

Nederlands Instituut voor
Toegepaste Geowetenschappen TNO

Het effect van een vries-dooi cyclus op het mechanisch gedrag van de Klei van Boom bij de Westerscheldetunnel



NITG 98-22-B



TNO-rapport
NITG 98-22-B

Het effect van een vries-dooi cyclus op het mechanisch gedrag van de Klei van Boom bij de Westerscheldetunnel

Eindrapport

Datum
juni 1998

Projectleider
drs. R. Rijkers

Projectmedewerkers
dr. G. Klaver
ing. F. de Lang
drs. G. de Lange

Projectnummer
144468139

Richard Holkade 10
Postbus 157
2000 AD Haarlem

Telefoon 023 530 03 00
Fax 023 535 16 14

Opdrachtgever
Bouwdienst Rijkswaterstaat

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar
gemaakt door middel van druk, foto-
kopie, microfilm of op welke andere
wijze dan ook, zonder voorafgaande
toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
'Algemene Voorwaarden voor
onderzoeksopdrachten aan TNO', dan
wel de betreffende terzake tussen de
partijen gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het
TNO-rapport aan direct belang-
hebbers is toegestaan.

© 1996 TNO

Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO
is gevestigd in Delft en Haarlem en heeft nevenvestigingen in
Haarlem, Heerlen, Nuenen, IJmuiden en Zwolle.

Het instituut is het centrale geowetenschappelijke informatie-
en onderzoeksinstituut van Nederland, ten behoeve van het
duurzaam beheer en gebruik van de ondergrond en de
ondergrondse natuurlijke bestaansbronnen



Samenvatting

Door de Bouwdienst van Rijkswaterstaat wordt geanticipeerd op verandering van sterkte-eigenschappen van de Klei van Boom tijdens en na een vries-dooi cyclus. In dit rapport wordt de problematiek met betrekking tot de veranderingen van sterkte-eigenschappen van de Klei van Boom tijdens en na een vries-dooi cyclus en de gevolgen daarvan geïnventariseerd. Na een analyse van bestaande geomechanische gegevens van de Klei van Boom in Nederland en België worden verwachte veranderingen van geomechanische eigenschappen bij de Westerscheldetunnel besproken.

De oorspronkelijke structuur van grond verandert door een vries-dooi cyclus en hiermee veranderen ook de stijfheid- en de sterkte-eigenschappen. De verandering van de structuur van klei door bevriezen en ontdooien wordt op de schaal van korreltextuur primair toegeschreven aan heroriëntatie van deeltjes en de vorming van microbreuken. Het vries-dooi proces wordt door veel auteurs vergeleken met het mechanisme van consolidatie.

De Klei van Boom onder de Westerschelde kan in geotechnische zin niet als een homogeen lichaam worden beschouwd. De doorlatendheid naar de top en de basis neemt toe tot meer dan 1×10^{-5} m/s, het zoutgehalte in de Klei van Boom neemt toe tot meer dan 20.000 mg Cl/l, het gemiddelde kleigehalte bedraagt ca. 46 % en varieert slechts weinig. De zandige eenheden aan de basis en de top van de Klei van Boom bevatten een significant hoger gehalte zand- en silt.

Wanneer het watergehalte w en plasticiteitsgrens w_p ongeveer gelijk zijn (resp. 25 en 22 % bij de Westerscheldetunnel) worden er weinig veranderingen van geomechanische eigenschappen na een vries-dooi cyclus verwacht. De hoge consolidatiegraad en de lage doorlatendheid van de Klei van Boom bij de Westerschelde zijn belangrijke aanwijzingen die van invloed zijn op deze verwachting.

Een volumetoename (of dilatantie) bij bevriezing wordt verwacht, maar deze is niet eenvoudig te voorspellen omdat de doorlatendheid niet goed bekend is. De volumetoename van klei als gevolg van bevriezing is eveneens afhankelijk van vriestemperatuur en vriessnelheid. Het zoutgehalte is in drie boringen gemeten en deze is voor een groot deel van de Klei van Boom laag. Slechts aan de basis en aan de top van de Klei van Boom (en waarschijnlijk bij de Pas van Terneuzen) is het zoutgehalte hoog.

Uit de geologische reconstructie van het Westerscheldegebied en analyse van zoutgehalte van het formatiewater van de Klei van Boom kan worden afgeleid dat verzilting van de Klei van Boom optreedt vanaf de bodem van de Westerschelde.

Het wordt aanbevolen om geotechnische laboratoriumtesten uit te voeren op de Klei van Boom onder zoutwater omstandigheden om sterkte en stijfheid te bepalen

gedurende en na bevriezing. Hierbij kan kruip eveneens bestudeerd worden ten behoeve van het berekenen van spanningen op de hoofdtunnelsegmenten.

Monitoring van de groei en de omvang van het vrieslichaam, alsmede van de (mogelijke) deformatie van de hoofdtunnelbuizen tijdens het vries en ontdooiproces wordt aanbevolen.

De resultaten van deze studie lijken een discussie te rechtvaardigen omtrent de noodzaak van bevriezing van de Klei van Boom onder de Middelpaalt voor de aanleg van dwarsverbindingen. Op de locatie Mol in België wordt heden een schacht aangelegd zonder de Klei van Boom te bevriezen. Anderzijds duiden de laboratoriumproeven op monsters van de Klei van Boom afkomstig van de locatie Mol op een veel grotere sterkte dan op de locatie Westerschelde.

Er zijn verschillende criteria aan te geven waaraan het gedrag van de Klei van Boom tijdens bevriezen en ontdooien kan worden getoetst, met name:

- lensvorming
- expansie
- sterkte verandering
- verandering van permeabiliteit
- krimp

Het belang van ieder van deze criteria tijdens en na de operatie dient hierbij te worden afgewogen, teneinde de conclusie te kunnen trekken welk proces of criterium maatgevend zal zijn en derhalve in aanmerking komt voor monitoring.

Inhoud

Samenvatting	i
Lijst van figuren	v
Lijst van tabellen	vii
1 Inleiding	1
2 Vraagstelling en doelstelling	2
3 Resultaten literatuurstudie	3
3.1 Het effect van bevriezing op de structuur van klei	4
3.2 Verandering van sterkte-eigenschappen van klei na een vries-dooi cyclus	6
3.3 Doorlatendheid, volume-toename en vriesscheuren	14
3.4 Kruipgedrag van klei bij bevriezen en ontdooien	17
3.5 Het effect van zoutgehalte op geomechanische eigenschappen ...	19
3.6 Het effect van natuurlijke compactie en consolidatie	21
4 Inventarisatie van relevante eigenschappen van de Klei van Boom klei bij de Westerscheldetunnel	23
4.1 Geologische eigenschappen van de Klei van Boom	23
4.2 Geotechnische indeling van de Klei van Boom	25
4.3 Geomechanische eigenschappen	25
4.3.1 Volumieke gewichten, watergehalten en Atterbergse grenzen	25
4.3.2 Doorlatendheid	26
4.3.3 Korrelgrootte distributie	29
4.3.4 Sterkte-eigenschappen	29
4.3.5 Overconsolidatie	29
4.3.6 Elasticiteit	29
4.4 Geochemisch eigenschappen	32
4.4.1 Variatie zoutgehalte onder de Westerschelde	32
4.4.2 Interpretatie van de variatie van het zoutgehalte	32
4.4.3 Mineralogie van de Klei van Boom	33
4.5 Permafrost en verzilting gedurende het Kwartair	35
5 Verwachte effecten van bevriezen op geomechanische eigenschappen van de Klei van Boom bij de Westerscheldetunnel	37
5.1 Structuur van de Klei van Boom en kleimineralogie	37

5.2	Sterkte-eigenschappen en kruip	37
5.3	Doorlatendheid en dilatantie.....	37
5.4	Consolidatiegraad	38
5.5	Zoutgehalte	38
6	Aanbevelingen	40
	Literatuur	41
	Bijlagen	
	A Watergehalten en droge en natte eenheidsgewichten	
	B Atterbergse grenzen w_p , w_L en plasticiteitsindex I_p	
	C Geochemische samenstelling formatiewater Klei van Boom	
	D Kleimineralogie van de Klei van Boom	
	E Kopie uit Harris (1995) betreffende invloed van dooi op poriëndruk (Nixon en Morgenstern, 1971)	

Lijst van figuren

Figuur 1	De verandering van sterkte-eigenschappen van zanden en kleien als gevolg van verlaging van de temperatuur.....	4
Figuur 2	Verandering van microstructuur van klei. Kaoliniet: a-voor en na bevriezen in b-gesloten, c-open systeem. Smectiet d-voor en na bevriezen in e-gesloten en f-open systeem (Hohman-Porebska & Czurda, 1997).....	5
Figuur 3	Veranderingen van void-ratio tijdens een vries-dooi cyclus (Nixon & Morgenstern, 1973)	8
Figuur 4	Ultrasonische snelheid versus temperatuur metingen gedurende een vries-dooi cyclus (Thimus et al., 1991b).....	8
Figuur 5	Ultrasonische snelheid versus temperatuur voor drie verschillende grondsoorten (Thimus et al., 1991c).....	9
Figuur 6	Bezwijkcriteria van de Klei van Boom en de invloed van temperatuur (Thimus, 1993)	10
Figuur 7	Relatie cohesie versus temperatuur (Chen Xiangsheng et al., 1991)	13
Figuur 8	Ontwikkeling van 'excess pore pressure' tijdens een vries-dooi cyclus (volgens Morgenstern & Nixon, 1971), i) onder eigen gewicht, (ii) met belasting p_0 ('gewichtloze' grond)	13
Figuur 9	Afname van permeabiliteits-ratio k_R na een vries-dooi cyclus versus de vloeigrens (Nagasawa & Umeda, 1985).....	16
Figuur 10	Resultaten van triaxiale kruiptesten van bevroren klei met watergehalte van 30 % (Chen Xiangsheng et al., 1991)	18
Figuur 11	Resultaten van uni-axiale kruiptesten van bevroren leperen klei en de invloed van de fase overgangen (Thimus & Henriët, 1991a)	18
Figuur 12	Percentage onbevroren water versus temperatuur van zoute bevroren grond (Zhang Lixin, 1991).....	20

Figuur 13	De samenstelling van een zoutwater-systeem bij atmosferische druk (Harris, 1995)	21
Figuur 14	Het effect van bevriezen en ontdooien op de void-ratio van Ellsworth klei; $w_f = 45\%$, $w_p = 25\%$ (Chamberlain & Gow, 1979).	22
Figuur 15	Watergehalte, plasticiteits- en vloeigrens versus diepte in het gebied van de Pas van Terneuzen, Middelpaat en Everingen	27
Figuur 16	Watergehalte versus lutumgehalte van de Klei van Boom onder de Westerschelde	28
Figuur 17	Ongedraineerde schuifsterkte van de Klei van Boom bij de Westerscheldetunnel	30
Figuur 18	Zoutgehalten van het poriënwater van de Klei van Boom in drie boringen in de Westerschelde	34

Lijst van tabellen

Tabel 1	Geomechanische parameters Klei van Boom en Klei van Ieperen (Thimus, 1989; 1991b).....	7
Tabel 2	Uni-axiale druksterkte van de Klei van Boom (Thimus, 1993)	10
Tabel 3	Geomechanische parameters van kleimonsters (Chen Xiangsheng et al., 1991)	12
Tabel 4	Geomechanische parameters van kleimonsters (Thimus & Henriët, 1991a)	19
Tabel 5	Geomechanische en geohydrologische parameters van de Klei van Boom bij de Westerscheldetunnel	31

1 Inleiding

Momenteel toetst de afdeling Tunnelbouw van de Bouwdienst van Rijkswaterstaat het definitieve ontwerp van de toekomstige Westerscheldetunnel. Bij deze tunnel zullen dwarsverbindingen worden gerealiseerd met behulp van vriestechnieken. Door de Bouwdienst van Rijkswaterstaat wordt geanticipeerd op verandering van sterkte-eigenschappen van de Klei van Boom tijdens en na een vries-dooi cyclus. Door RWS-Bouwdienst is aan het NITG-TNO opdracht gegeven om het mechanisch gedrag tijdens en na een vries-dooi cyclus te analyseren (opdrachtbrief RWS 97003530; offerte GIH-97624).

In dit rapport wordt de problematiek met betrekking tot de veranderingen van sterkte-eigenschappen van de klei na bevrozing-ontdooien besproken. Er is uitsluitend gebruik gemaakt van bestaande kennis in de literatuur en van bestaande gegevens over de Klei van Boom. Omdat er in Nederland nauwelijks ervaring is opgebouwd met vriestechnieken in stijve kleien (zoals de Klei van Boom) is het noodzakelijk kennis te nemen van ervaringen in het buitenland. Op basis van deze ervaringen worden de effecten van bevroren en ontdooien op de sterkte-eigenschappen van de Klei van Boom op de locatie van de toekomstige Westerscheldetunnel geanalyseerd.

In hoofdstuk 2 worden de doelstellingen en belangrijke aspecten van dit onderzoek genoemd. In hoofdstuk 3 wordt een samenvatting gegeven van de bevindingen in de literatuur ten aanzien van het effect van bevrozing op de structuur van klei, sterkte-eigenschappen, doorlatendheid, volumeverandering, scheurvorming, kruip en de invloed van zoutgehalte en de consolidatiegraad. In hoofdstuk 4 worden de relevante geologische, geomechanische en geochemische eigenschappen van de Klei van Boom behandeld. Op basis van hetgeen in hoofdstuk 3 en 4 behandeld is, wordt in hoofdstuk 5 conclusies getrokken over de mogelijke effecten van een vries-dooi cyclus op de Klei van Boom bij de Westerscheldetunnel. Op basis van de uitkomsten van het onderzoek worden in hoofdstuk 6 aanbevelingen gedaan. Tevens zijn aan dit rapport enige tabellen, bijlagen en een literatuurlijst toegevoegd.

2 Vraagstelling en doelstelling

De belangrijke vragen die bij het onderzoek centraal staan, zijn:

1. *In welke mate is er verandering van sterkte-eigenschappen van stijve kleien te verwachten tijdens en na het bevriezen?*
2. *Wat kan er gezegd worden over de effecten op deze sterkte-eigenschappen op de korte en de lange termijn (bezwijken en kruip)?*
3. *Kan de Klei van Boom bij de Westerschelde met betrekking tot de onderhavige problematiek als een homogeen lichaam worden beschouwd?*
4. *Wat is het effect van bevriezing in eventuele waterdoorlatende zones?*
5. *Welk deel van het watergehalte is aan kleideeltjes gebonden en welk deel kan zich vrij bewegen in de poriën van de Klei van Boom?*
6. *Wat is de samenstelling van het formatiewater (zoutgehalte) en welke invloed heeft deze op het vries-dooi proces en de verandering van sterkte-eigenschappen van de Klei van Boom?*

De doelstelling van deze studie luidt:

Vergroten van de kennis betreffende de veranderingen van sterkte-eigenschappen die optreden als gevolg van het in-situ bevriezen en ontdooien van de Klei van Boom onder de Westerschelde.

Met behulp van bestaande gegevens over de Klei van Boom bij de Westerschelde en de literatuur worden de hierboven genoemde vragen besproken en uitgewerkt.

3 Resultaten literatuurstudie

3.1 Het effect van bevriezen op de structuur van klei

Het bevriezen van zandige sedimenten met vrij poriënwater levert normaliter in de Nederlandse situatie weinig complicaties op. Echter, de korreltextuur van stijve kleien (zoals die van de Klei van Boom) is anders dan van poreuze zanden, waarbij het meest relevante verschil is dat relatief een groot percentage water aan plaatvormige klei-mineralen gebonden is. Rijkswaterstaat stelt in een notitie over de aanleg van dwarsverbindingen in de Westerscheldetunnel terecht dat het bevriezen van grond feitelijk het bevriezen van het aanwezige water in de sedimenten betreft (Rijkswaterstaat Bouwdienst, 1997). Echter, de bevriezing van zandige sedimenten leidt tot een snellere verhoging van de sterkte dan bij kleien (Fig. 1). Het aan de kleikorrels gebonden water bevriest minder gemakkelijk in vergelijking met formatiewater van zanden.

Het water in verzadigde sedimenten wordt in drie fasen verdeeld: (1) kristalwater, (2) aan de korrels gebonden water en (3) vrij poriënwater. De percentages van de verschillende fasen wordt bepaald door het type sediment, de pakking (consolidatie) en de ouderdom van het sediment (diagenese of 'aging'). Het watergehalte neemt theoretisch af met toenemende diepte. Dit consolidatieproces vindt plaats als gevolg van toenemende lithostatische spanningen. Als gevolg van deze toename van effectieve korrelspanningen naar de diepte worden in kleien de plaatvormige kleimineralen horizontaal gerangschikt loodrecht op de (verticale) maximale spanningsrichting.

Het wordt in de literatuur aangetoond dat de oorspronkelijke structuur van grond verandert door een vries-dooi cyclus en dat tevens hierdoor de fysische en sterkte-eigenschappen veranderen. De verandering van de structuur van klei door bevriezen en ontdooien wordt op de schaal van korreltextuur primair toegeschreven aan heroriëntatie van deeltjes en de vorming van microbreuken en wordt door veel auteurs vergeleken met het mechanisme van consolidatie (Chamberlain, 1980; Yong et al., 1985; Nixon & Morgenstern, 1973; Jessberger, 1982; Mitchell, 1995; Harris, 1995). Het bevriezen van kleien is essentieel anders dan bij grofkorrelige sedimenten. De feitelijke bevriezing van kleien begint pas bij enkele graden onder nul als gevolg van de heersende potentiële krachten tussen het gebonden water en kleideeltjes. Het karakter van de verbinding tussen kleideeltjes verandert bij bevriezing door volumetoename van het bevroren water (Wood & Williams, 1985).

Hohman-Porebska & Czurda (1997) bestudeerden zowel de veranderingen van de microstructuur met SEM-analyses (Scanning Electron Microscope) als de verandering van schuifsterkte met een 'direct shear-box'. Analyses werden uitgevoerd van kleien met variërende mineralogische en geomechanische eigenschappen (korrelgrootteverdeling, dichtheid, Atterbergse grenzen, etc).

