

**Inventarisatie geomechanische,  
geochemische en geohydrologische  
eigenschappen en Tertiaire  
kleipakketten - CAR Fase II**

Eindrapportage

**Inventarisatie geomechanische, geochemische en geohydrologische  
eigenschappen en Tertiaire kleipakketten - CAR Fase II  
Eindrapportage**

Nederlands Instituut voor  
Toegepaste Geowetenschappen TNO





TNO-rapport  
NITG 98-90 B

## Inventarisatie geomechanische, geochemische en geohydrologische eigenschappen van Tertiaire kleipakketten - CAR Fase II

Eindrapport

Datum

november 1998

Projectleiding

drs. R.H.B. Rijkers

Projectmedewerkers

dr. ir. D I. Huisman  
drs. G. de Lange  
drs. J.P. Weijers  
N. Witmans-Parker

Richard Holkade 10  
Postbus 157  
2000 AD Haarlem

Telefoon 023 530 03 00  
Fax 023 535 16 14

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  
onderzoekopdrachten aan TNO', dan  
wel de betreffende terzake tussen de  
partijen gesloten overeenkomst.  
Het ter inzage geven van het  
TNO-rapport aan direct belang-  
hebbenden is toegestaan.

© 1996 TNO

Projectnummer

005.40069/01.01

Opdrachtgever

Ministerie van Economische Zaken

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.





## Voorwoord

In het eindrapport van het onderzoek CAR-Fase I (CAR = tertiary Clay As potential host Rock) worden zeven Tertiaire stratigrafische eenheden genoemd als potentieel geschikte kleilagen ten behoeve van terugneembare ondergrondse opslag. De resultaten van CAR-Fase I ('Kartering Tertiaire kleipakketten') geven inzicht in de regionale verbreiding, de diepteligging en de dikte van Tertiaire kleipakketten.

CAR-Fase II ('Karakterisatie Tertiaire kleipakketten') sluit bij Fase I aan, door dezelfde kleipakketten geomechanisch, geochemisch en geohydrologisch te karakteriseren op basis van bestaande gegevens. Deze rapportage moet tevens inzicht verschaffen over het type en de hoeveelheid relevante gegevens.

Dit onderzoeksrapport (CAR-Fase II) is een inventarisatie van geomechanische, geochemische en geohydrologische gegevens van Tertiaire kleipakketten in Nederland. Het rapport is samengesteld in opdracht van Economische Zaken en heeft tot doel binnen het CORA-onderzoeksprogramma relevante geowetenschappelijke gegevens over Tertiaire kleipakketten te verzamelen en te analyseren. Het heeft anderzijds tot doel de huidige kennis betreffende de ruimtelijke variatie van voornoemde parameters van Tertiaire kleipakketten in de ondergrond van Nederland te vergroten.

## Samenvatting

Binnen het onderzoeksprogramma van de Commissie CORA zijn de doelstellingen van het project CAR-Fase II als volgt gedefinieerd: (1) het inventariseren van geomechanische, geohydrologische en geochemische eigenschappen van kleipakketten van Tertiaire ouderdom op basis van bestaande en beschikbare informatie, en (2) het bepalen van de ruimtelijke variatie van deze parameters op bekkenschaal. Onderwerp van studie zijn zeven kleipakketten *Oosterhout Formatie*, *Breda Formatie*, *Klei van Veldhoven*, *Klei van Rupel* (*Klei van Boom*), *Klei van Asse*, *Klei van Ieper* en *Klei van Landen*.

Om de lithostratigrafische ontwikkeling en geomechanische parameters van Tertiaire kleipakketten te bestuderen is een profiel samengesteld met behulp van gegevens van boringen van oliemaatschappijen. In het profiel Oosterschelde-Ameland zijn de Voorne Trog, het Kijkduin Hoog, de Midden-Nederlandse breukzone en het Noordzee Bekken te onderscheiden. Na geologische interpretatie van vijf lithostratigrafische kleipakketten zijn specifieke geofysische logs (gamma-ray *GR*, sonic *DT*, neutron *CNL*, resistivity *LLS-LLD* en density *FDC* logs) geanalyseerd om geomechanische parameters te berekenen. Van boringen en studies op het vaste land (o.a. Westerscheldetunnel-WOV en het ondergronds laboratorium-SCK/CEN te Mol) zijn geochemische en geohydrologische parameters onderzocht.

### Geologie

De Formatie van Oosterhout en de Formatie van Breda zijn zandig en met een heterogene lithologie ontwikkeld. In vergelijking met de dieper gelegen Tertiaire kleipakketten zijn deze pakketten minder geschikt voor mijnbouwactiviteiten vanwege hun hoge waterdoorlatendheden. De Klei van Rupel is in Zuid-Nederland aanwezig met behoorlijke diktes, terwijl deze klei in Midden-Nederland sterk geërodeerd is of zelfs door erosie geheel afwezig is. In het noordelijk deel van Nederland is de Klei van Rupel dunner aangetroffen en is de lithologie mergelig ontwikkeld in vergelijking met het zuiden van Nederland. De homogeniteit van de Klei van Rupel neemt naar het noorden af.

De Klei van Asse en Ieper worden in het noorden van Nederland opgebouwd door homogene kleipakketten. Op basis van deze homogene lithologische eigenschappen lijken de Klei van Asse en Ieper in het noorden van Nederland meer geschikt te zijn voor mijnbouwactiviteiten dan de Klei van Rupel. Deze formaties liggen hier wel op dieptes van 800 tot 1400 m.

### Geomechanica

Berekeningen van geomechanische parameters van kleipakketten uit boorgatmetingen kunnen uitgevoerd worden voor een aantal volumetrische en fysische parameters. Deze parameters ( $\rho$ ,  $\gamma$ ,  $n$ ,  $dt$  en  $E$ ) vertonen een

begravingstrend met grotere dieptes wat duidt op verandering van de korrelstructuur als gevolg van compactie. Veranderingen van watergehalte en de volumieke bulkmassa vertonen slechts een geringe toename bij verhoging van de begravingsdiepte van 500 naar 800 m.

Op basis van verschillen in sterkte-parameters van de Klei van Rupel bij verschillende diepteligging blijkt dat de variatie in sterkte-eigenschappen groot is.

De sterkte van de Klei van Rupel bij de Westerschelde is ongeveer vijf keer zo gering als de Klei van Boom in Mol. Het verschil in sterkte-karakteristieken van de Klei van Rupel (Westerschelde) en de Klei van Boom (Mol) kan verklaard worden door verschillen in consolidatie (begravingsdiepte) en/of door verschillende laboratorium meettechnieken. Hierbij moet ook worden opgemerkt dat de geteste kleimonsters van Mol en de Westerschelde in verschillende stratigrafische delen van de Klei van Boom (Rupel) bemonsterd zijn. De watergehalten van de locaties Westerschelde en Mol zijn vergelijkbaar, nl. 20-25 %. Vergelijking van de sterkte van de Klei van Boom op de twee locaties toont significante verschillen. Bij hogere begravingsdiepte van 500-800 m wordt verwacht dat de sterkte verder toeneemt.

### **Geochemie**

Er bestaat grote variabiliteit in de chemische en kleimineralogische eigenschappen van Tertiaire kleien. Parameters kunnen op dm-schaal variëren. Dit geldt ook voor organische stof, zandlagen, carbonaatafzettingen en sulfides. Deze parameters hebben belangrijke implicaties voor porositeit, sterkte en chemische reactiviteit. Hierbij moet ook rekening worden gehouden met mijnbouw-activiteiten in sulfide-rijke afzettingen. Deze zorgen voor sulfide-oxidatie, waarbij metalen vrijkomen en verzuring optreedt. Dergelijke zure milieu's kunnen ondergrondse metalen en betonnen constructies aantasten.

### **Geohydrologie**

De geohydrologische parameters van Tertiaire kleien zijn sterk afhankelijk van de lokale lithologische ontwikkeling en begravingsgeschiedenis. De onderzochte kleien hebben een doorlatendheid die doorgaans kleiner is dan  $1 \times 10^{-8}$  m/s. De heterogeen ontwikkelde Klei van Rupel heeft richting het noorden van Nederland een onvoorspelbare ontwikkeling van de doorlatendheid als gevolg van de veranderende lithologische samenstelling.

### **Implicaties van het CAR-II onderzoek**

De resultaten van het CAR onderzoek geeft, naast de diepteligging, lithologische ontwikkeling en karakteristieke eigenschappen van Tertiaire kleipakketten, eveneens de beperkingen aan van de huidige kennis over deze kleipakketten. Zo ontbreken er experimenteel bepaalde geomechanische parameters van kleien die representatief zijn voor begravingsdiepten van 500 tot 800 m. Nagenoeg iedere geomechanische parameter is druk en temperatuur-afhankelijk en kunnen niet

lineair naar de diepte geëxtrapoleerd worden. Eveneens is het niet mogelijk het effect van opwarming van een kleimassief op de geomechanische en geohydrologische parameters in te schatten. Mineralogische omzettingen kunnen bijvoorbeeld onder invloed van temperatuur optreden en uiteindelijk de uitkomsten van rekenmodellen beïnvloeden.

#### **Aandachtgebieden voor vervolgonderzoek**

Wanneer de eigenschappen en de verbreidingskaarten van Tertiaire kleipakketten beschouwd worden (CAR-Fase I en Fase II), kunnen er een aantal aandachtsgebieden worden genoemd die geschikt zijn voor vervolgonderzoek. Deze aandachtsgebieden liggen in Noord- en Zuid-Nederland: Groningen, Drenthe (incl. de Waddenzee), Oost-Gelderland, Zeeland en Noord-Brabant.

#### **Aanbevelingen voor vervolgonderzoek**

Analyse van boorgatmetingen om de lithologische ontwikkeling van sedimenten en enkele geomechanische eigenschappen te berekenen is mogelijk. Het behoeft aanbeveling om deze analyse met landboringen te herhalen wanneer deze gegevens beschikbaar worden.

Voor de noodzakelijke modelberekeningen van ondergrondse stabiliteit, bestaan er te weinig betrouwbare (experimenteel bepaalde) parameters die representatief zijn voor diepten van 500 tot 800 m. Tevens dienen de parameters die bekend zijn van de Westerscheldetunnel en het ondergrondse laboratorium te Mol te worden aangepast voor temperaturen hoger dan 15 °C. Niet alleen omdat de natuurlijke temperatuur van de aarde toeneemt met de diepte, maar ook vanwege de opwarming van het kleimassief direct rond de opslagfaciliteit. Hiertoe zouden monsters getest moeten worden bij verschillende begravingsdiepten en temperaturen.

