	$K_0^{OC}$ -øvre værdi	$\sigma'_{pc}$
København Kalk og Bryozokalk	0,36 (OCR) <sup>0,33</sup>	0,43 (OCR) <sup>0,60</sup>	2400

## 9 Hviletrykskoefficient for horisontal aflastning

### 9.1 Generelt

Erfaringer viser, at for design af sekantpælevægge, spunsvægge og slidsevægge vil man opnå et yderst konservativt design, hvis man benytter  $K_0^{OC}$ -værdier for jordlagene som input i FEM-programmer, fx PLAXIS- og OPTUM programmerne ved vurderinger af støttevægges deformationer. Det skal bemærkes, at dette gælder, når der er anvendt  $K$ -moduler som udledt efter de i denne kravspecifikation JOR103 anførte metoder og formler sammen med en Mohr-Coulomb jordmodel. Hvis der anvendes mere avancerede jordmodeller, som en Hardening-Soil eller en Hardening-Soil-small-strain-model, da gælder ovennævnte betragtninger måske ikke. Her vil en kalibrering være påkrævet.

Dette er dokumenteret ved sammenligning af beregnede- og målte udbøjninger af monitorerede støttekonstruktioner, jf. Eksamensprojekt for Nordhavnsvejen (Kirstein, 2016) og Geonote 05 – Internt HOFOR-notat, Forlængelsen af Nordhavnsvejens Tunnel (Haahr, 2018).

Geo nævner i Preliminary GIR'en for Kalvebod Brygge (2017), at hviletryk vil starte fra jordtryk bestemt ved  $K_0^{OC}$  og derefter afhængigt af deformationerne i jorden bevæge sig mod det aktive jordtryk ( $K_a$ ) henholdsvis det passive jordtryk ( $K_p$ ) i en brudgrænsetilstand. Det skal bemærkes, at det aktive jordtryk også indeholder et kohæsionsbidrag ( $K_c$ ) for OC-lerjord, hvorfor det aktive jordtryk for OC-lerarter kan være  $< 0$  kPa, som følge af en høj kohæsion. Man må dog ikke tage negative jordtryk i regning.

Geo konkluderer endvidere, at som følge af ovenstående bemærkninger vil jordtrykkene i en anvendelsesgrænsetilstand (SLS) være lig med eller større end hviletrykket svarende til normalkonsolideret tilstand. Hvis deformationerne under udførelsen af konstruktionen endvidere har tilladt fuldt udviklet aktivt jordtryk, da vil SLS-jordtrykket vende tilbage til hviletryk for normalkonsolideret jord, alternativt vil jordtrykket ligge mellem hviletrykket bestemt ved  $K_0^{OC}$  og hviletrykket bestemt for normalkonsolideret jord,  $K_0^{NC}$ .

Ovennævnte betragtninger er ikke dokumenteret ved fuldskalaforsøg eller ved tilbageregning af eksisterende monitorerede støttekonstruktioner, men gælder sandsynligvis for sand og grus. Hviletrykskoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , i en anvendelsesgrænsetilstand kan derfor sandsynligvis være mindre end de aktive jordtrykskoefficienter,  $K_a$ , da det samlede aktive jordtryk også afhænger af  $K_c$  (kohæsionsbidraget) for lerjordarter. Derfor kan man ikke udelukke at SLS-

## KRAVSPECIFIKATION

---

jordtrykkene kan ligge under hviletryk for normalkonsolideret jord og også under det aktive jordtryk bestemt ved  $K_a$  (uden bidrag fra  $K_c$ ).

Erfaringer tyder på, at efter en horisontal aflastning vil jordtryk i SLS ikke antage højere værdier end jordtryk bestemt ved  $K_0^{NC}$ .

Et andet vigtigt forhold som ofte negligeres, er det faktum, at der skal meget små tøjninger til at udløse aflastningsjordtrykket, som verificeret ved monitorerede støttekonstruktioner.

I Tabel 9 er anført anbefalede værdier af hviletrykskoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , for anvendelse ved design af støttevægge, skakter og tunneler, når styrke- og deformationsparametre er udledt efter de i denne kravspecifikation JOR103 anførte metoder og formler og der anvendes en Mohr-Coulomb jordmodel i de numeriske beregninger.

Det skal endvidere fremhæves at begge værdier i Tabel 9 (nedre- og øvre værdier) skal vurderes i det enkelte design tilfælde og den kritiske værdi skal benyttes.

*Tabel 9: Anbefalede værdier af hviletrykskoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , for anvendelse ved design af støttevægge, skakter og tunneler.*

	$K_{0,a}$ -nedreværdi	$K_{0,a}$ -øvre værdi
	[-]	[-]
Fyld og normalkonsolideret jord	$(1 - \sin\phi'_{tr})$	
Smeltevandsler og -silt	0,30	0,60
Moræneler	0,30	0,60
Morænesand, -silt og -grus	0,40	0,70
Smeltevandssand og -grus	0,50	0,80
Grønsandsaflejringer	0,30	0,60
Grønsandskalk	0,01	0,30
Knust kalk og kalk, hvor H1 er dominerende	0,33	0,38
København Kalk og Bryozokalk	0,01	0,30

### 9.2 Fyld og normalkonsolideret jord

For fyldaflejringer og normalkonsolideret jord fastsættes en konservativ værdi for hviletrykskoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$  (ved reduktion af de horisontale spændinger) til hviletrykskoefficienten  $K_0^{NC}$ :

$$K_{0,a} = K_0^{NC} = (1 - \sin\phi'_{tr}) \quad (\text{Ligning 6})$$

## KRAVSPECIFIKATION

---

### 9.3 Forkonsolideret jord

Når der sker en aflastning af jorden, fx ved etablering af sekantpælevægge, skakter og tunnelrør, da reduceres  $K_0^{OC}$  – værdien kraftigt (fra 2 á 6 til 0,3 á 0,6). Dette fald i  $K_0^{OC}$  skyldes primært den effektive kohæsion og "aging" (evt. også cementering) som forkonsoliderede ler- og morænelerarter har udviklet under konsolideringsprocessen.

Tilbagegøring af udbøjninger for en instrumenteret midlertidig sekantpælevæg for Nordhavnsvejen, Geonote 04 (Haahr, 2018), har vist, at man kan benytte følgende konservative hviletrykskoefficienter for horisontal aflastning for design af sekantpælevægge, skakter og tunnelrør:

En øvre værdi vurderes til:

$$K_{0,a_{\text{øvre}}} = 0,6 \text{ (á 0,8)} \quad \text{(Ligning 7)}$$

og en nedre værdi til:

$$K_{0,a_{\text{nedre}}} = 0,3 \text{ (á 0,5)} \quad \text{(Ligning 8)}$$

Ovennævnte værdier gælder, når styrke- og deformationsparametrene for de forkonsoliderede jordarter er bestemt ved de empiriske formler i dette notat.

Erfaringer viser dog, at for design af sekantpælevægge, spunsvægge og slidsevægge vil man opnå et konservativt design blot ved at sætte  $K_0^{OC} = K_0^{NC}$ , som input i PLAXIS ved vurderinger af støttevæggenes deformationer. Dette er dokumenteret ved sammenligning af beregnede deformationer og målte udbøjningerne af monitorerede støttekonstruktioner jf. Torvebyen i Køge (2010), Multimediehuset (2011), Kanalvej 2 (2014), Langelands Plads (2017), H.C. Ørsteds Vej 65-69 (2017) og Nordhavnsvejen (2018).

### 9.4 København kalk og bryozokalk

I Haahr (2016b) er udledt en alternativ metode til vurdering af hviletrykskoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , for kalk:

Hvis kohæsionen udelades i bestemmelsen af hviletrykskoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , da bliver den ikke repræsentativ for kalkmassen, hvorfor  $K_{0,a}$  bliver alt for konservativ.

Ved hjælp af Mohrs cirkel for spændinger, se Hansen (1978), kan man udlede et formelsæt til fastlæggelse af en mere realistisk hviletrykskoefficient for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ . Parametrene som skal anvendes er således:  $\varphi'_M$  og  $c'_M$  for kalkmassen og  $\sigma'_1$  og  $\sigma'_3$ . Med disse parametre bestemmes  $\tau_f$  og  $\sigma_f$ , hvorefter en sekantfriktionsvinkel,  $\varphi'_s$ , vurderes via:

$$\varphi'_s = \text{Arctan} \left( \frac{\tau_f}{\sigma_f} \right) \quad \text{(Ligning 9)}$$

## KRAVSPECIFIKATION

---

Dernæst bestemmes en tilnærmet hviletrykskoefficient for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$  som:

$$K_{0,a} \approx 1 - \sin(\varphi'_s) \quad (\text{Ligning 10})$$

Det skal bemærkes, at  $\tau_f$  i ovennævnte sammenhænge definerer den forskydningsspænding ved brud, for en given spændingstilstand,  $\sigma'_1$  og  $\sigma'_3$ , som bestemmes for tangentparametrene,  $\varphi'_M$  og  $c'_M$ , henholdsvis ved sekantparametrene,  $\varphi'_s$  og  $c' = 0$  kPa. På denne måde indregnes indflydelsen af den effektive kohæsion på de realistiske hviletrykskoefficienter for horisontal aflastning.

Ovennævnte tilnærmede metode vil give resultater af  $K_{0,a}$ , som typisk vil ligge i intervallet:

$$0,01 < K_{0,a} < 0,6.$$

Tilbagegeregning af en instrumenteret sekantpælevæg for de midlertidige vægge på Nordhavnsvejens tunnel, gav dog væsentlige mindre værdier:

$$0,01 < K_{0,a} < 0,3.$$

## KRAVSPECIFIKATION

---

# 10 Materialedata for jord og kalk

### 10.1 Fyldaflejninger (sand)

#### 10.1.1 Generelt

Styrkeparametre for sandfyld udledes med baggrund i empiriske formler og resultater af SPT-forsøg. Styrkeparametre for sandfyld bestemmes således som for intakt sand (friktionsjord).

#### 10.1.2 Styrkeparametre

Styrkeparametre kan udledes ved hjælp af SPT-forsøg, se afsnit 10.4.2.

Er der ikke udført SPT-forsøg skønnes den triaksiale friktionsvinkel til:

$$\varphi'_{tr} = 28^\circ \text{ á } 33^\circ \quad (\text{Ligning 11})$$

Hvor  $28^\circ$  antages for løst leret sandfyld og  $33^\circ$  for fast lejret sandfyld.

For friktionsaflejninger anvendes den plane friktionsvinkel,  $\varphi'_{pl}$  for design:

$$\varphi'_{pl} \approx [1,0+0,10 \cdot I_D] \cdot \varphi'_{tr} \leq 1,1 \cdot \varphi'_{tr} \quad (\text{Ligning 12})$$

#### 10.1.3 Deformationsparametre

Konsolideringsmodulen for sandfyld bestemmes med baggrund i resultater af SPT-forsøg, ukorrigerede  $N_{SPT}$ -værdier, og overlejringsstrykket,  $\sigma'_{v0}$ , i den dybde, hvor forsøget er udført.

Følgende relation anvendes til bestemmelse af K-modulet, jf. Denver (1980):

$$K = 5 \cdot \sqrt{N_{SPT}} \quad (\text{MPa}) \quad (\text{Ligning 13})$$

Uden SPT-forsøg anbefaler Christensen (1993) brugen af skønsformlen:

$$K_s = (250 \text{ MPa}) (\sigma'/25 \text{ MPa})^\alpha \quad (\text{Ligning 14})$$

hvor  $K_s$  er en sekantværdi der varierer med komprimeringsgraden.

Ovennævnte formel anvendes for fyldjord primært bestående af friktionsfyld.

$\sigma'$  er største effektive hovedspænding og hvor eksponenten  $\alpha$  varierer mellem 0,9 for SP = 90% til  $\alpha = 0,5$  for SP = 96%.

Hviletrykskoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , bestemmes med baggrund i friktionsvinklen.

# KRAVSPECIFIKATION

## 10.1.4 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til sandfyld

Tabel 10: Udedte styrke- og deformationsparametre for sandfyld.

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$\varphi'_{tr}$ [°]	$\tan^{-1} \left[ \frac{(N_1)_{60}}{(12,2 + 20,3 \frac{\sigma'_{v0}}{p_a})} \right]^{0,34}$	(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub> er det korrigerede antal slag p <sub>a</sub> = 100 kPa
	28 – 33	Uden forsøg (28° for løst leret sandfyld og 33° for fast lejret sandfyld)
c' [kPa]	0	
K <sub>t</sub> [MPa]	$5,0 \text{ MPa} \sqrt{N_{SPT}}$	Bestemmes ud fra SPT-forsøg med det ukorrigerede antal salg, N <sub>SPT</sub>
	$250 \text{ MPa} \left[ \frac{\sigma'_0}{25 \text{ MPa}} \right]^\alpha$	Uden in situ-målinger (Christensen, 1993) σ' <sub>0</sub> er største effektive hovedspænding α varierer mellem: 0,9 for SP = 90% og til 0,5 for SP = 96%
K <sub>0,a</sub> [-]	(1 – sin φ' <sub>tr</sub> )	

NB: For sandfyld anvendes  $\varphi'_{pl} \approx [1,0+0,10 \cdot I_p] \cdot \varphi'_{tr} \leq 1,1 \cdot \varphi'_{tr}$  (se ligning (Ligning 22) i afsnit 10.4.2)

## 10.2 Fyldaflejninger (ler)

### 10.2.1 Generelt

Den udrænedede forskydningsstyrke for lerfyld bestemmes som for intakt ler.

### 10.2.2 Styrkeparametre

Styrkeparametre for lerfyld udledes med baggrund i empiriske formler, resultater af feltvingeforsøg, SPT-forsøg og plasticitetsindeksforsøg (evt. med støtte i vandindholdet).

Sædvanligvis bestemmes den triaksiale friktionsvinkel alene som et skøn, jf. dansk erfaring:

$$\varphi'_{tr} = 25^\circ \text{ á } 30^\circ \quad (\text{Ligning 15})$$

Alternativt bestemmes den med baggrund i plasticitetsindekset, I<sub>p</sub>, jf. afsnit 10.6.2.

For kohæsionsaflejninger sættes normalt  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$ .

## KRAVSPECIFIKATION

---

Den udrænedede forskydningsstyrke,  $c_u$ , bestemmes ved vingeforsøg, idet  $c_u \approx c_v$ .

Sædvanligvis benyttes en effektiv kohæsion,  $c'$ , for lerfylden, og denne skønnes, jf. dansk erfaring, til:

$$c' \approx 0,1 \cdot c_u \quad (\text{Ligning 16})$$

### 10.2.3 Deformationsparametre

Konsolideringsmodulen for lerfyld bestemmes med baggrund i empiriske formler med kendskab til vingeforsøg og vandindholdet.

Konsolideringsmodulet for ler- og morænelersfyld, med  $c_u \geq \text{ca. } 50 \text{ kPa}$ , kan bestemmes ved den empiriske formel, jf. Knudsen:

$$K = 20 \cdot c_v/w \quad (\text{Ligning 17})$$

hvor  $c_v$  er vingestykken og  $w$  er vandindholdet.

Er der tale om en meget svag ler- og morænefyld, med  $c_u < \approx 50 \text{ kPa}$ , da anvendes den empiriske formel, jf. Knudsen (1987), se Frederiksen, Gravesen, Knudsen og Thorsen (1987):

$$K = 10 \cdot c_v/w \quad (\text{Ligning 18})$$

Hviletrykskoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , bestemmes med baggrund i friktionsvinklen.



## KRAVSPECIFIKATION

### 10.2.4 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til lerfyld

Tabel 11: Udlledte styrke- og deformationsparametre for lerfyld.

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$c_u$ [kPa]	$c_v$	Bestemmes ved feltvingeforsøg
	$k_2 \cdot N$	Bestemmes ud fra SPT-forsøg, hvor $N = N_{SPT}$ er det ukorrigerede antal slag. $k_2 = c_u/N$ er afbildet i Figur 4 som funktion af plasticitetsindekset, $I_p$ .
$\varphi'_{tr}$ [°]	$45 - 14 \cdot \log(I_p/1\%)$	$I_p$ indsættes i %.
	25 - 30	Uden forsøg (25° for fedt lerfyld, $I_p \approx 25\%$ og 30° for normalt lerfyld, $I_p < 12\%$ )
$c'$ [kPa]	$k \cdot c_u$	$k \approx 0,1$
$K_i$ [MPa]	$20 \cdot c_v/w$	For $c_u \geq 50$ kPa (Knudsen, 1983?)
	$10 \cdot c_v/w$	For $c_u < 50$ kPa (Knudsen, 1987)
$K_{0,\alpha}$ [-]	$(1 - \sin\varphi'_{tr})$	

NB: For lerfyld anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$

## 10.3 Tørve- og gytjeaflejringer

### 10.3.1 Generelt

Gytje består af finkornede, allochtone organiske aflejringer, som både kan aflejres i ferskvand og i marint miljø. Tørv er et organisk sediment, som er dannet i en mose.

### 10.3.2 Styrkeparametre

Gytjens udrænedede forskydningsstyrke,  $c_u$ , bestemmes oftest ved vingeforsøg,  $c_v$ . Andre muligheder er tryksonderinger, CPT/CPTU-sonderinger, triaksialforsøg og tilbageregning af indtrufne stabilitetsbrud.

### 10.3.3 Deformationsparametre

Dekadehældningen,  $Q$ , bestemmes med baggrund i empiriske formler og vandindholdet (for normalkonsoliderede aflejringer).

## KRAVSPECIFIKATION

Hviletrykskoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , bestemmes med baggrund i friktionsvinklen.