Veranderingen van structuur zijn waargenomen met de SEM na bevroering als microbreuken (Fig. 2). Sterkte-analyse van verschillende kleisoorten toonde aan dat met name de cohesie van kleistenen afhankelijk is van de vriestemperatuur: bij lagere temperaturen werd een hogere cohesie aangetoond, terwijl de interne wrijving ongeveer hetzelfde bleef. De veranderingen van de pakking is voornamelijk het gevolg van de overgang van water naar ijs. Dit proces is mede afhankelijk van de mineralogische samenstelling en de beschikbaarheid van water.

Verschiede kleisoorten zijn natrium-montmorilloniet (of smectiet), illiet en kaoliniet. Smectieten worden, in tegenstelling tot de andere kleisoorten, gekarakteriseerd door zwellen na toevoeging van water. Dit impliceert dat bij ondergrondse bouwactiviteit in smectieten een verhoging van spanningen het gevolg kan zijn.

De invloed van een vries-dooi cyclus op veranderingen in de structuur van ongeconsolideerde klei is ook onderzocht door Schababerle et al. (1989). De groei van ijslenzen bleek sterker ontwikkeld te zijn bij kleisoorten met een hoger gehalte aan montmorilloniet. Kaoliniet-kleien vertonen een lagere dichtheid en een verhoogde porositeit na een vries-dooi cyclus. Kleien met smectieten zwellen meer door bevroeren omdat er relatief meer water migreert naar het vriesfront. Lensvorming treedt alleen op wanneer er voldoende water hiervoor kan worden aangevoerd (Czurda & Wagner, 1985).

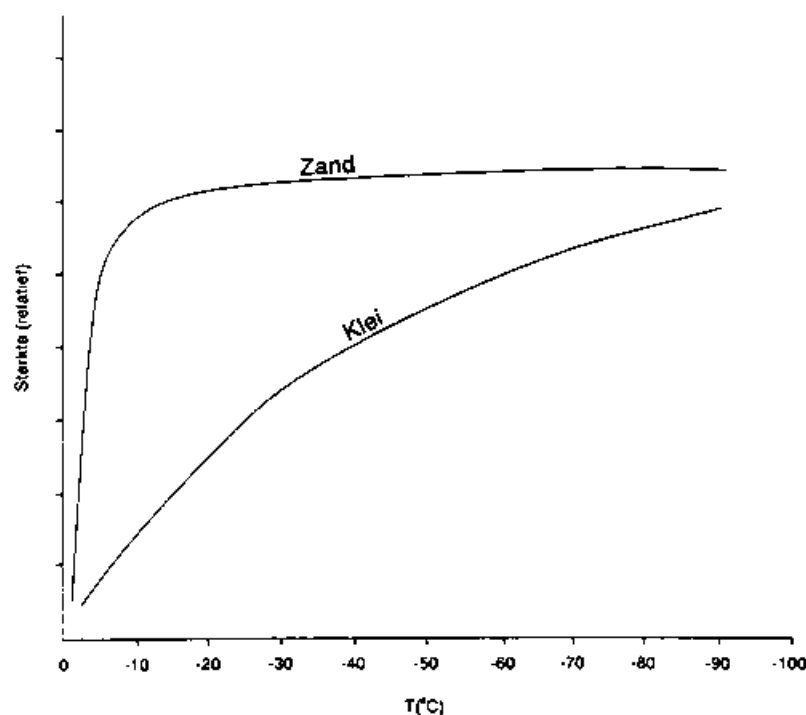


Fig. 1 De verandering van sterkte-eigenschappen van zanden en kleien als gevolg van verlaging van de temperatuur.

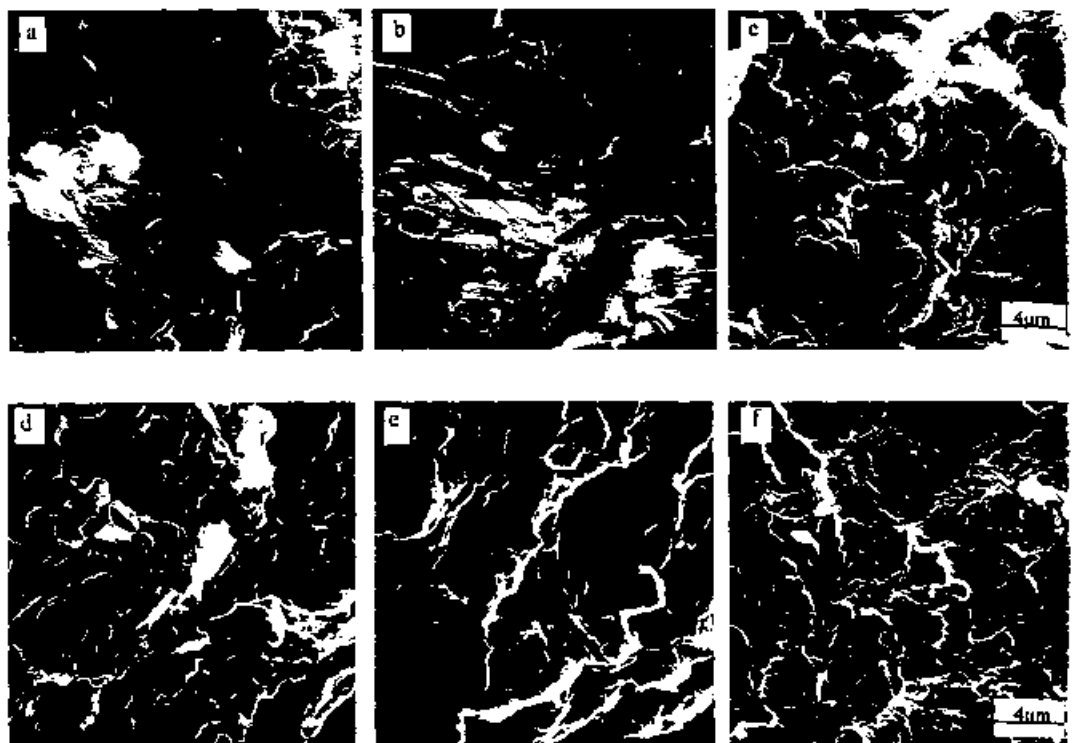


Fig. 2 De verandering van de micro-structuur van twee verschillende kleisoorten: Kaoliniet: a-voor en na bevroren in b-gesloten, c-open systeem. Smectiet: d-voor en na bevroren in e-gesloten en f-open systeem (Hohman-Porebska & Czurda, 1997).

3.2 Verandering van sterkte-eigenschappen van klei na bevriezen en ontdooien

Yong et al. (1985) rapporteren kwalitatieve resultaten van een vries-dooi cyclus op het mechanische gedrag van een (ongeconsolideerde) klei die niet eerder bevroren is geweest ($w_L = 80\%$, $w_p = 45\%$ en hoog watergehalte). Eén vries-dooi cyclus heeft een significante verlaging van de vloeigrens en de ongedraineerde sterkte van de kleien tot gevolg. Op basis van verschillende testen wordt gesteld dat de verandering van geomechanische eigenschappen na verschillende vries-dooi cycli beïnvloedt wordt door (1) type kleimineraal, (2) gehalte aan organisch materiaal en (3) geochemie van de poriënvloeistof.

Ogata et al. (1985) stelt dat ook de consolidatie invloed heeft op de veranderingen van sterkte-eigenschappen. Kaolinitmonsters ($w_L = 58\%$, $w_p = 25\%$) zijn voorbereid met toenemende consolidatiedrukken en de monsters bleken bij hogere consolidatie een hogere dichtheid, een lagere cohesie en een hogere interne wrijving te hebben na een vries-dooi cyclus.

Nixon & Morgenstern (1973) wijzen op de afname van de void-ratio van een sediment na een vries-dooi cyclus (Fig. 3). De vries-dooi cyclus heeft hetzelfde effect als consolidatie. Bondarenko & Sadowsky (1991) stellen dat, wanneer het watergehalte w en plasticiteitsgrens w_p ongeveer gelijk zijn, er geen verschil is in schuifweerstand van dooiend, gedooid en onbevroren grond. De permeabiliteit van grond neemt dan wel toe gedurende het ontdooien. Omdat voor de Klei van Boom bij de Westerschelde geldt: $w \sim w_p$ (zie Tabel 5) is deze laatste bevinding belangrijk.

Thimus et al. (1991a, c) heeft een methode ontwikkeld om de hoeveelheid onbevroren water in sedimenten te monitoren met ultrasone apparatuur door de amplitude van ultrasone golven te meten tijdens bevriezing. De geomechanische parameters van de gebruikte Klei van Boom monsters staan weergegeven in Tabel 1. In Fig. 4 staan de resultaten van de metingen gedurende een vries-dooi cyclus weergegeven. Thimus (1991b) concludeert dat bevriezing van water in Klei van Boom geleidelijk gebeurt en dat de gehele vloeibare fase pas compleet bevroren is bij ca. $-100\text{ }^\circ\text{C}$. Controle van het watergehalte is hierbij uitgevoerd met behulp van calorimetrie en NMR-analyses. Het totale watergehalte in grofkorrelige sedimenten (silt) is eerder bevroren dan dat van kleiïge sedimenten (zie Fig. 5; Thimus, 1991c).

Een groot aantal geomechanische testen is uitgevoerd met monsters van de Klei van Boom om het mechanische en rheologische gedrag gedurende kunstmatige bevriezing te bepalen (Thimus 1989, 1991b). Uni-axiale, triaxiale compressie en extensie testen zijn uitgevoerd bij $+20$, -2 , -5 , -10 , -20 en $-30\text{ }^\circ\text{C}$. De geomechanische karakteristieken van de bestudeerde kleimonsters van de Klei van Boom staan weergegeven in Tabel 1. De resultaten van de uni-axiale druksterkte proeven laten een lichte afname van sterkte zien voor temperaturen rond $-5\text{ }^\circ\text{C}$ en

een toename onder -10°C (Tabel 2). Gedurende kruiptesten hebben Thimus & Henriët (1991b) onregelmatigheden gevonden rond de -3°C . Op deze temperatuur wordt het monster ca. 1°C warmer, waardoor de licht afname van sterkte verklaard wordt. De elasticiteitsmodulus neemt bij bevriezing tot -30°C toe van 146 MPa tot 780 MPa (Thimus, 1989). De verandering van de stijfheid na een gehele cyclus van de klei is niet bekend. De bezwijkcriteria van de Klei van Boom zijn gedefinieerd door uni-axiale en triaxiale druk- en trekproeven; de sterkte neemt toe met lagere temperatuur (Fig. 6).

Tabel 1 Geomechanische parameters Klei van Boom en de Ieperen klei (Thimus, 1989; 1991b; Volckaert, 1997).

parameter	Klei van Boom	Ieperen klei
Mineralogie	Kaoliniet 40 % Illiet 25 % Montmorill. 35 %	Smectiet 50 % Illiet 25 % Kaoliniet 25 %
Klei-gehalte (% < 0,002 mm)	45	23
Soortelijk opp. (m^2/gr)	39,1	39
w_L (%)	67,5	77,5
w_p (%)	26,2	25,8
I_p (%)	41,3	51,7
γ_n (kN/m^3)	20,14	20,49
γ_d (kN/m^3)	16,32	16,11
γ_s (kN/m^3)	26,4	26,96
w_{105} (%)	22,2	21,39
S (%)	100	85,63
n (%)	39	40,3
k_v (m/s)	$1,4\text{e-}10$ - $4,7\text{e-}12$	-
f_{undr} (MPa)	1 - 1,1	-
E (MPa)	200 - 400	-

w_L	vloeigrens	γ_n	eenheidsgewicht nat sediment
w_p	plasticiteitsgrens	γ_d	eenheidsgewicht droog sediment
I_p	plasticiteitsindex	γ_s	eenheidsgewicht van korrels
k_v	vertikale doorlatendheid		
w_{105}	watergehalte (105 °C drogen)	f_{undr}	ongedraineerde sterkte
S	waterversadigingsgraad	E	elasticiteitsmodulus
n	porositeit		

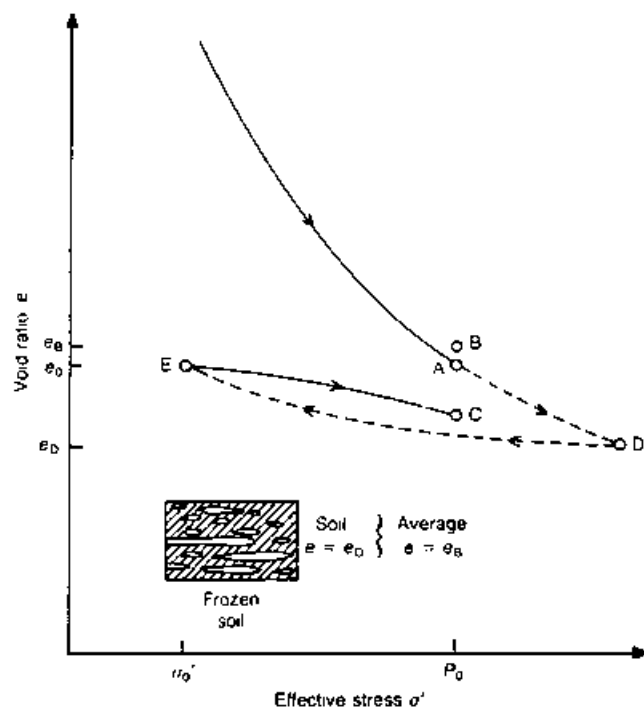


Fig. 3 Veranderingen van void-ratio tijdens een vries-dooi cyclus (Nixon & Morgenstern, 1973). A: normaal geconsolideerd bij P_0 en is onbevoren, B: uitzetting a.g.v. bevriezing, D: zuiging van water en consolidatie, E: overgeconsolideerde elementen nemen water op, C: na gedraineerde consolidatie.

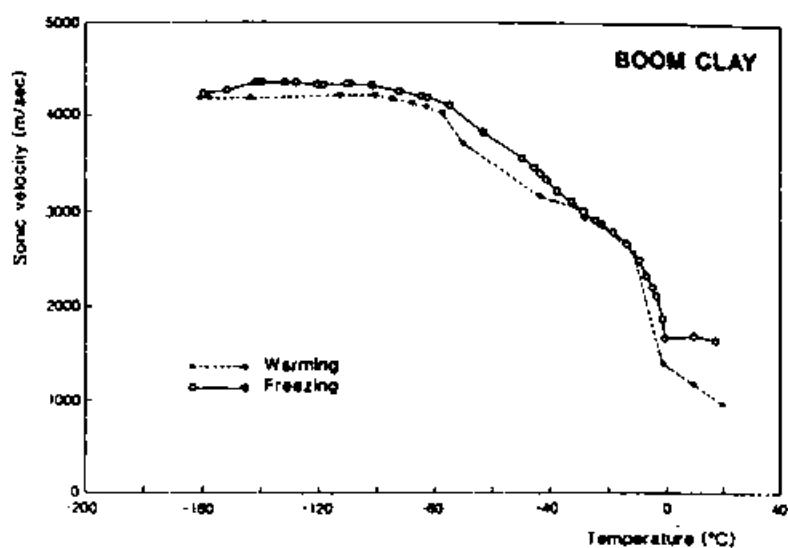


Fig. 4 Ultrasonische snelheid versus temperatuur metingen gedurende een vries-dooi cyclus (Thimus et al., 1991b).

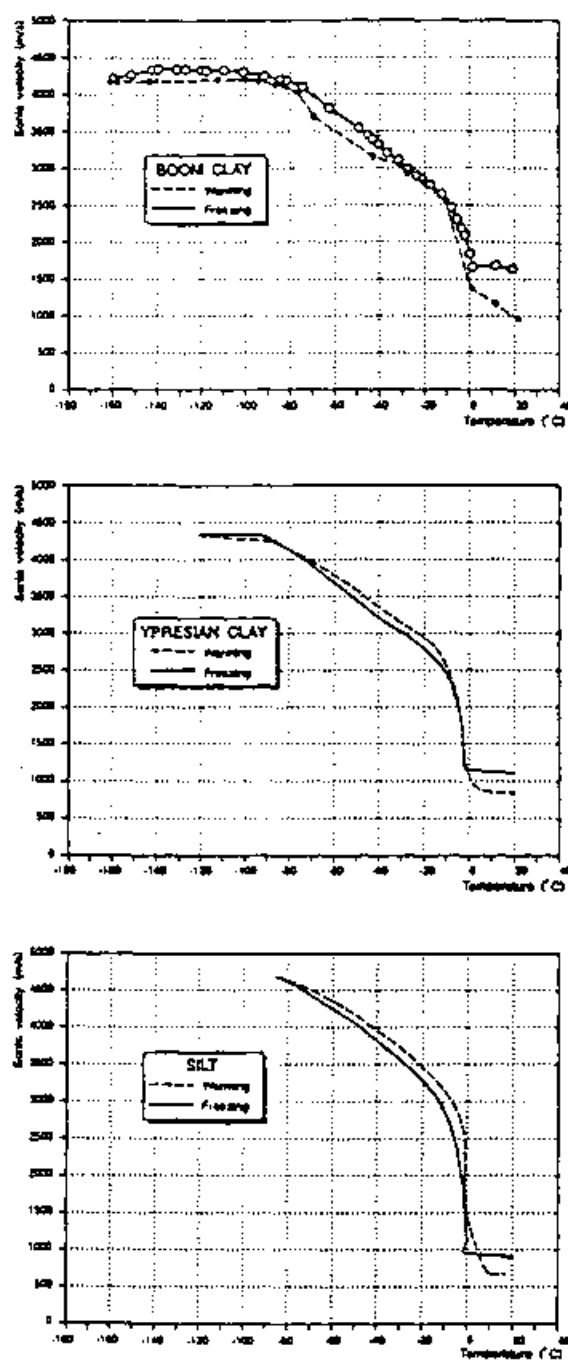


Fig. 5 Ultrasonic snelheid versus temperatuur voor drie verschillende grondsoorten (Thimus et al., 1991c).

