

# Evaluatie van de overconsolidatieratio (OCR) bij de Damwandproef Pernis

dr.ir. D.A. Kort  
NGI, Noorwegen

## SAMENVATTING

In het kader van de damwandveldproef in Pernis in 1998 is een tiental methoden van grondonderzoek toegepast: boringen, sonderingen met waterspanningsmetingen, pressiometerproeven, dissipatieproeven, in situ vinproeven, alsmede laboratoriumonderzoek in de vorm van classificatieproeven, oedometerproeven en triaxiaalproeven. Uit deze proefresultaten is een schatting gemaakt van de overconsolidatieratio (OCR). Hiervoor zijn verschillende, wereldwijd toegepaste interpretatiemethoden gebruikt. De OCR die bepaald wordt uit de samendrukkingsproeven vertoont een geheel afwijkend beeld in vergelijking met de andere proeven. Vermoed wordt dat dit te maken heeft met uitdroging van de bovenste kleilaag.

## INLEIDING

In 1999 is een damwandproef in Pernis uitgevoerd [1,2]. In het kader van deze proef zijn verscheidene methoden van grondonderzoek toegepast:

- In situ grondonderzoek:
- Boringen  $\varnothing$  100 mm
- Sonderingen (CPT) en waterspanningssonderingen (CPTU)
- Dissipatieproeven
- Cambridge cone pressiometerproeven (CPM)
- Menard pressiometerproeven
- In situ vinproeven
- Laboratorium grondonderzoek:
- Classificatieproeven
- Oedometerproeven (incrementeel belast)
- Triaxiaalproeven (single stage CIUC met  $\sigma'_3 \approx 0,5 \cdot \sigma'_{vp}$ ,  $1,0 \cdot \sigma'_{vp}$  en  $1,5 \cdot \sigma'_{vp}$ )

Het grondonderzoek is uitgevoerd door MOS Grondmechanica in samenwerking met Fugro, Gemeentewerken Rotterdam en GeoDelft [3] en is ter beschikking gesteld voor de predicties van de damwandproef.

Al deze methoden van grondonderzoek zijn erop gericht om sterkte-, zettings- dan wel consolidatieparameters te verkrijgen. Het is daarom interessant om de uitkomsten van verschillende grondonderzoekstechnieken met elkaar te vergelijken en op hun waarde te beoordelen.

De locatie van de damwandproef in Pernis is hiervoor geschikt, vooral ook vanwege de grote hoeveelheid beschikbare metingen aan en rond de damwanden.

Dit artikel richt zich uitsluitend op de interpretatie van de overconsolidatieratio (OCR). Dit is een belangrijke parameter, omdat deze nauw verbonden is met de ongedraineerde schuifsterkte en de spanningsafhankelijkheid van de zettingsparameters in klei.

## GRONDOPBOUW EN GEOLOGIE

*Figuur 1* toont de grondopbouw geïnterpreteerd uit de boringen en de CPT's. De grondopbouw bestaat uit estuariene kleiafzettingen tot ongeveer NAP -5 m met daaronder een 5 à 6 m dikke veenlaag, gevolgd door een 6 à 7 m dikke kleilaag. De Pleistocene zandlaag begint op ongeveer NAP -17,5 m diepte. De veenlaag is gashoudend en heeft naar schatting een verzadigingsgraad van ongeveer 90%. Dat de veenlaag gas-houdend is, is gebleken uit het feit dat de ontgraven damwandkuip nog ca. driekwart jaar heeft nageborreld, waarbij methaangas uit de bodem opsteeg.

De site zelf maakte voorheen deel uit van het Pernisserpark, waar veel bomen en struiken stonden. Hierdoor is mogelijk in de droge perio-

den grondwater uit de toplagen onttrokken. Deze bomen waren echter al een geruime periode voor het grondonderzoek gerooid.