### 10.3.4 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til gytjeaflejninger

Tabel 12: Uledte styrke- og deformationsparametre for gytjeaflejninger

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$c_u$ [kPa]	$0,6 \cdot c_v = 0,20 \cdot \sigma'_{v0}$	For $I_p \geq 75\%$ og/eller $w > 60\%$ , hvor $c_v/\sigma'_{v0} = 0,33$
	$0,8 \cdot c_v = 0,34 \cdot \sigma'_{v0}$	For $I_p < 75\%$ og $w < 60\%$ , hvor $c_v/\sigma'_{v0} = 0,43$
	$\mu c_v$	$c_v$ bestemmes ved vingeforsøg eller som anført herover som funktion af $\sigma'_{v0}$ $\mu = 1,08/(1+0,01 I_p) \leq 1,0$
	$\frac{q_t - \sigma'_{v0}}{18}$	Ved udførelse af CPT-forsøg (tilnærmet udtryk - Johansen, 2011)
$\varphi'_{tr}$ [°]	$45 - 14 \cdot \log(I_p/1\%)$	For OC-gytje
	$45 - 12 \cdot \log(I_p/1\%)$	For NC-gytje
$c'$ [kPa]	$k \cdot c_u$	For OC-gytje: $k = 0,1$
		For NC-gytje: $k = 0,0$
Q [%]	$60 \left[ \frac{w-0,25}{w+0,40} \right]$	DS415:1977 ( $w > 0,30$ )
$K_{0,a}$ [-]	$(1 - \sin\varphi'_{tr})$	

NB: For gytje anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$

## KRAVSPECIFIKATION

### 10.3.5 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til tørveaflejringer

Tabel 13: Udedte styrke- og deformationsparametre for tørveaflejringer

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$c_u$ [kPa]	$\mu c_v$	$c_v$ bestemmes ved vingeforsøg (Type V9.2)
		$\mu = 0,5$ uden klassifikationsforsøg
		$\mu = \left(\frac{0,43}{w_L}\right)^{0,45} \leq 1,0$
	$\frac{q_t - \sigma'_{v0}}{18}$	Ved udførelse af CPT-forsøg (tilnærmet udtryk - Johansen, 2011)
$\varphi'_{tr}$ [°]	> 31	Udenlandsk erfaring (Long, 2005).
	30	Ved aktivt brud (se dgf-Bulletin om Tørv, kapitel 16)
	11	Ved passivt brud (se dgf-Bulletin om Tørv, kapitel 16)
$c'$ [kPa]	0	For NC tørv
	0 - 3	For OC tørv
Q [%]	$60 \left[ \frac{w-0,25}{w+0,40} \right]$	DS415:1977 ( $w > 0,30$ )
	$11,6 \cdot \ln(w/1\%) - 23,7$	(Johansen, 2011) $w$ indsættes i %
$K_{0,\alpha}$ [-]	$(1 - \sin \varphi'_{tr})$	

NB: For tørv anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$

## 10.4 Friktionsaflejringer (sand og grus)

### 10.4.1 Generelt

Korrelationer, formeludtryk og værdier i det følgende afsnit gælder for alle naturligt aflejrede sandaflejringer generelt og gælder uanset alder og aflejringstilstand.

For friktionsjordarter som sand og grus anbefaler HOFOR, at der udføres SPT-forsøg for udledning af styrkeparameteren, den effektive triaksiale friktionsvinkel,  $\varphi'_{tr}$ .

Hvis der er målt  $N_{SPT}$ -værdier, anført som  $N = 59$  slag/130mm, skal disse værdier ekstrapoleres til  $N_{SPT}^{ex} = 136$  slag/300mm.

## KRAVSPECIFIKATION

---

### 10.4.2 Styrkeparametre

SPT-forsøg, udtrykt ved  $N_{SPT}$ -værdier, som angivet på boreprofilerne (dvs. antal slag pr. 300 mm nedsynkning) skal korrigeres til  $N_{cor}$ , i henhold til anbefalingerne i DS/EN 1997-2:2007 and EN ISO 22476-3:2005:

$$N_{cor} = (N_1)_{60} = \frac{E_r}{60} \cdot \lambda \cdot C_N \cdot N_{SPT} \cdot k \quad (\text{Ligning 19})$$

hvor

$E_r$  er energiforholdet for det specifikke forsøgsudstyr, som skal justeres til et reference energiforhold på 60%.

$\frac{E_r}{60} \approx 0.83$  á 1.3 afhængigt af det valgte udstyr (for an automatic hammer with a trip release  $\frac{E_r}{60} = 1.0$ , whereas for a safety hammer with a 2 turns of rope release  $\frac{E_r}{60} = 0.83$ ).

$\lambda$  er en korrektionsfaktor, der tager højde for energitabet i forhold til stangens længde, se Figur 1 (Tabel A.1 i EN ISO 22476-3:2005).

Figur 1 (Tabel A.1 i EN ISO 22476-3:2005)

**Table A.1 —Correction factors in sands due to rod length**

Rod length below the anvil m	Correction factor $\lambda$
>10	1,0
6 to 10	0,95
4 to 6	0,85
3 to 4	0,75

$C_N$  er en korrektionsfaktor for den vertikale effektive spænding,  $\sigma'_v$ , som følge af overlejringstrykket i sand, som afhænger af den relative lejringstæthed,  $I_D$ , for normalt konsolideret sand og om sandet er normalt eller overkonsolideret, se Figur 2 (Table A.2 i EN ISO 22476-3:2005):

$k$  er en korrektionsfaktor for sandtypen (fint- eller grovkornet) som anbefalet i DS/EN 1997-2:2007, Anneks F, F.1 (4): For fine sandtyper bør  $N$ -værdierne reduceres i forholdet 55:60, og for grove sandtyper bør forholdet øges til 65:60.

## KRAVSPECIFIKATION

Figur 2: (Tabel A.2 i EN ISO 22476-3:2005)

**Table A.2 — Correction factors  $C_N$  for vertical stress  $\sigma'_v$  due to overburden of the soil in sands**

Type of consolidation	Density Index $I_D$ %	Correction factor $C_N$
Normally consolidated	40 to 60	$\frac{200}{100+\sigma'_v}$
	60 to 80	$\frac{300}{200+\sigma'_v}$
Overconsolidated	—	$\frac{170}{70+\sigma'_v}$
(σ <sub>v</sub> ' in kPa)		

Jf. Schmertmann (1976) bestemmes den triaksiale friktionsvinkel,  $\varphi'_{tr}$ , som funktion af det effektive overlejringstryk,  $\sigma'_{v0}$ , med baggrund i SPT-forsøg,  $N_{SPT}$ :

$$\varphi'_{tr} \approx \tan^{-1} \left[ \frac{N_{SPT}}{(12,2 + 20,3 \frac{\sigma'_{v0}}{p_a})} \right]^{0,34} \quad (\text{Ligning 20})$$

hvor

$p_a$  = atmosfærisk tryk (= 100 kPa).

Som følge af erfaringer og anbefalinger i DS/EN 1997-2:2007 skal det ukorrigerede antal slag,  $N_{SPT}$ , erstattes med det korrigerede antal slag,  $(N_1)_{60}$ :

$$\varphi'_{tr} \approx \tan^{-1} \left[ \frac{(N_1)_{60}}{(12,2 + 20,3 \frac{\sigma'_{v0}}{p_a})} \right]^{0,34} \quad (\text{Ligning 21})$$

Ovennævnte formel af Schmertmann (1976) har den fordel, at man kan bestemme triaksiale friktionsvinkler,  $\varphi'_{tr} > 46^\circ$  som bestemt for Cityringen, hvilket ikke er muligt i henhold til

DS/EN 1997-2:2007 hvor  $\varphi'_{tr} \leq 46^\circ$ . Dertil kommer at  $\varphi'_{tr} < 28^\circ$  også bliver aktuelt for meget lave  $N_{SPT}$ -værdier.

Det skal bemærkes, at formel (Ligning 21) kun gælder for rent kvartssand, hvorfor den udledte friktionsvinkel skal korrigeres for indhold af grus, silt og ler.

Look (2007) anbefaler, at man korrigerer de udledte friktionsvinkler som følger:

## KRAVSPECIFIKATION

---

Reducer  $\varphi'_{tr}$  med  $5^\circ$  for leret sand.

Forøg  $\varphi'_{tr}$  med  $5^\circ$  for gruset sand.

Det er desuden dansk praksis, at man korrigerer de udledte triaksiale friktionsvinkler for et moderat indhold af silt og for afrundede korn:

Reducer  $\varphi'_{tr}$  med  $2^\circ$  for 10% silt.

Reducer  $\varphi'_{tr}$  med  $3^\circ$  for 20% silt.

Reducer  $\varphi'_{tr}$  med  $3^\circ$  for afrundede korn.

Ved plan tøjningstilstand anvendes den plane friktionsvinkel,  $\varphi'_{pl}$  for friktionsaflejringerne grovsilt, sand og grus, bestemmes ved at forøge den triaksiale friktionsvinkel svarende til, jf. DS/EN 1997-1 DK NA:2021:

$$\varphi'_{pl} \approx [1,0 + 0,10 \cdot I_D] \cdot \varphi'_{tr} \leq 1,1 \cdot \varphi'_{tr} \quad (\text{Ligning 22})$$

### 10.4.3 Deformationsparametre

Konsolideringsmodulen for friktionsaflejringer bestemmes med baggrund i empiriske formler med input af resultater af SPT-forsøg, ukorrigerede  $N_{SPT}$ -værdier, og overlejringsstrykket i den dybde, hvor forsøget er udført.

Hviletrykskoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , bestemmes som skønnede værdier.

## KRAVSPECIFIKATION

### 10.4.4 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til sand

Tabel 14: Udedte styrke- og deformationsparametre for sand.

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$\varphi'_{tr}$ [°]	$\tan^{-1} \left[ \frac{(N_1)_{60}}{(12,2 + 20,3 \frac{\sigma'_{v0}}{p_a})} \right]^{0,34}$	<p><math>(N_1)_{60}</math> er det korrigerede antal SPT-slag, <math>N_{SPT}</math>.  <math>p_a = 100</math> kPa</p> <p>Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med 5° for leret sand.            Forøg <math>\varphi'_{tr}</math> med 5° for gruset sand.</p> <p>Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med 2° for 10% silt.            Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med 3° for 20% silt.            Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med 3° for afrundede korn.</p>
$c'$ [kPa]	0	
$K_t$ [MPa]	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	<p><math>K_{t,0} \approx 20</math> MPa</p> <p><math>\Delta K_t = 2000</math> for dybder <math>\leq 9</math> m under eksisterende terræn.  <math>\Delta K_t = 2500</math> for dybder <math>&gt; 9</math> m under eksisterende terræn.</p>
	$10,37 \text{ MPa} \sqrt{N_{SPT}}$	Udtrykt ved SPT-forsøg (Denver, 1980)
	$300 \text{ MPa} \sqrt{\frac{\sigma'_{red}}{1 \text{ MPa}}}$	Uden in situ-målinger (Christensen, 1993)
$K_{0,\alpha}$ [-]	0,5 – 0,8	

NB: For sand anvendes  $\varphi'_{pl} \approx [1,0+0,10 \cdot l_D] \cdot \varphi'_{tr} \leq 1,1 \cdot \varphi'_{tr}$

## KRAVSPECIFIKATION

### 10.4.5 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til grus

Tabel 15: Udedte styrke- og deformationsparametre for grus

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$\varphi'_{tr}$ [°]	$\tan^{-1} \left[ \frac{(N_1)_{60}}{(12,2 + 20,3 \frac{\sigma'_{v0}}{p_a})} \right]^{0,34}$	<p><math>(N_1)_{60}</math> er det korrigerede antal SPT-slag, <math>N_{SPT}</math>.  <math>p_a = 100</math> kPa</p> <p>Forøg <math>\varphi'_{tr}</math> med 5° for rent grus.            Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med 5° for leret grus.</p> <p>Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med 2° for 10% silt.            Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med 3° for 20% silt.            Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med 3° for afrundede korn.</p>
$c'$ [kPa]	0	
$K_t$ [MPa]	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	<p><math>K_{t,0} \approx 20</math> MPa</p> <p><math>\Delta K_t = 2500</math> for dybder <math>\leq 9</math> m under eksisterende terræn.  <math>\Delta K_t = 3000</math> for dybder <math>&gt; 9</math> m under eksisterende terræn.</p>
	$10,37 \text{ MPa} \sqrt{N_{SPT}}$	Udtrykt ved SPT-forsøg (Denver, 1980)
$K_{0,\alpha}$ [-]	0,5 – 0,8	

NB: For grus anvendes  $\varphi'_{pl} \approx [1,0+0,10 \cdot I_D] \cdot \varphi'_{tr} \leq 1,1 \cdot \varphi'_{tr}$

## 10.5 Silt (grov- og finsilt)

### 10.5.1 Generelt

Det skal anføres at silt generelt betragtes som en "overgangsjord", med fastlæggelse af såvel den udrænedede forskydningstyrke,  $c_u$ , og de effektive styrkeparametre,  $\varphi'_{tr}$  og  $c'_{tr}$ .

Der behandles kun overkonsolideret silt, idet der mangler data for normalkonsolideret silt.

Silten opdeles i grovsilt (betrages som en friktionsjord) henholdsvis finsilt (betrages som en kohæsionsjord).

Hvis der er målt  $N_{SPT}$ -værdier, anført som f.eks.  $N = 59$  slag/130mm, skal disse værdier ekstrapoleres til  $N_{SPT}^{ex} = 136$  slag/300mm.



## KRAVSPECIFIKATION

---

### 10.5.2 Styrkeparametre (grov- og finsilt)

Grovsilt betragtes som et friktionsmateriale.

Med udgangspunkt i SPT-forsøg bestemmes friktionsvinklen for grovsilt, efter principperne som beskrevet i forrige afsnit for sand og grus.

For grovsilt vurderes den effektive kohæsion  $c' = 0$  kPa.

Finsilt betragtes som et kohæsionsmateriale.

SPT- og feltvingeforsøg kan anvendes for fastlæggelse af den udrænedede forskydningsstyrke,  $c_u$ . SPT-forsøg tolkes som anført i formel (Ligning 30).

Udførelse af triaksialforsøg benyttes til fastlæggelse af den triaksiale friktionsvinkel,  $\varphi'_{tr}$ .

Uden forsøg antages konservativt:

$$\varphi'_{tr} = 32^\circ \quad (\text{Ligning 23})$$

Den effektive kohæsion for overkonsolideret silt antages at være bestemt ved:

$$c'_{tr} = k_3 \cdot c_u \quad (\text{Ligning 24})$$

$$k_3 \approx 0,05 \quad (\text{Ligning 25})$$

Se også Figur 11 hvor resultatet af et triaksialforsøg på silt fra Langelands Plads, Frederiksberg (2016) er plottet ( $\varphi'_{tr} = 33,7^\circ$  og  $c'_{tr} = 7$  kPa og  $c_u = 132$  kPa) samt et forsøg på silt fra Storgrundet Wind Farm.

#### Datagrundlaget er yderst sparsomt for silt.

Begge forsøg bekræfter relationen som udtrykt ved ligning 24 og ligning 25.

Der indføres dog en øvre grænse på  $c' = 35$  kPa, da man ofte vil være begrænset i in-situ målinger af den udrænedede forskydningsstyrke på  $c_u = 700$  kPa.

At denne øvre grænse er en konservativ værdi ses af Tabel 16 med udvalgte resultater af triaksialforsøg fra diverse projekter.

Tabel 16: Udvalgte triaksialforsøg (CAU- og MACD-trykforsøg) på overkonsolideret finsilt.

Projekt	$c_u$ [kPa]	$\varphi'_{tr}$ [°]	$c'$ [kPa]	$k_3 = c'/c_u$ [-]
Cityringen – CW-PI-5 (B C0103), Lab. Nr. 3140)*	> 700 ?	32,0	157	> 0,224 ?
Langelands Plads	132	33,6	7	0,053

\*Dette forsøg er foretaget på en forstyrret prøve (prøven viste sig ikke at være intakt). Det er derfor ikke muligt at drage nogle konklusioner ud fra dette forsøg.

### 10.5.3 Deformationsparametre (grov- og finsilt)

I det følgende er anført udtryk for  $K_t$ -moduler for overkonsolideret finsilt ved (Lange og Haahr, 2012).

$$K_t = 20 \text{ MPa} + 1500 \cdot \sigma'_{red} \quad (\text{Ligning 26})$$

## KRAVSPECIFIKATION

Hviletrykskoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , bestemmes med baggrund i friktionsvinklen.

### 10.5.4 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til grovsilt

Tabel 17: Udedte styrke- og deformationsparametre for overkonsolideret grovsilt

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$\varphi'_{tr}$ [°]	$\tan^{-1} \left[ \frac{(N_1)_{60}}{(12,2 + 20,3 \frac{\sigma'_{v0}}{p_a})} \right]^{0,34}$	<p><math>(N_1)_{60}</math> er det korrigerede antal SPT-slag, <math>N_{SPT}</math>.</p> <p><math>p_a = 100</math> kPa</p> <p>Forøg <math>\varphi'_{tr}</math> med 5° for gruset silt.            Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med 5° for leret silt.            Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med 5° for silt.</p> <p><math>32^\circ \leq \varphi'_{tr} \leq 35^\circ</math></p>
	32	Uden forsøg
$c'$ [kPa]	0	
$K_t$ [MPa]	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	<p><math>K_{t,0} \approx 20</math> MPa</p> <p><math>\Delta K_t = 1500</math></p>
$K_{0,a}$ [-]	$(1 - \sin \varphi'_{tr})$	Interval: 0,3 – 0,6

NB: For grovsilt anvendes  $\varphi'_{pl} \approx [1,0+0,10 \cdot I_D] \cdot \varphi'_{tr} \leq 1,1 \cdot \varphi'_{tr}$

# KRAVSPECIFIKATION

## 10.5.5 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til finsilt

Tabel 18: Udedte styrke- og deformationsparametre for overkonsolideret finsilt

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$c_u$ [kPa]	$c_v$	Bestemmes ved feltvingeforsøg
	$k_2 \cdot N$	Bestemmes ud fra SPT-forsøg, hvor $N = N_{SPT}$ er det ukorrigerede antal slag. $k_2 = c_u/N$ er afbildet i Figur 4 som funktion af plasticitetsindekset, $I_p$ .
$\varphi'_{tr}$ [°]	$45 - 14 \cdot \log(I_p/1\%)$	$I_p$ indsættes i % $32^\circ \leq \varphi'_{tr} \leq 35^\circ$
	32	Uden forsøg
$c'$ [kPa]	$k_3 \cdot c_u$	$k_3 \approx 0,05$ og $c' \leq 35$ kPa
$K_t$ [MPa]	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	$K_{t,0} \approx 20$ MPa $\Delta K_t = 1500$
$K_{0,a}$ [-]	$(1 - \sin \varphi'_{tr})$	Interval: 0,3 – 0,6

NB: For finsilt anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$

## 10.6 Kohæsiionsaflejringer (ler og moræneler)

### 10.6.1 Generelt

Der behandles primært overkonsoliderede lerarter (smeltevandssler og moræneler), men der er anført en tabel med angivelse af empiriske formler for udledning af styrke- og deformationsparametre for senglacialt ler.

### 10.6.2 Styrkeparametre (ler og moræneler)

Styrkeparametre (friktionsvinklen,  $\varphi'$ , den effektive kohæsiion,  $c'$ , og den udrænedede forskydningsstyrke,  $c_u$ ) for disse aflejringer (ler og moræneler) udledes med baggrund i empiriske formler, plasticitetsindekset,  $I_p$ , resultater af vingeforsøg og SPT-forsøg. Hvis der ikke er udført forsøg til bestemmelse af plasticitetsindekset,  $I_p$ , da benyttes vandindhold som vikarierende parametre for  $I_p$  (med forsigtighed).

Det skal fastlægges om aflejringerne er normal konsoliderede (NC, dvs. OCR = 1,0) eller overkonsoliderede (OC, dvs. OCR > 1,0), idet dette har betydning for fastlæggelse af den effektive kohæsiion,  $c' = 0$  for NC-aflejringer.

## KRAVSPECIFIKATION

---

De opstillede empiriske formler er udledt ud fra resultater af klassifikationsforsøg og triaksialforsøg.

Hvor der er tale om store afgravninger kan vurderingen af den udrænedede forskydningsstyrke,  $c_{u,afkast}$  for aflastning skønnes ud fra SHANSEP, se formel (10.12) i Teknisk Ståbi, 22. udgave 2013:

$$c_{u,etter}/c_{u,før} = (\sigma'_{etter}/\sigma'_{før})^{(0,2)}$$

Da der er uenighed i branchen om effekten af denne aflastning skal vurderingen indeholde effekten af en genbelastning af jorden og dermed en genbelastning af  $c_u$  ved bæreevneberegning. (se DGI Memo no 11, 1991).