## Inhoudsopgave

Voorwoord .....	i	
Samenvatting .....	ii	
Inhoudsopgave .....	v	
Lijst van figuren .....	ix	
Lijst van tabellen .....	xi	
<b>1</b>	<b>Inleiding .....</b>	<b>1</b>
	1.1 Het onderzoekskader .....	1
	1.2 Doelstellingen.....	1
	1.3 Gegevensbronnen .....	2
	1.4 Rapportage .....	2
<b>2</b>	<b>Toelichting bij het geologisch profiel Oosterschelde - Ameland .....</b>	<b>4</b>
	2.1 Tertiaire kleipakketten .....	4
	2.1.1 Oosterhout Formatie .....	5
	2.1.2 Breda Formatie .....	8
	2.1.3 Klei van Veldhoven .....	8
	2.1.4 Klei van Rupel .....	9
	2.1.5 Klei van Asse .....	10
	2.1.6 Klei van Ieper .....	11
	2.1.7 Klei van Landen .....	12
	2.2 Structurele eenheden van Tertiaire ouderdom .....	13
<b>3</b>	<b>Inventarisatie van geomechanische, geochemische en geohydrologische eigenschappen .....</b>	<b>17</b>
	3.1 Belangrijke parameters met betrekking tot mijnactiviteiten .....	
	en veiligheidsstudies bij ondergrondse opslag van radioactief .....	
	afval .....	17
	3.2 Geomechanische parameters uit offshore boringen .....	17
	3.3. Formatie van Oosterhout .....	20
	3.3.1 Geomechanische parameters .....	20
	3.3.2 Geochemische parameters .....	20
	3.3.3 Geohydrologische parameters .....	26
	3.4 Formatie van Breda .....	27
	3.4.1 Geomechanische parameters .....	27
	3.4.2 Geochemische parameters .....	27



3.4.3	Geohydrologische parameters .....	27
3.5	Klei van Veldhoven .....	29
3.5.1	Geomechanische parameters .....	29
3.5.2	Geochemische parameters .....	29
3.5.3	Geohydrologische parameters .....	29
3.6	Klei van Rupel .....	30
3.6.1	Geomechanische parameters .....	30
3.6.2	Geochemische parameters .....	31
3.6.3	Geohydrologische parameters .....	31
3.6.4	Dataset Westerschelde .....	32
3.6.4a	Geologische en lithologische beschrijving .	32
3.6.4b	Geomechanische parameters .....	33
3.6.4c	Geochemische parameters .....	38
3.6.4d	Geohydrologische parameters .....	43
3.6.5	Dataset Mol .....	44
3.6.5a	Geologische en lithologische beschrijving .	44
3.6.5b	Geomechanische parameters .....	46
3.6.5c	Geochemische parameters .....	49
3.6.5d	Geohydrologische parameters .....	52
3.6.5e	Thermodynamische parameters .....	52
3.7	Klei van Asse .....	53
3.7.1	Geomechanische parameters .....	53
3.7.2	Geochemische parameters .....	53
3.7.3	Geohydrologische parameters .....	53
3.8	Klei van Ieper .....	54
3.8.1	Geomechanische parameters .....	54
3.8.2	Dataset Mol .....	54
3.8.2a	Geologische parameters .....	54
3.8.2b	Geomechanische parameters .....	55
3.8.2c	Geochemische parameters .....	55
3.9	Klei van Landen .....	57
3.9.1	Geomechanische parameters .....	57
3.9.2	Geohydrologische parameters .....	57
4	Temperatuurgegevens van de ondergrond van Nederland .....	58
4.1	Gegevensanalyse .....	58
4.2	Temperatuurkaarten .....	58
5	Waterkwaliteit in de ondergrond van Nederland .....	59
5.1	Zoutgehalte van formatiewater van Tertiaire kleien .....	59
5.2	Zoutconcentraties in de ondergrond van Nederland .....	59
6	Synthese en conclusies .....	60
6.1	Algemeen .....	60

6.2	Geologische aspecten van Tertiaire kleien.....	60
6.3	Geomechanische aspecten van Tertiaire kleien .....	61
6.4	Geochemische aspecten van Tertiaire kleien .....	61
6.5	Geohydrologische aspecten van Tertiaire kleien .....	62
7	Implicaties van de resultaten van CAR-II voor het CORA .....	
	onderzoeksprogramma .....	64
7.1	Leemten in kennis van geowetenschappelijke parameters ten behoefte van het CORA-onderzoeksprogramma .....	64
7.2	Betekenis van de resultaten van CAR-II voor TRUCK I/II en .....	
	METRO .....	65
7.3	Aandachtsgebieden Tertiaire kleivoorkomens op het land .....	66
8	Aanbevelingen .....	68
	Referenties .....	69

## Bijlagen

### *Profiel Oosterschelde - Ameland:*

- Bijlage A.1 Geologisch profiel Oosterschelde-Ameland
- Bijlage A.2 Lijst van gebruikte boringen in profiel Oosterschelde-Ameland

### *Geomechanische gegevens uit de offshore boringen:*

- Bijlage B.1 Geomechanische gegevens Formatie van Breda
- Bijlage B.2 Sonic snelheden versus diepte Formatie van Breda
- Bijlage C.1 Geomechanische gegevens Klei van Rupel
- Bijlage C.2 Sonic snelheden, bulkdichtheden en cnl-porositeiten versus diepte  
Klei van Rupel
- Bijlage D.1 Geomechanische gegevens Klei van Asse
- Bijlage D.2 Sonic snelheden en bulkdichtheden versus diepte Klei van  
Asse
- Bijlage E.1 Geomechanische gegevens Klei van Ieper
- Bijlage E.2 Sonic snelheden, bulkdichtheden en cnl-porositeiten versus diepte  
Klei van Ieper
- Bijlage F.1 Geomechanische gegevens Klei van Landen
- Bijlage F.2 Sonic snelheden, bulkdichtheden en cnl-porositeiten versus diepte  
Klei van Landen
- Bijlage G Compressiegolf en Young's modulus versus diepte

*Dataset Westerschelde Klei van Rupel*

- Bijlage H Korrelfractie  $< 2 \mu\text{m}$   
Bijlage I Atterbergse grenzen  $w_p$ ,  $w_L$  en  $I_p$   
Bijlage J Volumieke gewichten  $\gamma_b$ ,  $\gamma_{dr}$  en watergehalte  $w$   
Bijlage K Porositeit  $n$  en verzadigingsgraad  $S$   
Bijlage L Volumiek gewicht van kleikorrel  $\gamma_k$   
Bijlage M Ongedraineerde schuifsterkte  $f_{undr}$   
Bijlage N Kleimineralogie  
Bijlage O Casagrande geotechnische classificatie (ASTM D 2487)  
Bijlage P Activiteit van klei volgens Skempton (1953) van BK1 en BK2

*Geohydrologische gegevens*

- Bijlage Q Geohydrologische gegevens Tertiaire kleipakketten

*Temperatuur gegevens*

- Bijlage R.1 Temperatuur op 500 m diepte  
Bijlage R.2 Temperatuur op 1000 m diepte

*Toelichting parameters*

- Bijlage S.1 Toelichting consolidatie, compactie en begravingsgeschiedenis  
Bijlage S.2 Toelichting lithologische en geomechanische parameters  
Bijlage S.3 Toelichting geochemische parameters  
Bijlage S.4 Toelichting geohydrologische parameters

## Lijst van figuren

Figuur 2.1	Lithostratigrafisch diagram van het Paleoceen en het Eoceen van Zuid- en Centraal-Nederland (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1998) .....	6
Figuur 2.2	Lithostratigrafisch diagram van het Oligoceen en Mioceen van Zuid-Nederland (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1998) .....	7
Figuur 2.3	Structurele eenheden die gedurende het Tertiair actief waren in Nederland (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1998) .....	15
Figuur 2.4	Positie van boringen in het profiel Oosterschelde-Ameland en van de boringen die gebruikt zijn voor de herziene beschrijvingen van het Tertiair in de Nieuwe Stratigrafische Nomenclator (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1998) .....	16
Figuur 3.1	Driehoeksdiagram van de kleimineralogische samenstelling (piekhoogte-percentages) van de Klei van Reuver in twee verschillende groeven (Brachterwald en Hoher Stahl).....	22
Figuur 3.2	Variatie in gehalten aan $Al_2O_3$ , $K_2O$ , $TiO_2$ en de kleimineralogie in de klei van Reuver (groeve Brachterwald). .....	23
Figuur 3.3	Variatie in de relatie $Al_2O_3$ - $K_2O$ in de Klei van Oosterhout, Reuver en Brunssum .....	24
Figuur 3.4	Variatie in de relatie $TiO_2$ - $Al_2O_3$ in de Klei van Oosterhout, Reuver en Brunssum.....	25
Figuur 3.5	Watergehalte, plasticiteits- en vloeigrens versus diepte van de Klei van Rupel in het gebied van de Westerschelde.....	36
Figuur 3.6	Watergehalte versus lutumgehalte van de Klei van Rupel onder de Westerschelde .....	37
Figuur 3.7	Variatie in de relatie $K_2O$ - $Al_2O_3$ in de Klei van Rupel .....	40

Figuur 3.8	Diepteprofielen van een aantal hoofdelementen in de Formatie van Breda, Klei van Rupel en Zand van Vessem (Boring Borssele/48G160) .....	41
Figuur 3.9	Profiel van Cl-gehalten in de top van de Klei van Rupel (boring Borssele/48G160) .....	42
Figuur 3.10	Stratigrafische sectie van de eerste geologische boring op de Mol site (België) .....	45
Figuur 3.11	Bezwijkcriteria van de Klei van Boom en de invloed van temperatuur (Thimus, 1993) .....	48

#### Figuren van Bijlage S

Figuur S.1	De relatie tussen de plasticiteits-index en de klei-fractie (Skempton, 1953).	
Figuur S.2	Positie van de waarnemingspunten (boringen en groeves) met geochemische en kleimineralogische informatie.	
Figuur S.3	Verschillende methoden om een kwantitatieve schatting te maken van de percentages kleimineralen op basis van een XRD-diffractogram.	