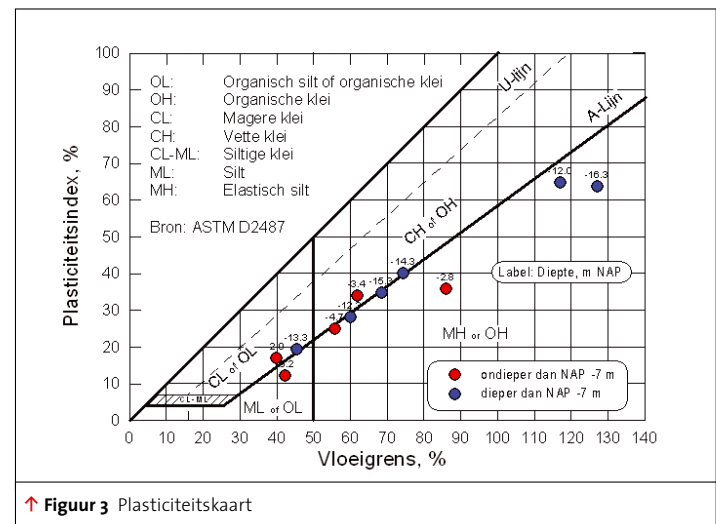
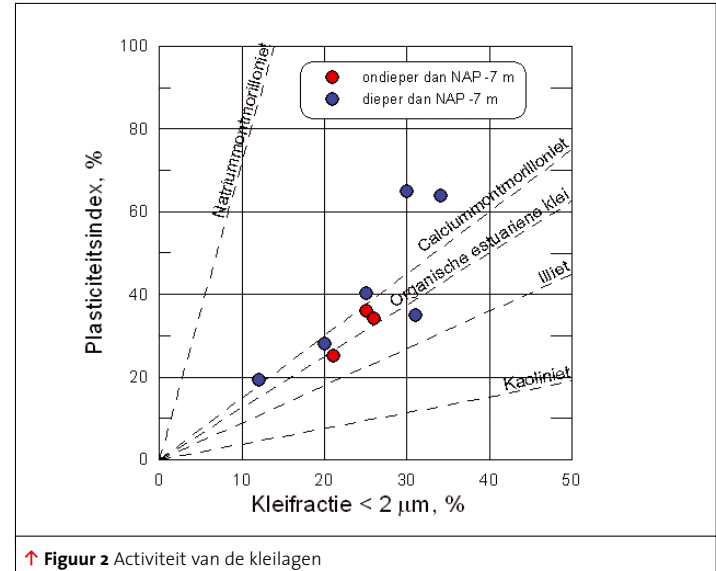
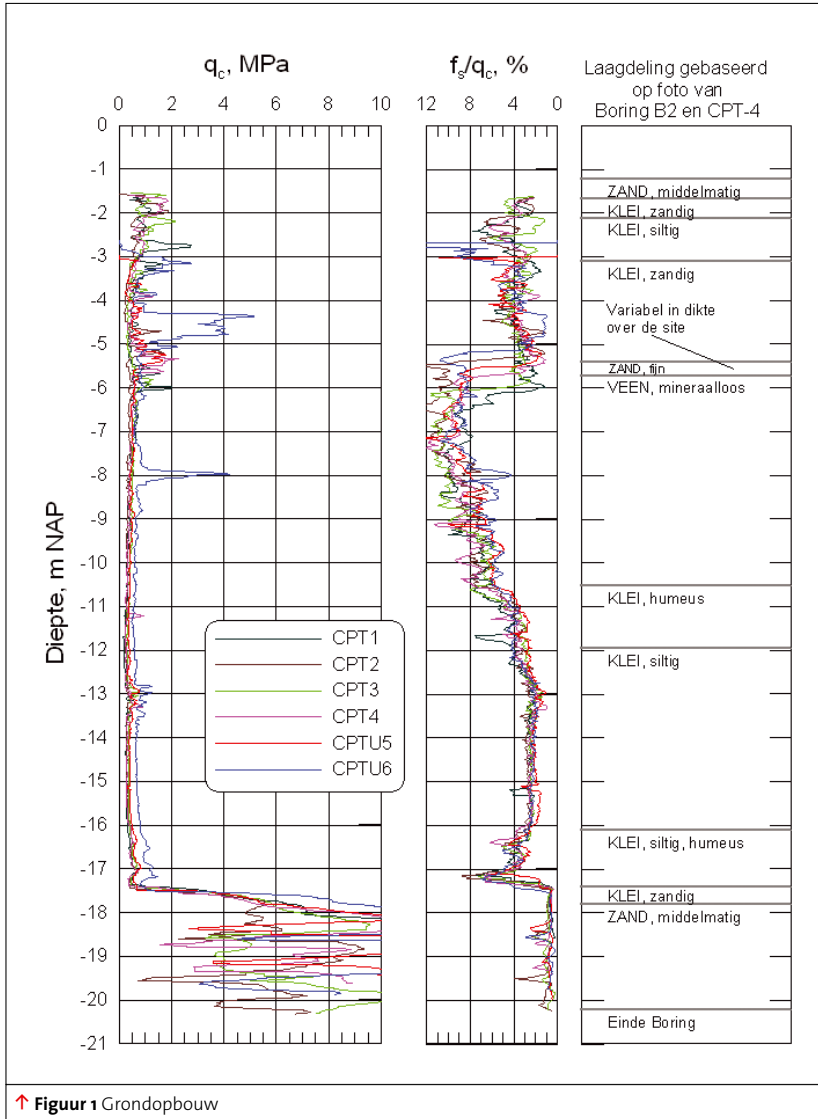
Over de geologie van de site is bekend dat deze overeenkomt met de typische geologische aspecten voor de grondopbouw in West-Nederland met Holocene klei- en veenafzettingen. Deze afzettingen zijn ontstaan in de mondingen van de grote rivieren (estuariënen) als gevolg van getijdewerking. Veen- en kleiafzettingen konden ontstaan door de vorming en doorbraak van strandwallen langs de kust. Deze klei- en veenafzettingen werden met regelmaat gedeeltelijk weggeslagen en weer opnieuw gevormd.