Tabel 2 Uni-axiale druksterkte van Klei van Boom (Thimus, 1993; Thimus, 1989).

temperatuur (° C)	aantal monsters	sterkte (MPa)	E-modulus (MPa)
+ 20	13	2,44	146
- 2	3	2,75	389*
- 5	3	2,44	177
- 10	30	4,36	283
- 20	11	7,73	490
- 30	5	9,71	780

* waarde kan door Thimus niet verklaard worden

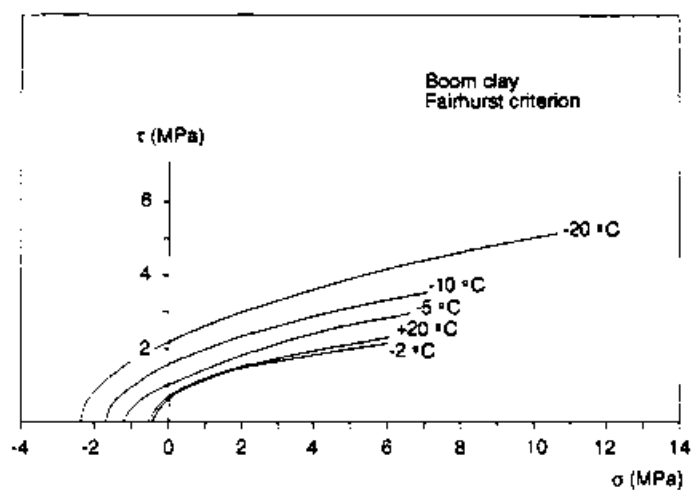


Fig. 6 Bezwijkcriteria van de Klei van Boom en de invloed van temperatuur (Thimus, 1993).

Verandering van temperatuur bij de triaxiale sterkte van kleimonsters heeft nauwelijks effect op de interne wrijving ϕ , terwijl de cohesie toeneemt met een factor twee van -5 tot -25 °C (Chen Xiangsheng et al. 1991). In Fig. 7 staan de resultaten weergegeven tussen cohesie en temperatuur van kleimonster met verschillende watergehaltes. De geomechanische karakteristieke parameters van de gebruikte monsters staan weergegeven in Tabel 3.

Volgens Broms & Yao (1964) zal in de ongedraineerde conditie direct na de vriesdooi cyclus een zeer lage effectieve restspanning ontstaan ('residual stress') door de verhoogde poriëndruk, waardoor de schuifsterkte ($\tau = c' + \sigma_n' \cdot \tan \phi'$) zeer laag wordt. Door dissipatie van de waterspanning en consolidatie zal de klei zijn sterkte weer herwinnen. Dit houdt in dat voorkomen moet worden dat de klei aan het dooifront nabij de ondergrondse constructie onder spanning staat. De restspanning kan in speciale apparatuur bepaald worden. Hiermee kan ook de tijd worden bepaald die nodig is om voldoende sterkte te herwinnen.

Deze tijdelijke verlaging van sterkte is gelokaliseerd aan het dooifront. De poriëndruk aan het dooifront kan bepaald worden door de afleiding van Nixon & Morgenstern (1971). Met de berekende poriëndruk kan een indruk verkregen worden van het zuigingspotentieel. Uit de grafiek van Fig. 8 wordt de verhouding tussen belasting en poriëndruk afgelezen bij een bekende dooiconsolidatieverhouding R. De R wordt berekend uit de relatie:

$$R = \alpha / (2\sqrt{c_v})$$

c_v = consolidatiecoëfficiënt

α = materiaalconstante te bepalen in een proefopstelling uit de relatie

$$X = \alpha \cdot t^{1/2}$$

X = afstand afgelegd door het dooifront

t = tijd

Een kopie van de passage uit Harris (1995) is als bijlage E toegevoegd.

Tabel 3 Geomechanische parameters van kleimonsters
(Chen Xiangsheng et al., 1991).

parameter	klei
Mineralogie	Kaolinit 40 % Illiet 25 % Montmorill. 35 %
Korrelgrootte verdeling:	
2 – 0,05 mm	3 %
0,05 – 0,005 mm	19 %
< 0,005 mm	78 %
w_L (%)	65,9
w_P (%)	36,2
I_P (%)	29,7
γ_d (kN/m ³)	16,56
γ_s (kN/m ³)	27,9
w_{105} (%)	21,2
S (%)	100

w_L vloeigrens γ_s eenheidsgewicht van de korrels
 w_P plasticiteitsgrens γ_d eenheidsgewicht droog sediment
 I_P plasticiteitsindex

w_{105} watergehalte (105 °C drogen)
 S waterverzadigingsgraad

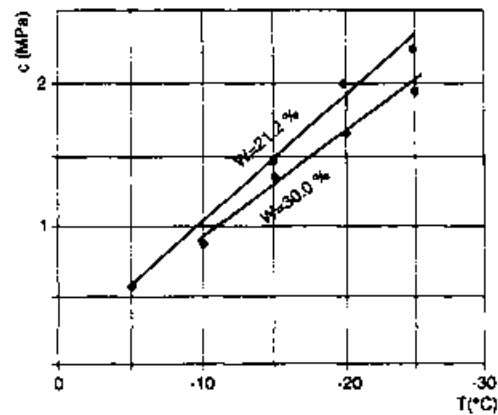


Fig. 7 Relatie cohesie versus temperatuur (Chen Xiangsheng et al., 1991).

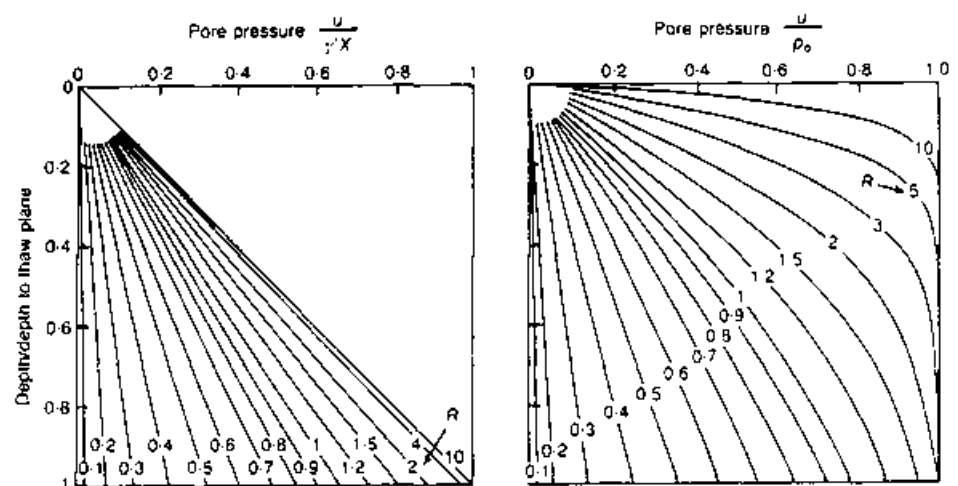


Fig. 8 De ontwikkeling van 'excess pore pressure' tijdens een vries-dooi cyclus (Morgenstern & Nixon, 1971); (i) onder eigen gewicht, (ii) met belasting p_0 ('gewichtloze' grond).

3.3 Doorlatendheid, volume-toename en vriesscheuren

Door het bevroren van een klei-massief neemt het volume toe door bevroering van het water. Tevens wordt door bevroering van het kleimassief extra water aangezogen via waterdoorlatende lagen. Hoe groter de doorlatendheid, des te sneller er water kan worden aangevoerd naar het vriesfront. Volume-toename vindt met name plaats als gevolg van bevroering van ijslenzen, die met water gevoed kunnen worden door onbevroren waterfilms (Ladanyi & Shen, 1985).

In-situ studies hebben uitgewezen dat de groei van ijslenzen niet gelimiteerd is tot het vriesfront, maar eveneens doorgaat in het bevroren materiaal. Dit betekent dat de vergroting van deze lenzen gebeurt onder invloed van de sterkte van de omgevende kleidelen (Wood & Williams, 1985). De vorming van ijslenzen is afhankelijk van poriënwaterspanning en de druk die op poriën-ijs wordt uitgeoefend. Uit experimenten blijkt dat ijslenzen ook niet gevormd kunnen worden bij een opgelegde druk hoger dan een zgn. 'shut-off pressure' (Ladanyi & Shen, 1985). De 'shut-off pressure' is de druk in een waterdoorlatend sediment waarbij geen ijslenzen meer gevormd kunnen worden. Wanneer de 'shut-off pressure' overschreden is, wordt water uitgedreven voor het vriesfront. De 'shut-off pressure' is afhankelijk van de grondsoort, de drukverdeling en vriescondities en is experimenteel te bepalen volgens de methode van Konrad & Morgenstern (1982). Dit betekent in praktische zin voor kleien dat de kans op groei van ijslenzen naar grotere dieptes kleiner wordt.

Bij onvoldoende bedekking boven het vrieslichaam kunnen radiale scheuren ontstaan naar de bodem van de Westerschelde, zodat waterdoorlatende zones worden gecreëerd bij bevroering. Opheffing van de grond boven het vrieslichaam kan dan het gevolg zijn van de bevroering. De bedekking van de Klei van Boom bij de Pas van Terneuzen bedraagt slechts 12 m en is een zone waar scheuren kunnen ontstaan als gevolg van een vries-dooi cyclus.

In het algemeen wordt na een vries-dooi cyclus een verhoging van de permeabiliteit geconstateerd, ook als geen volumeverandering plaatsvindt. Deze schijnbare tegenspraak wordt verklaard door het gecombineerde effect van afname van de porositeit van het klei-materiaal (consolidatie) en het ontstaan van doorlatende kanalen (of scheurtjes) in het kleimassief. Nagasawa & Umeda (1985) geven hiervoor de volgende vergelijking:

$$k_{FT} = k_R \cdot k_i (e^3 / (1 + e))$$

k_{FT}	= hydraulische doorlatendheid na de vries-dooi cyclus	[m/s]
k_R	= relatieve doorlatendheid	[-]
k_i	= initiële doorlatendheid	[m/s]
e	= poriëngetal	[-]

Zij stelden een relatie vast tussen de vloeigrens en de relatieve permeabiliteit. Bij een $w_L = 70\%$ (Fig. 9), zoals waargenomen in de Klei van Boom, geldt een $k_R = 1,5$.

De gemiddelde porositeit van de Boomse Klei bij de WOV is ca. 43%. Hieruit volgt een poriëngetal van $e=0,75$. Dan wordt de permeabiliteit na dooi:

$$k_{FT} = 0,36 \cdot k_i$$

Hieruit zou volgen dat de permeabiliteit van een overgeconsolideerde klei als de Boomse Klei juist vermindert. Dit is in tegenspraak met Chamberlain (1980). Hij stelde de relatie met de consolidatiespanning vast. Bij een vergelijkbare klei (Ellsworth Clay) vond hij:

$$\begin{aligned} k_{FT} &= 10^2 \cdot k_i && \text{bij een } \sigma' = 1 - 10 \text{ kPa en} \\ k_{FT} &< 5 \cdot k_i && \text{bij een } \sigma' > 100 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Het resultaat van Chamberlain lijkt betrouwbaarder. Een hogere permeabiliteit heeft ook een hogere consolidatiecoëfficiënt c_v tot gevolg.

Gedurende het vriesproces van 0 tot -60°C treedt de meeste expansie op tussen 0 en -5°C . Bij ongesteunde proeven op gelaagde Boomse Klei uit Schelle, België ($w=25\%$, $w_L=56\%$, $w_P=30\%$, $e=0,65$, $S=100\%$, geen montmorilloniet!), werd een maximale expansie gemeten van 3,3 % loodrecht op de gelaagdheid (Bourbonnais & Ladanyi, 1985). De theoretische volumetrische expansie van volledig verzadigde onbevroren grond naar een temperatuur waarbij de gehele vloeibare water fase veranderd is in ijs, wordt als volgt uitgerekend:

$$\Delta V/V_{\text{onbevroren}} = 0,09 \cdot (1 + 1/w_L \cdot G_s)^{-1}$$

ΔV	= volumeverandering	[m ³]
$V_{\text{onbevroren}}$	= initieel volume van de grond	[m ³]
w_L	= totaal watergehalte	[-]
G_s	= specifiek gewicht van de grond	[-]

Volgens bovenstaande formule wordt een procentuele volumeverandering van 3,64 % voor de Klei van Boom uitgerekend met $w_L = 25\%$ en $G_s = 2,72$. Bij een $\varepsilon_1 = 3,3\%$ bedraagt de $\varepsilon_2 = 0,17\%$ (ε_1 loodrecht op gelaagdheid; $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$ parallel aan gelaagdheid). Dit geldt wanneer $\Delta V/V = (\varepsilon_1 + 2 \cdot \varepsilon_2)$ gelijk is aan de expansie van de klei. Onder voorgaande voorwaarden impliceert dit dat de klei met name in verticale richting uitzet en niet evenwijdig aan de gelaagdheid in horizontale richting.

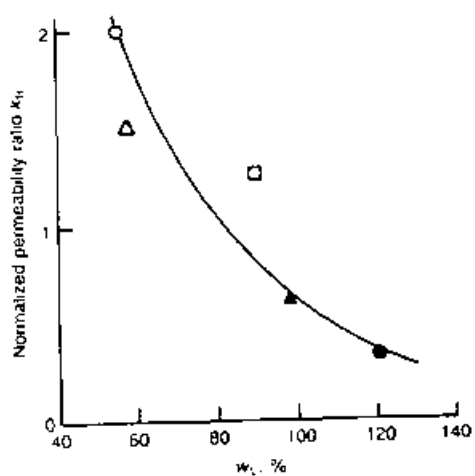


Fig. 9 Relatie permeabiliteitsratio en vloeigrens na een vries-dooi cyclus (Nagasawa & Umeda, 1985).

3.4 Kruipgedrag van klei bij bevriezen en ontdooien

Chen Xiangsheng et al. (1991) hebben triaxiale kruiptesten uitgevoerd bij temperaturen tussen de 0 en -20 °C aan kleien. De geomechanische karakteristieken van de gebruikte monsters zijn vergelijkbaar met die van de Klei van Boom op de locatie Mol in België (verg. Tabel 1 en 4). Fig. 10 laat de resultaten van kruiptesten van bevroren klei met een watergehalte van 30 % zien. Uit de waarnemingen wordt geconcludeerd dat temperatuursveranderingen effect hebben op het kruipgedrag van klei. Bij lagere temperaturen treedt minder kruip op. Tussen -10 en -20 °C vindt een sterke reductie van kruip plaats.

Thimus & Henriët (1991a) hebben kruiptesten met een dilatometer uitgevoerd gedurende een vries-dooi cyclus. Hiervoor is Klei van Boom gebruikt waarvan de geomechanische parameters staan samengevat in Tabel 4. Rond ca. -3 °C vinden onregelmatigheden plaats (Fig. 11). Bij deze temperatuur wordt de met de Klei van Boom vergelijkbare Ieperen klei ca. 1 °C warmer. Tegelijkertijd vindt een toename van de axiale vervorming plaats. De toename van de axiale vervorming wordt hierdoor (indirect) verklaard door exotherme reacties gedurende de bevriezing van het water die samenhangen met de overgang van de vloeibare naar de vaste fase. Met ultrasone amplitude metingen is deze faseovergang eveneens waargenomen (Thimus, 1993).

Bij de constructie van de eerste schacht van een ondergronds laboratorium in Mol (België) zijn in de jaren tachtig ervaring opgedaan met het bevriezen van de Klei van Boom. De verandering van geomechanische eigenschappen en kruip van de Klei van Boom waren bij de aanleg van de schacht relevant met betrekking tot het onderzoek van ondergrondse opslag van radioactief materiaal (Funcken et al. 1983). De aanleg van een verticale schacht en een horizontale ruimte op 227 m heeft geleid tot deformatie van de bevroren Klei van Boom en convergentie van de ondergrondse ruimte. De snelheid van convergentie bedroeg één tot meer dan tien cm per dag (Funcken et al., 1983). Deze excessieve kruip van de bevroren klei leidde tot breuken op verbindingpunten van constructies. Rheologische studies zijn vervolgens uitgevoerd naar het geomechanisch gedrag van de Klei van Boom. Hieruit is gebleken dat de bruikbaarheid van de vriesoperatie afhankelijk is van drie overwegingen:

- (1) de temperatuur mag niet te laag zijn,
- (2) de dikte van het vrieslichaam moet voldoende zijn om een afsluiting te garanderen en
- (3) het materiaal moet snel bevroren worden om de vriestijd te minimaliseren.

Bovenstaande heeft implicaties voor het aantal te gebruiken vrieslanzen, de vriestemperatuur en de duur van de bevriezing.

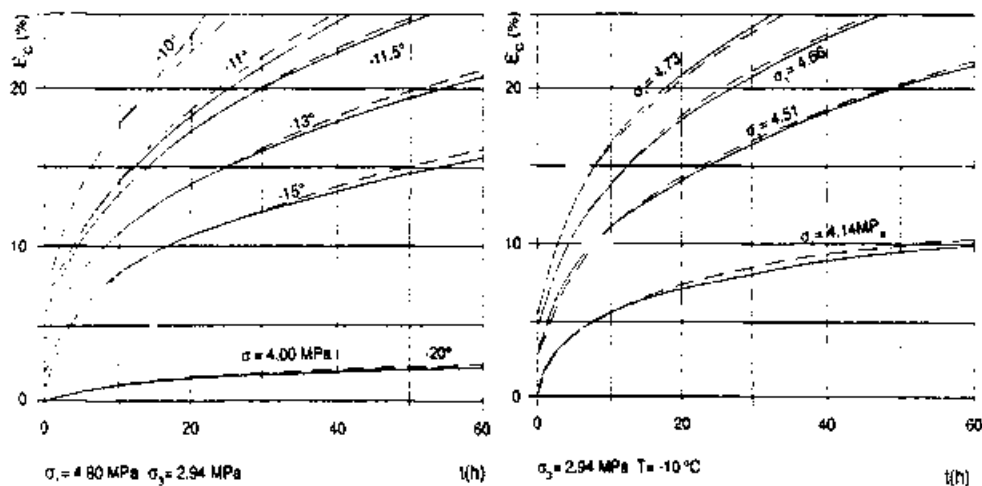


Fig. 10 Resultaten van triaxiale kruptesten van bevroren klei met watergehalte van 30 % (Chen Xiangsheng et al., 1991).