## Lijst van tabellen

Tabel 1	Relevante geowetenschappelijke parameters voor een mijnontwerp en veiligheidsstudies met betrekking tot ondergrondse opslag van radio-actief afval .....	18
Tabel 2	Chemische samenstelling van fosforiet en glauconiet uit de Formatie van Breda van de boring Reusel .....	28
Tabel 3	Geomechanische en geohydrologische parameters van de Klei van Rupel bij de Westerscheldetunnel.....	35
Tabel 4	Geomechanische parameters Klei van Boom (Thimus, 1989; 1991b) .....	47
Tabel 5	Uni-axiale druksterkte van Klei van Boom (Thimus, 1993) .....	48
Tabel 6	Geomechanische parameters Klei van Ieper (Thimus, 1989; 1991b) .....	55
Tabel 7	Resultaat inventarisatie geomechanische, geochemische en geohydrologische parameters van Tertiaire kleipakketten .....	63

## Tabellen van Bijlage S

Tabel S.1	Het verband tussen consistentieklassen en de ongedraineerde schuifsterkte (naar BSI, 1981).	
-----------	---	--



# 1 Inleiding

## 1.1 Het onderzoekskader

Binnen het onderzoeksprogramma van de Commissie CORA wordt door SCK-CEN (in samenwerking met KU-Leuven en ECN) een project uitgevoerd naar een mogelijk mijnontwerp met betrekking tot terugneembare berging van nucleair afval in kleipakketten (project TRUCK). Tegelijkertijd wordt een studie uitgevoerd naar de veiligheidsaspecten van een ondergrondse opslag in kleipakketten door het ECN (project METRO). Het CAR-Fase II onderzoek ondersteunt beide projecten door gegevens te verzamelen en te analyseren van geomechanische, geohydrologische en geochemische aard. Aan dit onderzoek worden uitgangspunten en randvoorwaarden ontleend ten behoeve van rekenmodellen in METRO en TRUCK.

## 1.2 Doelstellingen

De doelstellingen van het CAR-Fase II project zijn als volgt geformuleerd:

- 1- het inventariseren van geomechanische, geohydrologische en geochemische eigenschappen van kleipakketten van Tertiaire ouderdom op basis van bestaande en beschikbare informatie.
- 2- het bepalen van de ruimtelijke variatie van geomechanische, geohydrologische en geochemische eigenschappen op bekkenschaal.

Het CAR-Fase II onderzoek is een inventarisatie van beschikbare gegevens om zeven slecht-doorlatende kleipakketten van Tertiaire ouderdom te karakteriseren. Tevens wordt in een geologisch profiel de diepteligging in verschillende eenheden gevisualiseerd en worden de onderlinge posities van kleipakketten inzichtelijk gemaakt. Met behulp van geofysische boorgatmetingen zijn geomechanische parameters van Tertiaire kleipakketten berekend.

Onderwerp van studie zijn de volgende geologische formaties en laagpakketten:

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| <u>Boven-Noordzee Groep:</u>  | - <i>Oosterhout Formatie</i>            |
|                               | - <i>Breda Formatie</i>                 |
| <u>Midden-Noordzee Groep:</u> | - <i>Klei van Veldhoven</i>             |
|                               | - <i>Klei van Rupel (Klei van Boom)</i> |
| <u>Onder-Noordzee Groep:</u>  | - <i>Klei van Asse</i>                  |
|                               | - <i>Klei van Ieper</i>                 |
|                               | - <i>Klei van Landen</i>                |



### 1.3 Gegevensbronnen

De geologische, geomechanische, geohydrologische en geochemische gegevens zijn afkomstig van een zestal bronnen:

- I Boorgatmetingen van offshore boringen ouder dan 10 jaar die geselecteerd zijn voor de compilatie van een geologisch profiel en van boringen op het land die gepubliceerd zijn. De gegevens van olie en gas boringen zijn eigendom van de oliemaatschappijen en niet openbaar, maar mogen op basis van de Nederlandse wetgeving en afspraken met de NOGEPa gebruikt worden door het NITG-TNO.
- II Geomechanische en geohydrologische gegevens van de Klei van Rupel (Klei van Boom) afkomstig van het geotechnische onderzoek in de Westerschelde ten behoeve van de aanleg van de WOV-tunnel (Westerschelde Oever Verbinding).
- III Geologische, geomechanische, geohydrologische en geochemische gegevens van de Klei van Boom ten behoeve van de aanleg van ondergrondse onderzoekfaciliteit te Mol (SCK-CEN, België).
- IV Openbare kaartbladen van de diepe en ondiepe ondergrond die zijn samengesteld door het NITG-TNO.
- V Overige openbare rapporten van (toegepast) geologisch onderzoek van het NITG-TNO.
- VI Onderzoeksrapporten van buitenlandse onderzoeksinstituten, overige publicaties en openbare rapporten.

### 1.4 Rapportage

In Hoofdstuk 2 worden de bestudeerde Tertiaire kleipakketten en regionaal-structurele eenheden besproken. De kleipakketten zijn weergegeven in het geologisch profiel Oosterschelde-Ameland (Bijlage A) waarin de verbreiding, diepteligging en lithologische variatie zijn aangegeven.

Karakteristieke eigenschappen worden systematisch per eenheid besproken in hoofdstuk 3 en zijn voor een groot deel opgenomen in de Bijlagen B t/m Q. Hoofdstukken 4 en 5 geven regionale informatie over de temperatuur en het zoutgehalte van de Nederlandse ondergrond.

In hoofdstuk 6 worden de belangrijkste bevindingen van de uitgevoerde analyses

in relatie tot de diepteligging besproken. In Tabel 7 wordt een overzicht gegeven van de geïnventariseerde parameters.

In Hoofdstuk 7 worden belangrijke implicaties van de resultaten van CAR-Fase II besproken, zoals de aansluiting bij het onderzoek van CAR-Fase I, de beperkingen van de resultaten van CAR-Fase II en de gebieden met homogene kleipakketten op het land die geschikt zijn voor toekomstig onderzoek. In hoofdstuk 8 worden aanbevelingen gedaan voor toekomstig vervolgonderzoek.

## 2 Toelichting bij het geologisch profiel Oosterschelde - Ameland

In dit hoofdstuk worden de bestudeerde Tertiaire kleipakketten en structureel-geologische eenheden in de ondergrond van Nederland toegelicht. In het samengestelde geologische profiel Oosterschelde-Ameland (Bijlage A) is onder meer de lithologische ontwikkeling gegeven. In dit hoofdstuk worden bij ieder kleipakket de wijzigingen in de nomenclatuur van Tertiaire kleipakketten in Nederland gegeven.

De compilatie van het offshore profiel heeft als resultaat dat de lithologische ontwikkeling op regionale schaal van vijf Tertiaire kleipakketten in het westelijk deel van Nederland bekend is. Vier regionaal structurele eenheden zijn in het profiel duidelijk te onderscheiden. De kleipakketten in de verschillende structurele eenheden onderscheiden zich in diepteligging, breukontwikkeling, tektonische geschiedenis en structurele stijl. Van zuid naar noord zijn de volgende eenheden zichtbaar: de Voorne Trog, het Kijkduin Hoog, de Midden-Nederlandse breukzone en het Noordzee Bekken (Bijlage A.1). De geologische ontwikkeling in iedere structurele eenheid in het profiel Oosterschelde-Ameland wordt bij het betreffende kleipakket behandeld. Eveneens worden van de kleipakketten de stratigrafische eenheden over de landsgrenzen genoemd.

### 2.1 Tertiaire kleipakketten

Van zeven lithostratigrafische eenheden zijn in dit rapport de geomechanische, geohydrologische en geochemische parameters geïnventariseerd:

<i>Oosterhout Formatie</i>	<i>Plioceen</i>	( 2 - 5 miljoen jaar geleden)
<i>Breda Formatie</i>	<i>Mioceen</i>	( 5 - 23 " " " )
<i>Klei van Veldhoven</i>	<i>Laat-Oligoceen</i>	(23 - 29 " " " )
<i>Klei van Rupel</i>	<i>Oligoceen</i>	(23 - 35 " " " )
<i>Klei van Asse</i>	<i>Midden-/Laat Eoceen</i>	(38 - 50 " " " )
<i>Klei van Ieper</i>	<i>Vroeg-Eoceen</i>	(50 - 56 " " " )
<i>Klei van Landen</i>	<i>Laat-Paleoceen</i>	(56 - 60 " " " )

Voor een uitgebreide beschrijving van deze pakketten, de diepteligging, en de verbreiding wordt verwezen naar het rapport 'Kartering slecht-doorlatende laagpakketten van Tertiaire Formaties' (RGD, 1996). De stratigrafische indeling en definitie van het Tertiair in dit rapport is ontleend aan de recent gereed gekomen 'Stratigrafic nomenclator of the Netherlands' (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1998). In deze nieuwe nomenclatuur is de naamgeving van het gehele Tertiair herzien. Hierdoor treden er kleine verschillen op in benaming met

de definitie van stratigrafische eenheden van het CAR - Fase I rapport. In deze rapportage wordt bijvoorbeeld de naam 'Klei van Boom' gebruikt voor de Belgische equivalent van de Nederlandse Klei van Rupel.

Lithostratigrafische diagrammen van het Paleoceen-Eoceen en het Oligoceen-Mioceen zijn opgenomen in Fig. 2.1 en Fig. 2.2. In Fig. 2.4 staan de locaties van de gebruikte offshore boringen van het profiel en de openbare geologische gegevens van Tertiaire kleipakketten (uit de nieuwe geologische nomenclator) op een kaart aangegeven.

### 2.1.1 Oosterhout Formatie

De Oosterhout Formatie bestaat in het westen en noorden van Nederland veelal uit zandige kleien. De kleiige inschakelingen worden naar het zuidoosten en het oosten van Nederland meer zandig. Deze ontwikkeling in zuidoostelijke richting staat in relatie tot de positie van de Pliocene bekkenrand: de mariene Formatie van Oosterhout gaat in Zuid-Nederland lateraal over in de continentale Kiezeloëliet Formatie, waarin de lokaal voorkomende Klei van Reuver en de Klei van Brunssum worden onderscheiden.

Van de Oosterhout Formatie en de kleien van de Kiezeloëliet Formatie worden in Car-Fase 1 (RGD, 1996) diepte- en diktekaarten gepresenteerd.

#### *Algemene karakteristiek*

De Oosterhout Formatie bestaat uit een opeenvolging van schelphoudende zanden, zandige kleien en groene en grijze kleien. Het gehalte aan glauconiet is middelmatig tot laag en in het zuiden van het land zijn de zanden zeer rijk aan schelpen. Pyriet, glimmer, planten- en zeeëgelresten worden regelmatig aangetroffen.

#### *Distributie*

De formatie is aanwezig in Centraal- en West-Nederland.

#### *Type sectie*

Oosterhout 44D/177, 106-279 below surface, 172,9 along hole (Doppert et al., 1975)

Klundert 43H/63, 105-281 below surface, 176 along hole (NAM & RGD, 1980)

Hellevoetsluis-1,, 217-337 below rt (= rotary table), 120 m along hole (NAM & RGD, 1980).

#### *Afzettingsmilieu*

De formatie is afgezet in een ondiep-mariene omgeving en gedeeltelijk in een delta-front binnen de neritische zone.