## CLASSIFICATIE VAN DE HOLOCENE LAGEN

De classificatie van de Holocene lagen kan inzichtelijk worden gemaakt met behulp van de activiteit en de plasticiteitskaart (*figuren 2 en 3*). De activiteit is gedefinieerd als

$$\text{Activiteit} = \frac{\text{Plasticiteitsindex (\%)}}{\text{Kleifractie} < 2 \mu\text{m} (\%)} \quad (1)$$

en geeft informatie over het waterbindend vermogen van de kleimineralen en het type kleimineraal in het monster. De activiteit van de kleimineralen is van dezelfde orde van grootte als die van calciummontmorilloniet en van



organische estuariene kleisoorten die elders in de wereld worden gevonden. Hierbij is er geen significant verschil tussen de kleilagen boven en onder het laagveen rond NAP -7 m.

Figuur 3 toont de plasticiteitskaart volgens ASTM D2487 [4]. De kaart toont een concentratie van punten rond de A-lijn en dat betekent dat de klei in het algemeen vet is en weinig organisch. Enkele monsters zijn wat siltiger of organischer van aard. Dit beeld wordt bevestigd door de profielen van het watergehalte, de Atterbergse grenzen en het organisch gehalte in figuur 4. In deze figuur zijn ook de waterge-

haltes van de samendrukkings- en triaxiaalproeven en de laagdeling volgens de boring van figuur 1 ingetekend.

Het organisch gehalte is bepaald met de gloei-verliesmethode. Dit leidt over het algemeen tot een lichte overschatting van het organisch gehalte, omdat in het proces ook montmorillonietmineralen worden verbrand. Het organisch gehalte in de kleilagen is ongeveer 5% en op basis van de plasticiteitskaart zou men kunnen verwachten dat dit vergelijking met het geotechnische gedrag van anorganische zeekleien mogelijk maakt.

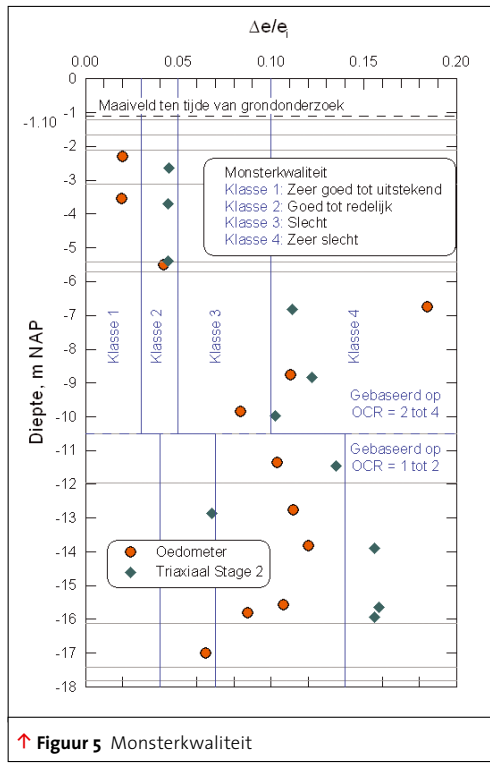
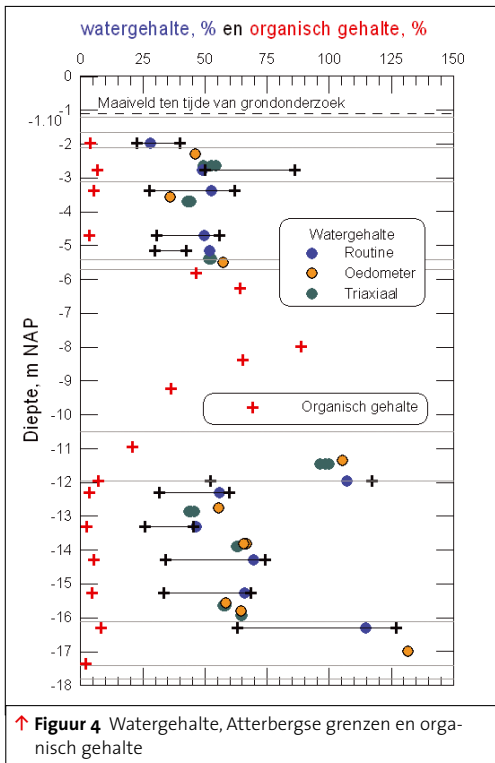
Het watergehalte in de kleilagen ligt dicht tegen de vloeigrens aan en dit betekent vaak dat de klei normaal geconsolideerd is. In de lagen boven NAP -3 m ligt het watergehalte dicht tegen de uitrolgrens aan. In verzadigde zeekleien duidt dit vaak op overconsolidatie. Bij het steken van Laval blokmonsters in deze lagen werd de klei als “droog” ervaren. Deze blokmonsters zijn in 2000 gestoken in het kader van een internationaal onderzoeksproject van GeoDelft, maar zijn uiteindelijk nooit beproefd.