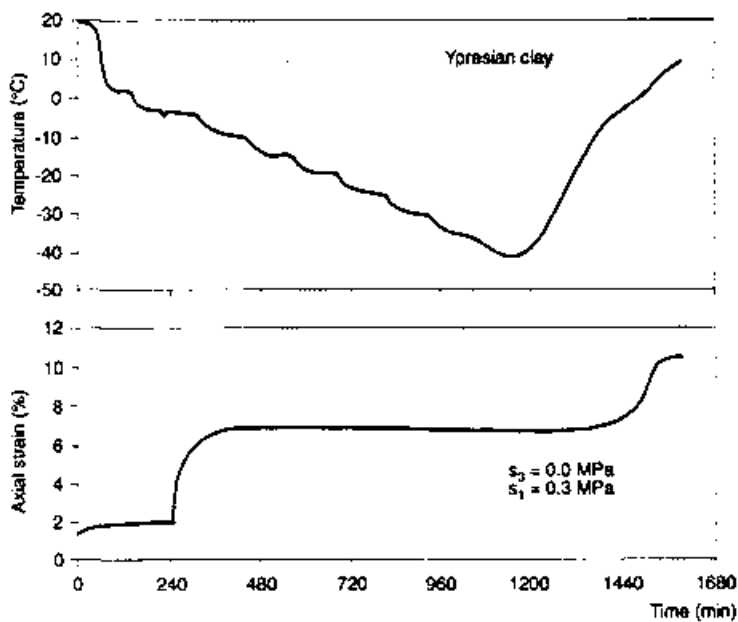


Fig. 11 Resultaten van uni-axiale kruptesten van bevroren Ieperen klei en de invloed van de fase overgangen (Thimus & Henriët, 1991a).

Tabel 4 Geomechanische parameters van de Klei van Boom gebruikt bij de kruiptesten(aangepast naar Thimus & Henriet, 1991)

parameter	klei
Klei-gehalte (% < 0,002 mm)	71
γ_n (kN/m ³)	19,42
γ_d (kN/m ³)	15,07
γ_s (kN/m ³)	27,21
w_{105} (%)	28,87
S (%)	99,47
n (%)	44,63
K_h (m/s)	4×10^{-12}
K_T (W/m °K)	1,7
$1/m_v$ (MPa)	100

γ_n	eenheidsgewicht nat sediment
γ_d	eenheidsgewicht droog sediment
γ_s	eenheidsgewicht van korrels
w_{105}	watergehalte (105 °C drogen)
S	waterversadigingsgraad
n	porositeit
k_h	horizontale doorlatendheid
K_T	warmtegeleiding
m_v	samendrukkingsmodulus

3.5 Het effect van zoutgehalte op geomechanische eigenschappen

Significante hoeveelheden NaCl in het poriënwater verlagen het vriespunt van het water. Bij bevriezing van een grondmassief worden de zouten geconcentreerd in de nog onbevoren fase. Zhang Lixin (1991) toonde bij zoutwater kleimonsters aan dat het onbevoren watergehalte sterk verandert tussen -20 en -30 °C (Fig. 12). Bij hoge temperaturen bestaan er drie verschillende fases (Fig. 13):

- (1) een vloeistof fase,
- (2) een vloeistof-ijs fase en
- (3) een vloeistof-zout fase.

Zouten worden met het formatiewater naar het vriesfront getransporteerd door permeabele lagen, maar worden in het eerste vriesproces niet gekristalliseerd. Bij verdere bevroering worden de zouten vervolgens lokaal gekristalliseerd waardoor er zones met hoge concentraties zoutkristallen in het bevroren kleimassief voorkomen.

Bij het bevriezen van kleiige sedimenten met zout formatiewater dient men rekening te houden drie belangrijke aspecten:

- (1) als gevolg van de differentiatie van zouten tijdens het vriesproces kunnen in gelaagde kleiige sedimenten met heterogene permeabiliteit geen cirkelvormige, maar slechts onregelmatig gevormde vrieslichamen ontstaan,
- (2) door de vriespuntverlaging van zout in de ondergrond heeft het vrieslichaam bij dezelfde temperatuur een kleinere omvang vergeleken met een zoet-water situatie en
- (3) smectiet-klei kan veranderen van sterkte door vermenging met zout water. Door uitwisseling van Ca en Na-ionen treedt volumeverhoging van de zwellende klei op. Bevriezing van (zoutwater-)klei waarbij er geen uitwisseling van formatiewater optreedt, heeft weinig gevolgen met betrekking tot volumeverandering en spanningsvariaties gedurende het vriesproces.

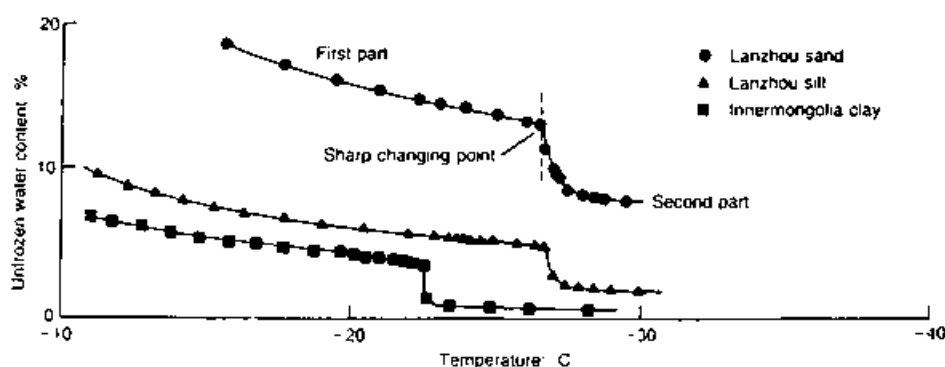


Fig. 12 Percentage onbevroren water versus temperatuur van zoute bevroren grond (Zhang Lixin, 1991).

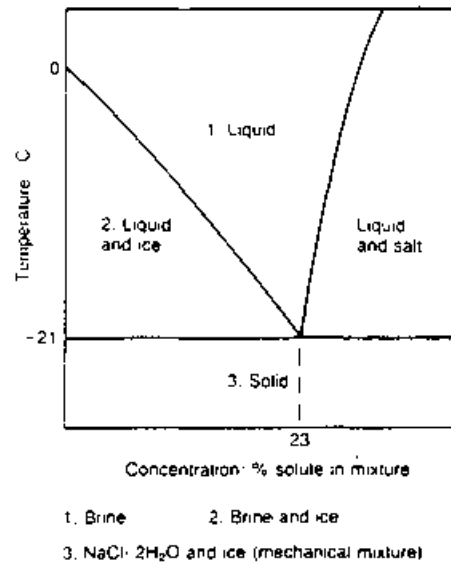


Fig. 13 De samenstelling van een zoutwater-systeem bij atmosferische druk (Harris, 1995).

3.6 Het effect van natuurlijke compactie en consolidatie

Het watergehalte is een maat voor de consolidatie, waarvan er drie soorten onderscheiden kunnen worden: onder-, normaal- en overgeconsolideerde kleien. Een ondergeconsolideerde klei heeft een hoger watergehalte dan op basis van zijn huidige diepteligging verwacht wordt. Een overgeconsolideerde klei heeft juist een te laag watergehalte voor zijn diepteligging wat kan betekenen dat de klei gedurende zijn geologische begravingsgeschiedenis reeds hoge effectieve drukken heeft gekend. Hierna is het kleipakket opgeheven en is de hoge horizontale korrelspanning bewaard gebleven. De Klei van Boom is overgeconsolideerd omdat de grensspanning hoger is dan de effectieve verticale korrelspanning (zie par. 4.3.5). Dit komt onder meer tot uitdrukking in de lage watergehalten en de hoge plasticiteitsindex.

Consolidatie beïnvloedt de verandering in porositeit (void-ratio) gedurende een vries-dooi cyclus (Chamberlain & Gow, 1979). Metingen aan bevroren kleimonsters vertonen bij toenemende consolidatiespanningen een afname in void-ratio en een toename in doorlatendheid. De afname van de poriënruimte van kleimonsters wordt verklaard door herschikking van korrels onder druk van het ijs, terwijl de toename van permeabiliteit wordt toegekend aan het ontstaan van een

hexagonaal scheurenpatroon in het kleimassief. Bij een toenemende verticaal effectieve spanning (= grotere begravingsdiepte) wordt de afname van de poriënruimte minder en ontstaan er eveneens minder scheuren (Fig. 14). Hierbij is het belangrijk op te merken dat er een ondergrens van het watergehalte van kleien is gevonden waaronder geen consolidatie tijdens vries-dooi meer gemeten wordt (Chamberlain, 1980). In de praktijk blijkt dit de w_p . De herschikking van de korrels levert dan geen verlaging van de void-ratio meer op. Het is mogelijk dat een dergelijke ondergrens van het watergehalte reeds bereikt is bij de overgeconsolideerde Klei van Boom (zie par. 3.2 en 4.3.5).

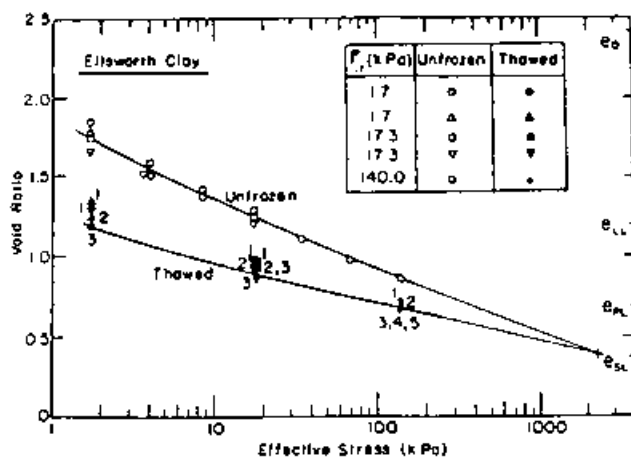


Fig. 14 Het effect van bevriezen en ontdooien op de void ratio van Ellsworth klei; w_L 45 %, w_p 25 % (Chamberlain & Gow, 1979).

e_0 = initiële void-ratio, e_{LL} = void-ratio bij liquid limit

e_{PL} = void-ratio bij plastic limit, e_{SL} = void-ratio bij shrinkage limit

4 Inventarisatie van relevante eigenschappen van de Klei van Boom bij de Westerscheldetunnel

Het is voor deze studie van belang watergehalten, permeabiliteiten en sterkte-eigenschappen van het kleimassief te onderscheiden van het kleimateriaal. Anders dan de eigenschappen van een kleimassief, worden de geomechanische eigenschappen van een beperkt aantal kleimonsters in het laboratorium bepaald. Deze eigenschappen zijn niet direct van toepassing op het gehele kleimassief. De sterkte-eigenschappen en permeabiliteit in een kleimassief verschillen doorgaans van de eigenschappen van het homogene kleimateriaal. Deze verschillen treden op als gevolg van heterogeniteiten in waterdoorlatendheden, differentiële verticale belasting, heterogene lithologische en geochemische samenstelling van de Klei van Boom.

4.1 Geologische eigenschappen van de Klei van Boom

De Formatie van Rupel bestaat uit mariene afzettingen van Midden-Oligocene ouderdom. Er worden twee lithostratigrafische eenheden onderscheiden: de Klei van Rupel en het Zand van Vesseem (resp. Klei van Boom en Zand van Berg; zie Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1998). De Klei van Boom is in het Westerscheldetunnel-tracé 4 tot 31 m dik en is het restant van een oorspronkelijk veel dikkere afzetting. In dit deel van het sedimentatiebekken wordt de oorspronkelijke dikte van het pakket op ca. 100 m geschat. In de omgeving van Doel bedraagt de dikte nog ca. 90 m (Schittekat et al., 1983).

Het monotone geologische karakter van de afzetting maakt het mogelijk over relatief grote afstanden te correleren. Daardoor zijn diverse parameters goed te vergelijken met elders gevonden waarden (Vandenberghe, 1978; Schittekat et al., 1983). Ook uit het seismisch onderzoek blijkt dat de afzetting over grote afstanden een homogeen karakter heeft doordat de reflectoren in het pakket een gelijkmatig beeld vertonen. Verschillen in het kleigehalte, het organische stofgehalte, mineralogische samenstelling (zie par. 4.4.3) en kalkhoudende niveaus zijn het gevolg van verschuivingen in het sedimentatiemilieu tijdens de afzetting. De Klei van Boom in het Westerscheldetunnel-tracé is stratigrafisch gezien het onderste deel van het oorspronkelijke pakket. De argumenten hiervoor zijn te vinden in het kleigehalte, de fractie $< 2 \mu\text{m}$ vertoont afnemende waarden met de diepte, het hoge organische stofgehalte (TOC) in het bovenste deel van het pakket, de biostratigrafie en de naar de basis toe afnemende gamma-waarde van boorgatmetingen.

De uit het gebied rond Antwerpen bekende septaria-lagen zijn in het tracé in mindere mate aanwezig. Septariën zijn kalkachtige concreties die in duidelijke horizonten voorkomen. De omvang ervan kan variëren van enkele cm's tot één meter en de maximale dikte bedraagt 30 cm. In de boormonsters van de

Westerschelde zijn alleen concreties van cm-grootte aangetroffen. Ook in België is bekend dat het onderste deel van de Klei van Boom duidelijk minder van deze septaria lagen heeft. De top van de Klei van Boom vertoont een sterk reliëf. In de Everingen is dat het gevolg van erosie die voor of tijdens de afzettingen van de glauconiethoudende zanden heeft plaatsgevonden. Ook in de Pas van Terneuzen heeft in dezelfde fase al erosie plaatsgevonden, gezien het voorkomen van kleine restanten van glauconietzand. Holocene erosie heeft vooral op de Middelpaas en in de Pas van Terneuzen plaatsgevonden.

De aangetroffen basis van de Klei van Boom is in overeenstemming met de regionale helling van de Tertiaire afzettingen in het gebied. Dit grensvlak is in de seismische opnamen, de boorgegevens, sonderingen en de boorgatmetingen duidelijk herkenbaar.

Binnen de Klei van Boom wordt ter plaatse van de Westerscheldetunnel (van boven naar beneden) de hieronder beschreven subeenheden onderscheiden. De grenzen tussen deze subeenheden verlopen over het algemeen geleidelijk, hetgeen vermoedelijk veroorzaakt wordt door subtiele en graduele verschuivingen in de afzettingsomstandigheden tijdens het sedimentatieproces.

- 6a Zwak tot sterk siltige lichtbruine klei met kalkrijke laagjes en kalkconcreties. Het kleigehalte (deeltjes < 2µm) bedraagt gemiddeld ca. 25%, maar is in de kalkrijke laagjes beduidend lager.
- 6b Zwak siltige stevige donkerbruine klei. Het kleigehalte ligt gemiddeld tussen 45 en 50%. Op enkele plaatsen komen kalkhoudende concreties voor. Deze concreties komen overeen met de uit België bekende septaria. In de boormonsters zijn ze slechts enkele cm's groot. In de literatuur worden grotere afmetingen voor septaria gemeld, zelfs tot 1 m doorsnede en een dikte van 10 tot 30 cm (Vandenbergh, 1978; Schittekat et al., 1983). Meestal betreft het dan septaria die in een stratigrafisch hoger (jonger) gelegen deel van de Klei van Boom voorkomen.
- 6c Zwak siltige bruine klei met dunne siltige en fijnzandige laagjes. De gemiddelde korrelgrootte van deze zanden ligt tussen 90 en 140 µm. De dikte van deze zandlaagjes bedraagt veelal enkele millimeters tot enkele centimeters. Zowel de verticale als de laterale verbreiding van deze zandlaagjes is gering. Het gemiddelde kleigehalte ligt tussen 50 en 60%. Plaatselijk komen kleine concreties voor.
- 6d Zwak siltige bruingrijze klei met dunne siltrijke laagjes. Het kleigehalte varieert tussen 25 en 50%. Het kleigehalte neemt met toenemende diepte geleidelijk af. Vooral de siltige trajecten vertonen sporen van graafgangen (bioturbatie). Plaatselijk komen fijne schelpresten voor.
- 6e Zwak tot matig siltige grijze klei, met fijnzandige laagjes. Het zandgehalte neemt naar onderen geleidelijk toe. Het kleigehalte ligt gemiddeld tussen 20 en 40%. De klei in deze laag is steeds kalkhoudend.

Onder de Pas van Terneuzen worden de zones 6d en 6e aangetroffen, onder de Everingen zijn de zones 6c tot 6e aanwezig. Onder de Middelplaat wordt de gehele cyclus van 6a tot en met 6e aangetroffen.

Scheuren werden verwacht in de top van de Klei van Boom en zijn dan het gevolg van opheffing en erosie (RGD, 1992), maar zijn in recente studies niet aangetroffen (WOV/GD, 1995b).

4.2 Geotechnische indeling van de Klei van Boom

In het kader van het ingenieurs-geologische onderzoek heeft Grondmechanica Delft de Klei van Boom in twee geotechnische zones verdeeld (WOV/GD, 1995b).

Zone 43 Klei van Boom, zwak tot matig siltig incidenteel enkel dunne zandlaagjes of zandlenzen (dikte < 2mm).

Zone 44 Klei van Boom, matig tot sterk siltig met dunne zandlaagjes en zandlenzen (dikte < 2 mm) en lokaal (zeer) sterk siltige tot kleiige zandlagen (dikte gemiddeld 0,5 m), tevens bestaat Zone 44 lokaal uit lithologie van zone 43 (die in banden voorkomt.)

4.3 Geomechanische eigenschappen

De gegevens die gebruikt zijn voor onderstaande inventarisatie van geomechanische eigenschappen van de Klei van Boom zijn gebaseerd op laboratoriumanalyses van WOV/GD (1994, 1995a, c), RGD (1992) en interpretatie van gegevens voor dit onderzoek.

4.3.1 Volumieke gewichten, watergehalten en Atterbergse grenzen

Het natte eenheidsgewicht van de Klei van Boom varieert van 19 tot 21 kN/m³, het droge eenheidsgewicht van 15 tot 16 kN/m³ en het natuurlijk watergehalte (bij 105 °C drogen) van 17 tot 33 % (Bijlage A). Het eenheidsgewicht van de Klei van Boom varieert weinig, terwijl het watergehalte grote verticale variatie vertoont. Binnen een meter in een boring kan het watergehalte 10 % hoger of lager worden. De plasticiteitsgrens van de Klei van Boom varieert tussen 10 en 30 % (gemiddelde is 22%) en de vloeigrens varieert van 30 tot 100 % (gemiddelde 70 %; Bijlage B).

Het gemiddelde watergehalte van de Klei van Boom onder de Westerscheide bedraagt 25 %, welke waarde erg dicht bij de gemiddelde waarde van de plasticiteitsgrens van 22 % ligt. In Fig. 15 staan deze gegevens voor de relevante deeltrajecten weergegeven. De Klei van Boom wordt op basis van deze gegevens in een Casagrande chart geclassificeerd als hoog plastisch klei (categorie CH). De porositeit vertoont, analoog aan het watergehalte, een grote variatie van 33 tot

49 %. Het watergehalte versus lutumgehalte van de Klei van Boom onder de Westerschelde staat weergegeven in Fig. 16. Het verband geeft aan dat monsters met een hoge lutumgehalte eveneens een hoog watergehalte hebben. Kleiige sedimenten bevatten dus niet minder water dan zandige sedimenten met lage lutumgehalten.