#### *Ouderdom*

Pliocene

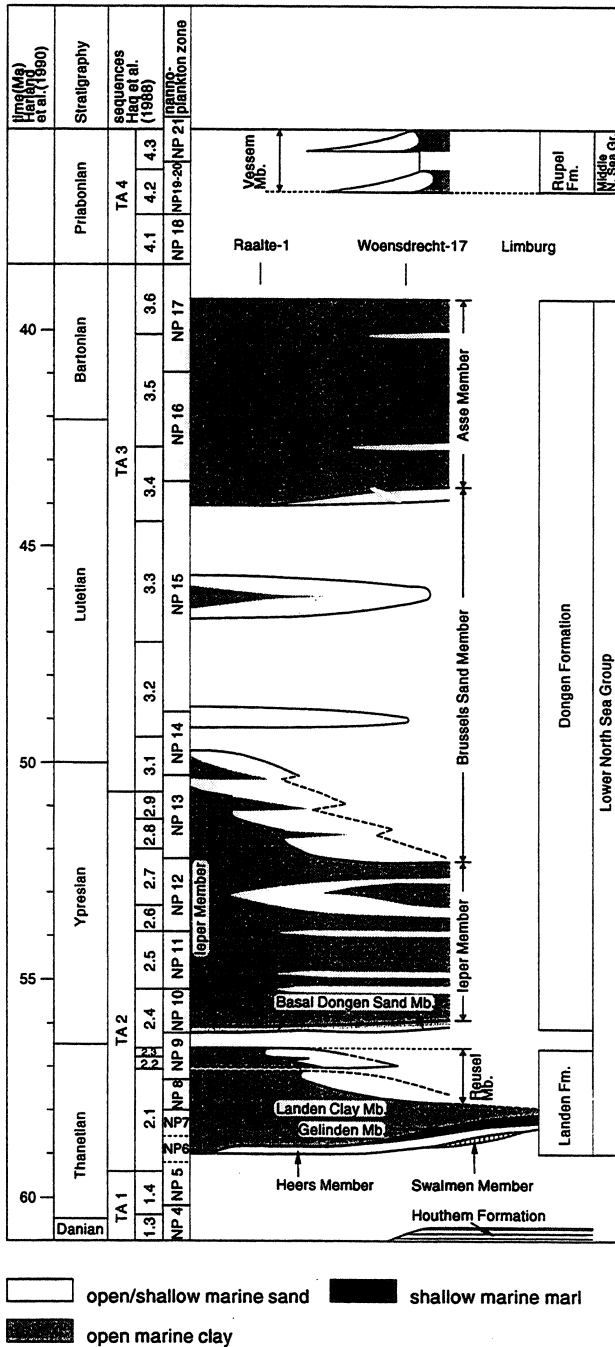


Fig. 2.1

Lithostratigrafisch diagram van het Paleoceen en het Eoceen van Zuid- en Centraal-Nederland (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1998).

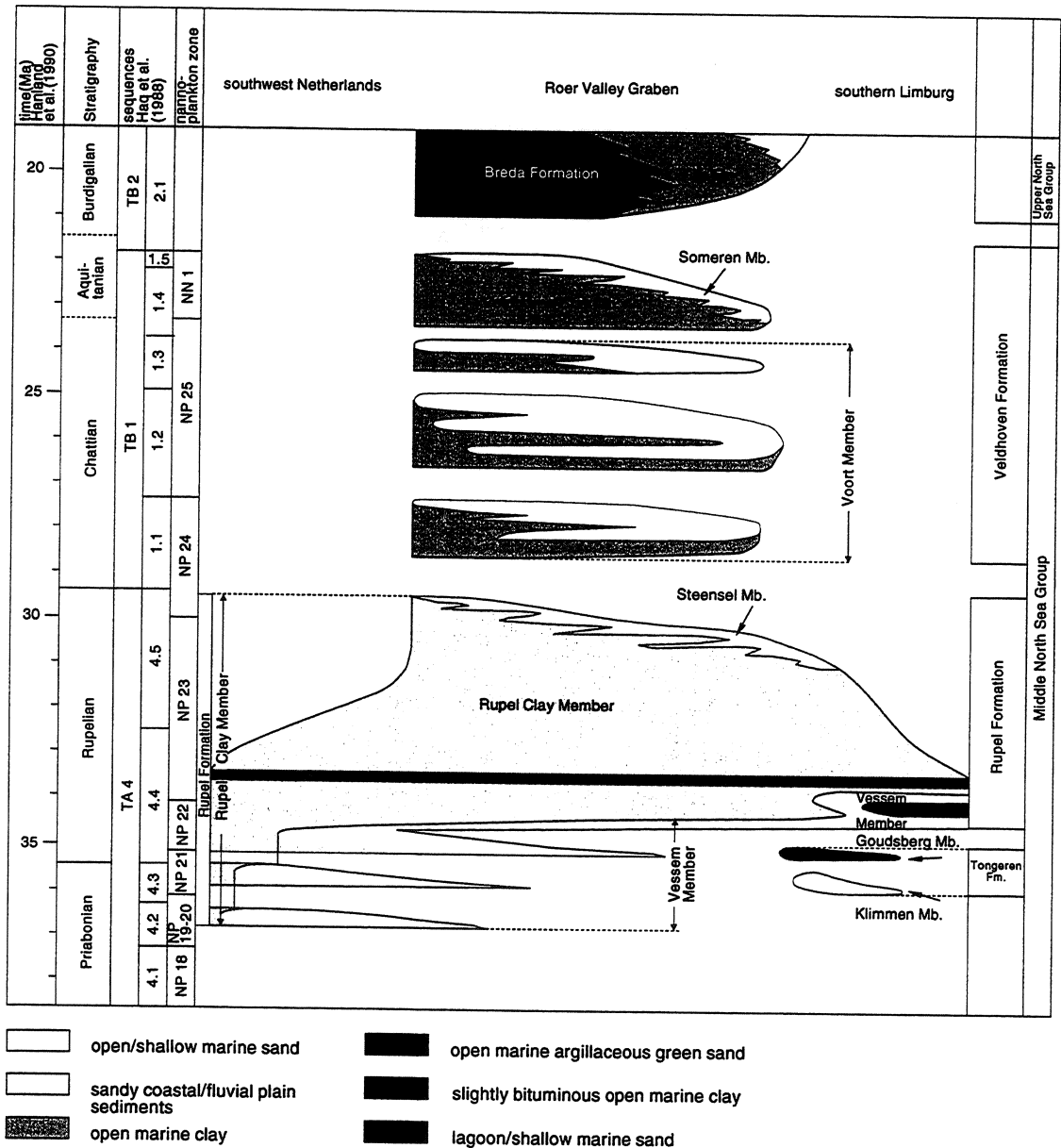


Fig. 2.2

Lithostratigrafisch diagram van het Oligoceen en het Mioceen van Zuid-Nederland (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1998).

## 2.1.2 Breda Formatie

### *Algemene karakteristiek*

Opeenvolging van grijsgroene tot donkergroene glauconitische zanden, zandige kleien en kleien. De formatie bevat fijn grind, schelpgruis en dikke slappe leemlagen in de zanden.

### *Distributie*

De Breda Formatie is aanwezig in grote delen van Nederland, met uitzondering van kleine gebieden in het oosten, zuidoosten en het zuidwesten van Nederland, en het Kijkduin Hoog.

### *Type sectie*

Rijsbergen 50A/154, 174-234 below surface; 60 m along hole

### *Afzettingsmilieu*

De Breda Formatie is afgezet in een ondiep mariene omgeving. Op seismische data is de typische scheve gelaagdheid van zandige delta-front afzettingen waarneembaar.

### *Ouderdom*

Mioceen

### *Profiel Oosterschelde - Ameland*

De Formatie van Breda is in het bestudeerde profiel aangetroffen als glauconitische zanden met kleien en lokaal bruinkoollagen. De basis van de Formatie is gedefinieerd door één of meer lagen van glauconietzand met een dikte van 2 tot 15 m die in alle eenheden voorkomt. In de Voorne Trog is de Formatie van Breda zeer zandig ontwikkeld. In de overige eenheden komen dikke pakketten glauconietzand aan de basis voor die bedekt worden door kleilagen.

## 2.1.3 Klei van Veldhoven

### *Algemene karakteristiek*

De Klei van Veldhoven bestaat uit groene en grijze kleien, welke meer siltiger en zandiger naar de top worden. De Klei van Veldhoven is typisch ontwikkeld in de Roerdal Slenk.

### *Distributie*

Deze klei is aanwezig in Centraal en Zuid-Nederland in breukbegrensde depressies.

### *Type sectie*

Veldhoven-1, 935-1047 m, below rt; 112 m along hole

### *Afzettingsmilieu*

De Klei van Veldhoven is afgezet ondiep marien afgezet.

### *Ouderdom*

Laat-Oligoceen (Chattien)

### *Profiel Oosterschelde - Ameland*

De Formatie van Veldhoven komt in het profiel Oosterschelde-Ameland niet voor als gevolg van Laat-Oligocene opheffing en erosie.

#### 2.1.4 Klei van Rupel

##### *Algemene karakteristiek*

Het laagpakket bestaat uit kleien afgewisseld door dunne siltige en zandige laagjes. Het pakket wordt zandiger en siltiger naar de basis en de top. De kleien zijn rijk aan pyriet, bevat nauwelijks glauconiet en calciumcarbonaat is geconcentreerd in septariën lagen.

##### *Distributie*

De Klei van Rupel is aanwezig in geheel Nederland, behalve in het uiterste zuidwesten en zuidoosten van het land en boven een achttal zoutdiapieren in Drenthe. Tevens is de Klei van Rupel geërodeerd in de centrale delen van het Nedersaksisch Bekken (Drenthe) en het West-Nederlands Bekken (Zuid-Holland) als gevolg van opheffing gedurende de Savische fase.

##### *Type sectie*

Veldhoven-1, 1122-1213 m, below rt; 91 m along hole.

##### *Afzettingsmilieu*

Ondiep marien met waterdiepte tot 50 m.

##### *Ouderdom*

Midden-Oligoceen (Rupelien en Vroeg-Chattien)

##### *Profiel Oosterschelde - Ameland*

Een homogene opeenvolging van kleipakketten van de Klei van Rupel komt in het profiel slechts voor in de Voorne Trog. De stratigrafische opeenvolging, de dikte en de diepte van de Klei van Rupel is, met name in de boring S05-01, vergelijkbaar met de locatie Mol in België. Aan de basis en de top zijn zandige pakketten aanwezig van het Vessem Laagpakket (zanden) en het Steensel Laagpakket (zanden en klei). In de Achterhoek zijn equivalente zandige laagpakketten aangetroffen van de Vessem en Steensel (resp. Ratum en Winterswijk).