Forsigtige middel peak værdier for den triaksiale friktionsvinkel af finkornede jordarter (samlet vurdering af nyere og gamle forsøg) – Engineering judgement kan bestemmes som, jf. Sørensen og Okkels (2013):

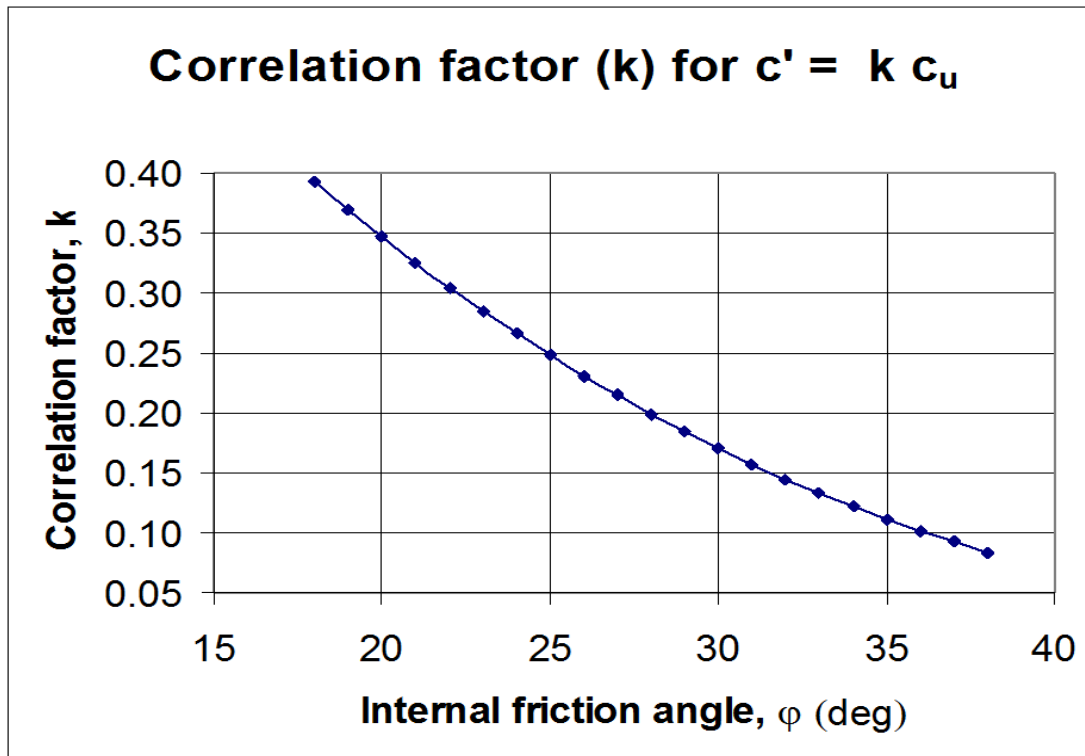
$$\varphi'_{tr} = 45^\circ - 14 \cdot \log(I_p/1\%) \quad (4\% < I_p < 50\%) \quad (\text{Ligning 27})$$

Den effektive kohæsion kan bestemmes ved følgende udtryk, jf. Moust Jacobsen (1975), se Figur 3:

$$c' = k \cdot c_u \quad (\text{Ligning 28})$$

$$k \approx N_{c,d}/N_{c,\varphi} \quad (\text{Ligning 29})$$

## KRAVSPECIFIKATION



Figur 3: Korrelationsfaktor mellem  $c'$  og  $c_u$ , Moust Jacobsen (1975).

Der indføres dog en øvre grænse på  $c' = 70$  kPa, da man ofte vil være begrænset på in-situ målinger af den udrænedede forskydningsstyrke på  $c_u \leq 700$  kPa. Dette kræver at den effektive friktionsvinkel antager værdien  $36^\circ$ , hvilket ikke er usandsynligt.

At denne øvre grænse er en konservativ værdi, ses af Ligning 27 ( $c'_{max} = 271$  kPa) med udvalgte resultater af triaksialforsøg på moræneler fra diverse projekter.

$c_u$  bestemmes ved feltvingeforsøg (eller alternativt ved SPT-forsøg).

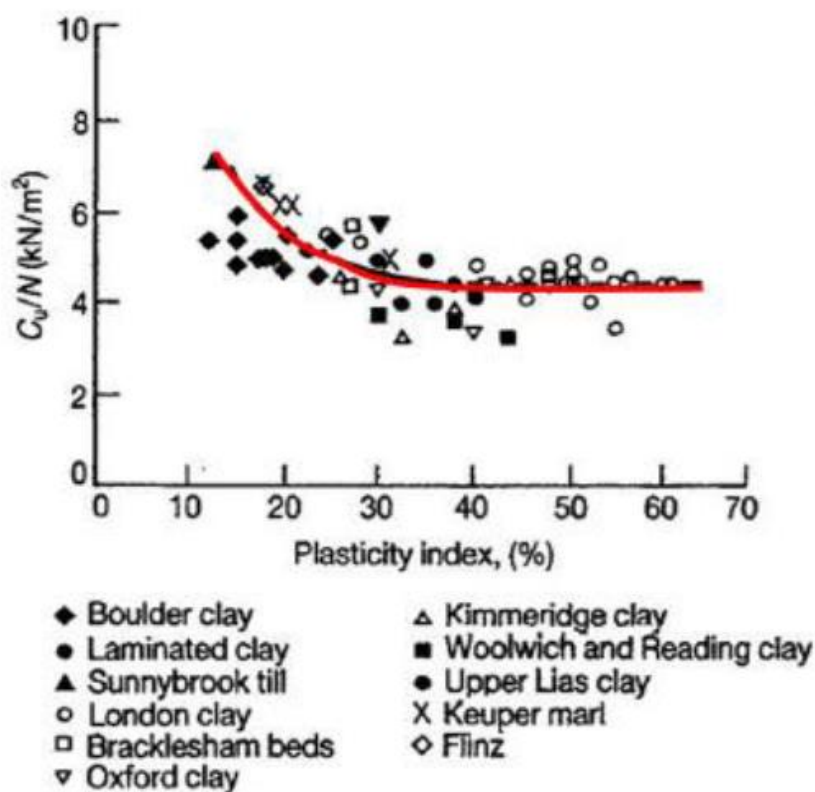
Hvis der udføres SPT-forsøg benyttes Stroud (1974), se Figur 4.

$$c_u = k_2 \cdot N_{SPT} \quad (\text{Ligning 30})$$

$$k_2 \approx c_u / N_{SPT} = f(I_p) \quad (\text{Ligning 31})$$

## KRAVSPECIFIKATION

---



Figur 4. Plot af forholdet mellem  $c_u/N$  og plasticitetsindeks,  $I_p$  for forskellige lerarter (efter Stroud, 1974)

I Danmark er det efterhånden opnået praksis for at anvende:

$$c_u / N \approx 7-8 \quad (\text{Ligning 32})$$

for "normal" moræneler med et  $I_p$  på 7-10%.

$N = N_{SPT}$ , det ukorrigerede slagantal.

Der er dog eksempler på, at ovennævnte forhold kan nærme sig 16 á 34 for 'moræneler sandet'/morænesand leret'. Derfor vil (Ligning 32) være en konservativ konverteringsfaktor for alle moræneaflejringer.

## KRAVSPECIFIKATION

Figur 5. Udvalgte triaksialforsøg (CAU- og MACD-trykforsøg) på moræneler, VAL (2021), SST (2019), SST (2020), Cityringen og JBH (1961).

Location	Borehole no.	Lab. no.	lp [%]	$c_{u,max}$ [kPa]	$\varphi'_{peak}$ [°]	$c'_{peak}$ [kPa]	$k = c'/c_u$ [-]
SST-2021	BRD124P14	24		555	20,1	294	0,53
SST-2021	BRD124P14	26		481	23,9	98	0,20
SST-2021	BRD136P14	30	10,7	1453	32	166	0,11
SST-2021	BRD140P14	26	11,5	1080	27,8	196	0,18
SST-2021	BRD163P34	33		1101	30	87	0,08
SST-2021	BRD175P35	15	11,3	1348	31,1	127	0,09
VAL-2021	VAL02p34		15,8	398	28,5	74	0,19
VAL-2021	VAL39p34		13	323	32,8	44	0,14
VAL-2021	VAL40p34		15,7	187	32	39	0,21
SST-2019	BRD34P34	K33	11,3	1440	30,4	172	0,12
SST-2019	BRD51P34	22A	10,3	727	30,2	109	0,15
SST-2019	BRD25P34	K28	12,2	548	27,9	90,3	0,16
SST-2019	BRD34P34	K36	22,7	178	27,6	12,1	0,07
Cityringen 2009	C1005	234		160	33,1	42,5	0,27
Cityringen 2009	C1005	244		438	29,3	58,5	0,13
Cityringen 2009	C1306	1590		465	32,9	60,4	0,13
Cityringen 2009	C0109	1289	22,4	327	30,6	50	0,15
Cityringen 2009	C0702	1480		259	28	50	0,19
Cityringen 2009	C1603	1432		186	28	62	0,33
Cityringen 2009	C1504	2118		938	33,9	166	0,18
SST-2020	BRD136P14	30	7,2	1153	31,1	141	0,12
SST-2020	BRD136P14	32	10,1	545	31	133	0,24
SST-2020	BRD140P14	26	11,5	1075	26,2	271	0,25
SST-2020	BRD140P14	26_2	11,5	1031	36,7	53	0,05
SST-2020	BRD163P34	34	9,3	872	25,2	209	0,24
SST-2020	BRD168P34	19	14,2	676	25,9	142	0,21
SST-2020*	BRD168P34	19_2	15,4	706	26,6	127	0,18
SST-2020	BRD195P34	23	6,9	843	32,8	71	0,08
Ferring-MACU <sub>u=0</sub> (1999)	BF5A	7-3		1044	33,5	134	0,13
Ferring-MACU <sub>u=0</sub> (1999)	BF5A	8-1		947	34,7	149	0,16
Ferring-MACD (2008)	B5	93		500	35,1	72,6	0,15
NHV-RAMBØLL (2010)	VSP01	14A		745	32,5	94,9	0,13
NHV-RAMBØLL (2010)	B42	14A		276	37,0	34,6	0,13
Offshore Wind Farm (confidential)				622	29,1	160	0,26
Kastrup P-hus (1995)	5016	59		475	31,5	65,9	0,14
Kastrup P-hus (1995)	5017	42		446	32,5	68,5	0,15
Metnord (2013)	N0209			360	24,7	71,1	0,20
Metnord (2013)	N0204			174	28	62	0,36
Metnord (2013)	N0209			168	36,4	37,9	0,23
Storstrømmen (2016) COWI	11 forsøg			193	30,5	26,0	0,13
JBH (1961)				180	35	30,0	0,17

\* Anværet spændingsdiagram for den anisotrone konsolidering

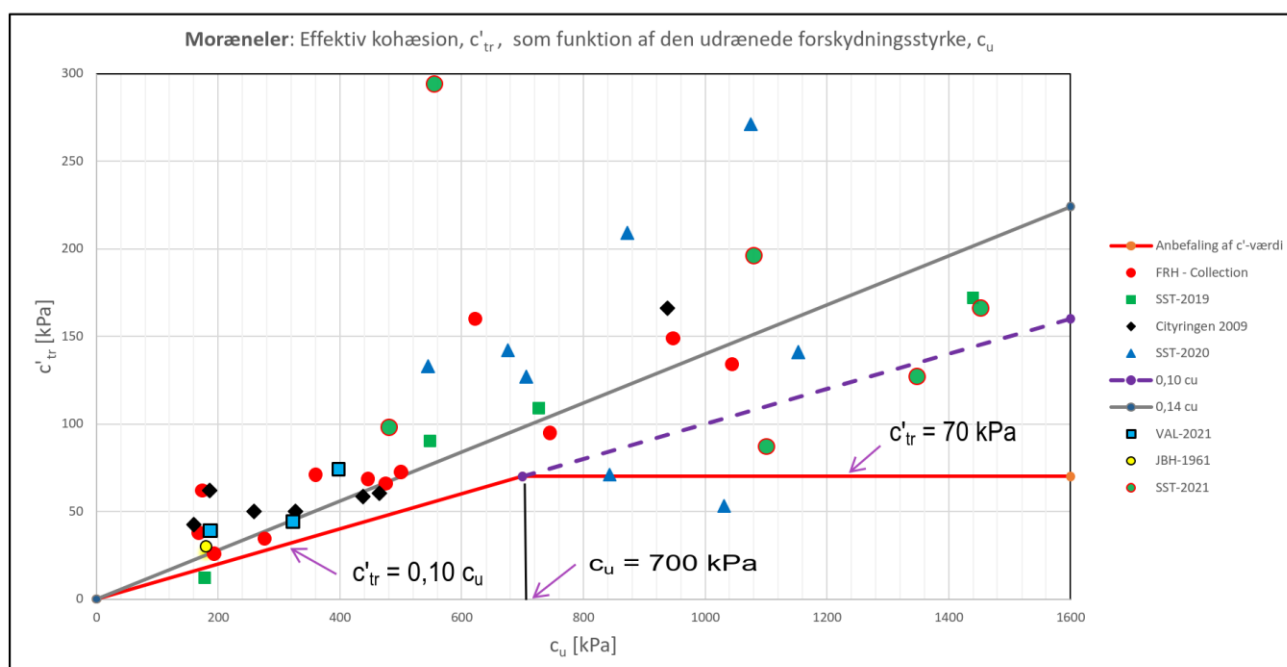
De anførte styrkeparametre i Figur 5 er udledt ved brug af tolkningsmetode A, hvor spændingsvejene for det aktuelle CAU<sub>u=0</sub>-forsøg plottes i et ( $\sigma'_1 - \sigma'_3$ ),  $\sigma'_3$ -koordinatsystem for udledning af peak-værdier af  $\varphi'_{tr}$ ,  $c'_{tr}$  og  $c_{u,max}$ , efter Dansk praksis, se dgf-Bulletin 22 (2013).

## KRAVSPECIFIKATION

Som det fremgår af ovennævnte database med triaksialforsøgsdata (primært fra København og Storstrømmen), har Moust Jacobsens formel (Ligning 29) fra 1975 vist sig at være en plausibel relation for bestemmelse af omregningsfaktoren  $k \approx N_{c,d}/N_{c,\varphi} > 0,1$  (dansk praksis siger  $k = 0,1$  uden kendskab til fx  $I_p$ ) til vurdering af den effektive kohæsion,  $c'$ .

I Figur 6 er dernæst plottet  $c'$  som funktion af  $c_u$ , hvor anbefalingerne for udledte parametre desuden er angivet som den røde kurve ( $c' = 0,1 c_u$  for  $c_u < 700$  og dernæst  $c' = 70$  kPa for  $c_u > 700$  kPa).

De nye resultater med triaksialforsøg på  $c_u$ -værdier  $> 700$  kPa viser, at  $c' = 0,1 c_u$  er et forsigtigt skøn for samtlige værdier af  $c_u$  indenfor styrkeintervallet  $c_u < 1500$  kPa.



Figur 6: Den effektive kohæsion,  $c'_{tr}$  som funktion af  $c_u$  for moræneler ( $c_u < 1500$  kPa).

For valg af styrkeparametre spiller  $c'$ -værdier for moræneaflejringer, som bestemt ved (Ligning 28), (Ligning 29) og for morænesand, -silt og -grus ved (Ligning 47) og (Ligning 48) i afsnit 10.7.2, en helt afgørende rolle. Dette er dokumenteret ved følgende projekter:

- De midlertidige vægge for Nordhavnvejens tunnel (jf. Rambølls indlæg i DGF (2011) "Grundlæggende dimensioneringsprincipper for sekantpælevægge – overvejelser i forbindelse med Nordhavnsvej-projektet" henholdsvis i (2014) "Nordhavnsvejen, Banekrydsningen – monitoring vs numeriske beregninger af byggegrube" samt indlæg af Frands Haahr i DGF (2014) "Den 'korrekte' jordmodel?")
- Midlertidig byggegrube for Kanalvej Etape 1 (2013) og Kanalvej Etape 2 (2014)
- Byggegrube for 5 etagers P-kælder, Axel Towers (2015).



## KRAVSPECIFIKATION

---

I situationer med tolkning af parametre fra boreprofiler, fx kerneboringer uden in situ-forsøg, er det ikke muligt at vurdere styrkeparametre for de sædvanligvis stærkt overkonsoliderede lerarter. Hvis der eksisterer målte vandindhold, er der dog en mulighed for at udføre grove skøn af styrkeparametrene, jf. Moust Jacobsen (1970), men det skal pointeres, at det med nutidens forsøgspraksis (CAU med bagtryk) kan være problematisk at verificere disse skønnede styrkeparametre, dels som følge af ændret praksis for forsøgsudførelse (tidligere var praksis at udføre CAU=0-forsøg uden anvendelse af bagtryk) og dels sandsynligvis også som følge af en automatisk forsøgsudførelse.

Uden kendskab til in situ-forsøg men alene det naturlige vandindhold,  $w_{nat}$ , kan styrkeparametrene vurderes **med forsigtighed** efter erfaringsformlerne opstillet af Moust Jacobsen (1970):

Uden kendskab til in situ-forsøg men alene det naturlige vandindhold,  $w_{nat}$ , skønnes den udrænedede forskydningsstyrke,  $c_u$ , som:

$$c_u = 10 \cdot \exp(0,77 \cdot (e_k)^{-1,2}) \quad (\text{Ligning 33})$$
$$= 10 \cdot \exp(0,77 \cdot (2,7 \cdot w_{nat})^{-1,2}) \text{ [kPa]} \quad \text{for } w_{nat} \geq 9\%$$

Ovennævnte udtryk anvendes for intervallet  $w_{nat} \geq 9\%$ .