4.3.2 Doorlatendheid

De verticale doorlatendheid is gemeten van de eenheden BK1 en BK2 (top van de Klei van Boom volgens Schittekat et al. 1983) met de 'falling head' methode (WOV/GD, 1995c). De gemeten doorlatendheden van deze twee geologische eenheden variëren van 0,01 tot $6,1 \times 10^{-9}$ m/s. Hierbij kan worden opgemerkt dat de doorlatendheid van BK1 een factor 10 tot 100 lager is dan in BK2.

Tevens zijn er verticale doorlatendheden bekend van de eenheid BK3-I die direct onder BK2 ligt. De gemeten verticale doorlatendheden liggen in de orde grootte van 10 tot 40×10^{-9} m/s (RGD, 1992). Voornoemde metingen suggereren een toename van de doorlatendheid naar de basis van de Klei van Boom. Deze trend komt overeen met de toename van de korrelgrootte naar de basis.

Horizontale doorlatendheden in gelaagde sedimenten zijn normaliter hoger dan de verticale doorlatendheden. Tevens is de verwachting dat de doorlatendheid toeneemt naar de basis van de Klei van Boom (naar de top van het Zand van Berg) tot ca. 1×10^{-5} m/s. Deze verwachting is gebaseerd op een toenemende zandfractie naar de basis van de Klei van Boom.

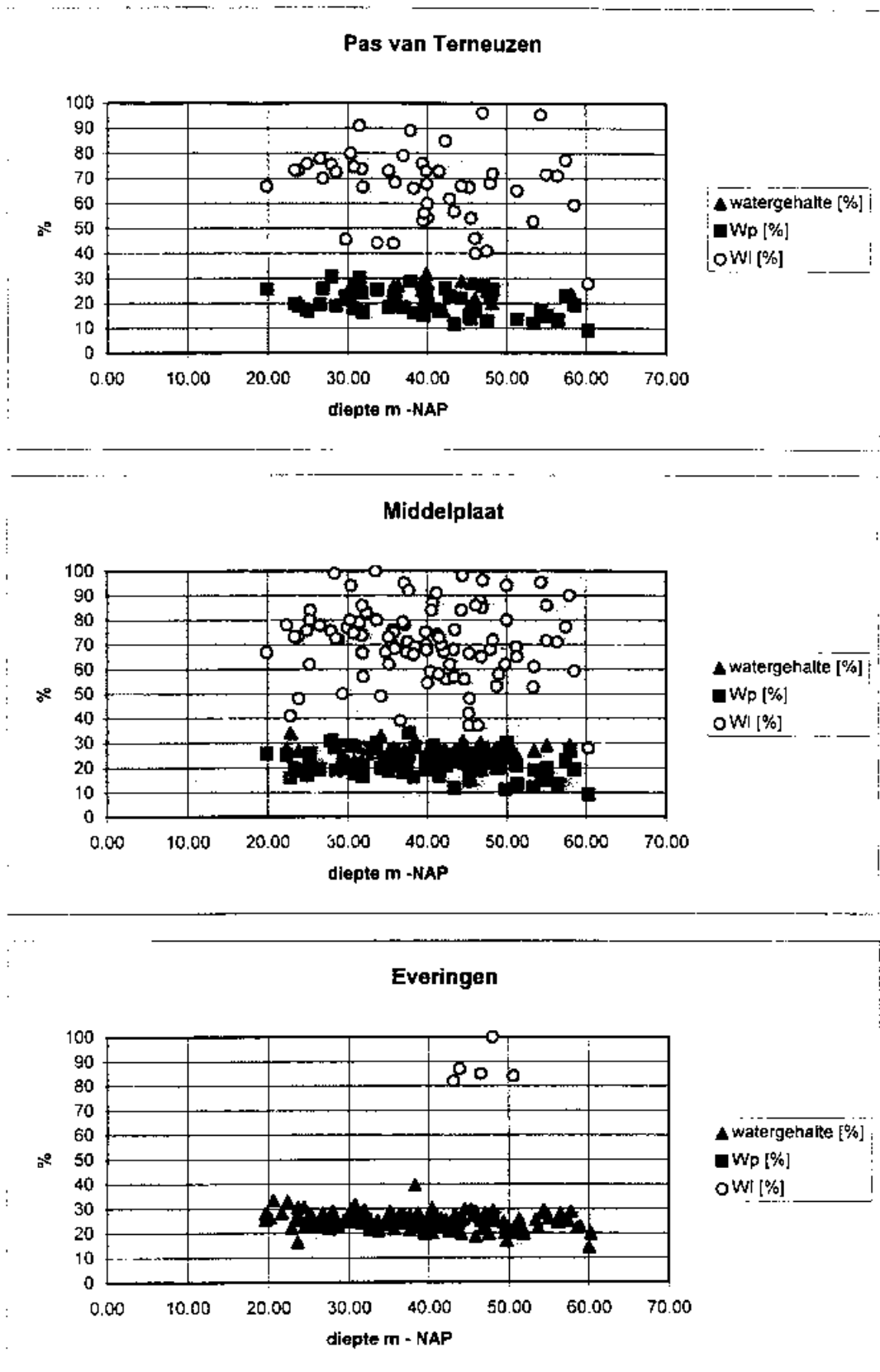


Fig. 15 Watergehalte, plasticiteits- en vloeigrens versus diepte in het gebied van de Pas van Terneuzen, Middelpaalt en Everingen.

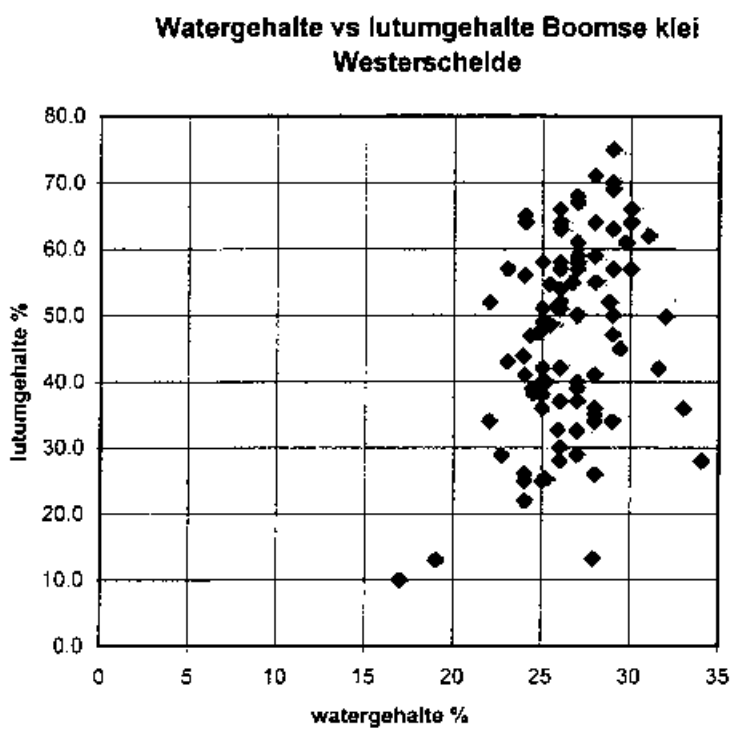


Fig. 16 Watergehalte versus lutumgehalte van de Klei van Boom onder de Westerschelde.

4.3.3 Korrelgrootte distributie

De lutumfractie ($< 2 \mu\text{m}$) van de Klei van Boom varieert van 20 tot 70 %. De basis van de Klei van Boom is zandiger waarbij de korrelgrootte geleidelijk overgaat in het Zand van Berg dat direct onder de Klei van Boom liggen. Slechts in de onderste helft van de Klei van Boom worden significante silten en klei- en silt houdende zandige laagjes gevonden.

4.3.4 Sterkte-eigenschappen

De gemeten variatie van ongedraineerde schuifsterkte (f_u vrije prisma, f_u penetro, f_u torvane en f_{uu} triaxiaal) van de Klei van Boom is groot (Fig. 17) en is waarschijnlijk het gevolg van verstoring van de korrelstructuur tijdens monstername. De gedraineerde schuifsterkte van de Klei van Boom kan ook worden geschat met de conusweerstand q_c van de Klei van Boom. De conusweerstand vertoont een homogeen beeld en bedraagt gemiddeld 4 á 5 MPa (aan top ca. 6 á 7 MPa). Wanneer deze omgerekend wordt naar ongedraineerde sterkte $f_{u,qc}$ van 200-325 kPa (aan de top 300 - 450 kPa), komt deze goed overeen met de ongedraineerde sterkte UU van 297 - 300 kPa die in het laboratorium bepaald is. De omrekening van q_c naar ongedraineerde sterkte is uitgevoerd volgens de methode van Robertson & Campanella (1983).

4.3.5 Overconsolidatie

Uit een nadere beschouwing van de oedometerproefresultaten gepresenteerd in rapport CO-350690/351 (GD, WOV, 1995c) lijkt de pre-consolidatiespanning tussen ca. 1000-2000 kPa te liggen. Dit impliceert dat de OCR ter plaatse van de WOV tussen ca. 5 en 10 ligt. De preconsolidatiespanning heeft een aantal oorzaken. Gezien de ouderdom van de Klei van Boom kan een groot deel toegeschreven worden aan 'aging'. Verder wordt aangenomen dat er erosie heeft plaatsgevonden na een opheffingsfase, waardoor het pakket in dikte gereduceerd is.

4.3.6 Elasticiteit

In de literatuur zijn enige gegevens gevonden over de verandering van elasticiteitsmoduli tijdens bevriezing van de Klei van Boom van de locatie Mol. Deze moduli staan weergegeven in Tabel 2 en representeren E-moduli die gemeten zijn bij uni-axiale druksterkte proeven (Thimus, 1989). De E-modulus neemt bij bevriezing toe van 146 MPa bij 20 °C tot 780 MPa bij -30 °C.

De elasticiteitsmoduli van de Klei van Boom op de Westerschelde locatie zijn in-situ bepaald met de pressiometer en aan vrije prisma- en uu-proeven in het laboratorium (WOV/GD 1995).

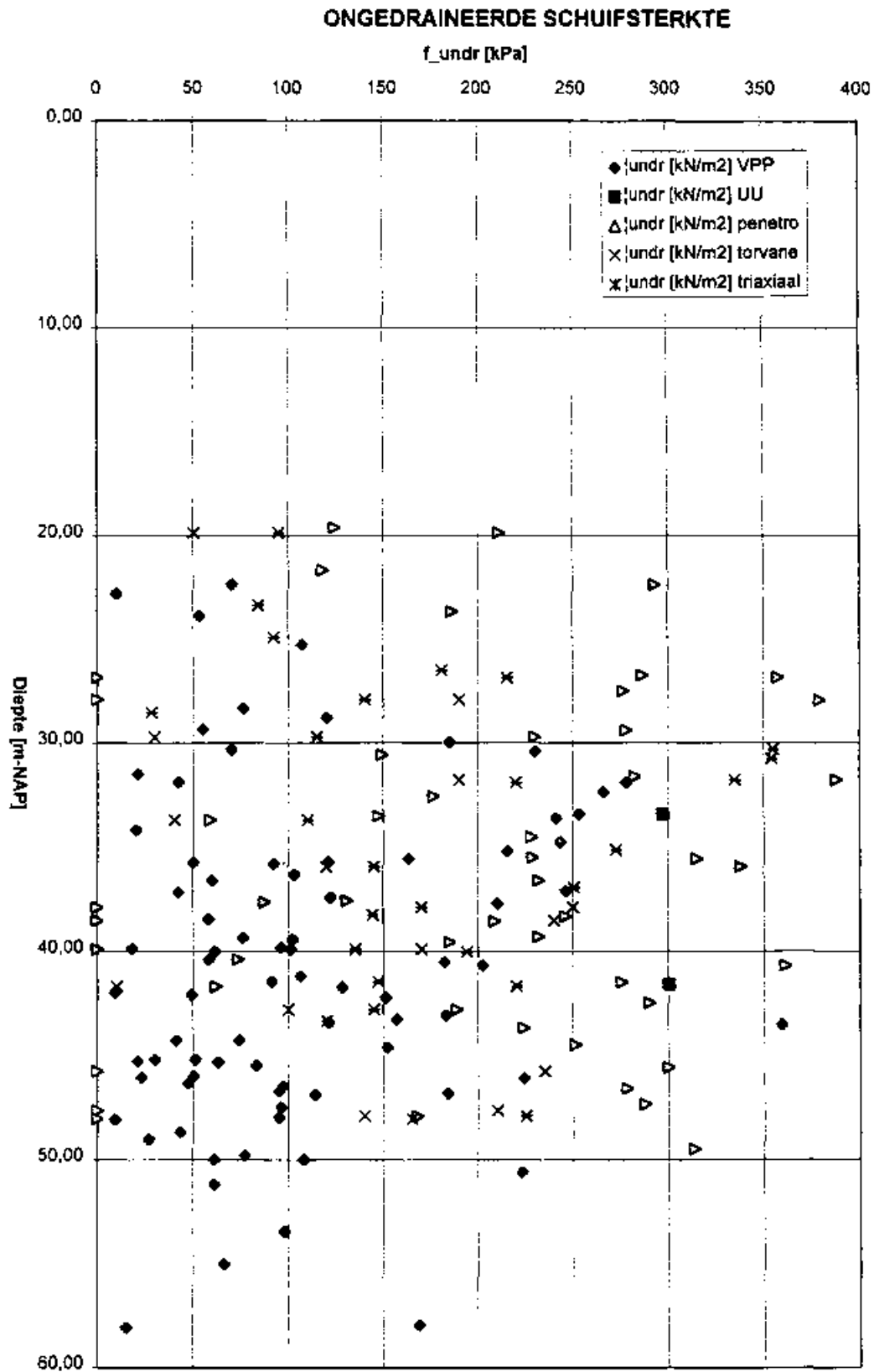


Fig. 17 De variatie in ongedraineerde schuifsterkte van de Klei van Boom bij de Westerscheldetunnel.

Tabel 5 Geomechanische en geohydrologische parameters van de Klei van Boom bij de Westerscheldetunnel (* gemiddelde waarde).

parameter	Klei van Boom
Mineralogie	Kaoliniet 18 % Illiet 35 % Montmorill. 47 %
Korrelfractie < 0,002 mm (%) *	46
w_L (%) *	70
w_P (%) *	22
I_P (%) *	48
γ_n (kN/m ³) *	19,5
γ_d (kN/m ³) *	15,4
γ_s (kN/m ³) *	26,7
n (%)	43
w_{105} (%) *	25
S (%) *	96
k_v (m/s)	1×10^{-7} tot 6×10^{-9}
$f_{uu\ undr}$ (kPa)	290-300
E (MPa)	8 - 50

w_L	vloeigrens	γ_n	eenheidsgewicht nat sediment
w_P	plasticiteitsgrens	γ_d	eenheidsgewicht droog sediment
I_P	plasticiteitsindex	γ_s	eenheidsgewicht van de korrels

w_{105}	watergehalte (105 °C drogen)	S	waterverzadigingsgraad
k_v	verticale doorlatendheid		

$f_{uu\ undr}$ ongedraineerde sterkte triaxiaal

E elasticiteitsmodulus (range afgeleid uit sonderingen, pressiometerproeven en vrije prismaproeven)

4.4 Geochemische eigenschappen

4.4.1 Variatie zoutgehalte in de Klei van Boom onder het WOV-traject

In drie Westerschelde boringen (48G160, 48G158 en 54E268) is het zoutgehalte in het poriënwater van de Klei van Boom bepaald (Bijlage C). De variatie van het zoutgehalte met de diepte is voor deze boringen in Fig. 18 uitgezet. Hieruit blijkt dat het bovenste deel van de Klei van Boom (bovenste twee monsters van iedere boring) het zoutgehalte in het poriënwater ongeveer 20.000 mg/l bedraagt. Vanaf de bovenkant van de Klei van Boom neemt het zoutgehalte hyperbolisch tot vrijwel nul af over een afstand variërend tussen de 10 à 12 meter. In twee van de drie boringen is tot aan de onderkant van de Klei van Boom geen zout in het poriënwater aanwezig.

In boring 48G160 wordt in tegenstelling tot de twee andere boringen over het traject tussen 42 en 46 meter beneden NAP zout aangetroffen (Fig. 18). Het diepste monster in deze boring, genomen uit het Zand van Berg, bevat weer zout. Dit is ook waargenomen in een filter op de Middelpaalt onder de Klei van Boom. Tevens blijkt dat het grondwater in dit filter het getijdenverloop van de Westerschelde volgt (RGD, 1992; NITG-TNO, 1997). Dit betekent dat er een hydraulisch contact bestaat tussen het Zand van Berg en de geul van de Westerschelde in het studiegebied.

4.4.2 Interpretatie van de variatie in het zoutgehalte van de Klei van Boom onder het WOV-traject

Om de variatie van het zoutgehalte in het poriënwater van de Klei van Boom te kunnen begrijpen, zijn de volgende twee punten uit de geologische reconstructie van het gebied waarin het WOV-traject ligt van belang:

- 1) Hoewel de Klei van Boom van oorsprong een mariene afzetting is, is deze klei sedert het Pliocen (ca. 5 milj. jaar B.P.) geheel verzoet.
- 2) In de periode na 1530 na Chr. is de Klei van Boom weer onder invloed van zout grondwater komen te staan als gevolg van inundatie van de zee (zie par. 4.5).

Uit de beschikbare gegevens van de Klei van Boom onder het WOV-traject blijkt dat het poriënwater in de bovenkant van de Klei van Boom (1 à 2 meter) hetzelfde zoutgehalte heeft als het water in de Westerschelde bij Ellewoutsdijk (20.000-24.000 mg/l, januari 1991, DIHO niet gepubliceerde gegevens). Dit betekent dat de bovenkant van de Klei van Boom een geohydrologische verbinding heeft met de Westerschelde en hiermee het zoute oppervlakte water vrij uitwisselt.