De Klei van Rupel is aanwezig in het Noordzee Bekken met een stratigrafische opeenvolging die anders is dan de ontwikkeling in de Voorne Trog. In de boringen van L17-02 tot M09-01 (Noordzee Bekken) is de Klei van Rupel ontwikkeld met een dikte van 30 tot 90 m in een sterk gelaagde opeenvolging van mergelige kleien met waarschijnlijk enige kalkbanken van enkele meters dikte. De top en de basis van de Klei van Rupel vertoont lokaal zand- en silthoudende kleilagen.

De Klei van Rupel is afwezig in de boringen Q13-01, Q07-02 en Q04-06 op het Kijkduin Hoog, als mede in de boringen Q01-Hoorn-A-03 en Q1-Helm-A-02 in de Midden-Nederlandse breukzone als gevolg van Laat-Oligocene erosie (zie Bijlage A).

##### *Nieuwe Stratigrafische Nomenclatuur*

Oorspronkelijk gedefinieerd door NAM & RGD (1980) als Klei van Boom. Herziening van de naamgeving in de nieuwe nomenclatuur is doorgevoerd om verwarring met de Klei van Boom in België te vermijden (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1998). De Rupel Formatie wordt volgens de nieuwe nomenclator opgebouwd uit drie laagpakketten. Het Steensel en Vessem Laagpakket zijn zanden aan de top en basis van de Rupel Formatie in Zuid-Nederland:



---

NAM & RGD (1980)	Nieuwe Nomenclator: Van Adrichem Boogaert & Kouwe (1993-1998)	Oost-Nederland Van den Bosch & Hager (1984)
------------------	---	---

---

*Rupel Formatie*

	Steensel Laagpakket	Winterswijk Laagpakket
Klei van Boom	Klei van Rupel (Laagpakket)	Brinkheurne Formatie
Zand van Berg	Vessem Laagpakket	Ratum Laagpakket

---

In Oost-Nederland wordt de Klei van Rupel opgedeeld in het Winterswijk Laagpakket en de Brinkheurne Formatie. In de boringen 34G129, 34G148 en 34G159 (omgeving Winterswijk) worden deze pakketten aangetroffen als donker (blauw), grijze gekleurde, zwak siltige klei met kalkseptariën met pyrietconcreties. De klei wordt in de boring aangeduid als 'vette' klei en bevat glimmers en schelpen.

*Klei van Rupel in België en Duitsland*

Vergelijking van Oligocene Klei van Boom in België (Rupel Groep), Duitsland (Lintfort Laagpakket) en Nederland (Brinkheurne Formatie en Winterswijk Laagpakket) toont aan dat regionale correlatie van kleiige en zandige facies goed mogelijk is. Eveneens zijn de zandige facies aan de top en de basis herkenbaar in alle drie gebieden (Van den Bosch, 1974; Van den Bosch & Hager, 1984).

De Belgische equivalenten van de zandige eenheden aan de top en de basis van de Rupel Formatie vallen binnen de Zelzate of de Eigenbilzen Formatie (Marechal & Laga, 1988; Wouters & Vandenberghe, 1994).

## 2.1.5 Klei van Asse

*Algemene karakteristiek*

Het Asse Laagpakket bestaat uit donkergrijze zwak siltige kleien en bevat sporadisch glauconiet en mica. Over het algemeen zijn de kleien licht kalkig. Het bovenste deel is zandig en bevat geen calciumcarbonaat. In Oost-Nederland, is dit deel zeer zandig, heeft een bruine kleur en bevat ligniet fragmenten. De Klei van Asse wordt omschreven als een plastische tot stijve klei.

*Distributie*

Het Asse Laagpakket is aanwezig in Zuidwest-Nederland en in Noord(oost)-Nederland, met uitzondering van centrale delen van het Nedersaksisch Bekken en een aantal zoutdiapieren in Drenthe.

*Type sectie*

Dongen-1, 691-735 m below rt; 44 m along hole.

*Dikte*

Dikte tot 80 m in Zeeland waargenomen.

*Afzettingsmilieu*

Het Asse Laagpakket is afgezet in een open marien milieu met waarschijnlijk een lage waterstand (< 15 m).

*Ouderdom*

Midden- en Laat-Eoceen (Lutetien tot Bartonien)

*Profiel Oosterschelde - Ameland*

De dikte van de Klei van Asse is in geheel Nederland sterk beïnvloed door opheffing en erosie gedurende het Laat-Eoceen. In de Voorne Trog (tussen het Brabant Massief en het Kijkduin Hoog) is een dik pakket homogene klei bewaard gebleven. Op het Kijkduin Hoog en de in de Midden-Nederlandse breukzone is de Klei van Asse geërodeerd als gevolg van Laat-Eocene erosie. De Klei van Asse is met aanzienlijke dikte aanwezig in het Noordzee Bekken en een opeenvolging van rythmisch gelaagde (mergelige) kleien met kalkbanken en zandige lagen. De dikte varieert hier van 100 tot 250 m.

*Klei van Asse in België*

De Klei van Asse is niet identiek aan de Maldegem Formatie (Marechal & Laga, 1988) uit de Belgische lithostratigrafie. De laatste is lokaal opgedeeld in zanden en kleien, terwijl in Nederland er voornamelijk sprake is van kleien.

**2.1.6 Klei van Ieper***Algemene karakteristiek*

Het Ieper Laagpakket wordt regionaal onderverdeeld in twee delen op basis van karakteristieken van boorgatmetingen. Het onderste deel wordt gekarakteriseerd door bruin-grijze en beige tot roodbruine kalkloze klei met pyriet en plantenresten en reworked materiaal. Het bovenste deel omvat een aantal zandige lichamen, is kalkig en bevat glauconiet. Langs de Vroeg-Eocene kustlijn in Oost-Nederland zijn de kleien siltiger en bevatten zandige inschakelingen. In het algemeen varieert deze klei van zacht tot hard en stevig, en van plakkerig tot brokkelig.

*Distributie*

Het Ieper Laagpakket is in geheel Nederland aanwezig, met uitzondering van Zuid-Limburg en het Kijkduin Hoog.

*Type sectie*

Dongen-1, 844-985 m, below rt; 425 along hole.

*Afzettingsmilieu*

Het grootste deel van de Ieper klei is afgezet in open-mariene omstandigheden. Het basale deel heeft duidelijke invloeden van kustnabije omstandigheden (zandig, glauconiet en oxidatie-kleuren).

*Ouderdom*

Vroeg-Eoceen (Ypresien)

*Profiel Oosterschelde - Ameland*

De Klei van Ieper is een rythmisch gelaagde opeenvolging van donkere, geelbruine siltige klei en varieert in dikte van 210 m tot meer dan 350 m. In het Noordzee Bekken komen zandige kustafzettingen voor en bevat de klei glauconiet. De deltaïsche zandige lichamen bereiken diktes tot 40 m. Ook in de noordelijkste boringen van het profiel Oosterschelde-Ameland komen deze zandige lichamen voor. In het Noordzee Bekken zijn de kleien mergelig en bevatten lokaal veel kalk. De Klei van Ieper in de Voorne Trog bevat weinig kalk en relatief veel pyriet.

#### *Klei van Ieper in België*

In België wordt de naam Ieper gebruikt voor een groep (Marechal & Laga, 1988), die ongeveer equivalent is aan het Nederlandse Klei van Ieper.

### **2.1.7 Klei van Landen**

#### *Algemene karakteristiek*

In het zuidelijk deel van de provincie Noord-Brabant en in Limburg bestaat de Klei van Landen overwegend uit donkergroene, harde, siltige klei met pyriet, glauconiet en mica. Het basale deel kan mergelig en licht van kleur zijn. Naar het oosten (dichterbij de Laat-Paleocene kustlijn) bevat de klei meer fijn zand/silt en de kleur is vaak groen en bruin.

De klei heeft vaak een schilferig voorkomen, veroorzaakt door diagenetische processen.

#### *Distributie*

De Klei van Landen is in geheel Nederland aanwezig, behalve op het Kijkduin Hoog en in Oost-Nederland als gevolg van non-depositie en erosie.

#### *Type sectie*

Veldhoven-1, 1279-1363 m; 84 m along hole

#### *Afzettingsmilieu*

Open-mariene omstandigheden met waterdieptes van tientallen tot honderden meters.

#### *Ouderdom*

Laat-Paleoceen (Thanetien)

#### *Profiel Oosterschelde - Ameland*

De Klei van Landen is een sterk heterogene relatief dunne kleilaag aan de basis van het Tertiair met zeer zandige eenheden aan de basis. In de Voone Trog zijn kleien slechts aan de top aanwezig.

#### *Nieuwe nomenclatuur*

De originele definitie door NAM & RGD (1980) is aangepast door Van Adrichem Boogaert & Kouwe (1993-1997).

#### *Klei van Landen in België*

De Klei van Landen in Zuidoost-Nederland correspondeert grotendeels met het Waterschei Laagpakket van de Hannut Formatie (Landen Groep) in België (Marechal & Laga, 1988).

## 2.2 Structurele eenheden van Tertiaire ouderdom in Nederland

In Nederland zijn als gevolg van tektonische bewegingen van de korst een aantal structurele eenheden ontstaan en gekarakteriseerd worden door synclinalen, bekkens, slenken, horstblokken en breukzones. In Nederland worden negen regionaal structurele eenheden onderscheiden van Tertiaire ouderdom (Fig. 2.3).

### London-Brabant Massief

Het London-Brabant Massief, dat zich uitstrekt van de zuidoostelijke kust van Engeland, het noordwesten van België en de Ardennen, is een oude geologisch structuur die voornamelijk opgebouwd is uit Paleozoïsche gesteente. Het massief is gedurende het Tertiair verschillende malen geactiveerd gedurende opheffingsfasen. De relatieve opheffing van het massief ten opzichte van gebieden ten noorden ervan, is een opvallende karakteristiek, waarvoor de ondiepe positie van de Klei van Rupel op de noordflank van het massief (locatie Westerschelde) een belangrijke aanwijzing is.

### Voorne Trog

De Voorne Trog is een noordwest-zuidoost strekkend synclinaal tussen het London-Brabant Massief en het Kijkduin Hoog. De synclinaal heeft een asymmetrisch noord-zuid profiel met een lange zuidelijke flank die geleidelijk richting het zuiden ondieper wordt.

### Kijkduin Hoog

Het Kijkduin Hoog omvat een deel van het gebied van het West-Nederland Bekken dat o.a. gedurende het Laat-Eoceen geïnverteerd is. Als gevolg van inversie en erosie is hier het grootste deel van de Onder- en Midden-Tertiair afwezig is.