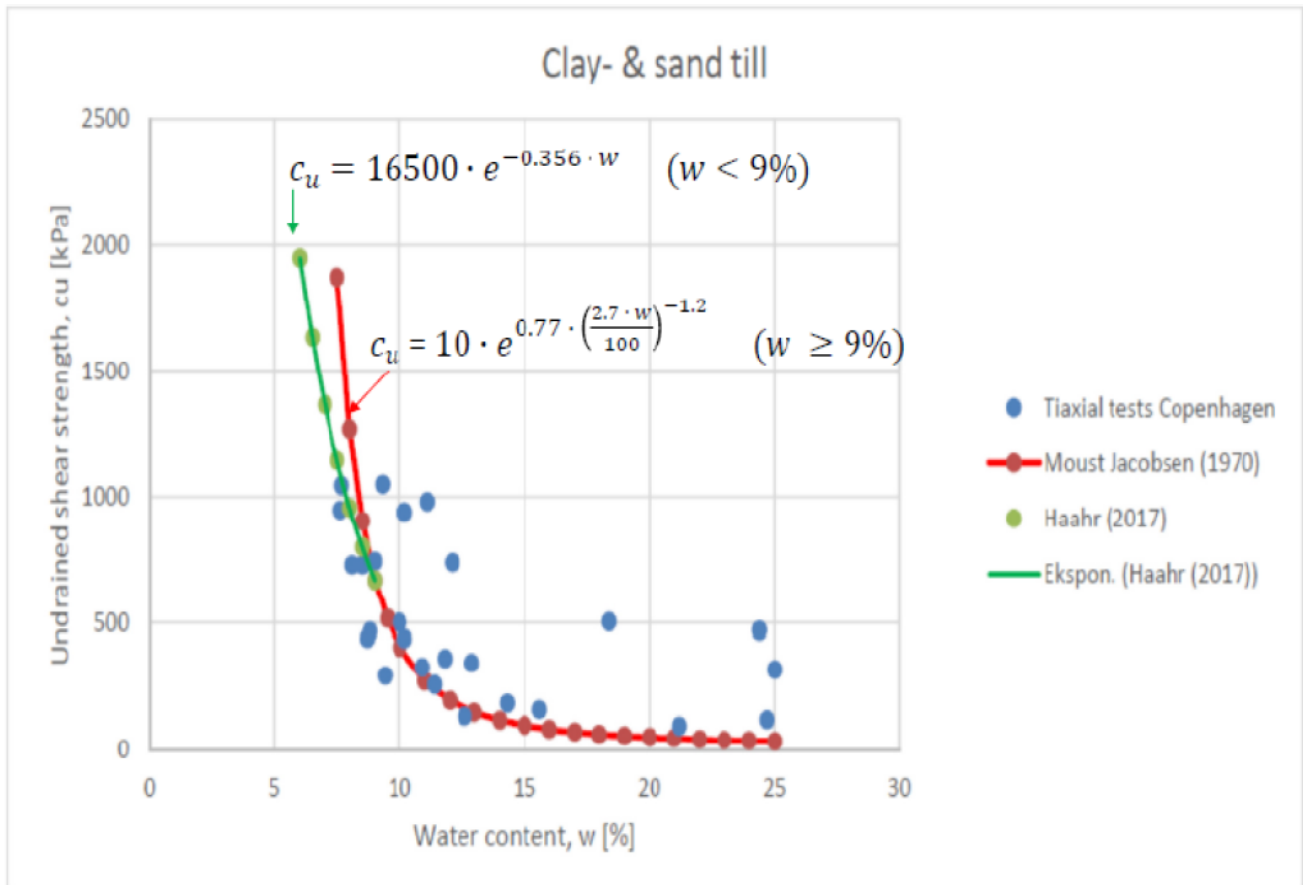
For  $3,7\% \leq w < 9\%$  har Haahr (2017) udledt udtrykket:

$$c_u = 16500 \cdot e^{-0,356 \cdot w} \quad (3,7\% \leq w < 9,0\%) \quad (\text{Ligning 34})$$

Udtrykket for  $c_u$ , som anført ved ligning (7.6.2.8), er ikke anvendelig for design, men anvendes som en indikativ parameter for morænelerets styrke ved vurdering af gravbarhed og slid på boremaskiner m.m.

Ovennævnte udtryk for vurdering af den udrænedede forskydningsstyrke er vist i Figur 7, henholdsvis i Figur 8:

## KRAVSPECIFIKATION



Figur 7: Forslag til bestemmelse af den udrænedede forskydningsstyrke for moræneler og –sand med baggrund i det naturlige vandindhold,  $w$ .

For den effektive kohæsion,  $c'$  har Moust Jacobsen (1970) anbefalet følgende udtryk:

$$c' = 430 \cdot \exp(-7,3 \cdot e_k) \quad (\text{Ligning 35})$$

$$= 430 \cdot \exp(-19,3 \cdot w_{nat}) \quad [\text{kPa}]$$

Og endelig for den effektive friktionsvinkel,  $\varphi'$ , anbefaler Moust Jacobsen (1970):

$$\varphi' = 35,3^\circ - 9^\circ \cdot e_k \quad (\text{Ligning 36})$$

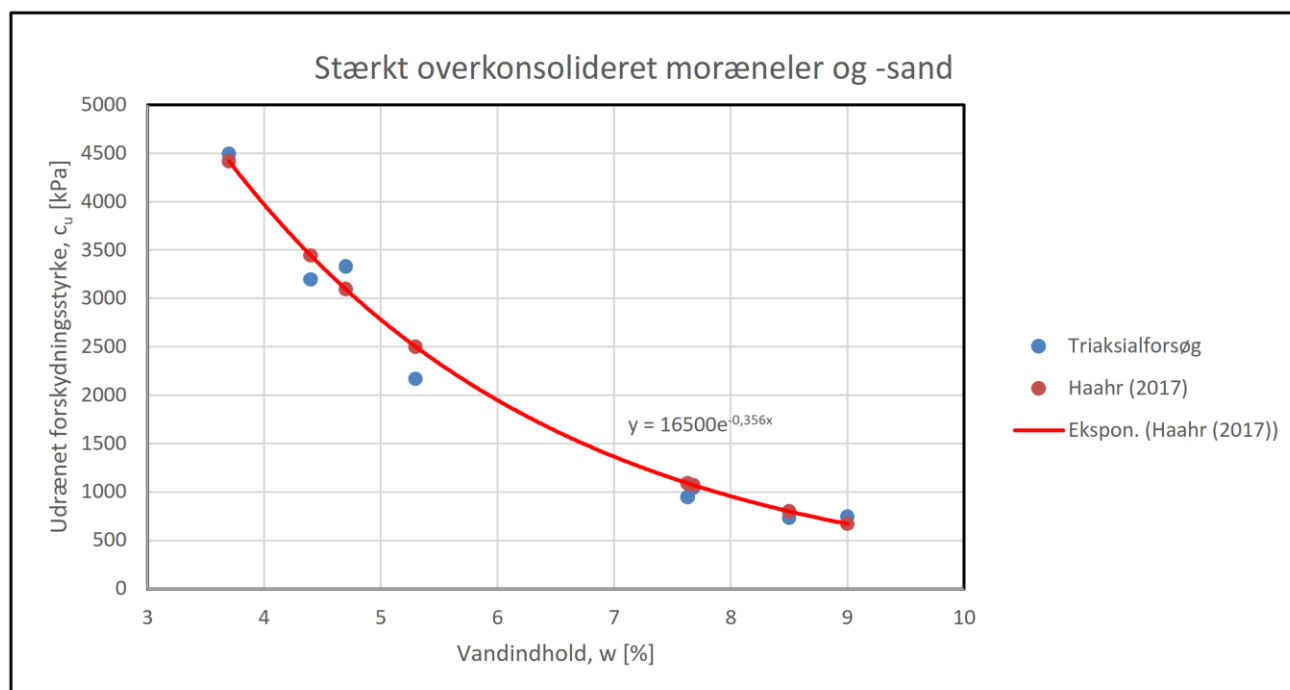
$$= 35,3^\circ - 24,3^\circ \cdot w_{nat}$$

Udtrykket for  $c_u$ , som anført i Tabel 19 og i Figur 8, er ikke anvendelig for design, men anvendes som en indikativ parameter for morænelerets styrke ved vurdering af gravbarhed og slid på boremaskiner m.m.

# KRAVSPECIFIKATION

Tabel 19: Styrkeparametre for vurdering af gravbarhed for moræneler.

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$c_u$ [kPa]	$16500 \cdot e^{-0.356 \cdot w}$	(3,7% $\leq w < 9,0\%$ )



Figur 8: Forslag til bestemmelse af den udrænedede forskydningsstyrke for moræneler og –sand med baggrund i det naturlige vandindhold,  $w$ , for intervallet (3,7%  $\leq w < 9,0\%$ ) (Haahr, 2017).

### 10.6.3 Deformationsparametre (ler og moræneler)

Konsolideringsmodulen for kohæsionsaflejringer bestemmes med baggrund i empiriske formler med input af den udrænedede forskydningsstyrke og aflastningsspændingen,  $\sigma'_{red}$ .

Den empiriske formel som anført i DS415:1977:

$$K \approx 40 c_v / w_{nat} \quad (\text{Ligning 37})$$

Formel (ligning 37), der er gældende for  $c_v$  varierende i intervallet [50 kPa  $< c_v < 700$  á 1500 kPa],

kan omskrives til en tilnærmet formel alene som en funktion af  $c_v = c_u$ , når relationen mellem  $c_u$  og vandindholdet,  $w_{nat}$ , kendes.

Det skal formeludtrykket i (Ligning 43) anvendes for bestemmelse af konsolideringsmodulet, da (Ligning 37) kan give værdier på den usikre side for høje  $c_u$ -værdier.

## KRAVSPECIFIKATION

---

Med udgangspunkt i Tabel 4.1 i Christensen et al. (2016), hvor tilnærmede sammenhænge mellem klassifikationsparameteren,  $w_{nat}$ , og den udrænedede forskydningsstyrke,  $c_u$ , er opstillet (Jacobsen, 1970), er der i Tabel 20 udledt konsolideringsmodulet som anført i DS415:1977.

Tabel 20:  $K$  som funktion af  $c_u$  og  $w_{nat}$  (DS415:1977)

$w_{nat}$	$c_u$	$K$	$K/c_u$
[%]	[kPa]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[-]
8.9	700	314607	449
9.5	500	210526	421
10.7	300	112150	374
11.9	200	67227	336
13	150	46154	308
14.7	100	27211	272
18	60	13333	222

Som det fremgår af Tabel 20 kan konsolideringsmodulet,  $K$  udledes ved følgende sammenhæng:

$$K = 473,74 \cdot c_u - 23001 \quad [\text{kPa}] \quad (\text{Ligning 38})$$

Endelig kan forholdet  $K/c_u$  fra Diagram 1 plottes som funktion af  $c_u$ , se Tabel 20:

$$K/c_u = 92,7 \cdot \ln[c_u/1,0 \text{ kPa}] - 156 \quad (\text{Ligning 39})$$

Som det ses af Diagram 2 varierer forholdet,  $K/c_u$  mellem ca. 200 og 450 for  $c_u$  varierende i intervallet  $[60 \text{ kPa} < c_u < 700 \text{ kPa}]$ .

## KRAVSPECIFIKATION

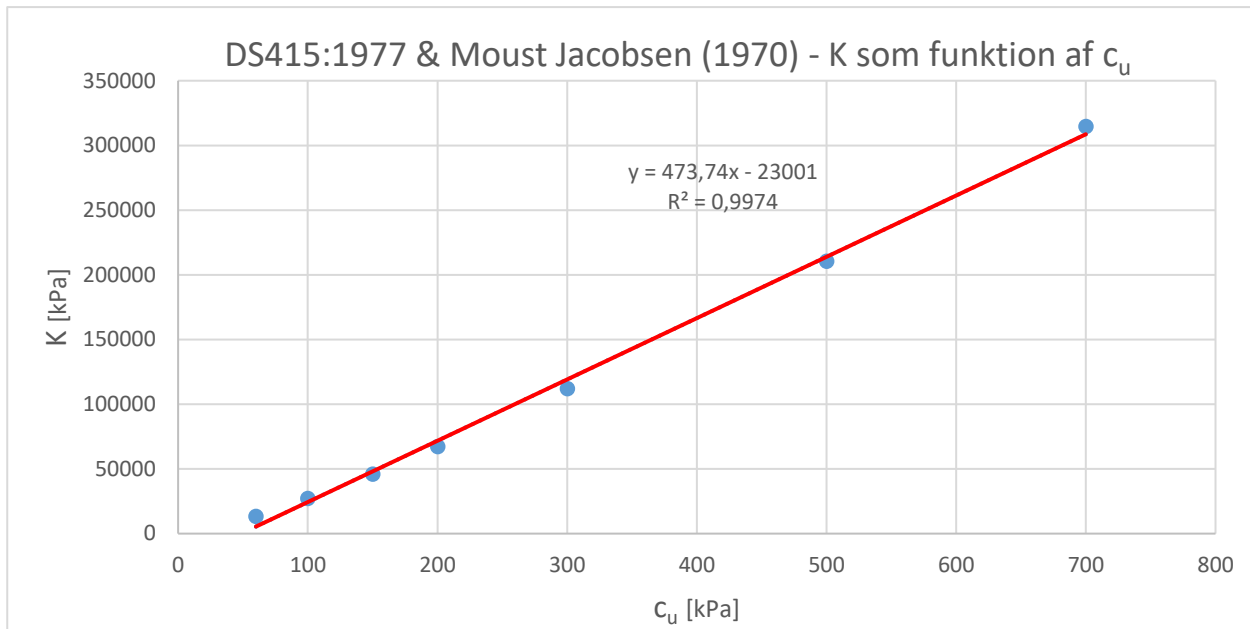


Diagram 1: Tilnærmet bestemmelse af  $K$  som funktion af  $c_u$  (DS415:1977) med den af Moust Jacobsen (1970) udledte sammenhæng mellem  $w_{nat}$  og  $c_u$ ,

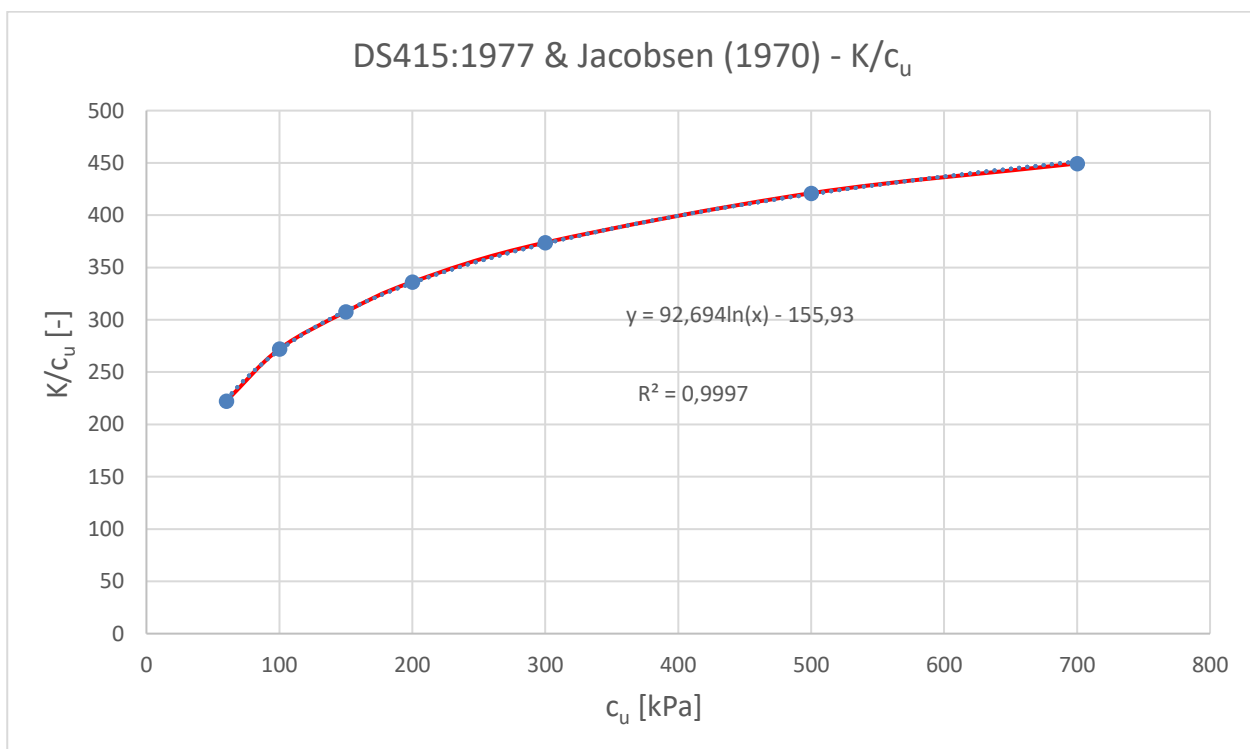


Diagram 2: Forholdet  $K/c_u$  som funktion af  $c_u$ , jf. Geonote 05, Haahr (2018).

## KRAVSPECIFIKATION

---

Som alternativ til ovennævnte tilnærmede udtryk for konsolideringsmodulet (tangenværdi),  $K_t$ , for forkonsoliderede jordarter, opstilles ofte udtryk for  $K_t$  som funktion af aflastningsspændingen (dgf-Bulletin 15). Udtrykkene opstilles med baggrund i konsolideringsforsøg udført i laboratoriet.  $K_t$  beskrives bedst ved følgende udtryk:

$$K_t = K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red} \text{ [MPa]} \quad (\text{Ligning 40})$$

$\sigma'_{red}$  er den mindste vertikale spænding som jorden har været udsat for (indsættes i enheden kPa).

Ved at opstille en database over de udledte udtryk for  $K_t$ , som udledt gennem årene for forskellige projekter, tilstræbes udledt en relation mellem  $K_{t,0}$  (=A) og  $c_u$ , jf. Geonote 05, Haahr (2018).

I Figur 9 er plottet  $K_{t,0}$  som funktion af den udrænedede forskydningsstyrke,  $c_u$ . Det ses af Figur 9 at  $K_{t,0}$  vokser med  $c_u$ , efter følgende formeludtryk:

$$K_{t,0} \approx 0,00013 \cdot (c_u)^2 + 0,0636 \cdot c_u + 7,95 \text{ [MPa]} \quad (\text{Ligning 41})$$

hvor

$c_u$  indsættes i enheden [kPa].