De hyperbolische afname van het zoutgehalte geeft aan dat het zoute Westerschelde water in de verzoete Klei van Boom diffundeert (Appelo & Willemsen, 1987; Beekman, 1991; Appelo & Postma, 1994). Modelberekeningen voor de intrusie van zeewater in een zoetwater sediment geven aan dat dit zeewater

in honderd jaar tot 6 m in dit sediment kan diffunderen (Appelo & Postma p. 377, 1994).

Uit de profielen in Fig. 18 blijkt dat het Westerschelde water tot een diepte variërend tussen de 6 en 8 m door het Westerschelde water geïnfilteerd is. Wanneer dezelfde effectieve diffusie-constante voor de Klei van Boom als in de berekeningen van Appelo & Postma (1994) wordt gebruikt, dan betekent dit dat het Westerschelde water minimaal al 100 jaar in de Klei van Boom diffundeert. De berekende tijdsduur van verzilting van minimaal 100 jaar en maximaal van 450 jaar (op basis van geologische gegevens) geven aan dat de verzilting ter plaatse van het WOV-traject van recente datum is.

Uit de sonderingen is de verzilting niet op te maken. Theoretisch zou zout poriënwater de klei sterker moeten maken. Waarschijnlijk wordt dit door de hoge overconsolidatiegraad verhindert.

4.4.3 Mineralogie van de Klei van Boom

De Klei van Boom bij de Westerschelde bevat een hoog gehalte van 45 tot 50 % smectiet (Bijlage D). Het gehalte kaoliniet van de Klei van Boom in de Westerschelde is lager dan in Mol en wordt waarschijnlijk veroorzaakt door verschillend interpretatiemethodieken of door verschillende brongebieden van het sediment.

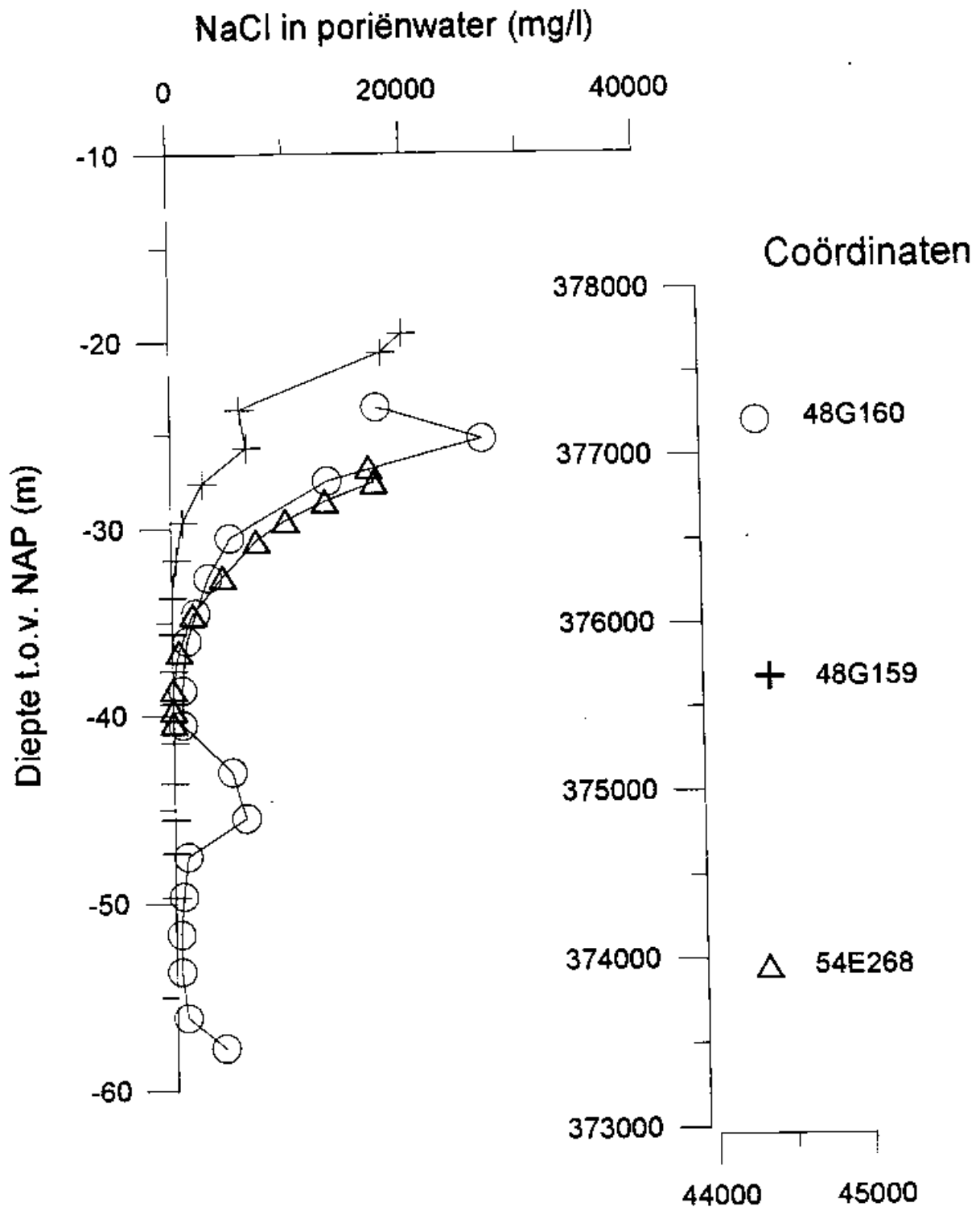


Fig. 18 Zoutgehalten van het poriënwater van de Klei van Boom in drie boringen in de Westerschelde.

4.5 Permafrost en verzilting gedurende het Kwartair

In deze paragraaf wordt de geologische geschiedenis van de Westerschelde in relatie tot de mariene (zout water) invloeden op de Klei van Boom besproken. Gedurende het Tertiair (65–5 Ma geleden) is als gevolg van regionale bodembeweging een afwisseling van sedimenten in Zeeland ontstaan. De top van de Klei van Boom wordt in het deeltracé Everingen bedekt door glauconiethoudende zanden van de Formatie van Breda en door peri-glaciale afzettingen van de Eem Formatie (Middelplaat, Pas van Terneuzen en Oever Zeeuwsch-Vlaanderen). Dit betekent dat de Klei van Boom gedurende de ijstijden van het Pleistoceen aan de oppervlakte heeft gelegen in het gebied van de Westerschelde. Op basis van de regionaal-geologische kartering en kennis is de onderstaande geologische reconstructie samengesteld (RGD, 1992; Vos & Van Heeringen, 1997; NITG-TNO, 1997):

Oligoceen (35-23 milj. jaar geleden): Afzetting van de Klei van Boom onder mariene (zout water) omstandigheden.

Mioceen / Pliocene (23-2 milj. jaar geleden): Mariene sedimentatie en erosie in het gebied van de Westerschelde.

Vroeg-Pleistoceen (2- 1,5 milj. jaar geleden): Mariene erosie, behalve op de oever Zuid-Beveland.

Laat-Pleistoceen (1,5 milj. jaar geleden - 10.000 voor Chr.): Op noordelijke oever na geheel geërodeerd onder continentale omstandigheden tijdens lage zeespiegel, tevens ontzilting van de Klei van Boom.

Holoceen Calais (van 6500 tot 5000 voor Chr.): waarschijnlijk lichte mariene erosie, doordat het gebied in deze tijd grensde aan het gebied met continentale afzettingen (zeespiegel ongeveer op NAP - 5,00 m.

Holoceen, Duinkerke (van 400 tot 700 na Chr.): lokaal sterke erosie, huidige geulen in de Westerschelde zijn in aanleg ontstaan. In het gebied van de Westerschelde is een kustfacies aanwezig; getijdenwerking is actief.

Van 700 tot 1530 na Chr.: geulactiviteit met beperkte mariene invloed en een geuldiepte van 10-15 m. *Van 1530 na Chr. tot heden:* Westerschelde hoofdgeulen zijn ontstaan met een diepte van 20-30 m. Gedurende de laatste eeuw is de Pas van Terneuzen uitgediept tot meer dan 30 m (Vos & Van Heeringen, 1997).

Op basis van regionale kennis van de bekkengeschiedenis is vastgesteld dat de Klei van Boom tijdens de permafrost gedurende het Pleistoceen reeds overgeconsolideerd was. De huidige geulen in het estuarium van de Westerschelde zijn pas ontstaan vanaf 400 na Chr. Verzilting van de Klei van Boom is opgetreden sedert de laatste Duinkerke transgressie vanaf 1530 na Chr. (NITG-TNO, 1997).

Het is mogelijk dat delen van de Klei van Boom gedurende het Pleistocene glaciële klimaat bevroren zijn geweest. Permafrost kan bij de Westerschelde, afhankelijk van de klimaatgrenzen tijdens de Pleistocene ijstijden van het glaciaal, dieptes tot 50 m onder het oppervlakte hebben bereikt. Dit kan betekenen

dat delen van de top van de Klei van Boom al een keer langdurig (langer dan 1000 jaar) bevroren zijn geweest. Hierover is echter niet met zekerheid uitsluitel te geven.

5 Verwachte effecten van bevroren op de sterkte-eigenschappen van de Klei van Boom bij de Westerschelde

5.1 Structuur van de Klei van Boom en kleisoort

De Klei van Boom onder de Westerschelde kan in geotechnische zin niet als een homogeen lichaam worden beschouwd. De doorlatendheid naar de top en de basis neemt toe tot meer dan 1×10^{-5} m/s, het zoutgehalte in de Klei van Boom neemt toe tot meer dan 20.000 mg Cl/l, het kleigehalte bedraagt ca. 46 % en varieert slechts weinig. De zandige eenheden aan de basis en de top van de Klei van Boom bevatten een significant hoger gehalte zand- en silt.

De Klei van Boom bestaat voor ca. 45 % uit zwellende mineralen. Bevriezing van zwellende kleimineralen onder lage effectieve spanningen kan volumetoename aan het vriesfront tot gevolg hebben als gevolg van de ontwikkeling van een zuigingspotentiaal.

5.2 Sterkte-eigenschappen en kruip

Bevriezing van de Klei van Boom bij de Westerschelde heeft een verhoging van de sterkte en de E-modulus tot gevolg. Na ontdooiing van de Klei van Boom bij de Westerschelde, waarvan het watergehalte w (~ 25 %) ongeveer gelijk is aan de plasticiteitsgrens w_p (~ 22 %), wordt verwacht dat er weinig verandering in sterkte-eigenschappen op zullen treden. De effectieve schuifsterkte parameters (c' en ϕ') veranderen niet of slechts weinig als gevolg van een vries-dooi cyclus.

Bij overgeconsolideerde klei nemen de meeste auteurs een reductie in sterkte waar. Het betreft hier de lange termijn situatie waarbij een zeker tijdseffect (of kruip) geobserveerd wordt. Kruip gaat een grotere rol spelen bij te snelle dooi en bij hoge belastingen door de ontoereikende dissipatie van de waterspanning in de klei.

5.3 Doorlatendheid en dilatantie

Een minimale volumetoename en de bijbehorende spanningstoename kunnen berekend worden op basis van het watergehalte van de sedimenten en de doorlatendheid. In het middendeel van de Klei van Boom is er sprake van lage doorlatendheden. In de basis en de top van Klei van Boom is de permeabiliteit waarschijnlijk hoger dan in het middendeel. In de basis en de top van de Klei van Boom is een significant zoutgehalte gevonden.

De hoeveelheid toestromend water naar het vrieslichaam als gevolg van de

ontwikkelde zuigingspotentiaal is theoretisch te berekenen. Deze hoeveelheid is afhankelijk van (1) de vriestemperatuur, (2) de vriessnelheid en (3) de doorlatendheid van het kleimassief, en zal in bevroren toestand tot volumetoename leiden.

Na een bevries-ontdooi cyclus wordt van de Klei van Boom een lichte afname van de void ratio van het kleimateriaal verwacht. Hierbij is het mogelijk dat er scheuren en doorlatende zones ontstaan waarlangs water kan migreren.

In de delen van de Klei van Boom onder de Westerschelde met lage doorlatendheden van 1×10^{-7} m/s (en lager) wordt verwacht dat de volumetoename gering is. Dit is niet het geval bij de Pas van Everingen waar de verticale spanningen en de dikte van de Klei van Boom gering zijn.

5.4 Consolidatiegraad

De overconsolidatieratio (OCR) van de Klei van Boom bij de Westerschelde bedraagt 5-10. Voor zover er sprake is van texturele veranderingen in de klei door vries-dooi cycli, is door Van Vliet-Lanoë & Dupas (1991) waargenomen dat de textuur ook na vier tot vijf cycli stabiel bleef. De voor dit rapport berekende OCR-waarde van 5-10 van de Klei van Boom bij de Westerscheldetunnel leidt volgens Yamamoto et al. (1988) en Chamberlain & Gow (1979) tot een zeer geringe consolidatie als gevolg van een vries-dooi cyclus. In proeven werd consolidatie alleen geconstateerd in kleien van gemiddelde plasticiteit bij een OCR kleiner dan 4.

Als gevolg van bevriezing kan zowel het ontstaan van microscheurtjes in de klei als een verhoging van de doorlatendheid niet worden uitgesloten. Bij lage effectieve spanning bestaat hierdoor een kans op scheuren en verbindingen naar de Westerschelde. Het bevriezen van het Zand van Berg onder de Klei van Boom verhoogt de kans op opheffing en scheuren bij de Pas van Terneuzen.

Eerdere bevriezing van de Klei van Boom (met mogelijk verschillende vries-dooi cycli) tijdens permafrost gedurende de ijstijden kunnen ook een aandeel in de preconsolidatiespanning hebben.

5.5 Zoutgehalte

Zout water in kleien verlaagt de temperatuur van klei. De zouten blijven bij bevriezing in de residuaire pekelfase wanneer de temperatuur niet laag genoeg wordt. Uit testen is gebleken dat zout water wel befrist, maar pas bij lagere temperaturen dan -20 tot -30 °C. Aan de buitenzijde van het vrieslichaam in zoute klei ontstaat een schilvormige structuur van bevroren (zoet water) klei en

onbevoren laagjes met geconcentreerd zout water.

Het zoutgehalte in de Klei van Boom is op drie locaties gemeten (Middelplaat en Zeeuwsch-Vlaanderen) en deze bedraagt op de diepte van het geplande tunneltracé minder dan 5000 mg Cl/l. In de lagen direct boven de Klei van Boom neemt het zoutgehalte toe tot 20.000 mg Cl/l wat overeenkomt met het zoutgehalte van het Westerschelde water.

Er is weinig bekend over invloeden van zout op veranderingen van sterkte-eigenschappen van de Klei van Boom. Er is bij geotechnische testen die zijn uitgevoerd aan de Klei van Boom in België weinig tot geen aandacht besteedt aan invloed van zout, waarschijnlijk omdat het grondwater ter plaatse zoet is.

Samenvattend wordt gesteld dat er geen significant veranderingen van geomechanische eigenschappen van de Klei van Boom als gevolg van een bevroers-ontdooi cyclus te verwachten zijn. Verhoging van verticale en horizontale spanningen tijdens aanleg van de dwarsverbindingen is onder meer afhankelijk van bevroering van waterdoorlatende zones aan de basis en aan de top van de Klei van Boom.

In vergelijking met de locatie Mol in België is de sterkte van de Klei van Boom bij de Westerschelde lager (resp. ca. 2 MPa en 300 kPa). Dit verschil kan verklaard worden door de grotere begravingsdiepte in Mol of door de invloed van zout formatiewater. De onderzochte monsters zijn tevens afkomstig uit verschillende geologische zones van de Klei van Boom.

6 Aanbevelingen

Het uitvoeren van geotechnische laboratoriumtesten op de Klei van Boom met zout formatiewater gedurende een bevries-ontdooi cyclus geeft kwantitatieve informatie over het vervormingsgedrag. Hierbij kunnen effecten van kruip gemeten worden ten behoeve van het berekenen van spanningen op de tunnelsegmenten in het kleimassief. Het is bij deze laboratoriumtesten van belang de in-situ spanningstoestand zo goed mogelijk na te bootsen van de situatie vóór, tijdens en na bevriezing. Deze informatie is van belang in relatie tot verhoging van grondspanning tijdens het bevriezen.

Onder de Pas van Terneuzen kan water worden aangevoerd vanuit de water-doorlatende sedimenten van het Zand van Berg onder de Klei van Boom. Er zijn in deze zone geen gegevens over het zoutgehalte voorhanden, maar het is op basis van de geringe dikte van de Klei van Boom en de hogere doorlatendheid van het Zand van Berg te verwachten dat het zoutgehalte hoger zal zijn dan de relatief lage gemeten zoutgehalten in de Klei van Boom onder de Middelplaat. Als gevolg van bevriezing van de Klei van Boom onder de Pas van Terneuzen is het mogelijk dat er scheuren ontstaan. Kennis van het zoutgehalte in de Klei van Boom is van belang voor de aanleg van een vrieslichaam.

Aangezien de doorlatendheid als meest significante eigenschap met betrekking tot bevriezen worden beschouwd, wordt het aanbevolen om de oedometerproefresultaten volledig uit te werken. Meer kennis over de 'shut-off pressure' van de Klei van Boom lijkt relevant met betrekking tot het bevriezen van de Klei van Boom. De volumetoename van de klei, de verandering van geomechanische eigenschappen en de resulterende spanningen rond de dwarsverbindingen gedurende bevriezing, zijn van belang voor het ontwerp van de dwarsverbindingen.

De resultaten van deze studie lijken de discussie te rechtvaardigen over de noodzaak van bevriezing van de Klei van Boom onder de Middelplaat voor de aanleg van dwarsverbindingen. De tweede schacht op de locatie Mol in België wordt heden aangelegd zonder de Klei van Boom te bevriezen. Problemen bij de aanleg van de eerste schacht met kruip hebben hiertoe aanleiding gegeven. De beslissing over de constructiemethode kan niet worden genomen op basis van deze studie. Slechts grondige kennis van stijfheid, sterkte en doorlatendheid van de Klei van Boom, alsmede stabiliteitsberekeningen tijdens ontgraving (zonder bevriezing) behoren hieraan ten grondslag te liggen.

Monitoring van de uitbreidingsnelheid en de omvang van het aangelegde vrieslichaam, alsmede van de deformatie of spanning van de hoofdtunnelbuizen tijdens het vries en ontdooiproces wordt sterk aanbevolen.