### Midden-Nederlandse breukzone

De Midden-Nederlandse breukzone is een structureel-geologische zone tussen het Jurassische Centraal-Nederlands Bekken en het West-Nederlands Bekken. De breukwerking was reeds actief gedurende de Jura, maar heeft eveneens voor vele breuken in de Tertiaire bedekking gezorgd. Alle breuken zijn gerelateerd aan de sterke dalings- en inversietektoniek van het dieper gelegen Breeveertien Bekken. De breuksystemen zijn geactiveerd gedurende het Laat-Eoceen (Pyreneïsche Fase). De Midden-Nederlandse breukzone lijkt zich naar het zuidoosten te continueren in de breukblokken ten noorden van de Roerdal Slenk.

### Noordzee Bekken

Het Noordzee Bekken wordt gekarakteriseerd door een relatief snelle daling waardoor er een dikke en complete opeenvolging van Onder-, Midden- en Boven-Noordzee sedimenten aanwezig zijn. De diepteligging van de basis van het Tertiair bedraagt direct ten noorden van Ameland meer dan 1500 m.

### Zuiderzee Bekken

Het Zuiderzee Bekken ligt in het zuidelijke deel van het Noordzee Bekken en heeft een maximale daling gedurende het Mioceen ondergaan.

### Lauwerszee Trog

Deze trog of synclinaal in het noorden van Nederland is aan de oost- en westzijde begrensd door breuken in het Tertiair die gerelateerd zijn aan zouttektoniek en gereactiveerde breukzones van het basement. De totale dikte van het Kenozoicum bedraagt meer dan 1750 m. De Hantum breukzone vormt de westelijke begrenzing van deze eenheid.

### Roerdal Slenk (Roer Valley Graben)

Deze eenheid wordt beschreven als een NW-ZO strekkende slenk die ten noorden begrensd wordt door de Peelblok en ten zuiden door het London-Brabant Massief. Het Tertiair bereikt in de Roerdal Slenk een maximum dikte van meer dan 2000 m. Sterke daling trad met name op gedurende het Oligoceen en het Mioceen.

### Neder-Rijn gebied (Lower Rhine Embayment)

Het oostelijk deel van Brabant en Limburg wordt gekarakteriseerd door een serie NW-ZO strekkende horstblokken en slenken. Het Neder-Rijn gebied omvat het zuidoostelijke deel van de Roerdal Slenk.

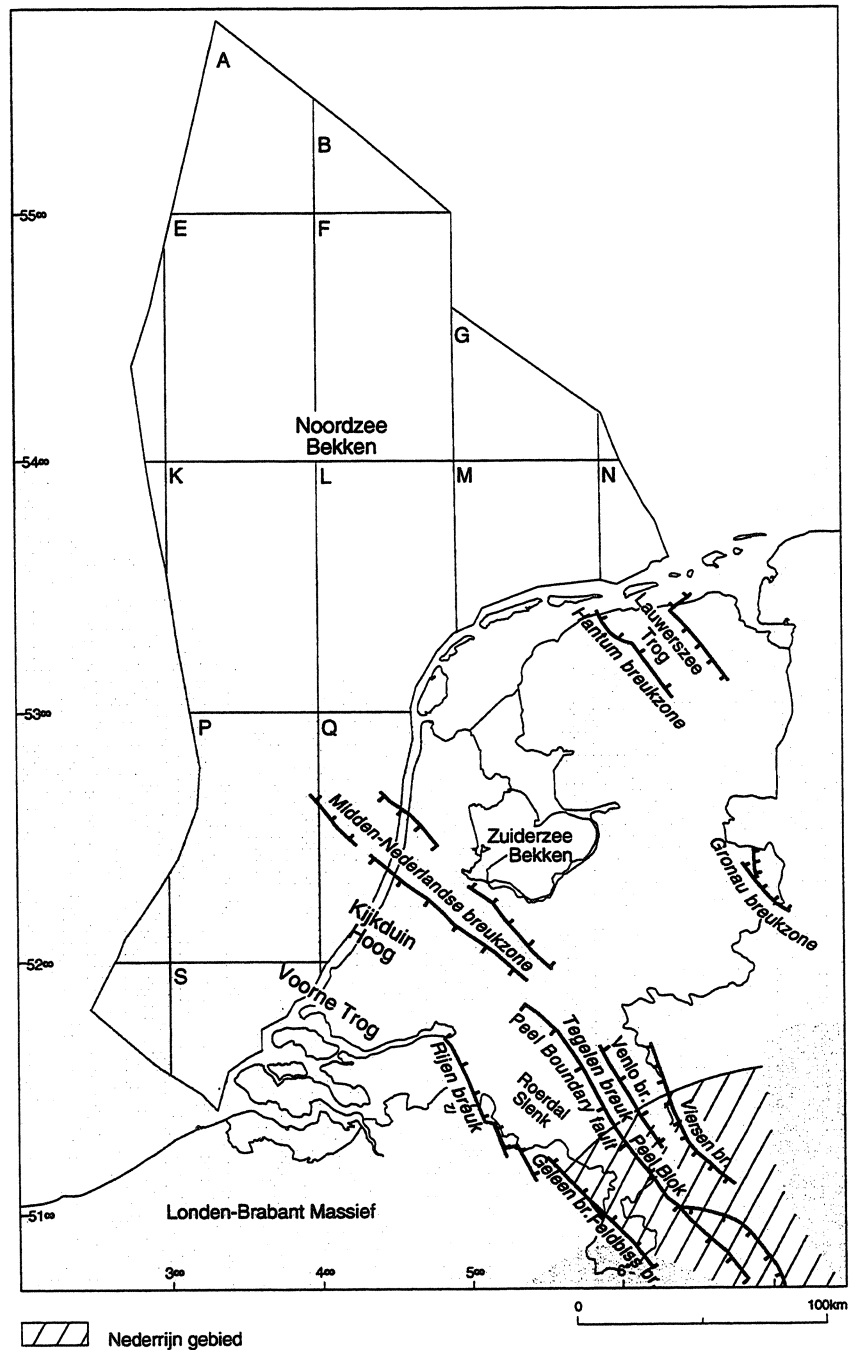


Fig. 2.3 Structureel-geologische eenheden die actief zijn geweest gedurende het Tertiair en het Kwartair.

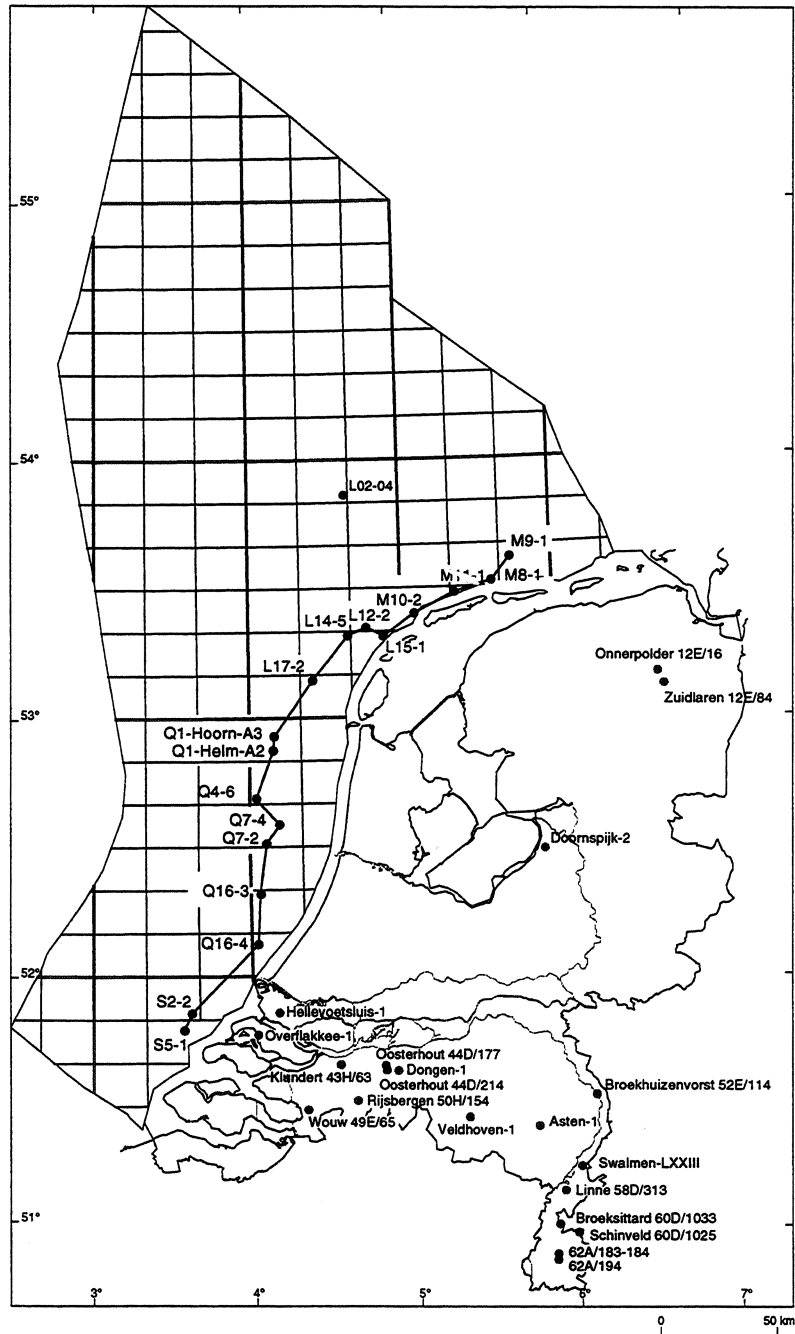


Fig. 2.4 Positie van boringen in het profiel Oosterschelde-Ameland (Bijlage A) en van de boringen die gebruikt zijn voor de herziene beschrijving van het Tertiair in de Nieuwe Stratigrafische Nomenclator (Van Adrichem Boogaert & Kouwe, 1993-1998).

### **3 Inventarisatie van geomechanische, geochemische en geohydrologische eigenschappen**

#### **3.1 Belangrijke parameters met betrekking tot mijnactiviteiten en veiligheidsstudies bij ondergrondse opslag van radioactief afval**

Geomechanische eigenschappen hebben vooral betrekking op fysische en sterkte-eigenschappen van de klei, zoals het watergehalte, het volumieke gewicht, de cohesie en elasticiteitsmodulus. Geochemische gegevens hebben zowel betrekking op het kleimateriaal als op het formatiewater en zijn van belang in relatie tot mineralisaties. Met de klei-mineralogische samenstelling kan de activiteit (of zwellingspotentieel) van een klei bepaald worden. De reactiviteit tussen klei, grondwater en ondergrondse constructiematerialen kan met geochemische gegevens beter begrepen worden. Geohydrologische eigenschappen van klei worden vooral gebruikt bij rekenmodellen en studies naar de verbreiding van radionucliden rond een opslagfaciliteit.