**MONSTERKWALITEIT**

Volgens Lunne et al. [5], zie ook [6], kan de kwaliteit van een kleimonster worden geschat uit de verandering van het poriëngetal die gepaard gaat met het terugbrengen van het gestoken monster op effectieve terreinspanningen. Dit kan worden gemeten met geavanceerde proeven zoals de oedometerproef en de

OCR	$\Delta e/e_0$			
	Klasse 1: Zeer goed tot uitstekend	Klasse 2: Goed tot redelijk	Klasse 3: Slecht	Klasse 4: Zeer slecht
1-2	< 0,04	0,04 - 0,07	0,07 - 0,14	> 0,14
2-4	< 0,03	0,03 - 0,05	0,05 - 0,10	> 0,10

↑ **Tabel 1** Criteria voor de evaluatie van monsterverstoring [5]



triaxiaalproef. Hoe meer volumeverandering hiermee gepaard gaat, des te meer de kleistruktuur kennelijk verstoord is. Lunne et al. hebben daarvoor de grenzen in tabel 1 voorgesteld. Deze grenzen zijn afgeleid voor verzadigde zee-kleien en kunnen leiden tot een overschatting van de monsterkwaliteit in magere of siltige kleien – zoals in Pernis – omdat deze van nature stijver reageren.

Figuur 5 toont de monsterkwaliteit versus diep-

te. De monsterkwaliteit in de kleilagen boven NAP -6 m lijkt zeer goed. Het kleigehalte in deze lagen is meer dan 20% (zie figuur 2). Maar er kan worden gesteld dat deze monsters stijver reageren als gevolg van het aanwezige silt of zand in deze lagen (figuren 1 en 3). In dat geval wordt de monsterkwaliteit overschat.

In de kleilagen beneden NAP -11 m is de monsterkwaliteit een stuk slechter van aard dan in de bovenste kleilaag. Dit is niet verrassend,

omdat dieper gelegen monsters meer worden ontlast, waardoor de kans groter is dat de kleistruktuur wordt kapotgemaakt. Het meeste standaard grondonderzoek valt overigens in Klasse 3.

**METHODEN VOOR DE BEPALING VAN DE OCR**

De overconsolidatieratio (OCR) is een belangrijke grondparameter, omdat deze nauw verbonden is met de ongedraineerde schuifsterkte en de spanningsafhankelijkheid van de zettingsparameters in klei. Tijdens het voorbelasten van klei wordt steeds meer water uitgeperst, waardoor de kleideeltjes dichter op elkaar komen en het aantal contacten toeneemt. Wordt de klei vervolgens ontlast, dan houden trekspanningen in de dunne waterfilmpjes die tussen de kleiplaatjes zijn gevormd, de meeste contacten in stand [7]. Overgeconsolideerde klei heeft daarom een hogere schuifsterkte en een hogere modulus dan normaal geconsolideerde klei.