Literatuur

- Appelo, C.A.J. and A. Willemssen (1987) *Geochemical calculations and observations on salt water intrusions, I.A. combined geochemical/mixing cell model*. J. Hydrol. 94, pp. 313-330
- Appelo, C.A.J. and D. Postma (1994) *Geochemistry, groundwater and pollution*. Ed. Balkema - Rotterdam, 536 pp.
- Aoyama, K., S. Ogawa and M. Fukada (1985) *Temperature dependencies of mechanical properties of soils subjected to freezing and thawing*. In: Proc. 4th Int. Symp. ground Freezing Sapporo, Aug. 1985" Rotterdam, Balkema, 1985, Vol. 1, pp. 217-222, 3 refs.
- Beekman, H.E. (1991) *Ion chromatography of fresh and salt water intrusion*. Ph.D Thesis, Vrije Univ. Amsterdam, 198 pp.
- Bondarenko, G.I. and A.V. Sadovsky (1991) *Water content effect of the thawing clay soils on shear strength*. In: "Ground Freezing 1991, Proc. 6th. Int. Symp. on Ground Freezing", Beijing, September, 1991, pp. 123-128
- Bourbonnais, J. and B. Ladanyi (1985) *The mechanical behaviour of a frozen clay down to cryogenic temperatures*. In: "Proc. 4th Int. Symp. ground Freezing Sapporo, Aug. 1985", Rotterdam Balkema, 1985, Vol. 1, pp. 237-244, 21 refs.
- Broms, B.B. and L.Y.C. Yao (1964) *Shear strength of a soil after freezing and thawing*. J. ASCE SM & FE Div, SM4, 1-25
- Chamberlain, E.J. (1980) *Overconsolidation effects of ground freezing under high pressure*. In: "Proc. 2nd IC on Permafrost, Yakutsk", 295-305
- Chamberlain E.J. and A.J. Gow (1979) *Effect of freezing and thawing on the permeability and structures of soils*, Engineering Geology, 13, pp. 73-92
- Chen Xiangsheng, Li Kun and Zhang Yunli (1991) *Temperature effects on mechanical characteristics of an artificially frozen typical clay under triaxial stress conditions* In: "Ground Freezing 1991, Proc. 6th. Int. Symp. on Ground Freezing", Beijing, September, 1991, pp. 129-134
- Czurda, K.A. and J.F. Wagner (1985) *Frost heave and clay expansion in freshwater clays*. In: "Proc. 4th Int. Symp. ground Freezing Sapporo, Aug. 1985" Rotterdam, Balkema, 1985, Vol. 1, pp. 129-136
- Funcken, R., P. Gonze, P. Vranken, P. Manfroy and B. Necdrael (1983) *Construction of an experimental laboratory in deep clay formation*. Eurotunnel '83 Conference, Basel, Switzerland, paper 9., pp 79-85

- Harris, J.S. (1995) *Ground freezing in practice*. Thomas Telford Services Ltd, London, pp. 264
- Hohman-Porebska, M. and K.A. Czurda (1997) *Cryogenical alterations of fabric and shear strength of clayey soils*. In: *ground freezing 97*, Kutsson (ed.) pp. 317-326
- Jessberger, H.L. (1982) *The application of ground freezing to soil improvement in engineering practice*. In "Symp. Soil and Rock Improvement, 1982, Balasubramanian", A.S. (ed.), Bangkok, A.I.T., 1982, paper E1, 27 pp.
- Ladanyi, B. and M. Shen (1985) *Mechanics of freezing and thawing in soils*. In: "Proc. Int. Symp. Frost geotech. Eng., Saariselka, March 1989", Espoo, VTT, 1989, Vol. 2, pp. 73-103
- Mitchell, J.K. (1995) *Fundamentals of soil behaviour*, John Wiley & Sons, New York, 2nd ed.
- Morgenstern, N.R. and J.F. Nixon (1971) *One-dimensional consolidation of thawing soils*, *Cndn. Geotech. J.*, 8, pp. 558-565
- Nagasawa, T. and Y. Umeda (1985) *Effects of the freeze-thaw process on soil structure*. In: "Proc. 4th ISGF, Sapporo", 2, pp. 219-224
- Nederlands Instituut Toegepaste Geowetenschappen-TNO (1997) *Holocene evolution of Zeeland (SW Netherlands)*, Meded. NITG-TNO 141 pp.
- Nixon, J.F. and N.R. Morgenstern (1973) *The residual stress in thawing soils*. *Cndn Geotech. J.*, 10-4, pp. 571-580
- Ogata, N., T. Kataoka and A. Komiya (1985) *Effect of freezing-thawing on the mechanical properties of soil*. In: "Proc. 4th Int. Symp. ground Freezing Sapporo, Aug. 1985" Rotterdam, Balkema, 1985, Vol. 1, pp. 201-207
- Rijks Geologische Dienst (1992) *Ingenieursgeologisch onderzoek Westerschelde Oeververbinding (WOV-tunnel)*, rapportnr. BP 11.016, 24 pp.
- Rijkswaterstaat Bouwdienst (1997) *Dwarsverbindingen Westerschelde met vriestechniek*, rapportage fase 1, 29 pp.
- Robertson, P.K. and R.G. Campanella (1983) *Interpretation of cone penetration tests. Part II: Clay*, *Can. Geotech. J.*, vol. 20. 1983, pp. 734-745
- Schababerle, R.J.F. Wagner and K.A. Czurda (1989) *Influence of freeze-thaw cycles on clay structures*. In 5th International Symposium on Ground Freezing, Jones & Holden eds., pp. 573-575

- Schittekat, J., J.P. Henriët & N. Vandenberghe (1983) *Geology and geotechnique of the Scheldt Surge Barrier, characteristics of an overconsolidated clay*. Proc. 8th Intern. Harbour Congress. K.N.V. Antwerp
- Thimus, J.Fr. (1989) *Caractéristiques physiques, mécaniques et rhéologiques d'un sol argileux lors de sa congélation - Application à l'argile de Boom*. Applied Science Thesis Université Catholique de Louvain.
- Thimus, J.Fr. & G. Henriët (1991a) *Influence of first phase change on the rheological behaviour of clay between 0 and -5 °C*. OMAE - Volume IV, Arctic/Polar Technology ASME, pp. 107-110
- Thimus, J.Fr., G. Henriët, P. Colin and Th. You (1991b) *Rheological behaviour of overconsolidated clay measured by creep test - Application to cryogenic storage*. In: Ground Freezing 1991, Proc. 6th. Int. Symp. on Ground Freezing, Beijing, September (eds. Yu & Wang), pp. 181-188
- Thimus, J.Fr., J. Aguirre-Puente & Fr. Cohen-Tenoudji (1991c) *Determination of frozen water content of an overconsolidated clay down to -160 °C by sonic approaches- Comparison with classical methods*, In: "Ground freezing '91" Yu & Wang (eds), pp 83-88
- Thimus, J.Fr. (1993) *Contribution of sonic propagation to the study of frost process and thermal degradation of frozen soils*. In: "Frost in geotechnical Engineering, Phukan" (ed.) Balkema, Rotterdam, pp. 51-57
- Vandenberghe (1978) *Sedimentology of the Boom Clay (Rupelian) in Belgium*. Verhand. Koninkl. v. Wetensch. Lett. en Sch. Kunst van België (Kl. Wetensch.), 40 (147), pp. 1-137
- Van Vliet-Lanoë, B. and A. Dupas (1991) *Development of soil fabric by freeze/thaw cycles - its effect on frost heave*. Proc. 6th ISGF, Beijing, 1, pp. 189-195
- Volckaert, G., B. Neerdael & Ph. Lalieux (1997) *Characteristics of argillaceous rocks: Boom Clay*. A catalogue of the Characteristics of Argillaceous Rocks studied with respect to radioactive waste disposals issues: Belgium, Canada, France, Germany, Italy, Japan, Spain.
- Wood, J.A. and P.J. Williams (1985) *Stress distribution in frost heaving soils*. In: "Proc. 4th Int. Symp. ground Freezing Sapporo, Aug. 1985" Rotterdam, Balkema, 1985, Vol. 1, pp. 165-171
- WOV/GD (1994) *Bijzondere metingen, Feitelijke eindrapportage veldonderzoek*, CO-350690/346
- WOV/GD (1995a) *Laboratoriumonderzoek, feitelijk eindrapport*, CO-350690/351

WOV/GD (1995b) *Geotechnische opinie Klei van Boom, Westerschelde Oeververbinding*, CO-350690/352

WOV/GD (1995c) *Geotechnische interpretatie grondonderzoeken*, CO-35690/378

Yamamoto, H. et al. (1988) *Effects of overconsolidation ratio of saturated soil on frost heave and thaw subsidence*. In: Proc. 5th IC on Permafrost, Trondheim, 1, 522-527

Yong, R.N., P. Boonsinsuk and C.W.P. Yin (1985) *Alteration of soil behaviour after cyclic freezing and thawing*. In: Proc. 4th Int. Symp. ground Freezing Sapporo, Aug. 1985, Rotterdam, Balkema, 1985, Vol. 1, pp. 187-195

Zhang Lixin, (1991) *The law of unfrozen water content in frozen saline (NaCl) soils*. In: Ground Freezing 1991, Proc. 6th. Int. Symp. on Ground Freezing, Beijing, September (eds. Yu & Wang), pp. 113-122

Bijlage A Watergehalten, droge en natte eenheidsgewichten

NITG- nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	watergehalte	eenheids gewicht	eenheids gewicht
					[%]	nat	droog
					w_g 105	γ_{nat} kN/m ³	γ_{dr} kN/m ³
54E0290	B-06	44322	374356	30.30	27	19.4	15.3
				31.45	30	18.3	14.1
				36.30	27	19.6	15.5
				39.35	29	19.1	14.8
				42.00	17	20.9	17.8
				45.30	19	20.4	17.1
54E0293	B-09	44327	374668	39.45	25	19.7	15.7
				45.50	28	19.3	15.1
				47.50	25	19.9	15.9
54E0294	B-010	44332	374766	48.10	20	20.6	17.1
				58.10	24	19.9	16.0
54E0296	B-011A	44374	374882	40.00	28	19.2	15.0
				42.25	26	20.0	16.0
				46.00	22	19.8	16.2
48G0205	B-013	44379	375066	35.70	27	19.3	15.2
				39.85	32	18.7	14.2
				44.30	29	18.8	14.5
				46.05	28	19.3	15.1
48G0206	B-014	44343	375164	25.27	25	20.0	16.0
				31.75	22	19.5	16.0
				34.15	33	18.7	14.1
				34.75	22	19.6	16.1
				37.50	25	19.8	15.9
				39.90	25	19.3	15.4
				42.35	24	19.4	15.6
				43.55	27	19.6	15.4
				44.45	31	19.0	14.5
45.20	24	19.1	15.4				
48G0207	B-015	44345	375265	25.20	20	20.4	17.0
				31.45	24	20.2	16.3
				31.90	23	20.4	16.6
				33.50	27	19.6	15.4
				37.10	27	20.0	15.8
				41.25	25	19.8	15.8
43.30	26	19.8	15.7				
48G0208	B-016	44349	375467	22.35	28	19.3	15.0
				25.25	24	20.2	16.3
				28.35	29	19.1	14.8
				32.35	26	19.9	15.8
				33.40	27	19.8	15.6
				35.55	25	19.7	15.8
				36.60	24	19.2	15.5
40.40	26	18.5	14.7				

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	watergehalte	eenheids gewicht nat	eenheids gewicht droog
					[%]	γ_{nat} kN/m ³	γ_{dr} kN/m ³
					w_g 105		
48G0208	B-016	44349	375467	41.60	25	19.8	15.9
				45.20	24	18.7	15.1
				46.70	30	19.2	14.8
48G0209	B-017	44381	375864	30.40	29	19.6	15.2
				37.15	27	19.4	15.3
				42.10	27	19.1	15.1
48G0210	B-018	44370	376266	29.95	23	20.1	16.3
				37.40	25	19.6	15.6
				37.70	26	19.7	15.6
				43.45	27	19.4	15.3
48G0211	B-019	44381	376664	22.80	34	18.3	13.7
				23.85	27	19.5	15.4
				28.80	28	19.6	15.4
				29.35	26	19.4	15.4
				33.60	27	19.6	15.4
				39.80	25	19.8	15.8
				44.65	26	19.7	15.6
				48.70	28	19.0	14.8
50.00	27	19.2	15.1				
48G0212	B-021	44396	377164	35.20	25	19.8	15.9
				40.70	28	19.6	15.4
				45.33	26	19.2	15.2
48G0213	B-022	44399	377264	35.70	24	19.8	15.9
				50.00	30	19.1	14.7
				46.35	28	19.1	14.9
48G0214	B-023	44400	377365	31.85	26	19.2	15.2
				35.80	28	19.8	15.4
				38.45	31	18.8	14.3
				41.75	26	19.5	15.4
				45.95	25	19.8	15.8
				46.90	26	19.7	15.7
				49.80	27	19.2	15.1
				50.60	28	19.3	15.1
53.45	27	19.5	15.4				
57.95	29	19.2	14.9				
48G0215	B-024	44404	377465	41.20	29	19.5	15.2
				44.30	27	19.5	15.3
				46.85	24	19.9	16.0
				51.20	25	19.0	15.2
48G0216	B-025	44404	377566	40.54	26	20.0	15.9
				46.12	26	19.7	15.6
				49.02	28	18.8	14.7
				55.03	29	19.0	14.7

NITG- nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	watergehalte [%]	eenheids	eenheids
						gewicht nat	gewicht droog
					w_g 105	γ_{nat} kN/m ³	γ_{dr} kN/m ³
48G0216	B-025	44404	377566	46.50	27	20.0	15.7
				50.60	24	19.9	16.0
48G0219	B-028	44424	378165	43.10	25	19.8	15.9
				48.00	29	19.4	15.0
48G159	-	44360	375675	19.60	27.8	-	-
				19.62	25.3	-	-
				20.17	26.4	-	-
				20.62	33.3	-	-
				21.65	28.2	-	-
				22.35	32.9	-	-
				23.65	30.3	-	-
				23.82	26.6	-	-
				24.40	30.6	-	-
				25.50	25.4	-	-
				25.72	22.9	-	-
				26.55	23.1	-	-
				27.62	23.0	-	-
				27.65	24.4	-	-
				27.95	28.8	-	-
				28.65	24.0	-	-
				29.60	25.5	-	-
				29.67	24.5	-	-
				30.60	24.9	-	-
				31.55	24.4	-	-
				32.65	25.4	-	-
				33.60	24.7	-	-
				33.67	21.1	-	-
34.60	24.0	-	-				
35.55	24.7	-	-				
35.62	21.6	-	-				
36.32	27.8	-	-				
36.70	27.7	-	-				
37.60	27.4	-	-				
37.62	25.6	-	-				
38.30	25.3	-	-				
38.50	27.4	-	-				
39.30	23.8	-	-				
39.37	20.8	-	-				
40.40	30.2	-	-				
40.70	27.8	-	-				
41.47	23.2	-	-				
41.50	24.4	-	-				
42.10	25.0	-	-				
42.50	21.0	-	-				
43.25	27.6	-	-				
43.62	23.9	-	-				
43.70	25.4	-	-				
44.25	25.8	-	-				
44.50	29.9	-	-				

NITG- nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m NAP	watergehalte	eenheids gewicht nat	eenheids gewicht droog
					[%]	γ_{nat} kN/m ³	γ_{dr} kN/m ³
					$w_{g 105}$		
48G159	-	44360	375675	45.54	27.0	-	-
				45.60	27.6	-	-
48G159	-	44360	375675	45.76	28.7	-	-
				46.60	25.4	-	-
				47.32	25.2	-	-
				47.35	27.5	-	-
				47.65	27.4	-	-
				49.50	20.2	-	-
				49.67	16.8	-	-
				50.15	21.4	-	-
48G160	-	44300	377200	22.85	22.3	-	-
				23.35	25.4	-	-
				23.60	16.3	-	-
				24.50	22.8	-	-
				24.88	26.0	-	-
				25.30	26.7	-	-
				26.50	25.4	-	-
				26.65	23.9	-	-
				28.20	23.9	-	-
				30.30	30.1	-	-
				30.50	25.6	-	-
				30.73	31.6	-	-
				31.88	29.4	-	-
				32.60	23.5	-	-
				33.65	21.7	-	-
				34.50	23.6	-	-
				35.13	28.8	-	-
				36.00	24.2	-	-
				36.93	26.7	-	-
				37.30	25.3	-	-
				38.25	39.7	-	-
				38.65	28.1	-	-
				39.40	19.9	-	-
				40.03	26.2	-	-
				40.50	25.5	-	-
				41.48	25.8	-	-
				41.80	23.1	-	-
				43.05	23.0	-	-
				43.35	23.3	-	-
				44.00	19.9	-	-
				45.25	29.7	-	-
				46.70	22.0	-	-
				47.00	28.0	-	-
				47.50	19.8	-	-
				48.23	25.2	-	-
				49.33	24.5	-	-
				49.60	22.7	-	-
				50.60	21.8	-	-
				51.28	25.6	-	-

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	watergehalte	eenheids gewicht nat	eenheids gewicht droog
					[%]	γ_{nat} kN/m ³	γ_{dr} kN/m ³
					w_g 105		
48G160	-	44300	377200	51.65	21.9	-	-
				53.35	25.4	-	-
				53.65	22.5	-	-
				54.33	29.3	-	-
				54.65	28.0	-	-
48G160	-	44300	377200	55.03	25.9	-	-
				56.10	24.4	-	-
				56.43	27.9	-	-
				56.80	26.0	-	-
				57.47	24.8	-	-
				57.75	28.9	-	-
				58.53	22.3	-	-
				58.90	22.6	-	-
				60.00	14.4	-	-
				60.23	19.9	-	-
54E268	-	44330	373950	26.75	28.1	-	-
				26.77	24.8	-	-
				26.84	24.4	-	-
				27.50	24.1	-	-
				27.57	21.7	-	-
				28.50	23.4	-	-
				28.57	23.4	-	-
				29.40	25.2	-	-
				29.57	24.9	-	-
				30.55	24.6	-	-
				30.67	24.8	-	-
				31.60	27.7	-	-
				32.55	21.3	-	-
				32.57	22.7	-	-
				33.50	24.8	-	-
				34.50	24.9	-	-
				34.57	23.7	-	-
				35.50	25.6	-	-
				35.78	24.5	-	-
				36.57	24.2	-	-
36.60	26.1	-	-				
37.55	21.4	-	-				
38.55	24.3	-	-				
38.57	22.6	-	-				
39.55	24.3	-	-				
39.67	23.0	-	-				
40.37	20.2	-	-				
40.40	23.2	-	-				
45.82	18.7	-	-				
51.82	20.0	-	-				