Det antages at  $\Delta K_t$  i udtrykket (Ligning 40) er konstant, da relationen mellem den udrænedede forskydningsstyrke ikke er kendt p.t.:

$$\Delta K_t = 1500 \quad (\text{Ligning 42})$$

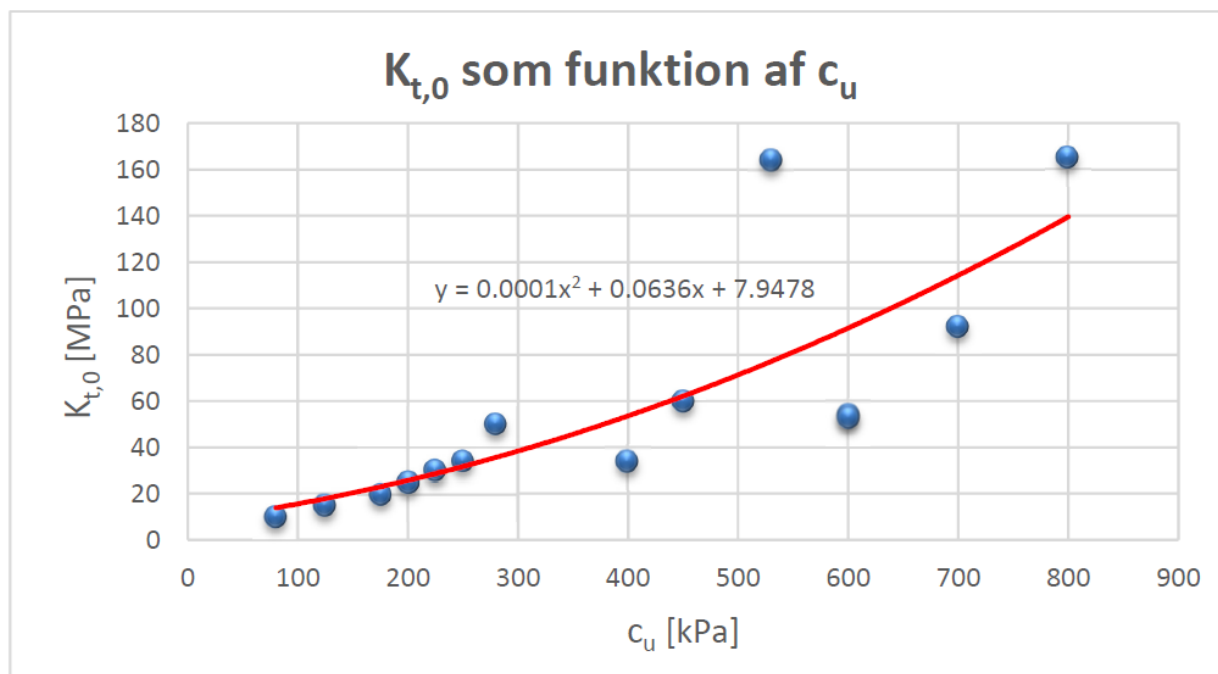
Herefter opstilles den ønskede relation for  $K_t$ :

$$K_t = [0,00013 \cdot (c_u)^2 + 0,0636 \cdot c_u + 7,9478] \text{ MPa} + 1500 \cdot \sigma'_{red} \text{ [MPa]} \quad (\text{Ligning 43})$$

Dette udtryk antages at gælde i intervallet  $50 \text{ kPa} \leq c_u \leq 1500 \text{ kPa}$ .

## KRAVSPECIFIKATION

---



Figur 9:  $K_{t,0}$  som funktion af  $c_u$  for moræneler (Haahr, 2016a).

Hviletrykskoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , bestemmes som skønnede værdier.

## KRAVSPECIFIKATION

### 10.6.4 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til senglacialt ler

Tabel 21: Udedte styrke- og deformationsparametre for senglacialt ler ( $4\% < I_p < 50\%$ ).

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$c_u$ [kPa]	$c_v$	Bestemmes ved feltvingeforsøg
	$k_2 N$	Bestemmes ud fra SPT-forsøg, hvor $N = N_{SPT}$ er det ukorrigerede antal slag. $k_2 = c_u/N$ er afbildet i Figur 4 som funktion af plasticitetsindekset, $I_p$ .
$\varphi'_{tr}$ [°]	$45 - 14 \cdot \log(I_p/1\%)$	For OC-ler ( $I_p$ indsættes i %)
	$45 - 12 \cdot \log(I_p/1\%)$	For NC-ler ( $I_p$ indsættes i %)
	$\arcsin[0,35 - 0,1 \cdot \ln(I_p/1\%)]$	
$c'$ [kPa]	0	For NC-ler (OCR = 1,0)
$c'$ [kPa]	$k \cdot c_u$	For OC-ler (OCR > 1,0): $k = (N_{c,0}/N_{c,\varphi})$ og $c' \leq 70$ kPa
$K_t$ [MPa]	$40 \cdot c_v/w$	$w$ indsættes i rent tal
	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	$4\% < I_p \leq 12\%$ $K_{t,0} = 20$ MPa og $\Delta K_t = 1000$
		$12\% < I_p \leq 20\%$ $K_{t,0} = 10$ MPa og $\Delta K_t = 800$
		$20\% < I_p < 50\%$ $K_{t,0} = 5$ MPa og $\Delta K_t = 500$
$K_{0,\alpha}$ [-]	0,3 – 0,6	

NB: For senglacialt ler anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$



## KRAVSPECIFIKATION

### 10.6.5 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til OC smeltevandsler

Tabel 22: Udedte styrke- og deformationsparametre for overkonsolideret smeltevandsler ( $4\% < I_p < 50\%$ ).

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$c_u$ [kPa]	$c_v$	Bestemmes ved feltvingeforsøg
	$k_2 N$	Bestemmes ud fra SPT-forsøg, hvor $N = N_{SPT}$ er det ukorrigerede antal slag. $k_2 = c_u/N$ er afbildet i Figur 4 som funktion af plasticitetsindekset, $I_p$ .
$\varphi'_{tr}$ [°]	$45 - 14 \cdot \log(I_p/1\%)$	$I_p$ indsættes i %
$c'$ [kPa]	$k \cdot c_u$	For $OCR > 1,0$ : $k = (N_{c,0}/N_{c,\varphi}) \leq 0,1$ og $c' \leq 70$ kPa
$K_t$ [MPa]	$40 \cdot c_v/w$	$w$ indsættes i rent tal
	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	$4\% < I_p \leq 12\%$ $K_{t,0} = 20$ MPa og $\Delta K_t = 1000$
		$12\% < I_p \leq 20\%$ $K_{t,0} = 10$ MPa og $\Delta K_t = 800$
		$20\% < I_p < 50\%$ $K_{t,0} = 5$ MPa og $\Delta K_t = 500$
$K_{0,\alpha}$ [-]	0,3 – 0,6	

NB: For smeltevandsler anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$

## KRAVSPECIFIKATION

### 10.6.6 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til moræneler

Tabel 23: Udedte styrke- og deformationsparametre for overkonsolideret moræneler ( $4\% < I_p < 50\%$ )

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$c_u$ [kPa]	$c_v$	Bestemmes ved feltvingeforsøg
	$k_2 N$	Bestemmes ud fra SPT-forsøg, hvor $N = N_{SPT}$ er det ukorrigerede antal slag/300mm's nedsynkning. $k_2 = c_u/N$ er afbildet i Figur 4 som funktion af plasticitetsindekset, $I_p$ . For moræneler vil $k_2$ typisk være ca. 7 á 8 for $I_p$ mellem 7 á 10%. For $I_p > 10\%$ henvises til Figur 4.
	$16500 \cdot e^{(-0,356 \cdot w)}$	( $3,7\% \leq w < 9,0\%$ ) Udtrykket må kun anvendes for vurdering af gravbarheden af moræneler og slid på boremaskiner
$\varphi'_{tr}$ [°]	$45 - 14 \cdot \log(I_p/1\%)$	$I_p$ indsættes i %
$c'$ [kPa]	$k \cdot c_u$	$k = (N_{c,0}/N_{c,\varphi}) \leq 0,1$ og $c' \leq 70$ kPa (Jacobsen, 1975)
$K_t$ [MPa]	$40 \cdot c_u/w$	$w$ indsættes i rent tal
	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	For $4\% < I_p \leq 10\%$ og $50 \text{ kPa} \leq c_u \leq 1500 \text{ kPa}$ $K_{t,0} \approx 0,00013 \cdot (c_u)^2 + 0,0636 \cdot c_u + 7,95 \text{ MPa}$ $\Delta K_t = 1500$ (Haahr, 2018), $c_u$ indsættes i kPa
		$10\% < I_p \leq 12\%$ $K_{t,0} = 20 \text{ MPa}$ og $\Delta K_t = 1200$ (Geo's anbefaling)
		$12\% < I_p \leq 20\%$ $K_{t,0} = 10 \text{ MPa}$ og $\Delta K_t = 800$ (Geo's anbefaling)
$20\% < I_p < 50\%$ $K_{t,0} = 5 \text{ MPa}$ og $\Delta K_t = 500$ (Geo's anbefaling)		
$K_{0,\alpha}$ [-]	0,3 – 0,6	

NB: For moræneler anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$

## KRAVSPECIFIKATION

---

### 10.7 Overgangsjordarter (morænesand, -silt og -grus)

#### 10.7.1 Generelt

Styrkeparametre (friktionsvinklen,  $\varphi'$ , den effektive kohæsion,  $c'$ , og den udrænedede forskydningsstyrke,  $c_u$ ) udledes med baggrund i empiriske formler, plasticitetsindekset,  $I_p$ , resultater af vingeforsøg og SPT-forsøg.

De opstillede empiriske formler er udledt ud fra resultater af klassifikationsforsøg og triaksialforsøg og gælder kun for overkonsoliderede aflejringer.

Det skal bemærkes, at det for morænesilt, -sand og -grus vil være relevant både at udlede effektive styrkeparametre ( $\varphi'$  og  $c'$ ) samt totale styrkeparametre ( $c_u$ ).

Da de ovennævnte aflejringer alle indeholder lerfraktionen, kan man oftest bestemme plasticitetsindekset,  $I_p$ , for dem. Hvis de ovennævnte overgangsjordarter er vurderet som NP (non plastic) ved under klassifikationen, men der fx er udført en sigtning af materialet, da har man følgende skønsformel for vurdering af en konservativ værdi af plasticitetsindekset,  $I_p$ , med baggrund i lerindholdet [% ler], jf. BRD, 2021 (se Geonote 03, rev. 1 2022):

$$I_p \approx e^{(0,1816 \cdot [\% \text{ ler}])} \quad (\text{Ligning 44})$$

For metode til udledning af styrkeparametre fra triaksialforsøg henvises til afsnit 7.2 samt bilag 1.

#### 10.7.2 Styrkeparametre (morænesand, -silt og -grus)

Hvor der ikke er udført triaksialforsøg, antages for morænesilt:

$$\varphi'_{tr} = 33^\circ \quad (\text{Ligning 45})$$

For morænesand og -grus benyttes tilsvarende:

$$\varphi'_{tr} = 37^\circ \quad (\text{Ligning 46})$$

Hvis der kan udføres plasticitetsindeks på aflejringerne, anvendes metoden i afsnit 10.6.2 for fastsættelse af friktionsvinklen.

Den udrænedede forskydningsstyrke,  $c_u$ , der vurderes med baggrund i SPT-forsøg, betragtes her som en vikarierende parameter, for fastlæggelse af den effektive kohæsion.

Den effektive kohæsion for morænesilt, -sand og -grus antages at være bestemt ved (Ligning 47) og (Ligning 48), jf. dgf-Bulletin 16, Christensen, Frederiksen, Haahr og Lyse (2016), revideret i 2018 af Haahr), se Figur 10:

$$c' = k_3 \cdot c_u \quad (\text{Ligning 47})$$

$$k_3 \approx 0,05 \quad (\text{Ligning 48})$$

Der indføres dog en øvre grænse på  $c' = 35$  kPa, da man ofte vil være begrænset i in-situ målinger af den udrænedede forskydningsstyrke (vikarierende parameter) på  $c_u = 700$  kPa. Det skal gøres opmærksom på, at der er eksempler på  $c'$ -værdier på op til 104,8 kPa (659 kPa) for morænesand (bestemt ved triaksialforsøg).

## KRAVSPECIFIKATION

Figur 10: Udvalgte triaksialforsøg (CAU- og MACD-trykforsøg) på morænesand, -silt og -grus fra SST (2020), Cityringen (2009) og diverse projekter.

Location	Borehole no.	Lab. no.	$I_p$ [%]	$c_{u,max}$ [kPa]	$\varphi'_{peak}$ [°]	$c'_{peak}$ [kPa]	$k = c'/c_u$ [-]
SST-2021	BRD143P14	20		1557	36,8	55	0,04
SST-2021	BRD190P24	24A		1484	37,2	25	0,02
SST-2020	BRD138P14	24	NP	1345	32,2	122	0,09
SST-2020*	BRD138P14	22	NP	1305	29,9	97,9	0,08
SST-2020 <sup>1</sup>	BRD141P14	51A	NP	1058	35,8	141	0,13
Cityringen - CW-PI-5	C1112	590		981	37,6	45,4	0,05
Cityringen - CW-PI-5	C0122	17		730	35,3	101,3	0,14
Cityringen - CW-PI-5	C0921	16		389	35	29,3	0,08
Nordhavnen 2 (GEO)	69	506		361	33	104,8	0,29
23.3065.01 Lillgrund - 1	3	84		237	37,7	46,6	0,20
Rødsand 2	L1		6,6	603	30,7	86,6	0,14
Rødsand 2	O.1		4	689	36	35,3	0,05
Middelgrunden				500	37,5	31	0,06
København Ny Bybane				633	35,5	36,3	0,06
Lillgrund	D08	58		238	40,2	65,6	0,28
Lillgrund				273	37,7	46,6	0,17
Lillgrund				72	39,5	16,8	0,23
Storgrundet			5	532	38,2	28,2	0,05
Langelandsplads, Frederiksberg (2016)				132	33,6	7,0	0,05
Nordhavnen				361	33,0	104,8	0,29
Malmø City Tunnel (2006)			3,7	300	37,0	107,2	0,36

\* GEO har ikke tolket effektive styrkeparametre.

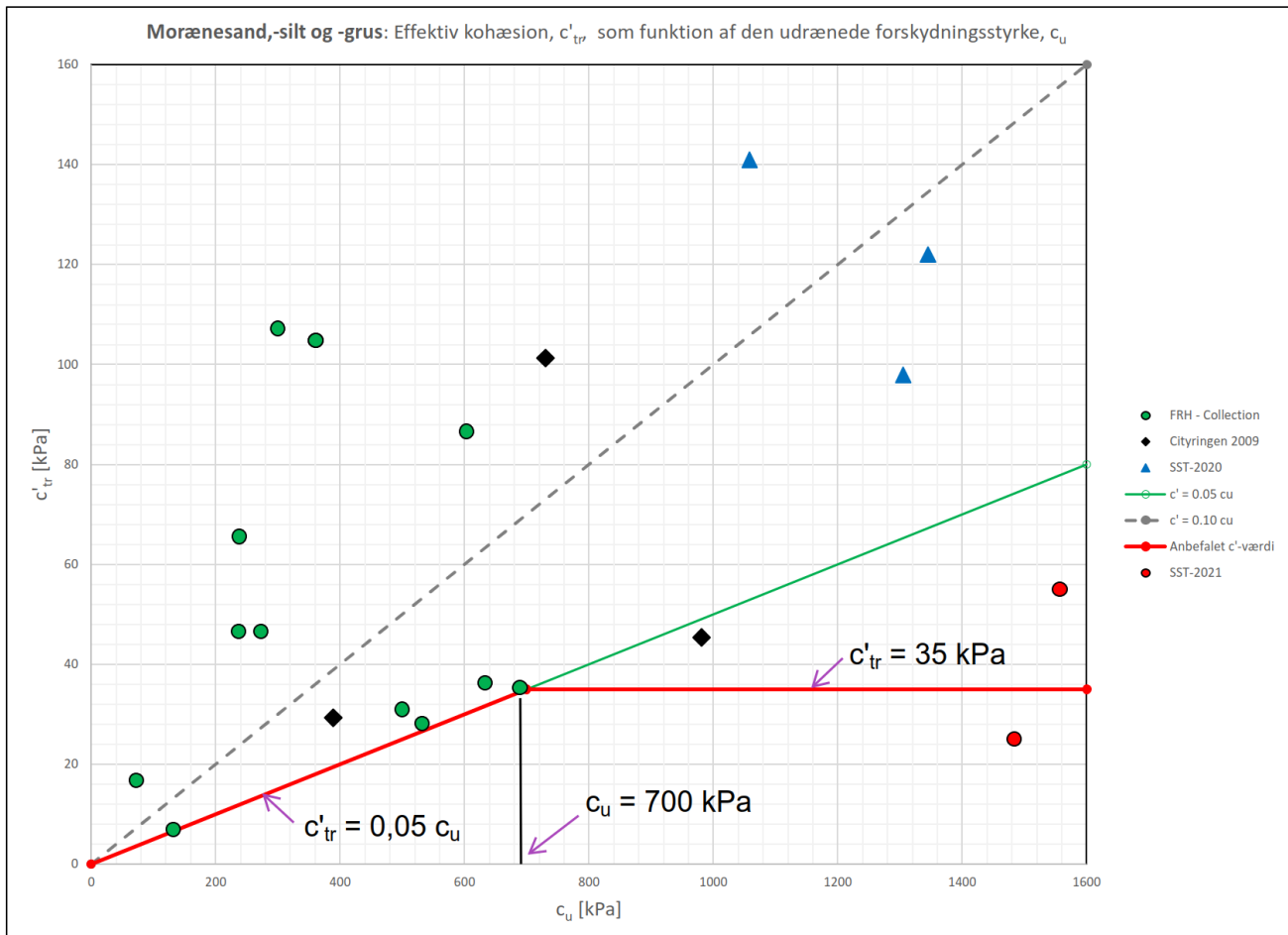
<sup>1</sup> Fejl i den anisotrope aflastning, antyder fejlbehæftede styrkeparametre.

Som det ses af de indsamlede forsøgsdata i Figur 10 så giver den i (Ligning 47) og (Ligning 48) anbefalede relation for bestemmelse af den effektive kohæsion,  $c' \approx 0,05 c_u$ , et forsigtigt skøn for morænesand-, -silt og -grus fra Københavnsområdet.

At denne øvre grænse på  $c' = 35$  kPa er en konservativ værdi ses af Figur 10 med udvalgte resultater af triaksialforsøg fra diverse projekter.

For metode til udledning af styrkeparametre fra triaksialforsøg henvises til afsnit 7.2 samt bilag 1.

# KRAVSPECIFIKATION



Figur 11: Den effektive kohæsi $\ddot{o}$ n,  $c'_{tr}$  som funktion af  $c_u$  for morænesand, -silt og -grus ( $c_u < 1400 \text{ kPa}$ ).

### 10.7.3 Deformationsparametre (morænesand, -silt og -grus)

Konsolideringsmodulen for overgangsjordarter bestemmes med baggrund i empiriske formler og aflastningsspændingen,  $\sigma'_{red}$ .

I det følgende er anført udtryk for  $K_t$  – moduler for morænesand ( $I_p < 4\%$ ) fra Storebælt (Kristensen et. al 1995).

$$K_t = 50 \text{ MPa} + 3000 \cdot \sigma'_{red} \quad (\text{Ligning 49})$$

Fra Ferring (2008) er benyttet:

$$K_t = 30 \text{ MPa} + 3000 \cdot \sigma'_{red} \quad (\text{Ligning 50})$$

Hviletrykkoeficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , bestemmes som skønnede værdier.

### 10.7.4 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til morænesand, -silt og -grus

## KRAVSPECIFIKATION

Figur 24: Udledte styrke- og deformationsparametre for overkonsolideret morænesand, -silt og -grus.

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$c_u$ [kPa]	$c_v$	Bestemmes ved feltvingeforsøg
	$k_2 \cdot N$	Bestemmes ud fra SPT-forsøg, hvor $N = N_{SPT}$ er det ukorrigerede antal slag. $k_2 = c_u/N$ er afbildet i Figur 4 som funktion af plasticitetsindekset, $I_p$ .
$\varphi'_{tr}$ [°]	$45 - 14 \cdot \log(I_p/1\%)$	$I_p$ indsættes i %, og hvis jordarten er bedømt som NP da kan $I_p$ skønnes som: $I_p \approx e^{(0,1816 \cdot [\% \text{ ler}])}$
	33	Morænesilt uden forsøg
	37	Morænesand og -grus uden forsøg
$c'$ [kPa]	$k \cdot c_u$	$k = 0,05$ og $c' \leq 35$ kPa
$K_t$ [MPa]	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	$K_{t,0} \approx 30$ MPa for $c_u \leq 300$ kPa $\Delta K_t = 3000$
		$K_{t,0} \approx 50$ MPa for $c_u > 300$ kPa $\Delta K_t = 3000$
$K_{0,a}$ [-]	0,4 – 0,7	

NB: For morænesand, -silt og -grus anvendes forsigtigt  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$ .