*Relatie OCR met ongedraineerde schuifsterkte*

Een correlatie tussen OCR en  $f_{undr}$  – bepaald uit de CAUC triaxiaalproef bij de piekwaarde of bij 10% axiale rek – met  $I_p$  als afhankelijke, die vaak met succes op kleisoorten wereldwijd wordt toegepast, is gegeven door Lunne et al. [8] en staat weergegeven in figuur 6.

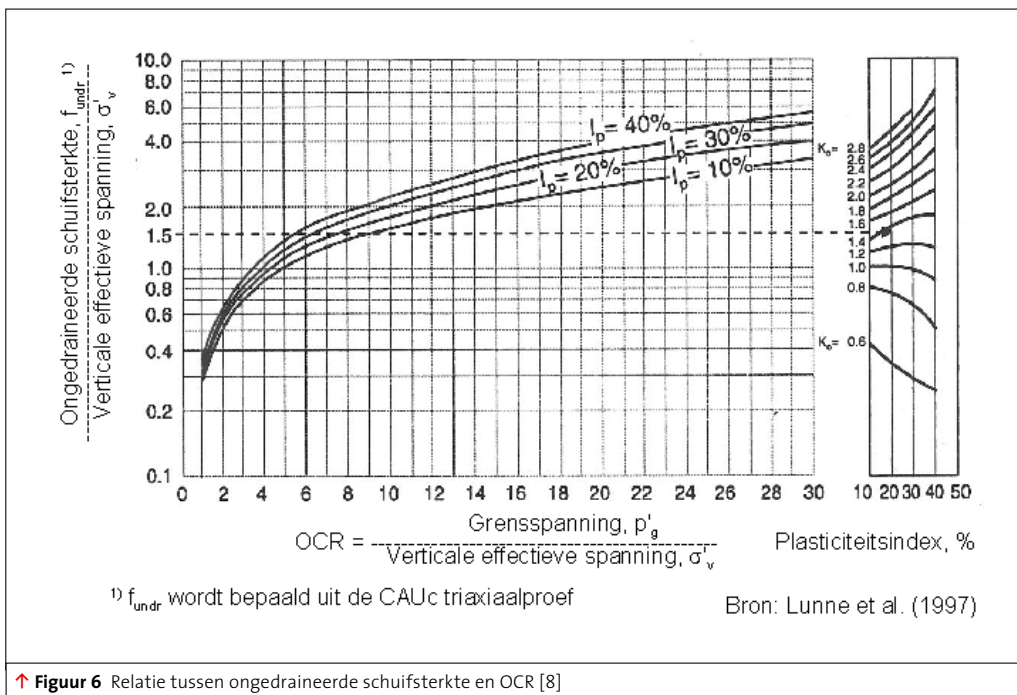
CIU-triaxiaalproeven zou men kunnen interpreteren alsof het CAUC proeven met  $K_0 = 1$  betreffen, wat overeenkomt met OCR = 3 – 5. Dit leidt dan tot te hoge sterkte waarden in lagen met OCR = 1, maar tot redelijke tot te lage sterktes in lagen met hogere OCR.

De ongedraineerde schuifsterkte uit de vinproef is gecorrigeerd met een factor 0,6 voordat de OCR werd bepaald [9].

*Relatie OCR met de sondering*

Er bestaat geen eenduidige methode om de OCR uit de sondering te bepalen. Desalniettemin hebben verschillende onderzoekers oedometerproeven op kwalitatief hoogwaardige blokmonsters geijkt aan sondeergegevens en op basis daarvan een correlatie tussen de OCR en de sondering voorgesteld.

Een aantal van deze correlaties die op diverse kleien uit de hele wereld worden toegepast, worden hieronder gegeven.



Powell [zie 8] heeft de volgende relatie voorgesteld:

$$OCR = k \cdot Q_t \quad (2)$$

met  $k = 0,3$  en  $Q_t = (q_t - \sigma'_v) / \sigma'_v$  met  $q_t = q_c - (1 - a) \cdot u_2$ , de gecorrigeerde conusweerstand,  $a$  de oppervlaktefactor van de conus,  $\sigma'_v$  en  $\sigma'_v$  de verticale grondspanning en verticale effectieve grondspanning en  $u_2$  de gemeten waterspanningen in de sondering; zie ook [8].

Mayne [zie 8] gaat uit van de volgende relatie:

$$OCR = 2 \cdot \left[ \frac{1}{1,95 \cdot M + 1} \cdot \left( \frac{q_t - u_2}{\sigma'_v} \right) \right]^{1,33} \quad (3)$$

met

$$M = \frac{6 \cdot \sin \phi'}{3 - \sin \phi'}$$

de helling van de critical state lijn.