Bijlage B Atterbergse grenzen w_p , w_l en plasticiteitsindex I_p

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	W _p [%]	W _i [%]	I _p [%]
48G0159	-	44360	375675	19.85	25.6	66.9	41.3
				23.77	18.6	73.3	54.7
				27.92	30.8	75.5	44.7
				31.77	24.2	73.8	49.6
				35.92	23.9	68.4	44.5
				39.90	23.2	67.8	44.6
				42.82	22.8	61.9	39.1
		47.92	22.0	68.0	46.0		
48G0160	-	44300	377200	23.35	19.9	73.3	53.4
				24.88	16.9	75.8	58.9
				26.50	19.5	77.8	58.3
				28.52	18.9	72.5	53.6
				30.30	21.3	80.0	58.7
				30.73	17.8	74.7	56.9
				31.88	16.3	66.6	50.3
				35.13	18.4	73.0	54.6
				36.93	18.2	79.1	60.9
				38.25	16.1	66.0	49.9
				40.03	19.3	54.3	40.0
				41.48	16.7	72.8	56.1
				43.35	11.6	56.8	45.2
				45.25	14.6	66.4	51.8
				47.00	26.9	96.2	69.3
				48.23	25.3	71.9	46.4
				51.28	13.4	65.1	51.7
				53.35	12.0	52.7	40.7
				54.33	17.3	95.3	78.0
				55.03	14.9	71.6	56.7
56.43	13.3	71.0	57.7				
57.47	22.9	77.2	54.3				
58.53	19.3	59.3	40.0				
		60.28	9.1	27.9	18.8		
54E268	-	44330	373950	26.85	26.0	70.0	44.0
				29.71	22.7	45.6	22.7
				33.68	25.3	44.2	18.9
				37.87	28.9	89.1	60.2
54E0290	B-06	44322	374356	31.45	30.0	91.0	61.0
				39.35	25.0	76.0	51.0
				39.45	15.0	53.0	38.0
				39.60	17.0	56.0	40.0
				45.50	14.0	54.0	40.0
		47.50	13.0	41.0	27.0		
54E0296	B-011A	44374	374882	40.00	19.0	60.0	41.0
				42.25	26.0	85.0	59.0
				46.00	17.0	46.0	29.0
48G0205	B-013	44379	375066	35.70	22.0	44.0	22.0
				39.85	20.0	73.0	53.0
				44.30	22.0	67.0	45.0

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	W _p [%]	W _i [%]	I _p [%]
48G0205	B-013	44379	375066	46.05	18.0	40.0	22.0
48G0206	B-014	44343	375164	25.27	26.0	84.0	58.0
				31.75	22.0	67.0	45.0
				34.15	20.0	49.0	29.0
				34.75	23.0	67.0	44.0
				37.50	20.0	71.0	51.0
				39.90	24.0	70.0	46.0
				42.35	21.0	56.0	35.0
				43.55	29.0	113.0	84.0
				44.45	26.0	98.0	72.0
				45.20	21.0	42.0	21.0
48G0207	B-015	44345	375265	25.20	22.0	62.0	41.0
				31.45	25.0	79.0	54.0
				31.90	21.0	57.0	36.0
				33.50	26.0	100.0	74.0
				37.10	25.0	95.0	70.0
				41.25	22.0	74.0	51.0
				43.30	23.0	68.0	45.0
48G0207	B-016	44349	375467	22.35	25.0	78.0	53.0
				25.25	25.0	80.0	55.0
				28.35	28.0	99.0	71.0
				32.35	27.0	83.0	56.0
				35.55	21.0	70.0	49.0
				36.60	22.0	39.0	17.0
				40.40	20.0	59.0	38.0
				41.45	19.0	58.0	38.0
				45.20	24.0	37.0	13.0
				46.70	22.0	88.0	66.0
48G0209	B-017	44361	375864	30.40	29.0	94.0	65.0
				37.15	25.0	78.0	53.0
				42.10	21.0	67.0	46.0
48G0210	B-018	44370	376266	29.95	21.0	77.0	56.0
				37.40	21.0	67.0	46.0
				37.70	34.0	92.0	58.0
				43.45	25.0	76.0	52.0
48G0211	B-019	44381	376664	22.80	16.0	41.0	24.0
				23.85	19.0	48.0	29.0
				28.80	29.0	72.0	43.0
				29.35	20.0	50.0	30.0
				33.60	30.0	80.0	50.0
				39.80	21.0	75.0	54.0
				44.65	22.0	56.0	34.0
				48.70	20.0	53.0	33.0
				50.00	24.0	94.0	60.0
48G0212	B-021	44396	377164	35.20	24.0	62.0	38.0
				40.70	29.0	87.0	58.0

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	W _p [%]	W _i [%]	I _p [%]
48G0212	B-021	44396	377164	45.33	20.0	48.0	28.0
48G0213	B-022	44399	377264	35.70	25.0	76.0	51.0
				50.00	30.0	80.0	50.0
				46.35	26.0	37.0	11.0
48G0214	B-023	44400	377365	31.85	28.0	86.0	58.0
				35.80	27.0	75.0	48.0
				38.45	28.0	69.0	41.0
				41.75	26.0	70.0	43.0
				46.90	28.0	85.0	57.0
				49.80	11.0	62.0	51.0
				53.45	19.0	61.0	42.0
				57.95	27.0	90.0	63.0
48G0215	B-024	44404	377465	41.20	26.0	91.0	66.0
				44.30	24.0	84.0	60.0
				46.85	19.0	65.0	46.0
				51.20	21.0	69.0	48.0
48G0216	B-025	44404	377566	40.54	25.0	84.0	59.0
				46.12	24.0	86.0	62.0
				49.02	20.0	58.0	38.0
				55.03	20.0	86.0	65.0
48G0218	B-027	44417	377963	43.85	25.0	87.0	62.0
				46.50	25.0	85.0	60.0
				50.60	20.0	84.0	64.0
48G0219	B-028	44424	378165	43.10	24.0	82.0	58.0
				48.00	27.0	100.0	73.0

**Bijlage C Geochemische samenstelling formatiewater van Klei
van Boom**

NITG-nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	CaCO3 %	N %	POC %	NaCl gr %	NaCl mg/l vocht
48G159	44360	375675	19.62	2.02	0.15	1.97	0.505	19960
			20.62	2.02	0.14	2.11	0.606	18170
			23.67	2.20	0.13	2.06	0.384	6010
			25.72	0.83	0.08	1.02	0.150	6550
			27.62	0.83	0.09	1.30	0.063	2750
			29.67	2.55	0.08	1.00	0.025	1030
			31.67	7.07	0.07	0.84	0.009	390
			33.67	1.63	0.06	0.76	0.000	0
			35.62	0.65	0.00	0.63	0.000	0
			37.62	0.47	0.00	0.46	0.000	0
			39.37	0.92	0.00	0.38	0.000	0
			41.47	0.30	0.00	0.37	0.000	0
			43.62	0.48	0.04	0.49	0.000	0
			45.54	0.83	0.05	0.43	0.000	0
47.32	0.99	0.04	0.40	0.000	0			
49.67	3.59	0.03	0.41	0.000	0			
48G160	44300	377200	23.60	3.28	0.12	1.40	0.372	17710
			25.30	12.46	0.14	2.28	0.717	26740
			27.50	1.94	0.11	1.53	0.289	13480
			30.50	2.51	0.18	3.22	0.112	5040
			32.60	1.08	0.09	1.07	0.058	3110
			34.50	1.21	0.08	0.96	0.043	2080
			36.00	1.49	0.10	1.35	0.030	1280
			38.65	1.02	0.10	1.10	0.018	810
			40.50	6.82	0.09	0.88	0.037	800
			43.05	2.20	0.07	0.86	0.119	5000
			45.50	0.85	0.08	0.71	0.123	6120
			47.50	1.80	0.06	0.53	0.021	1100
			49.60	0.31	0.05	0.37	0.014	710
			51.65	1.19	0.05	0.40	0.008	460
53.65	2.11	0.06	0.55	0.009	450			
56.10	1.41	0.06	0.56	0.022	950			
57.75	3.99	0.05	0.53	0.096	4140			
54E268	44330	373950	26.77	3.14	0.06	0.72	0.421	17000
			27.57	2.38	0.05	0.62	0.378	17440
			28.57	0.27	0.06	0.66	0.310	13230
			29.57	1.10	0.06	0.77	0.245	9840
			30.67	1.61	0.03	0.39	0.181	7310
			32.57	1.61	0.03	0.40	0.100	4390
			34.57	0.05	0.04	0.44	0.042	1770
			36.57	0.42	0.05	0.55	0.014	560
			38.57	2.36	0.03	0.44	0.000	0
			39.67	0.70	0.03	0.40	0.000	0
40.37	0.94	0.00	0.32	0.000	0			

Bijlage D Kleimineralogie van de Klei van Boom

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	monster	diepte - m NAP	smectiet [%]	vermiculiet [%]	illiet [%]	kaoliniet [%]	chloriet [%]	korrelfractie < 2µm
54E0290	B-06	44322	374356	865	39.20	46	sp	37	16	?	
				865	39.35	-	-	-	-	-	34
48G0208	B-016	44349	375467	112	24.15	44	-	34	22	sp	
					22.35	-	-	-	-	-	55
					25.25	-	-	-	-	-	65
				120	32.20	46	-	34	20	sp	
					32.35	-	-	-	-	-	63
				130	42.50	51	sp	34	15	?	
					41.45	-	-	-	-	-	36
	43.30	-	-	-	-	-	52				
Uitkomsten van röntgendiffractie opnamen					gemiddeld	46.75		34.75	18.25		

Bijlage E **Kopie uit Harris (1995) betreffende invloed van dooi
op poriëndruk (Nixon en Morgenstern, 1971)**

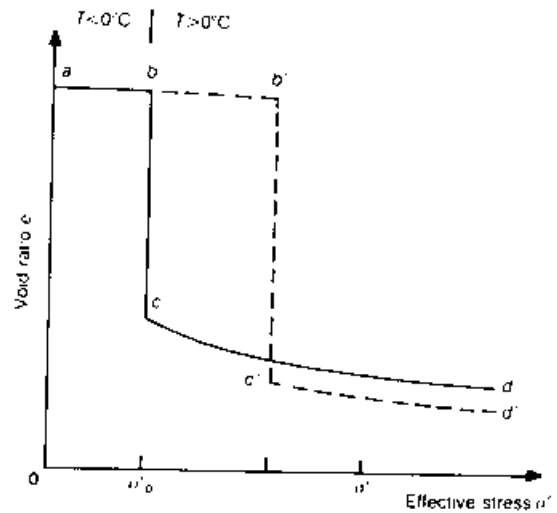


Fig. 3.13. Typical thaw-settlement behaviour of frozen soils [after Tsytovich *et al.* (1965)]

by thermocouples or thermistors located at two intermediate heights on the sides of the specimen. As soon as the thaw plane reaches the base of the specimen, the pore pressure is measured by a transducer. Settlement is monitored throughout the process.

Typical thaw settlement curves are shown schematically in Fig. 3.13. A small settlement of the frozen soil occurs under increasing stress between *a* and *b*, then a large settlement, (from *b* to *c*), when the thaw takes place followed by consolidation again under increasing stress of the completely thawed soil between *c* and *d*. Thawing at higher stress, indicated by the dashed lines may produce different post-thaw behaviour. Since most of the settlement occurs actually on thawing, its magnitude may be estimated if the ice content is known. Crude estimates may be possible from measuring the visible ice lenses in a core, but a more satisfactory solution is to measure the frozen bulk density [Watson *et al.* (1973)].

Theory of thaw consolidation

Imposition of a constant positive temperature to the upper surface of a semi-infinite frozen soil will cause the thaw plane to descend through the soil a distance *X*, in time *t* where

$$X = \alpha t^{1/2} \quad [3.24]$$

where α is a constant which depends on the rate of heat extraction.

In fine grained soils, the drainage of excess water will be impeded by the low permeability, resulting in excess pore pressures, u , which will dissipate according to the Terzaghi consolidation theory. The solution to this problem (Fig. 3.14) [Morgenstern and Nixon (1971)] depends on the thaw consolidation ratio, *R*, where

$$R = \frac{\alpha}{2\sqrt{c_v}} \quad [3.25]$$

and c_v is the coefficient of consolidation.

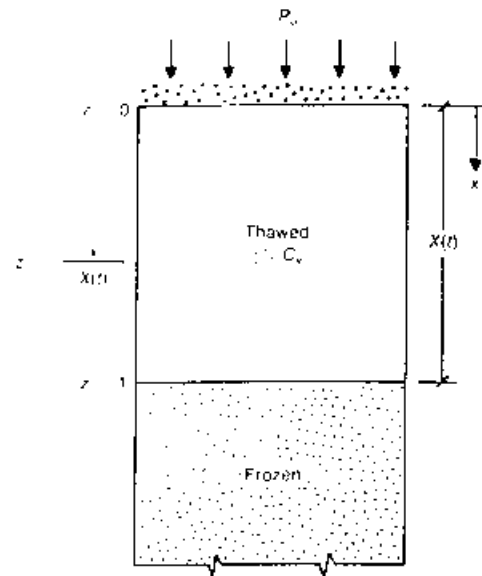


Fig. 3.14. One-dimensional thaw consolidation [after Morgenstern and Nixon (1971)]

For a soil consolidating under its own weight γ' it was found that

$$\frac{u}{\gamma'X} = \frac{1}{1 + 1/(2R^2)} \quad [3.26]$$

This is shown in chart form in Fig. 3.15(i).

A solution for a weightless soil subject to a surcharge p_0 is given in Fig. 3.15(ii). In both cases, it is found that the dimensionless pore pressures at a given depth increase with increasing thaw consolidation ratio R but are independent of time.

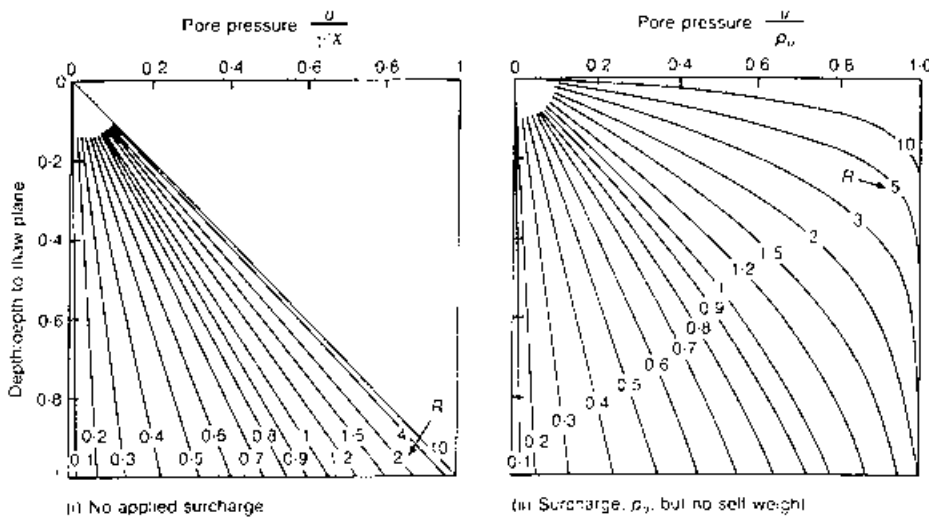


Fig. 3.15. Excess pore pressures [after Morgenstern and Nixon (1971)] (i) no applied surcharge (ii) surcharge, p_0 , but no self weight

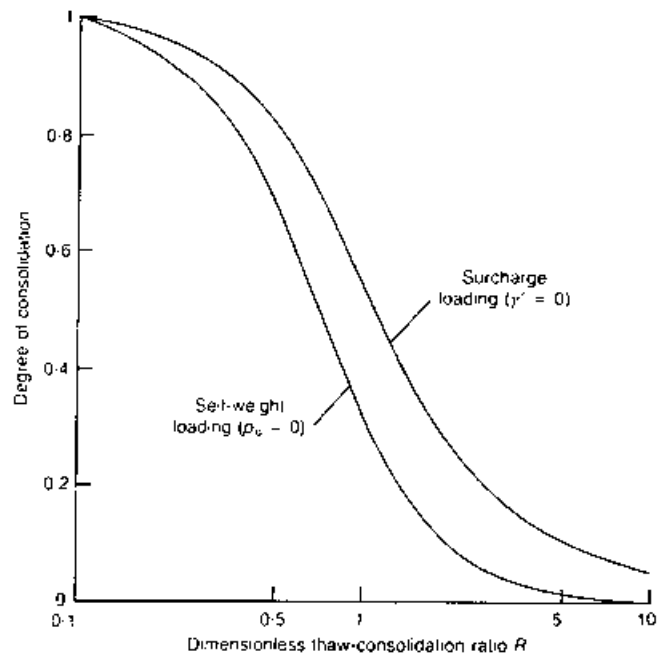


Fig. 3.16. Variation of degree of consolidation with thaw consolidation ratio [after Morgenstern and Nixon (1971)]

The relation between degree of consolidation and thaw consolidation ratio, determined by integrating the pore pressure distribution is shown in Fig. 3.16.

A series of tests on the thawing of undisturbed permafrost samples accorded well with the above theory [Nixon and Morgenstern (1974)]. The extension of the theory to non-linear behaviour and layered systems is discussed in Nixon and Ladanyi (1978). One difficulty in applying thaw consolidation theory is that parameters such as c_v are likely to change as freeze-thaw cycles modify the structure of the soil (see later).

Residual stress

The effective stress obtained by thawing under undrained conditions, σ'_0 , termed the residual stress [Nixon and Morgenstern (1973)], is an important boundary condition in theories of thaw consolidation. Its meaning is illustrated by the schematic settlement curve for an undrained freeze-thaw test shown in Fig. 3.17. A specimen of unfrozen soil is normally consolidated under an effective stress of p_v (point A). On freezing, the volume expansion involved in the phase change causes an increase in thickness (and average void ratio) at the same effective stress, B.

Thawing under undrained conditions reduces the average void ratio back to the initial value. However, there has been a change in stress conditions. The suctions set up during freezing cause an increase in effective stress in the soil and consolidation to point