### 10.8 Grønsandsaflejringer (grønsandssand, -ler -silt og -kalk)

#### 10.8.1 Generelt

Styrkeparametrene for grønlandsaflejringerne (grønsandssand, -silt og -ler) bestemmes ved vingeforsøg, SPT-forsøg og plasticitetsindekset.

Der foreligger ikke offentligt tilgængelige resultater af konsolideringsforsøg med grønlandsaflejringer, men forsigtige værdier af  $K_t$  er anført i denne kravspecifikation.

## KRAVSPECIFIKATION

---

### 10.8.2 Styrkeparametre

Hvor der ikke er udført SPT-forsøg, antages for **grønsandssand**:

$$\varphi'_{tr} = 42^\circ \quad (\text{Ligning 51})$$

$$c'_{tr} = 0 \text{ kPa} \quad (\text{Ligning 52})$$

Med udførte SPT-forsøg vil metoderne i afsnit 10.4.2 kunne anvendes til bestemmelse af styrkeparametrene.

For **grønsandsler** anbefales at udføre klassifikationsforsøg for bestemmelse af plasticitetsindekset,  $I_p$ , samt at bestemme den udrænedede forskydningsstyrke,  $c_u$ , ved vingeforsøg eller SPT-forsøg.

Herefter udledes styrkeparametrene som anført i Kapitel 10.6.

Hvor der hverken er udført SPT-forsøg, vingeforsøg eller bestemt  $I_p$ , antages for **grønsandsler**:

$$\varphi'_{tr} = 36^\circ \quad (\text{Ligning 53})$$

$$c'_{tr} = 100 \text{ kPa} \quad (\text{Ligning 54})$$

I CW-PI-5, afsnit 7.4.5.2, Figur 7-VV er anført en tolkning af et CAD/CID-forsøg på "grønsandsformationen", hvor man udleder:

$$\varphi'_{tr} = 36^\circ \text{ og } c'_{tr} = 118 \text{ kPa.}$$

I NHVKs designbasis (Lange og Haahr, 2012) er anvendt følgende styrkeparametre for **grønsandsler**:

$$\varphi'_{tr} = 36^\circ \text{ og } c'_{tr} = 100 \text{ kPa.}$$

Hvis der er tale om en fed **grønsandsler** skal man være mere påpasselig, og uden forsøg ansættes styrkeparametrene forsigtigt som, jf. (CW-PI-5):

$$\varphi'_{tr} = 30^\circ \quad (\text{Ligning 55})$$

$$c'_{tr} = 75 \text{ kPa} \quad (\text{Ligning 56})$$

Hvor der ikke er udført SPT-forsøg, antages for **grønsandssilt**:

$$\varphi'_{tr} = 32^\circ \quad (\text{Ligning 57})$$

$$c'_{tr} = 50 \text{ kPa} \quad (\text{Ligning 58})$$

For **grønsandskalk** anbefales det at benytte Tabel 29 i afsnit 10.9.1 for udledning af styrke- og deformationsparametre for **grønsandskalk**. Dette kræver fastlæggelse af  $q_{M,uc}$ ,  $GSI_M$  og  $\sigma'_3$  for kalkmassen.

## KRAVSPECIFIKATION

### 10.8.3 Deformationsparametre

Der foreligger ikke kendte resultater af konsolideringsforsøg med grønsandsaflejringer (**grønsandssand, -silt og -ler**), men forsigtige værdier af  $K_t$  bestemmes som (Lange og Haahr, 2012):

$$K_t = 20 \text{ MPa} + 2000 \cdot \sigma'_{red} \quad (\text{Ligning 59})$$

For **grønsandskalk** benyttes Tabel 29 i afsnit 10.9.1 for vurdering af deformationsparametre.

Hviletryskkoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , bestemmes som skønnede værdier.

### 10.8.4 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til grønsandssand

Tabel 25: Udedte styrke- og deformationsparametre for overkonsolideret grønsandssand.

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$\varphi'_{tr}$ [°]	$\tan^{-1} \left[ \frac{(N_1)_{60}}{(12,2 + 20,3 \frac{\sigma'_{v0}}{p_a})} \right]^{0,34}$	<p><math>(N_1)_{60}</math> er det korrigerede antal SPT-slag, <math>N_{SPT}</math>.  <math>p_a = 100 \text{ kPa}</math></p> <p>Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med <math>5^\circ</math> for leret grønsandssand.            Forøg <math>\varphi'_{tr}</math> med <math>5^\circ</math> for gruset grønsandssand.</p> <p>Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med <math>2^\circ</math> for 10% silt.            Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med <math>3^\circ</math> for 20% silt.            Reducer <math>\varphi'_{tr}</math> med <math>3^\circ</math> for afrundede korn.</p>
	42	Grønsandssand uden forsøg
$c'$ [kPa]	0	
$K_t$ [MPa]	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	$K_{t,0} \approx 20 \text{ MPa}$ $\Delta K_t = 2000$
$K_{0,a}$ [-]	0,3 – 0,6	

NB: For grønsandssand anvendes  $\varphi'_{pl} \approx [1,0+0,10 \cdot I_D] \cdot \varphi'_{tr} \leq 1,1 \cdot \varphi'_{tr}$



## KRAVSPECIFIKATION

### 10.8.5 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til grønsandsler

Tabel 26: Udedte styrke- og deformationsparametre for overkonsolideret grønsandsler.

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$c_u$ [kPa]	$c_v$	Bestemmes ved feltvingeforsøg
	$k_2 \cdot N$	Bestemmes ud fra SPT-forsøg, hvor $N = N_{SPT}$ er det ukorrigerede antal slag. $K_2 = c_u/N$ er afbildet i Figur 4 som funktion af plasticitetsindekset, $I_p$ .
$\varphi'_{tr}$ [°]	$45 - 14 \cdot \log(I_p/1\%)$	$I_p$ indsættes i %
	36	Grønsandsler uden forsøg, $I_p \leq 20\%$
	30	Grønsandsler, fedt uden forsøg, $I_p \leq 20\%$
$c'$ [kPa]	$k \cdot c_u$	$k = (N_{c,0}/N_{c,\varphi})$ og $c' \leq 70$ kPa (Jacobsen, 1975)
	100	Grønsandsler uden forsøg, $I_p \leq 20\%$
	75	Grønsandsler, fedt uden forsøg, $I_p > 20\%$
$K_t$ [MPa]	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	$K_{t,0} \approx 20$ MPa $\Delta K_t = 2000$
$K_{0,\alpha}$ [-]	0,3 – 0,6	

NB: For grønsandsler anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$ .

## KRAVSPECIFIKATION

### 10.8.6 Skønsformler/empiriske relationer for jordparametre til grønsandssilt

Tabel 27: Udedte styrke- og deformationsparametre for overkonsolideret grønsandssilt

Parameter	Empirisk formeludtryk	Kommentarer
$c_u$ [kPa]	$c_v$	Bestemmes ved feltvingeforsøg
	$k_2 \cdot N$	Bestemmes ud fra SPT-forsøg, hvor $N = N_{SPT}$ er det ukorrigerede antal slag. $k_2 = c_u/N$ er afbildet i Figur 4 som funktion af plasticitetsindekset, $I_p$ .
$\varphi'_{tr}$ [°]	$45 - 14 \cdot \log(I_p/1\%)$	$I_p$ indsættes i %.
	32	Uden forsøg
$c'$ [kPa]	$k_3 \cdot c_u$	$k_3 \approx 0,05$ og $c' \leq 35$ kPa
	50	Uden forsøg
$K_t$ [MPa]	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	$K_{t,0} \approx 20$ MPa $\Delta K_t = 2000$
$K_{0,\alpha}$ [-]	0,3 – 0,6	

NB: For grønsandssilt anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$ .

### 10.9 København kalk og bryozokalk

#### 10.9.1 Generelt

Det skal bemærkes at eftersom som kalken er en bjergart, jf. Hansen og Foged (2002), benyttes sædvanligvis kun effektive styrkeparametre. Dog indgår den enaksede trykstyrke,  $q_{uc}$ , som en styrkeparameter for vurdering af de effektive styrkeparametre. Ligeledes kan man i litteraturen finde udtryk, hvor spidsbæreevnen og overflademodstanden for borede pæle alene udtrykkes ved,  $q_{uc}$ ,

I bjergartsmeknikken er der tradition for at bestemme kalkens effektive styrkeparametre med baggrund i Hoek-Browns generaliserede brudkriterium, jf. Hoek (2012) og Zhang (2004). Her indgår en bjergartsbeskrivelse, Rock Mass Ratio (RMR89) efter Bieniawski (1989), og inddragelse af erfaringsmæssigt kendskab til kalkformationens styrke- og deformationsegenskaber, jf. Hansen og Foged (2002) og DGI (1994).

Bryozokalken antages p.t. at have styrke- og deformationsegenskaber som for København Kalk, og de kan udledes som anført i Tabel 29 med input parametre som  $q_{M,uc}$ ,  $GSI_M$  og  $\sigma'_3$ , der skal bestemmes for den aktuelle masse af Bryozokalk (vil sandsynligvis afvige fra København Kalken).

## KRAVSPECIFIKATION

Udledningen af de effektive styrkeparametre bliver derved noget komplicerede, derfor kræver HOFOR, at man for traditionelle konstruktioner: skybrudstunneller, skakte og tunnelrør anvender mere konservative styrkeparametre som er begrundet i erfaringstal, men kalibreret med stor-skala triaksialforsøg (Øresundsforbindelsen), pladebelastningsforsøg (Gemmas Allé og Lernacken) og seismik (Cityringen), se Tabel 28.

Den enaksede trykstyrke for København Kalk og Bryozokalk er defineret som funktion af hårdheden, jf. DS/EN 1997-2 DK NA:2013:

Tabel 28: Ved kernekartering i Danmark anvendes følgende styrkeskala

Hærtningsgrad	Enakset trykstyrke, $q_{uc}$ (MPa)
H1	0,25 – 1
H2	1-5
H3	5-25
H4	25-100
H5	100-500

For København Kalk og Bryozokalk, der indeholder kalk af forskellige hårdheder, antages det at  $GS/ = 45$  og  $q_{uc} = 5 - 13$  MPa for kalkmassen, ref. COWI (2016) for Cityringen, Branch off to Sydhavnen SHG-PI-6.3. Krumme brudkurver benyttes ved anvendelse af Yudhbir-Bieniawski

(1983) brudbetingelse for kalkmassen, der giver en bedre kalibrering med stor skala triaksialforsøg (for  $q_{uc} = 5$  MPa og  $GS/ = 45$ ) end Hoek-Brown modellen, jf. Steensen-Bach (2018).

De analyserede forsøg omfatter kun København Kalk. Der er ingen kendte stor-skala forsøg på Bryozokalk, men det er vigtigt at fremhæve, at kalkmassens styrke- og deformationsegenskaber skal udledes ved fastlæggelse af  $q_{M,uc}$  og  $GS/M$  for kalkmassen og den effektive horisontale spænding,  $\sigma'_3$  for den aktuelle kalk, København Kalk og/eller Bryozokalk.

I Tabel 29 er anført anbefalede effektive styrkeparametre,  $\varphi'_M$  og  $c'_M$ , og deformationsmoduler for København Kalk og Bryozokalk for forskellige kombinationer af  $q_{M,uc}$ ,  $GS/M$  og  $\sigma'_3$ . Ovennævnte værdier af  $q_{M,uc}$ ,  $GS/M$  skal repræsentere kalkmassen (rock mass).

De udledte styrkeparametre for kalkmassen,  $\varphi'_M$  og  $c'_M$ , angiver de triaksiale tangentværdier, **for anvendelse i kombination med relevante bjergartsmekaniske beregningsmetoder.**

$$E_{M,50} = E_{M,50,0} + 220MPa \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_0}{100kPa}} \quad (E_{M,50} = \text{deformationsmodul svarende til 50\% brudtøjning og vertikal belastning})$$

Tabel 29: Anbefalede effektive styrkeparametre og deformationsmoduler for kalkmassen for København Kalk og Bryozokalk

$q_{M,uc}$ [MPa]	$GS/M$ [-]	$\sigma'_3$ [kPa]	$\varphi'_M$ [°]	$c'_M$ [kPa]	$E_{M,50,0}$ [MPa]
2.5	30	20-200	45	20	40
		200-500	39	90	
5	30	20-200	48	25	80

## KRAVSPECIFIKATION

		200-500	42	110	
9	30	20-200	51	30	150
		200-500	45	125	
13	30	20-200	53	35	215
		200-500	47	140	
17	30	20-200	54	40	285
		200-500	48	165	

Tabel 30: Anbefalede effektive styrkeparametre og deformationsmoduler for kalkmassen for København Kalk og Bryozokalk

$q_{M,uc}$ [MPa]	$GSI_M$ [-]	$\sigma'_3$ [kPa]	$\varphi'_M$ [°]	$c'_M$ [kPa]	$E_{M,50,0}$ [MPa]
2.5	45	20-200	45	30	105
		200-500	39	100	
5	45	20-200	48	45	210
		200-500	42	130	
9	45	20-200	51	50	380
		200-500	45	150	
13	45	20-200	53	60	550
		200-500	47	165	
17	45	20-200	54	70	720
		200-500	48	190	

Tabel 31: Anbefalede effektive styrkeparametre og deformationsmoduler for kalkmassen for København Kalk og Bryozokalk

$q_{M,uc}$ [MPa]	$GSI_M$ [-]	$\sigma'_3$ [kPa]	$\varphi'_M$ [°]	$c'_M$ [kPa]	$E_{M,50,0}$ [MPa]
2.5	60	20-200	45	45	200
		200-500	39	120	
5	60	20-200	48	75	400
		200-500	42	165	
9	60	20-200	51	100	700
		200-500	45	210	
13	60	20-200	53	130	1000
		200-500	47	250	
17	60	20-200	54	150	1300
		200-500	48	290	

Følgende udtryk for vurdering af deformationsmodulet for kalkmassen,  $E_M$  (rock mass), benyttes for vertikal belastning:

$$E_{M,50} = E_{M,50,0} + 220MPa \cdot \sqrt{\frac{\sigma'_{t0}}{100kPa}} \quad (\text{Ligning 60})$$

hvor  $E_{M,50}$  = deformationsmodul svarende til 50% brudtøjning.

For andre brudtøjninger ( $E_{M,50}$  svarer til forskydningsspændinger ved 50% brudtøjninger, dvs.  $X = 0.5$ ), benyttes følgende korrektion (hypotese):

$$E_{M,X} \approx 0.7 \cdot (X)^{-0.5} \cdot E_{M,50} \leq 10 \cdot E_{M,50} = E_{M,max} \quad (\text{Ligning 61})$$

hvor  $E_{M,max}$  er deformationsmodulet ved små tøjninger (vertikal belastning).

## KRAVSPECIFIKATION

---

### 10.9.2 Styrkeparametre

Fra ca. 1995 har man i Danmark anvendt tilnærmede styrke- og deformationsparametre for kalk, opdelt i 3 typer, men uden nærmere specificering af hverken  $q_{uc}$ ,  $GSI$  eller det aktuelle spændingsniveau,  $\sigma'_3$ , hvilket er praksis i bjergmekanik:

Styrkeparametre og deformationsparametre afhænger af kalkens hårdhed og er opdelt i 3 grupper:

- Knust kalk og kalk, hvor H1 er dominerende.
- Glacialt forstyrret kalk domineret af H2
- Uforstyrret, intakt kalk domineret af H3/H4.

Derfor kan værdierne i Tabel 32 samt Tabel 33 resultere i usikre parametre, jf. Tabel

*Tabel 32: Tidligere benyttede styrkeparametre for København Kalk (bemærk, der ikke er nogen afhængighed af GSI eller spændingsniveauet,  $\sigma'_3$ ).*

	$\phi'$ [°]	$c'$ [kPa]
Knust kalk og kalk, hvor H1 er dominerende	38	0
Glacialt forstyrret kalk domineret af H2	45	50
Uforstyrret, intakt kalk domineret af H3/H4	45	100

### 10.9.3 Deformationsparametre

Tilsvarende for deformationsegenskaberne som anført i Tabel 33:

*Tabel 33: Tidligere benyttede deformationsparametre for København Kalk (bemærk, der ikke er nogen afhængighed af GSI eller spændingsniveauet,  $\sigma'_3$ ).*

	$K_0$ [-]	$\nu$ [-]	$K$ [MPa]
Knust kalk og kalk, hvor H1 er dominerende	0,38	0,25	100
Glacialt forstyrret kalk domineret af H2	0,30	0,25	600
Uforstyrret, intakt kalk domineret af H3/H4	0,15	0,25	1000

Hviletrykkoeficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , bestemmes som skønnede værdier.

## KRAVSPECIFIKATION

---

### 10.9.4 Horisontale deformationsparametre

Med baggrund i et enkelt horisontal belastningsforsøg udført i en rende, fandt man en væsentlig lavere  $E_{h,M,50,0}$ -modul på 130 MPa sammenlignet med  $E_{M,50,0} = 350 - 800$  MPa for vertikal belastning. Det bemærkes desuden, at det er gængs praksis, ved udledning af  $E_{h,M}$ -moduler på baggrund af pressuremeterforsøg, at multiplicere disse værdier med faktoren 3 for at udlede den vertikale  $E_M$ -modul for sætningsvurderinger. Herved synes retfærdiggjort, at anvende en faktor 3 for at konvertere vertikale E-moduler til horisontale E-moduler.

En forsigtig vurdering af det horisontale  $E_h$ -modul vil derfor, jf. Steensen-Bach (2018), være følgende udtryk:

$$E_{h,M,50} = \frac{E_{M,50}}{3} \quad (\text{Ligning 62})$$

Formlen (7.9.4.1) benyttes også for vurdering af  $E_h$ -modulet ved andre brudtøjninger:

$$E_{h,M,X} \approx 0.7 \cdot (X)^{-0.5} \cdot E_{h,M,50} \leq 10 \cdot E_{h,M,50} = E_{h,M,max} \quad (\text{Ligning 63})$$

### 10.9.5 Overflademodstand

En forsigtig værdi af overflademodstanden (glat overflade) i kalk for vurdering af bæreevnen af jordankre, bestemmes som anført af Rowe og Armitage (1978):

$$\tau_{max} = 0,45 (q_{M,uc})^{0,5} \quad (\text{Ligning 64})$$

hvor  $q_{M,uc}$  (indsættes i MPa) er den aktuelle trykstyrke for kalkmassen, som typisk vil variere med dybden.

Det vurderes at (Ligning 64) kan anvendes som en forsigtig værdi af overflademodstanden for borede pæle, da en øvreværdi ofte ses anført som  $\tau_{max} = 0,60 (q_{M,uc})^{0,5}$  under forudsætning af en ru overflade.