Larsson [10] heeft een factor  $k$  voorgesteld die afhankelijk is van de vloeigrens,  $w_L$ :

$$OCR = \frac{Q_t}{1,21 + 4,4 \cdot w_L} \quad (4)$$

Karlsrud et al. [11] hebben de volgende relatie voor Noorse kleien met een sensitiviteit  $S_t < 15$  gevonden:

$$OCR = \left( \frac{Q_t}{3} \right)^{1,2} \quad (5)$$

*Relatie OCR met de dissipatieproef*

Mayne [12] heeft een methode gepresenteerd om de dissipatieproef in normaal en overgeconsolideerde gescheurde kleien te interpreteren. Dat model voorspelt het verloop van de poriëndruk gedurende de dissipatieproef. In het model wordt de poriëndruk gesplitst in een

component die wordt veroorzaakt door compressie van de grond en in een schuifcomponent:

$$\Delta u_t = \Delta u_{oct} [1 + 50 \cdot T^n]^{-1} + \Delta u_{schuif} [1 + 5000 \cdot T^n]^{-1} \quad (6)$$

waarbij

$$\Delta u_t = u_2 - u_0 \quad (7)$$

$$\Delta u_{oct} = \frac{2}{3} \sigma'_v \cdot \left( \frac{6 \cdot \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \right) \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot OCR \right)^\lambda \cdot \ln(I_R) \quad (8)$$

$$\Delta u_{schuif} = \sigma'_v \cdot \left( 1 - \frac{1}{2} \cdot OCR \right)^\lambda \quad (9)$$

$$T^n = \frac{c_h \cdot t}{a^2 \cdot I_R^{0,75}} \quad (10)$$

met  $a$  de straal van de conus,  $I_R$  de rigiditeitsindex ( $G/f_{undr}$ ) en met  $\lambda$  een coëfficiënt waarvoor geldt  $\lambda \approx 0,8$ .

Door middel van trial-and-error kan uit het dissipatieverloop een OCR-waarde worden geschat.

*Relatie OCR met de cone-pressiometerproeven*

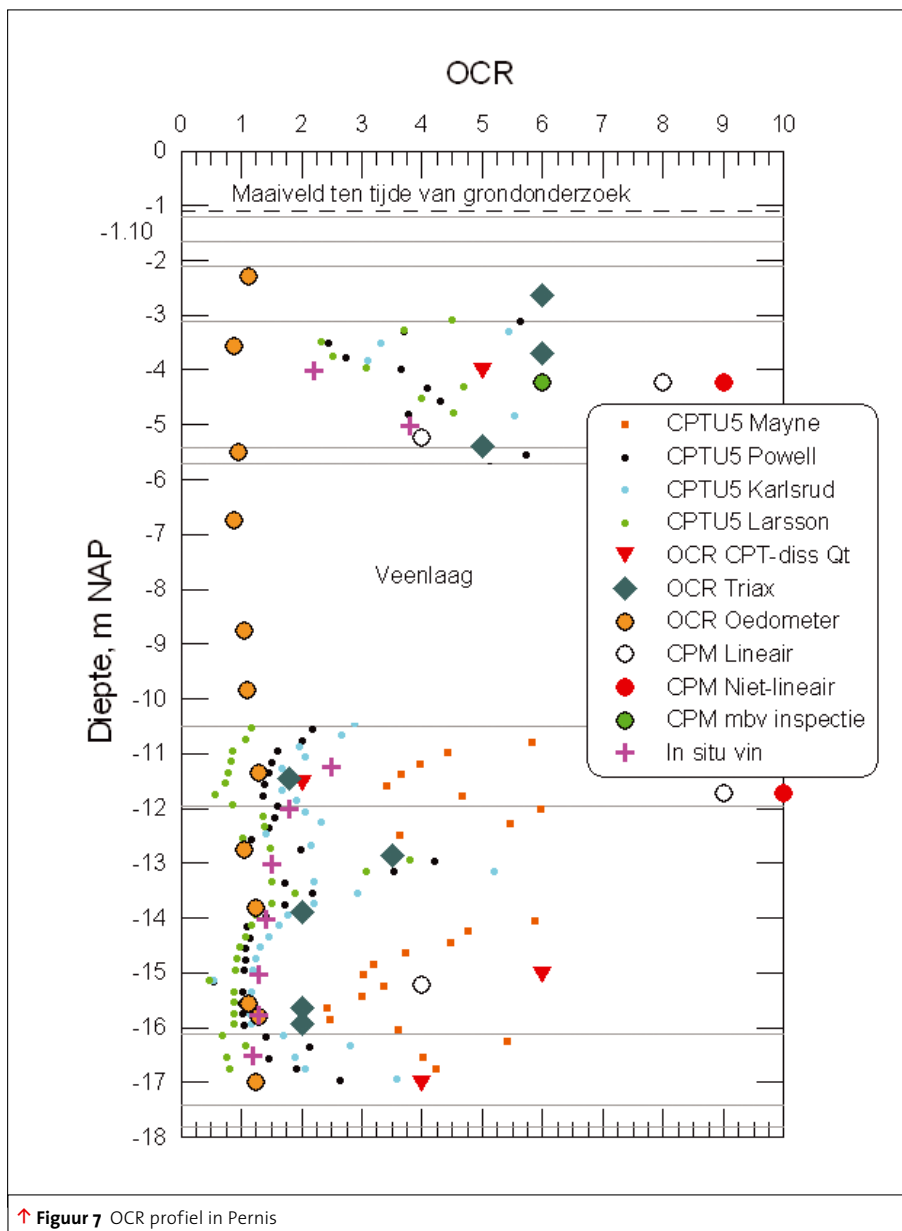
De OCR is op drie verschillende manieren uit de cone-pressiometerproeven bepaald, alle met behulp van *figuur 6*. Twee van deze methoden volgen uit de twee verschillende methodes waarop de ongedraineerde schuifsterkte uit de CPM is bepaald. De derde volgt uit de horizontale in-situ spanning voor aanvang van de proef waaruit een  $K_0$  kan worden bepaald.