In Tabel 1 wordt een overzicht gegeven van parameters die verzameld en bestudeerd zijn in deze rapportage.

#### **3.2 Geomechanische parameters van offshore boringen**

Om de lithostratigrafische ontwikkeling en geomechanische parameters van Tertiaire kleipakketten te bestuderen is een profiel samengesteld met behulp van gegevens van boringen van oliemaatschappijen. De boringen zijn afkomstig uit een strook van 25 km breed langs de kust van Nederland (Fig. 2.4 en Bijlage A.2). De gegevensselectie is gebaseerd op de beschikbaarheid van gamma-ray (GR), sonic (DT), neutron (CNL), resistivity (LLS-LLD) en density (FDC) logs. Na geologische interpretatie van vijf lithostratigrafische kleipakketten zijn specifieke geofysische logs geanalyseerd om geomechanische parameters af te leiden. De theoretische onderbouwing van de gebruikte berekeningsmethoden en de resultaten van de analyse van geomechanische parameters staan toegelicht in Bijlage S.

Na geologische interpretatie zijn geomechanische parameters van Tertiaire pakketten afgeleid op dieptes van ca. 400 m tot 1500 m beneden zeeniveau van de Klei van Rupel, Klei van Asse, Klei van Ieper en Klei van Landen. Voor de interpretatie van de Formatie van Oosterhout en Breda bleken uiteindelijk te weinig geofysische gegevens te bestaan, omdat in de ondiepe delen van boorgaten (diepte < 400 m) geen geofysische metingen zijn uitgevoerd. De geomechanische gegevens hebben betrekking op de bulkdichtheid, het watergehalte, de porositeit en de elasticiteitsmodulus.



Tabel 1 Relevante geowetenschappelijke parameters voor een mijnontwerp en veiligheidsstudies met betrekking tot ondergrondse opslag.

parameter	eenheid	mijnontwerp	veiligheidsstudie
<i>Lithol. en geochemische parameters</i>			
Korrelgrootteverdeling	%	X	x
Kleigehalte	%	x	x
Kleimineralogie	-	x	x
Geochem. samenstelling poriënwater	%	x	x
Geochem. samenstelling sediment	%	x	x
<i>Geomechanische parameters</i>			
Volumieke massa bulk nat	$\rho_n$ gr/cm <sup>3</sup>	x	-
Volumieke massa bulk droog	$\rho_{dr}$ gr/cm <sup>3</sup>	x	-
Volumieke massa korrel	$\rho_s$ gr/cm <sup>3</sup>	x	-
Volumiek gewicht bulk nat	$\gamma_n$ kN/m <sup>3</sup>	x	-
Volumiek gewicht bulk droog	$\gamma_{dr}$ kN/m <sup>3</sup>	x	-
Volumiek gewicht korrel	$\gamma_s$ kN/m <sup>3</sup>	x	-
Natuurlijk watergehalte	w %	x	-
Atterbergse grenzen:			
Plasticiteitsgrens	$w_p$ %	x	-
Vloei grens	$w_L$ %	x	-
Plasticiteitsindex	$I_p$ %	x	-
Ongedraineerde schuifsterkte	$f_{undr}$ kN/m <sup>2</sup>	x	-
Elasticiteitsmodulus	E -	x	-
Schuifsterkte (triaxiaal)	$\tau_p$ kN/m <sup>2</sup>	x	-
Effectieve cohesie (triaxiaal)	$c'$ kN/m <sup>2</sup>	x	-
Effectieve inwendige wrijving	$\phi'$ °	x	-
Ultrasone snelheid	dt $\mu$ s/ft	x	-
Activiteit van klei	A %	x	-
<i>Geohydrologische parameters</i>			
Permeabiliteit	k Darcy, m <sup>2</sup>	x	x
Hydraulische doorlatendheid	K m/s	x	x
Porositeit	n %	-	x
Diffusiecoëfficiënt	Df m <sup>2</sup> /s	x	x
Hydraulische gradient	dp/dx Pa/m	-	x
<i>Thermodynamische parameters</i>			
Specifieke warmte	c J/kg.K	x	x
Thermische geleidbaarheid	$\lambda$ W/m.K	x	x
Thermische diffusiviteit	$\alpha$ m <sup>2</sup> /s	x	-
Temperatuur op 500 m - NAP	$T_{500}$ °C	x	-
Temperatuur op 1000 m -NAP	$T_{1000}$ °C	x	-

x = direct van belang

- = niet direct van belang

De in deze rapportage vermelde fysische en geomechanische parameters van Tertiaire kleipakketten in het offshore profiel zijn vastgesteld door inspectie van analoge log-data. Bij de interpretatie van de gegevens en de vaststelling van een gemiddelden, is bij de kleipakketten uitgegaan van een compactietrend die vastgesteld is met behulp van de sonic log (Rider, 1986). Deze compactie-trend van interval transit tijden  $dt$  met toenemende diepten is vooral bruikbaar bij homogene kleipakketten. Het betrouwbaarheids-interval is vanwege de gebruikte werkmethode niet kwantitatief vastgesteld. Voor de bestudeerde en berekende parameters van de geomechanische parameters, geldt een betrouwbaarheidsmarge van 10%. De variatie van bedoelde parameters treedt o.a. op als gevolg van lithologische verschillen.

### 3.3 Oosterhout Formatie

#### 3.3.1 Geomechanische parameters

Inetpretatie van de Oosterhout Formatie in het offshore profiel en het toekennen van geomechanische parameters is niet mogelijk vanwege de afwezigheid van boorgatmetingen in de ondiepe trajecten. Geomechanische testen zijn uitgevoerd op monstermateriaal van de Oosterhout Formatie en geven de volgende resultaten:

<i>parameter</i>	<i>waarde</i>	<i>locatie</i>
ongedraineerde schuifsterkte $f_{undr}$	100 kN/m <sup>2</sup>	30D-206 (Kuikduin Hoog) 255 m -NAP
watergehalte $w$	25 %	30D-206 (Kuikduin Hoog) 255 m -NAP

Richting het zuidoosten en het oosten van Nederland wordt de lithologische ontwikkeling van de Oosterhout Formatie zandiger. De onverwacht lage ongedraineerde schuifsterkte wordt verklaard door een hoog zandgehalte of verstoring van het testmonster.

#### 3.3.2 Geochemische parameters

##### Kleimineralogie

De belangrijkste kleimineralen in kleilagen van Oosterhout, Reuver en Brunssum zijn kaolinit, illiet en smectiet. Er zijn twee hoofdklassen te onderscheiden (Fig. 3.1). De één heeft zeer hoge gehalten aan kaolinit (60 % piekhoogte), en lage gehalten aan smectiet (20 % piekhoogte), terwijl de andere juist lage gehalten aan kaolinit (30% piekhoogte) en hoge gehalten aan smectiet (60 % piekhoogte) vertoont. De overgangen in kleimineralogie kunnen zeer scherp zijn (Fig. 3.2), en er kan geen stratigrafisch of ruimtelijk patroon worden aangetoond. Illietgehalten zijn vrij constant, en variëren rond de 25% piekhoogte. In lagen rijk aan organische materiaal (veen, bruinkool en organisch-rijke klei) zijn de illietgehalten vaak verlaagd (tot 10 % piekhoogte) en komen kleine hoeveelheden Al-hydroxy tussenlagen voor in de smectiet.

##### K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>O en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Er is een grote variatie in de relatie K<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in de kleien van Oosterhout, Reuver en Brunssum (Fig. 3.2 en 3.3). De variatie in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-gehalten kunnen toegeschreven worden aan variaties in het kleigehalte, waarbij lage Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-gehalten in zand, en hoge Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-gehalten in kleipakketten voorkomen. Een deel van de monsters

vertoont extreem lage  $K_2O$ -gehaltenes ten opzicht van  $Al_2O_3$ , terwijl andere juist zeer hoge  $K_2O$ -gehaltenes vertonen. Er lijken wat dat betreft twee groepen te bestaan; één met hoge  $K_2O/Al_2O_3$  ratios, en één met lage. Deze schijnbare tweedeling wordt in alle drie de kleipakketten aangetroffen, en hangt waarschijnlijk samen met variaties in de kleimineralogie, waarbij lage  $K_2O$ -gehaltenes t.o.v.  $Al_2O_3$  correleren met hoge kaolinit-gehaltenes. In lagen rijk aan organisch materiaal met lage illiet-gehaltenes zijn  $K_2O$ -gehaltenes vaak lager t.o.v.  $Al_2O_3$ .

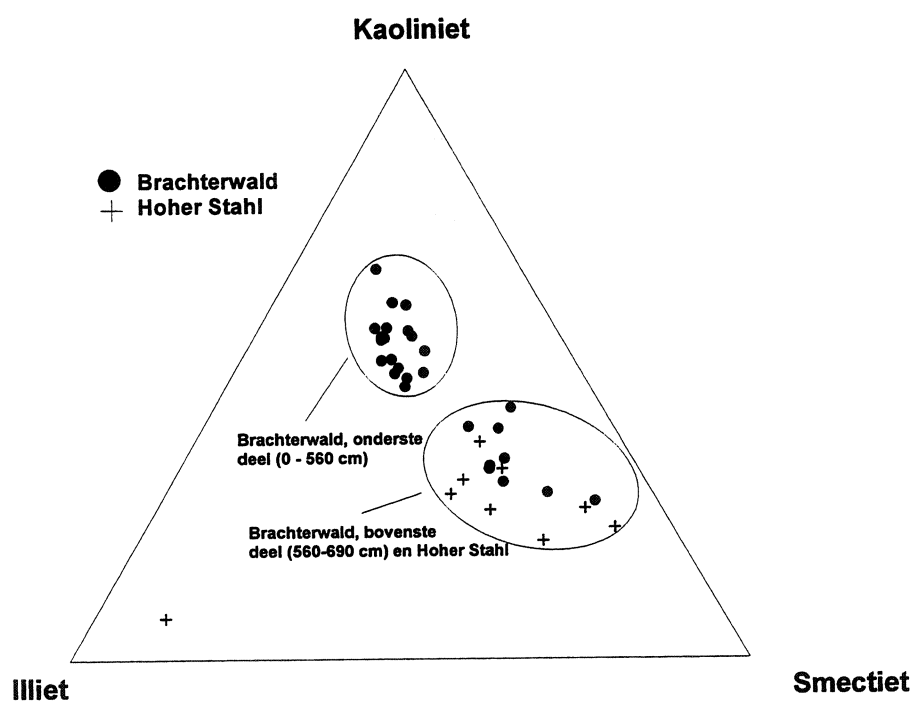
In het Limburgse deel van de Reuver en Brunssum kleien komen lokaal sterk verhoogde gehaltenes aan  $TiO_2$  voor in dunne lagen van enkele tientallen centimeters dikte (Fig. 3.2 en Fig. 3.4). Dit wordt veroorzaakt doordat in deze laagjes grote hoeveelheden zware mineralen (met name rutiel:  $TiO_2$ ) voorkomen in de fijn silt fractie. Dergelijke aanrijkingen zijn niet aangetroffen in de Brabantse boringen. De gehaltenes aan  $Na_2O$  zijn in het algemeen zeer laag (<0.2 %). Echter, in de meest recente afzettingen van Oosterhout en Reuver komen plaatselijk hogere gehaltenes voor (tot 0,5-1 %), met name in siltige klei en in de fijnere zandlagen. Dit Na is waarschijnlijk aanwezig in (plagioklaas-) veldspaten.