## KRAVSPECIFIKATION

### 10.9.6 Skønsformler/empiriske relationer for parametre til København kalk og bryozokalk

Tabel 34: Udedte styrke- og deformationsparametre for knust kalk og kalk, hvor H1 er dominerende.

Parameter	Empirisk formeludtryk/værdi	Kommentarer
$\varphi'_{tr}$ [°]	38	Uden forsøg
$c'_{tr}$ [kPa]	0	
$c_u$ [kPa]	$0,425 \cdot \sigma'_{v0}$	
$K_t$ [MPa]	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	$K_{t,0} \approx 40$ MPa $\Delta K_t = 2500$ (Storebælt, 1989)
$K_t$ [MPa]	100	Uden forsøg
$K_{0,\alpha}$ [-]	0,33 – 0,38	

NB: For knust kalk og kalk, hvor H1 er dominerende anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$ .

Tabel 35: Udedte styrke- og deformationsparametre for glacialt forstyrret kalk, hvor H2 er dominerende.

Parameter	Empirisk formeludtryk/-værdi	Kommentarer
$\varphi'_{tr}$ [°]	45	Uden forsøg
$c'_{tr}$ [kPa]	50	
$K_t$ [MPa]	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	$K_{t,0} \approx 200$ MPa $\Delta K_t = 6000$
$K_t$ [MPa]	600	Uden forsøg
$K_{0,\alpha}$ [-]	0,15 – 0,30	

NB: For glacialt forstyrret kalk, hvor H2 er dominerende anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$ .

# KRAVSPECIFIKATION

Tabel 36: Udlædte styrke- og deformationsparametre for uforstyrret, intakt kalk domineret af H3/H4.

Parameter	Empirisk formeludtryk/-værdi	Kommentarer
$\varphi'_{tr}$ [°]	45	Uden forsøg
$c'_{tr}$ [kPa]	100	
$K_t$ [MPa]	$K_{t,0} + \Delta K_t \cdot \sigma'_{red}$	$K_{t,0} \approx 800$ MPa $\Delta K_t = 10000$
$K_t$ [MPa]	1000	Uden forsøg
$K_{0,\alpha}$ [-]	0,01 – 0,15	

NB: For uforstyrret, intakt kalk domineret af H3/H4 anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$ .

## 10.10 Skrivekridt

### 10.10.1 Generelt

Skrivekridt er hærdnet pelagisk kalkslam, der er aflejret i øvre Kridt.

I dette afsnit præsenteres der meget konservative værdier af styrke- og deformationsparametre for Skrivekridt.

### 10.10.2 Styrkeparametre

Styrkeparametre for skrivekridt afhænger af skrivekridtets hårdhed og er opdelt i 3 grupper:

- Slamkalk, hvor H1 er dominerende.
- Glacialt forstyrret Skrivekridt domineret af H1/H2
- Intakt uforstyrret Skrivekridt domineret af H2/H3.

Da erfaringsdata synes at variere ret meget, anbefales det at udføre styrkeforsøg for en nærmere bestemmelse af det aktuelle skrivekridt, hvis aflejringerne har betydning for design af skakte eller tunneler. Se Høringsudgave dgf-Bulletin for skrivekridt, af 08-05-2014.

Skønsformler for den enaksede trykstyrke,  $q_{uc}$ , bestemmes af porøsiteten,  $n$ , og for de svage aflejringer af  $N_{SPT}$ -værdier.



## KRAVSPECIFIKATION

### 10.10.3 Deformationsparametre

Deformationsparametre bestemmes ved målte  $N_{SPT}$ -værdier, CPT-værdier eller tilnærmet som funktion af porøsiteten,  $n$ .

Hviletrykkoefficienten for horisontal aflastning,  $K_{0,a}$ , bestemmes som skønnede værdier.

### 10.10.4 Skønsformler/empiriske relationer for parametre til skrivekridt

Tabel 37: Udedte styrke- og deformationsparametre for slamkalk, hvor H1 er dominerende (erfaringer fra diverse Sweco-projekter).

Parameter	Empirisk formeludtryk/værdi	Kommentarer
$c_u$ [kPa]	$c_v$	
	80 – 100	
$\varphi'_{tr}$ [°]	30	Uden forsøg
$c'_{tr}$ [kPa]	12-25	
$K_t$ [MPa]	$100 \cdot c_u$	
$K_t$ [MPa]	$3 \cdot q_c$	Fra CPT-forsøg
$K_{0,a}$ [-]	0,50	Uden forsøg

NB: For slamkalk, hvor H1 er dominerende anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$

Tabel 38: Udedte styrke- og deformationsparametre for glacialt forstyrret skrivekridt domineret af H1/H2 (middel slamkalk, erfaringer fra Farøbroerne, 1980) og Rødsand 2 (2009) samt diverse Sweco-projekter.

Parameter	Empirisk formeludtryk/-værdi	Kommentarer
$q_{uc}$ [MPa]	$96,0 \cdot e^{(-0,0684 \cdot n)}$	$n$ er porøsiteten i %
$c_u$ [kPa]	$> 15 \cdot N_{SPT}$	SPT-forsøg
	200 – 400	Uden forsøg
$\varphi'_{tr}$ [°]	33	Uden forsøg (Rødsand 2, 2009)
$c'_{tr}$ [kPa]	$> 30$	
$K_t$ [kPa]	$> 95 \cdot c_u$	(Rødsand 2, 2009)
$K_t$ [kPa]	$0 + 12000 \cdot \sigma'_{red}$	For $\sigma'_{red} < 33$ kPa
	$200.000 + 6.000 \cdot \sigma'_{red}$	For $33 < \sigma'_{red} < 100$ kPa
	800.000 – 1.200.000	For $\sigma'_{red} > 100$ kPa
$K_{0,a}$ [-]	0,29	Uden forsøg

NB: For glacialt forstyrret skrivekridt domineret af H1/H2 anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$ .

## KRAVSPECIFIKATION

---

Table 39: Udedte styrke- og deformationsparametre for intakt skrivekridt domineret af H2/H3 (fast slamkalk, erfaringer fra Andreassen og Fabricius, 2014).

Parameter	Empirisk formeludtryk/-værdi	Kommentarer
$q_{uc}$ [MPa]	$96,0 \cdot e^{(-0,0684 \cdot n)}$	$n$ er porøsiteten i %
$\varphi'_{tr}$ [°]	35	Skrivekridt af hårdhed H2
	45	Skrivekridt af hårdhed H3
$c'_{tr}$ [kPa]	200	Skrivekridt af hårdhed H2
	500	Skrivekridt af hårdhed H3
$K_t$ [MPa]	$222000 \cdot e^{(-0,107 \cdot n)}$	$n$ er porøsiteten i %
$K_{0,\alpha}$ [-]	0,01 – 0,15	Uden forsøg

NB: For intakt skrivekridt domineret af H2/H3 anvendes  $\varphi'_{pl} \approx \varphi'_{tr}$ .

# KRAVSPECIFIKATION

---

## 11 Grundvandsforhold og hydrogeologiske vurderinger

For at kunne beskrive de relevante grundvandsforhold i forhold til det givne projekt, er det vigtigt indledningsvis ud fra projektets størrelse og grundvandsforholdenes betydning, at vurdere hvilke undersøgelser, data og tolkninger, der er nødvendige for projektets gennemførelse.

Den indledende vurdering af omfanget af grundvandsundersøgelserne og tolkningerne er beskrevet i JOR102, hvor det også er beskrevet, hvordan projektet klassificeres ud fra projektets størrelse, grundvandsforholdenes betydning og grundvandsrelaterede risici tilknyttet projektet.

### 11.1 Generelle hydrologiske forhold

Projektområdets generelle hydrogeologiske forhold, herunder specielt forhold, der kan være af betydning for projektet som for eksempel forekomst og udbredelse af primært magasin og af sekundære grundvandsmagasiner, vandindvinding, vådområder, fredede naturområder, nærtliggende hav, saltvand, potentielle forureninger, meget vandførende grundvandsmagasiner (og evt. artesiske områder), som udgravningen føres ned i eller som vil kunne give grundbrud, hvis de ikke aflastes.

#### 11.1.1 Projektområdets forskellige jordlags permeabilitet/hydraulisk konduktivitet/transmissivitet med angivelse af variabilitet

For grundvandsmagasiner relevante for projektet skal jordlagenes transmissivitet og permeabilitet bestemmes ud fra de hydrauliske forsøg og eventuelt ud fra kornkurver eller ud fra erfaringsværdier.

Som anført i JOR102 afsnit 4.4.7 kan vandføringsevnen af overgangsjordarter som stærkt sandet/gruset moræneler og stærkt leret/siltet morænesand/-grus samt smeltevandsaflejringer med (væsentligt og) varierende indhold af ler/silt vanskeligt vurderes alene på baggrund af erfaringsværdier.

For store projekter med sænkning i kalken/det primære magasin skal der udarbejdes et transmissivitetskort, der beskriver den horisontale fordeling af transmissivitet i det primære magasin. Omfang og detaljeringsgrad aftales med HOFOR.

Den vertikale fordeling af transmissiviteten i projektområdet skal også tolkes, hvis undersøgelserne i henhold til JOR102 omfatter flowlogs i kalk, grønsand og evt. overlejrrede vandførende lag.

#### 11.1.2 Designgrundvandsspejl

Designvandsspejl benævnt SLS, ULS og ALS skal bestemmes for alle konstruktioner, der kan blive udsat for grundvandstryk/vandtryk. Vedrørende designgrundvandsspejl er i TUN102 afsnit 2.10.6.4 angivet krav til midlertidige og permanente konstruktioner/tilstande for SLS, ULS og ALS.

Det bemærkes, at vandspejl ved bestemmelse af designgrundvandsspejl skal korrigeres for barometereffekt, og i kystnære områder for påvirkning fra varierende havvandstand.

## **KRAVSPECIFIKATION**

---

### **11.1.3 Geologisk model**

Afhængigt af projektets størrelse og betydningen af de hydrogeologiske forhold for projektet skal en digital 3D-geologisk model udarbejdes til en sammenhængende beskrivelse af projektområdets geologiske og hydrogeologiske forhold. Omfang og detaljeringsgrad skal aftales med HOFOR. Modellen kan anvendes som grundlag for en numerisk grundvandsmodel.

### **11.1.4 Numerisk grundvandsmodel**

En grundvandsmodel skal som minimum med rimelig præcision kunne forudsige grundvandssænkningens udbredelse i det pumpede magasin og forventede vandmængder til oppumpning og/eller reinfiltration. Det skal aftales med HOFOR, om en eksisterende grundvandsmodel skal anvendes som udgangspunkt, eller om en ny model skal opstilles. For mindre projekter kan en analytisk model være tilstrækkelig. Dette aftales i så fald med HOFOR.

Resultaterne af modelleringen indgår både i valg af design for grundvandssænkning, vurdering af risici for bygninger og mobilisering af forurening samt for myndighedsbehandlingen.

Detaljeringsgrad, laginddeling og cellestørrelse skal afklares med bygherren.

I tilfælde af potentiel mobilisering af forureninger skal modellen også anvendes til partikelsporing for at vurdere påvirkningen.

### **11.1.5 Grundvandskvalitet**

I forbindelse med prøvepumpninger skal grundvandskvaliteten screenes for at vurdere mulighederne for udledning og reinfiltration og forventelige krav til rensning af grundvand i projektet. Desuden skal det vurderes om en grundvandssænkning kan flytte på grundvandsforureninger. Hvis relevant for projektet skal afsnittet indgå i EIR.

### **11.1.6 Myndighedsforhold**

Der skal udarbejdes en oversigt over myndighedsforhold af betydning for håndtering af grund- og overfladevand; herunder nødvendige tilladelser ved relevante løsninger og eventuel screening af behandlingstider for tilladelser.

En liste af relevante forhold er præsenteret men ikke begrænset til:

- Etablering af boringer
- Grundvandssænkning/bortledning
- Påvirkning af vandindvinding
- Påvirkning af nærliggende søer og moser
- Reinfiltration
- Afledning til kloak
- Udledning til havet
- Udledning til vandløb eller søer.

### **11.1.7 Risikoområder**

Der skal udarbejdes et afsnit med relevante risici. I den forbindelse skal der udføres en screening i forhold til eksterne risici f.eks. nærliggende vandindvinding, kortlagte forureninger, nærliggende bygninger ved sætningsgivende jordlag. Potentielle nærliggende forureninger f.eks. nærliggende tankstationer, autoværksteder eller vaskerier.

## KRAVSPECIFIKATION

---

Der skal også vurderes interne vandrelaterede projektrisici for midlertidige og permanente konstruktioner; f.eks. grundbrud, svigt af spunsvæg og oversvømmelse.

### 11.1.8 GIR (HIR) – Ground investigation report / Hydrological investigation report

En hydrogeologisk undersøgelsesrapport, HIR (Hydrogeological Investigation Report), kan trækkes ud af GIR som en selvstændig rapport, hvis omfanget af de hydrogeologiske vurderinger begrundes dette.

Ellers indgår det følgende som en del af GIR. Dette gælder også EIR (Environmental investigation report).

### 11.1.9 GBR - Geotechnical basis report

I GBR, angives kontraktuelle intervaller for de forskellige geotekniske og hydrauliske parametre.

Det angives ligeledes intervaller for laggrænser; specielt af hensyn til vurdering af grundbrudsrisiko.

Der skal for grundvandshåndtering for GBR defineres:

En tabel over hydrostratigrafien defineret som koterede intervaller for tykkelsen af de forskellige geologiske lag for hver udgravning på projektet. Denne stratigrafi kan afvige for den definerede geotekniske stratigrafi.

Definerede intervaller for hydrauliske konduktiviteter for de pågældende stratigrafiske lag, for hver udgravning, samt beskrivelse af fordeling af transmissiviteten i det primære magasin.

Hvis flowlogs er udført i henhold til JOR102, skal intervaller for den vertikale fordeling af transmissiviteten beskrives.

### 11.1.10 GDB – Geotechnical design basis

I GDB gives designgrundlaget, herunder designgrundvandsspejl, og en beskrivelse af mulige tiltag til sikring af tørre og stabile udgravninger og færdige konstruktioner. Ofte vil det være relevant at basere dette på en geoteknisk model og grundvandsmodel, udført i forbindelse med GIR.

Der henvises til TUN 103: Grundvandshåndtering for nærmere beskrivelse af de forhold der skal tages hensyn til ved design af tunneler.

Det bemærkes, at man specielt ved risiko for grundbrud i en midlertidig udgravning skal anvende det mest kritiske af designgrundvandsspejlene ULS og ALS for den midlertidige fase for vandtrykket i magasinet med det destabiliserende vandtryk.

## KRAVSPECIFIKATION

---

### 12 Udførelsesmæssige forhold.

Beskrives og plottes i GIR eller i GBR.

#### 12.1 Stenforekomster

Risikoen for stenforekomster skal vurderes inkl. beregnede mængder samt antal af sten og blokke, stenforekomsternes mineralogi, slid- og styrkeegenskaber.

##### 12.1.1 Volumenprocent og antal sten og blokke

Forekomsten af sten og blokke skal bestemmes ved to metoder, der omfatter:

1) Registrering af fræsede længder og stenlag beskrevet i borer og boremandskabets vurdering af borehastighed og stenindhold i forbindelse med den geotekniske undersøgelse. Metoden benævnes BOR-metoden.

2) Automatiseret idealisering og ekstrapolering af kornkurver til beregning af vægtprocent og antal sten, blokke og store blokke i programmet GeoGIS2020 eller beregning fra formler beskrevet i SST-T-PD-GEO-GEN-REP-19 – HOFOR Videnbank. Metoden benævnes KK-metoden.

BOR-metoden omfatter beregning, for hver glacial enhed eller jordlag, af den totale borede længde i projektets borer i forhold til de samme enheders/lags samlede længder af fræsning, stenlag og intervaller beskrevet af boremandskabet med langsom borehastighed og mange sten.

Herfra beregnes, for hver glacial enhed, en længdeprocent "hindring" for borearbejdet. Boringernes rørdimension benyttes til beregning af volumenprocent hindring.

Fra jordlagene i den geologiske model og dimensionerne af projektets konstruktioner, vurderes en procentuel forekomst af jordlagene langs med tunnelstrækninger samt ved skakte og andre konstruktioner. Der beregnes herfra volumenprocent hindring i de forskellige forventede jordlag baseret på BOR-metoden.

Fra KK-metoden bestemmes et nedre, et centralt og et øvre estimat af antal og volumenprocent af fraktionsinddelte sten og blokke. Fraktionerne inddeles i 60-200 mm, 200-600 mm, 600-1000 mm, 100-1500, 1500-2000 mm, 2000-2500 mm. Ovenstående benyttes når kornkurven ikke er kendt. Er kornkurven kendt benyttes denne til at give estimat af antal og volumenprocent af fraktionsinddelte sten og blokke. Den vurderede procentuelle forekomst af jordlag i og langs med projektets konstruktioner benyttes til at beregne volumenprocent samt antal fraktionsinddelte sten og blokke.

Resultater fra begge metoder angives i tabelform og grafisk, og benyttes til at vurdere forventede sten- og blokforekomster i de individuelle jordlag ved gravede og borede konstruktioner.

##### 12.1.2 Mineralogi

For de jordlag, på hvilke der er udført mineralogisk bestemmelse af korn >16 mm på sigterester, skal vægtprocenterne af de individuelle bjergartstyper beregnes. Der inddeles i kategorierne korn >16 mm, korn fra 16-32 mm, korn fra 32-63 mm og korn >63 mm.

## KRAVSPECIFIKATION

---

Resultaterne rapporteres i tabelform og grafisk, og inddeles i jordlag samt for individuelle konstruktioner efter aftale med HOFOR.

Den mineralogiske analyse giver informationer om bjergartstypernes fordeling i de individuelle jordlag, samt om hvilke jordlag og i hvilke områder, der kan forventes særligt høje forekomster af slidende bjergarter. Bjergarternes mineralogiske sammensætning beskrives i SST-T-PD-GEO-GEN-REP-007 - Mineralogy of rock particles.

### 12.2 Slidegenskaber

Der skal udarbejdes en vurdering af slidegenskaber for jord- og bjergarter i forhold til gravbarhed samt slitage på bore- og gravemateriel. Vurderingen baseres på de trufne jord- og bjergarters erfaringsmæssige slidegenskaber som angivet i SST-T-PD-GEO-GEN-REP-004\_1.0\_Abrasivity of Soil and Rock kombineret med resultater af supplerende, projektspecifikke slidforsøg.

Slidforsøg omfatter Soil Abrasion Test™ (SAT), LCPC Abrasivity Coefficient (LAC) og Cerchar Abrasivity Index (CAI) Test.

Fra Soil Abrasion Test™ (SAT) klassificeres slidegenskaberne som ekstremt lave til ekstremt høje, jf. Tabel 40.