#### RESULTAAT VAN HET OCR PROFIEL IN PERNIS

Met behulp van bovenstaande methoden is het OCR profiel in Pernis bepaald. *Figuur 7* geeft het resultaat.

Verreweg het meest opvallende resultaat is dat de oedometerproeven in de kleilagen boven de veenlaag OCR = 1 aangeven, terwijl uit de methoden gebaseerd op de sondering, de dissipatieproef en de vinproef een 2 tot 6 maal hogere OCR-waarde volgt. Vanaf NAP -11 m en dieper komen de OCR-waarden uit de samendrukkingsproeven meer overeen met de overige waarden.

In de kleilagen boven de veenlaag geven de triaxiaalproeven een beeld van een hogere OCR-waarde dan de CPT's. Voor de interpretatie van de triaxiaalproeven zijn vele aannames gedaan die het resultaat OCR = 6 erg onzeker maken. Uit de triaxiaalproeven mag wel worden geconcludeerd dat  $OCR \gg 1$ . De vinproeven lijken het beeld van de CPT's wel aardig te volgen.



Ook in de kleilagen beneden NAP -10 m geven de triaxiaalproeven een licht afwijkend beeld. De methoden gebaseerd op de CPT en de vinproeven lijken het beeld van een normaal geconsolideerd profiel wel te bevestigen. Opvallend is dat de CPT-methode van Mayne afwijkt van de andere drie CPT-methodes. Er is niet gezocht naar een verklaring hiervoor.

De methoden uit de cone-pressiometerproeven geven geen bruikbaar resultaat. Er is geen onderzoek gedaan naar een verklaring hiervoor.

#### EEN MOGELIJKE VERKLARING VOOR HET GEMETEN GEDRAG BOVEN DE VEENLAAG

Voor het significante verschil in OCR boven de veenlaag zijn te weinig gegevens beschikbaar om een eenduidige verklaring te geven. De conclusie uit de samendrukkingsproeven dat de OCR = 1,0 – 1,5 wordt op geen enkele manier bevestigd door de andere in-situ proeven.

Uit eigen waarnemingen is geconstateerd dat de ondiepe kleilagen verbrokken en droog waren, dit ondanks dat de waterstanden in de peilbuizen en de naastgelegen sloot hoger waren. Uitgedroogde klei heeft een hogere sterkte en stijfheid dan normaal geconsolideerde klei, doordat bijvoorbeeld door verdamping het watergehalte afneemt en de klei krimpt, zodat net als bij samendrukking het aantal contacten toeneemt. Afhankelijk van de mate van uitdroging kan dit gepaard gaan met een initieel stijver gedrag van de klei totdat de trekspanningen in het water worden overwonnen en de klei zich als maagdelijk gaat gedragen; dit resulteert in een kunstmatige overconsolidatie [7]. Is de klei teveel uitgedroogd, dan verbrekt het waardoor er in het geheel geen grensspanning uit de samendrukkingsproef valt te interpreteren.