Tabel 40 *Klassifikation af slidegenskaber baseret på SAT-forsøg i henhold til (Dahl, F., Bruland, A., Jakobsen, P.D., Nilesen, B. & Grøv, E., 2012).*

Slidklassifikation - Kategori	Slid på skærestål [vægttab, mg]
Ekstremt lav	≤1.0
Meget lav	1.1 - 3.9
Lav	4.0 – 12.9
Mellem	13.0 – 25.9
Høj	26.0 – 35.9
Meget høj	36.0 – 43.9
Ekstremt høj	≥44.0

Erfaringsværdier for slidegenskaber af jordarter, truffet indenfor HOFORs projektområder baseret på SAT-forsøg, fremgår af Tabel 41.

Tabel 41 *Slidegenskaber baseret på HOFOR SAT-forsøg.*

Jordart	Slidklassifikation - Kategori
Sand, smeltevand	Mellem
Morænesand	Mellem til lav
Moræneler	Mellem til lav
Grønsandssand	Meget lav
Grønsandsler	Meget lav

Fra LCPC forsøg klassificeres slidegenskaber som ikke slidende til ekstremt slidende i henhold til Tabel 42.

## KRAVSPECIFIKATION

---

Tabel 42 *Klassifikation af abrasivitet/slidgegenskaber baseret på LAC i henhold til (Käsling, H. & Thuro, K., 2010).*

LAC [g/t]	Slidklassifikation
0 – 50	Ikke slidende
50 – 100	Ikke særligt slidende
100 – 250	Svagt slidende
250 – 500	Mellem slidende
500 - 1250	Stærkt slidende
1250 - 2000	Ekstremt slidende

Erfaringsværdier for slidgegenskaber af jord- og bjergarter, truffet indenfor HOFORs projektområder baseret på LAC, fremgår af Tabel 43.

Tabel 43 *Slidgegenskaber baseret på HOFOR LCPC-forsøg.*

Jord-/bjergart	Slidklassifikation - Kategori
Grus	Stærkt slidende
Kalksten (H3+H4)	Svagt slidende til ikke slidende
Flint	Ekstremt slidende til stærkt slidende
Grønsandskalk (H3) / grønsandskonglomerat (H3)	Ikke slidende

Fra CAI forsøg klassificeres slidgegenskaber som ekstremt lave til ekstremt høje i henhold til Tabel 44.

Tabel 44 *Klassifikation af abrasivitet/slidgegenskaber baseret på CAI-forsøg i henhold til (Cerchar - Centre d'Études et des Recherches des Charbonages de France. 1986, 1986).*

Middel CAI	Slidklassifikation
0,1 - 0,4	Ekstremt lav
0,5 – 0,9	Meget lav
1,0 – 1,9	Lav
2,0 - 2,9	Mellem
3,0 – 3,9	Høj
4,0 – 4,9	Meget høj
≥5.0	Ekstremt høj

Erfaringsværdier for slidgegenskaber af bjergarter, truffet indenfor HOFORs projektområder baseret på CAI forsøg, fremgår af Tabel 45.

Tabel 45 *Slidgegenskaber baseret på HOFOR CAI forsøg.*

Jord-/bjergart	Slidklassifikation Kategori
Grønsandskalk (H4) + grønsandskonglomerat	Lav til ekstremt lav
Gnejs	Meget høj
Ultramafisk bjergart	Høj
Kvartsit	Ekstremt høj
Kalksten (H3)	Ekstremt lav



## KRAVSPECIFIKATION

---

Jord-/bjergart	Slidklassifikation Kategori
Kalksten (H4)	Meget lav til ekstremt lav
Flint	Ekstremt høj til mellem

### 12.3 Slake durability

Der skal udarbejdes en vurdering af slake durability af kalk/kalksten i forhold til bjergartens modstandsdygtighed overfor forvitring. Vurderingen baseres på de trufne kalkbjergarters erfaringsmæssige slake durability egenskaber som angivet i KAL-DD-GEO-GEN-RAP-003 Slake Durability Tests Factual report, kombineret med resultater af eventuelle supplerende, projektspecifikke slake durability forsøg.

Slake durability indeks, dvs. modstandsdygtighed overfor forvitring, klassificeres som meget lav til ekstremt høj i henhold til Tabel 46.

Tabel 46 Slake durability indeks klassifikation

Slake Durability Indeks $i_d(2)$	Klassifikation
0 – 25	Meget lav
25- 50	Lav
50 – 75	Mellem
75 – 90	Høj
90 – 95	Meget høj
95 - 100	Ekstremt høj

Erfaringsværdier for slake durability af kalkbjergarter, truffet indenfor HOFORs projektområder, fremgår af Tabel 47.

Tabel 47 Slake durability af kalkbjergarter baseret på HOFOR slake durability forsøg.

Bjergart	Slake durability klassifikation
Kalk (H1)	Lav til meget lav
Kalk (H2)	Høj til lav
Kalksten (H3)	Ekstremt høj til høj
Kalksten (H4)	Ekstremt høj til meget høj

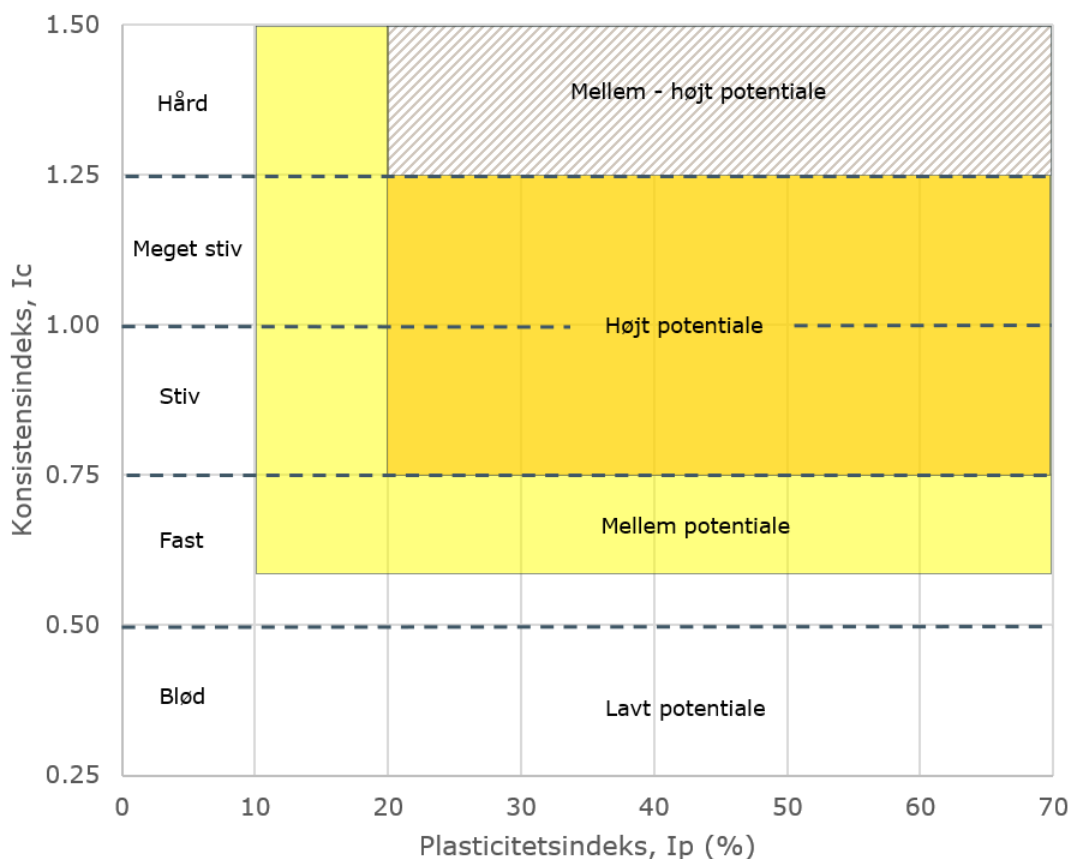
### 12.4 Klæbrighed

Der skal udarbejdes en vurdering af kohæsive aflejrings "klæbrighed" i forhold til risiko for eksempelvis tilstopning af og ophobning af boremudder i TBM's borehoved.

For kohæsionsaflejringer plottes aflejringens konsistensindeks,  $I_c$ , og plasticitetsindeks,  $I_p$ , i et såkaldt Thewes diagram, Figur 12, for vurdering af "tilstopning og klæbrighed" for den aktuelle jordtype.

# KRAVSPECIFIKATION

Klæbrigheds- og tilstopningspotentiale



Figur 12: Modificeret Thewes diagram for klæbrigheds- og tilstopningspotentiale, modificeret fra (Thewes, 1999).

## 12.5 Gravbarhed (styrke) og hærdningsgrader

(kan være indeholdt ovenfor)

## KRAVSPECIFIKATION

---

### 13 Referencer

Andreassen, K. A. og Fabricius, I. L. (2014): "Skrivekridt", Høringsudgave af dgf-Bulletin (under redigering).

Bieniawski, Z. T. (1989): *Engineering Rock Mass Classification*. John Wiley, Rotterdam.

Brinch Hansen, J. (1961): "A general Formula for Bearing Capacity". *Ingeniøren*, No. 2, Volume 5, June.

Christensen, J. D., Frederiksen, J., Haahr, F. og Lyse, C. (2016): "Moræneaflejringer". dgf-Bulletin 16 (under redigering).

Christensen, N. H. (1993): "Regler for beregning af slappe rør på DSBs areal". Geoteknisk Institut, Prepared for Infrastrukturtjenesten, DSB.

Danish Geotechnical Institute (1994): "The Øresund Link, Limestone – a Geological and rock mechanical description". Report No. 1, PA3 GEO 106.

Denver, H. (1980): *Sætningsberegninger for fundamenter på Sandlag*, Ph.D. Thesis, Soil Mechanics and Foundation, DTU.

Dgf-Bulletin 16. "Danske jordarter. Kapitel vedr. tørv". Foged, N., Rasmussen, J. L., Okkels, N. og Frederiksen, J. (under udarbejdelse).

DGI Memo no 11: "Application of Soil Weakening Theory in Unloading and Reloading", DGI Job no. 280 00667 Storebælt.

Foged, N., Rasmussen, J. L., Okkels, N. og Frederiksen, J.: "dgf-Bulletin vedr. Tørv" (Høringsudgave).

DS415 (1977): "Dansk Ingeniørforenings Norm for Fundering, 2. udgave Marts 1977", Dansk Standard DS 415.

DS/EN 1997-1 DK NA:2021: Nationalt anneks til Eurocode 7: Geoteknik – Del 1: Generelle regler.

DS/EN 1997-2 + AC:2011: "Eurocode 7 – Geoteknik – Del 2: Jordbundsundersøgelser og prøvning".

DS/EN 1997-2 DK NA:2013: "Eurocode 7 – Geoteknik – Del 2: Jordbundsundersøgelser og prøvning".

EN ISO 22476-3:2005: "Geotechnical investigation and testing – Field testing. Part 3: Standard penetration test".

Farøbroerne (1980): Brudstykke af ukendt DGI-notat.

Ferring (2008): "København, Kaj Fiskers Plads 9, Tilbygning til Ferring: Geoteknisk undersøgelse", GEO projekt nr. 30830, Rapport 2.

Frederiksen, J., Gravesen, P., Kundsén, B. og Thorsén, G. (1987): "Kursus 3, Danske Jordarter. Forekomst og egenskaber", AUC - Efteruddannelse, Kursus i Ingeniør Geologi.

## KRAVSPECIFIKATION

---

Galsgaard, J., Andersen, J.D., Fuglsang, L.D., Christensen, H.F., Nissen, R.W. Augustesen, A.H., Krogsbøll, A. og Thøgersen, L. (2010): DGF-Bulletin 22. Eksempelsamling til Lærebog i Geoteknik, Kapitel 7. Jords Styrke.

GEO (2014): "CITYRINGEN, Civil Works, Geotechnical Interpretative Report GIR Level 1", Metroselskabet, Document no. CR-CMT-GEN=Gen-CG-DES-REP-000104\_5.0.

Haahr, F. (2014): DGF-møde 20-11-2014 *Samspil mellem jord og konstruktion. Den 'korrekte jordmodel'?*

Haahr, F. (2016): DGF-møde 26-04-2016 *"Indflydelse af spændings- tøjningsniveauer på dansk designpraksis. Perspektivering af emnet"* (foredrag ikke tilgængelig).

Haahr, F. (2016a): *"Revurdering af K-moduler for moræneler"*. Intern rapport, 14. februar.

Haahr, F. (2016b): *"Civil Works. Design Basis – Alternative assessment of  $K_0$  for the soil and rock layers to be used for temporary and permanent structures"*, Cityringen. Branch off to Sydhavnen, CRSH1, prepared for MetSyd (confidential).

Haahr, F. (2017): *"Proposal for assessment of undrained shear strength of heavily over consolidated clay- and sand till estimated from water content  $9\% > w > 3.7\%$ "*. Internal report.

Haahr, F. (2018): *"Geonote 01. HOFOR – Egenskaber for København kalk. Undersøgelsesmetoder, Geologisk beskrivelse og laboratorieforsøg"*. Intern HOFOR rapport.

Haahr, F. (2018): *"Geonote 02. HOFOR – Styrkeparametre for grønsandsaflejringer. Indsamling af data"*. Intern HOFOR rapport.

Haahr, F. (2018): *"Geonote 03. HOFOR – Udledning af styrke- og deformationsegenskaber baseret på in situ-forsøg og erfaringsregler"*. Intern HOFOR rapport, revideret 22-01-2022.

Haahr, F. (2018): *"Geonote 04. HOFOR – Bestemmelse af  $K_0$  for design af skakter og skybrudstunneller"*. Intern HOFOR rapport.

Haahr, F. (2018): *"Geonote 05. HOFOR – Udledning af deformationsegenskaber baseret på in situ-forsøg og erfaringsregler"*. Intern HOFOR rapport.

Hansen, B. (1978): *"Lærebog i Geoteknik 1"*, DTU.

Hoek, E. (2012): *"Blast Damage Factor D"*, Technical Note for Rock News – February 2, 2012 Issue.

Jaky, J. (1944) *"The Coefficient of Earth Pressure at Rest"*. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, Budapest, Hungary, October, pp. 355-358.

Johansen, C. (2011): *"Styrke- og deformationsparametre for Vamdrup Mose – Teknisk Notat 4 ver. 02"*. 2. spor Sønderjylland, Vamdrup – Vojens. Sagsnr. Atkins1010728-3/GMCB 22.4006.01.

Kirstein, J. M. (2016): *"Vurdering af sætninger ved dybe udgravninger"*. DTU Eksamensprojekt, M.Sc.

Knudsen, B. (1997): (se Frederiksen, J., Gravesen, P., Kundsén, B. og Thorsén, G. (1987))

## KRAVSPECIFIKATION

---

Kristensen, P. S., Regtop, J. og Balstrup, T. (1995): "*Predicted and observed settlement and tilts of offshore bridge*". XI ECSMFE, The interplay between Geotechnical Engineering and the Engineering Geology, dgf-Bulletin 11, Volume 5, pp. 5.43-5.52.

Kryger Hansen, H. & Foged, N. (2002): "*Kalkens bjergmekaniske egenskaber*". dgf-Bulletin 19.

Kulhawy, F. H. and Mayne, P. W. (1990): EPRI EL-6800. Electric Power Research Institute, "*Manual on Estimating Soil Properties for Foundation Design*", Project 1493-6. Cornell University, Ithaca, New York

Lange, R. og Haahr, F. (2012): "*Design basis for temporary retaining walls. Nordhavnsvej, Vej- og Tunnelentreprise*". PP-30-PR-001, Rev. 4, 5. marts.

Larsen, K. A. and Ipsen, L. B. (20016): "*Methods for Predicting Void Ratio and Triaxial Friction Angle from Laboratory CPT and Shallow Depths*", Aalborg University.

Long, M. (2005): Review of peat strength, peat characterisation and constitutive modelling of peat with reference to landslides. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXVII, No. 3-4.

Look, Burt G. (2007): "*Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*". Taylor & Francis.

Lyse, C. og Brammer, S. (2014): Nordhavnsvejen, Banekrydsningen – monitoring vs. numeriske beregninger af byggegrube. DGF-møde 20-11-2014 Samspil mellem jord og konstruktion.

Mayne, P. W. and Kulhawy, F. H. (1982): "*K<sub>0</sub>-OCR Relationships in Soil*", *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 108 (6), pp. 851-872.

Meyerhof (1957): "*Discussion on Research on determining the density of sands by spoon penetration testing*". Proc. 4th Int. Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London 1957, Vol.3 p.110.

Moust Jacobsen (1970), "*Strength and Deformation Properties of Preconsolidated Moraine Clay*", *Geoteknisk Institut, Bulletin No. 27*, s. 21-45

Moust Jacobsen (1975): "*Nogle danske morænelerarters styrke- og deformationsegenskaber*", *Nordisk Geoteknikermøde 75*, København, Maj, pp.397-409.

Niras/GEO (2017): "*Preliminary GIR for Kalvebod Brygge Skybrudstunnel*", for HOFOR A/S & Frederiksberg Forsyning.

Rowe, R. K. and Armitage, H. H. (1978): "*A design method for drilled piers in soft rock*". *Can. Geotech. J.*, Ottawa, Canada, 24, 126-142.

Schmertmann, J. H. (1976): "*Measurement of the In-Situ Shear Strength*", *Proceedings, ASCE Speciality Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties*, Vol. 2, Raleigh, pp. 57-138. (closure pp. 175-179).

Skempton, A.W. (1986): "*Standard penetration test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging and overconsolidation*". *Geotechnique* 36, No.3, pp.425-447

## KRAVSPECIFIKATION

---

Stroud, M. A. (1974). "The Standard Penetration Test in insensitive clays and soft rocks". Proc. European Symposium on Penetration Testing, (ESOPT 1), Vol. 2:2, pp. 367 – 375.

Steenfelt, J.S. and Christensen, J.T. (1983): "Settlement of railway tunnel, in motorway embankment on fat clayey till", Danish Geotechnical Institute, Technical Report No.11.

Steenen-Bach, J. O. von (2018): "Copenhagen Limestone and Bryozoan Limestone. Assessment of effective strength parameters and deformation modulus for rock mass". Copenhagen & Bryozoan Limestone, Geonote 01 rev. 2 (confidential), Project 23.9032.01, 10<sup>th</sup> December 2018, Sweco.

Sørensen, K.K. and Okkels N. (2013): "Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clay", Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.

Sørensen, K.K (2013): "Sammenhæng mellem lers friktionsvinkel  $\varphi'_{peak}$  og plasticitetsindeks  $I_p$ ", møde I DGF 12. september (fra "Correlation between drained shear strength and plasticity index of undisturbed overconsolidated clay", Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris).

Sørensen, C. S., Steenfelt, J.S & Kammer Mortensen, J.: "Foundation of the East Bridge for the Storebælt Link", Proceedings of XI ECSMF, Copenhagen, 28 May – 1 June 1995.

Teknisk Ståbi, 22. udgave 2013.

Yudhbir, L. W. and Bieniawski, Z. T. (1983): "An empirically failure criterion for rock masses". ???

Zhang, L. (2004): "Drilled Shafts in Rock. Analysis and Design". A.A. Balkema Publishers.