Wanneer het in situ uitgedroogde monster niet goed wordt behandeld bij het prepareren van de samendrukkingsproef en water aan het monster wordt toegevoegd, zal het monster gaan zwellen, waardoor de structuur en de grensspanning die het monster heeft, verloren gaan. Dit zou een verklaring kunnen zijn waarom in de samendrukkingsproef lage OCR-waarden worden gemeten. Zekerheid kan worden verkregen bijvoorbeeld door gerichte samendrukkings- en triaxiaalproeven op hoogkwalitatieve monsters uit te voeren.

Opgemerkt dient te worden dat de bovenste

kleilaag in belangrijke mate afwijkt van kleien elders in de wereld. Niet zozeer omdat het hier een estuariene organische klei betreft, maar meer omdat de onderliggende veenlaag gashoudend is en dus ook het grondwater gashoudend is. Mogelijk draagt dit bij aan een verklaring dat de klei in situ onverzadigd en overgeconsolideerd wordt, of blijft na een droge periode.

#### CONCLUSIE

Uit het grondonderzoek dat in het kader van de damwandveldproef is uitgevoerd, is een schatting gemaakt van het OCR-profiel. Hiervoor zijn verscheidene interpretatiemethoden gebruikt die op voornamelijk zeekleien wereldwijd worden toegepast. Opvallend is dat de OCR bepaald uit de samendrukkingsproeven een geheel afwijkend beeld geeft ten opzichte van de andere proeven.

Vermoed wordt dat uitdroging of verdamping verklaart waarom de bovenste kleilaag zich overgeconsolideerd gedraagt. Mogelijk gaat dit gepaard met gashoudend grondwater. Dat deze OCR niet met de samendrukkingsproef gevonden wordt, kan te maken hebben met een onzorgvuldige behandeling van het grondmonster, waarbij water aan het proefstuk is toegevoegd.

Echter, om een eenduidige verklaring voor dit gedrag te geven, is aanvullend grondonderzoek noodzakelijk.

#### REFERENTIES

- [1] CUR-publicatie 207. Rotterdam Sheet Pile Wall Field Test. 2002.
- [2] Kort, D.A., A.F. van Tol en A. Jonker. Damwandveldproef Rotterdam. Geotechniek, pp. 58-66. Juli 2003.
- [3] MOS Grondmechanica B.V. Sheet Pile Wall Field Test at Rotterdam-Pernis. Site Investigation and Laboratory Testing. Rapport nr. R035490\_1. Oktober 1998.
- [4] ASTM International. Annual Book of ASTM Standards 2004. Volume 04.08. Soil and Rock.
- [5] Lunne, T., T. Berre en S. Strandvik. Sample disturbance effects in soft low plastic Norwegian clay. Proc. Int. Symp. on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, 25-27 June 1997, pp. 81-102. Rotterdam: Balkema. 1997.
- [6] NORSOK Standard. G-001. Marine Soil Investigations. Rev. 2. Lysaker: Standards

- Norway. [www.standards.no/petroleum](http://www.standards.no/petroleum)
- [7] Keverling Buisman, A.S. Grondmechanica. 2<sup>e</sup> druk. Delft: Waltman. 1944.
- [8] Lunne, T., P.K. Roberson en J.J.M. Powell. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. Londen: Spon Press. 1997.
- [9] Ingenieursbureau Gemeentewerken Rotterdam. Determination of Soil Parameters – Phase II: Vane Test. Rapport Nr. 05-168/F. Mei 1998.
- [10] Larsson, R. Piezocone Tests in Extremely Soft Soils. NGM 2004 XIV Nordic Geotechnical Meeting, pp. C15-C26. Swedish Geotechnical Society, 2004.
- [11] Karlsruh, K., T. Lunne, D.A. Kort en S. Strandvik. CPTU Correlations for Clays. XVI ICSMGE, Osaka. pp. 693-702. Rotterdam: Millpress. 2005.
- [12] Mayne, P. Flow Properties from Piezometer Tests. Interpretation of In-Situ tests. Georgia Tech: [www.ce.gatech.edu/~geosys](http://www.ce.gatech.edu/~geosys). Oktober 2002.

Reacties op dit artikel kunnen tot 1 juli 2007 naar de uitgever worden gestuurd