#### Diagenetische gevoelige elementen

De klei van Oosterhout vertoont hoge gehaltenes aan CaO als gevolg van de aanwezigheid van mariene schelpen. Daarnaast komen er in Brabant zowel in de Oosterhout als in de Reuver klei lagen voor waarin als gevolg van de aanwezigheid van dolomietkorrels in de zandfractie de MgO- en CaO-gehaltenes verhoogd zijn. In de Limburgse afzettingen komt lokaal sideriet voor, soms als mineraaltjes van zandgrootte in de kleipakketten, soms als siderietbanken in zandlagen, en soms als septarie-achtige knollen (tot enkele dm in doorsnede). Als gevolg hiervan zijn plaatselijk de  $Fe_2O_3$ , MnO en CaO-gehaltenes verhoogd.

In de Oosterhout en Reuver kleien komt lokaal pyriet voor. De hoogste concentraties aan pyriet komen voor in lagen rijk aan organisch materiaal (bruinkool, organisch-rijke klei). In Limburg komen bruinkoollagen en banden rijk aan organische stof met name voor in de top van de Klei van Reuver. De zwavelgehaltenes kunnen als gevolg van de aanwezigheid van die sulfides oplopen tot enkele procenten. Daarnaast vertonen elementen als As, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn, U, Y, Mo en REE (rare earth elements) ook verhoogde gehaltenes in organisch-rijke lagen. Dit is deels een gevolg van de inbouw in sulfides, deels van andere organische stof gerelateerde aanrijgingsprocessen.

Met nadruk wordt gesteld dat de aanwezigheid van deze sulfides beperkingen oplegt aan antropogene activiteiten. Wanneer nl. door bijvoorbeeld ondergronds bouwen, waterwinning of vervuiling zuurstof of andere oxiderende stoffen (b.v. nitraat) de organisch-rijke lagen bereiken dan zullen de sulfides oxideren. Hierdoor kunnen sporenelementen, (waaronder de zware metalen) vrij komen in het grondwater, terwijl er tegelijkertijd verzuring optreedt.



*Fig. 3.1* Driehoekdiagram van de kleimineralogische samenstelling (piekhoogtepercentages) van de Klei van Reuver in twee verschillende groeven (Brachterwald en Hoher Stahl). Er zijn duidelijk twee verschillende groepen te onderscheiden. De klei in het onderste deel van Brachterwald vertoont hogere kaoliniet- en lagere smectiet-gehalten dan het bovenste deel en dan de klei uit Hoher Stahl.

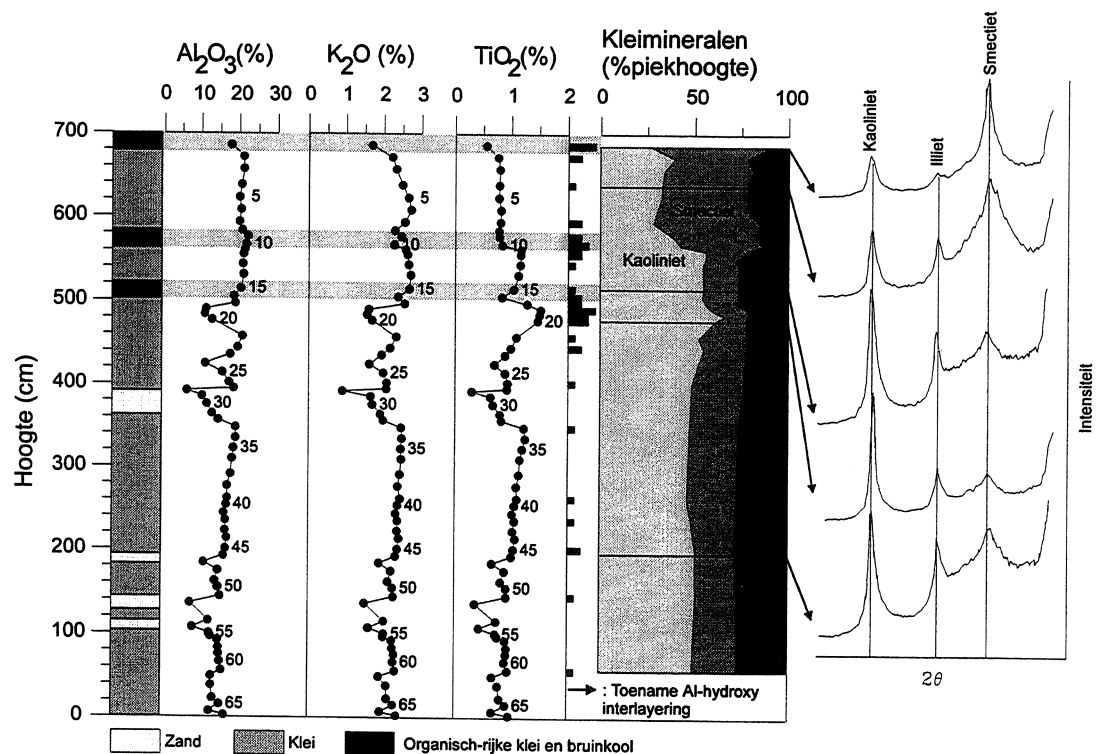


Fig. 3.2 Variatie in gehalten aan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$  en de kleimineralogie in de klei van Reuver (groeve Brachterwald). De gehalten aan smectiet zijn hoger in het deel boven de middelste organisch-rijke laag dan daaronder, terwijl de kaolinite-gehalten lager zijn. De illiet-gehalten zijn lager in de organisch-rijke lagen, terwijl daar ook Al-hydroxy interlayering voorkomt in de smectiet. Direct onder de onderste organisch-rijke laag neemt het  $\text{TiO}_2$ -gehalte toe.

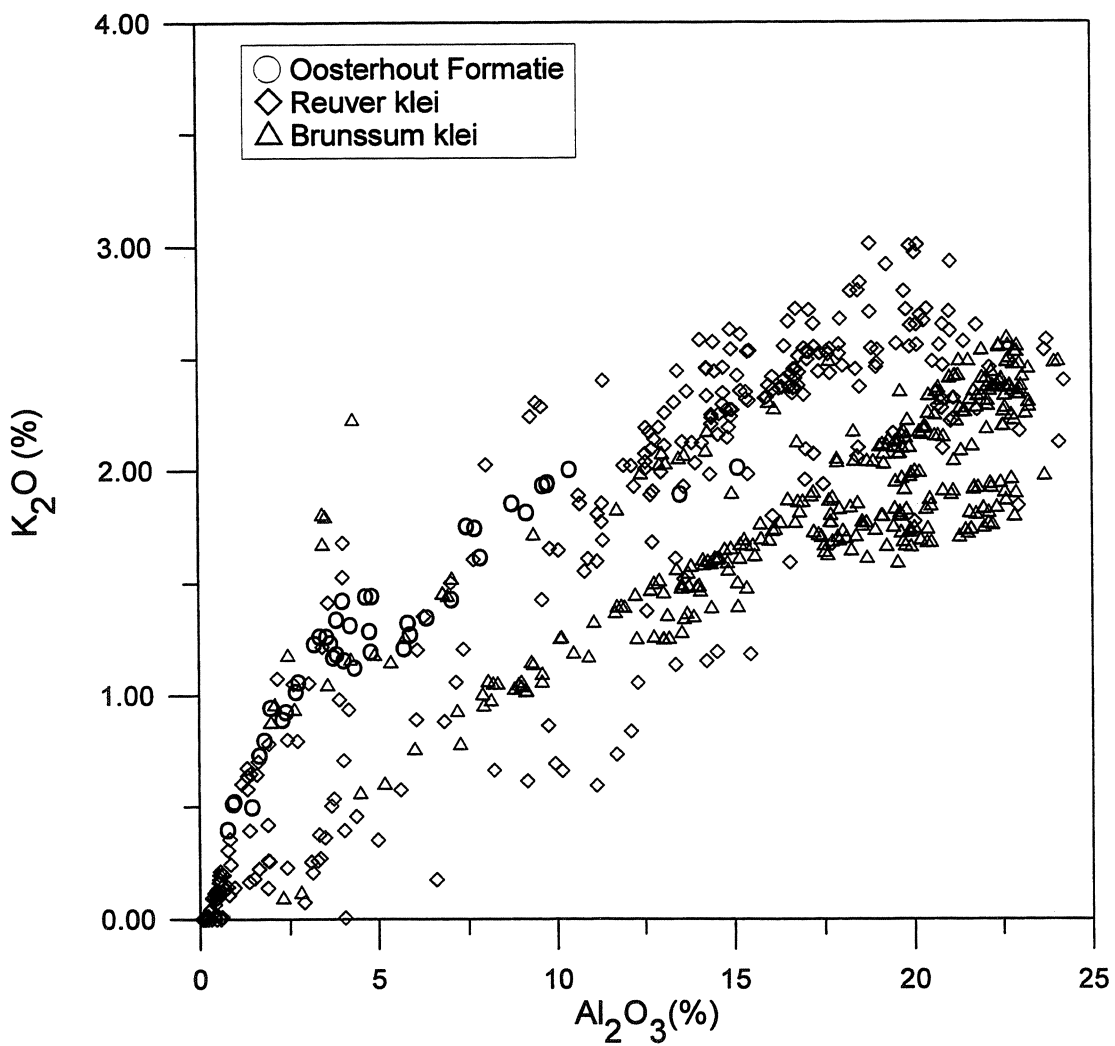


Fig. 3.3 Variatie in de relatie  $K_2O-Al_2O_3$  in de Klei van Oosterhout, Reuver en Brunssum.

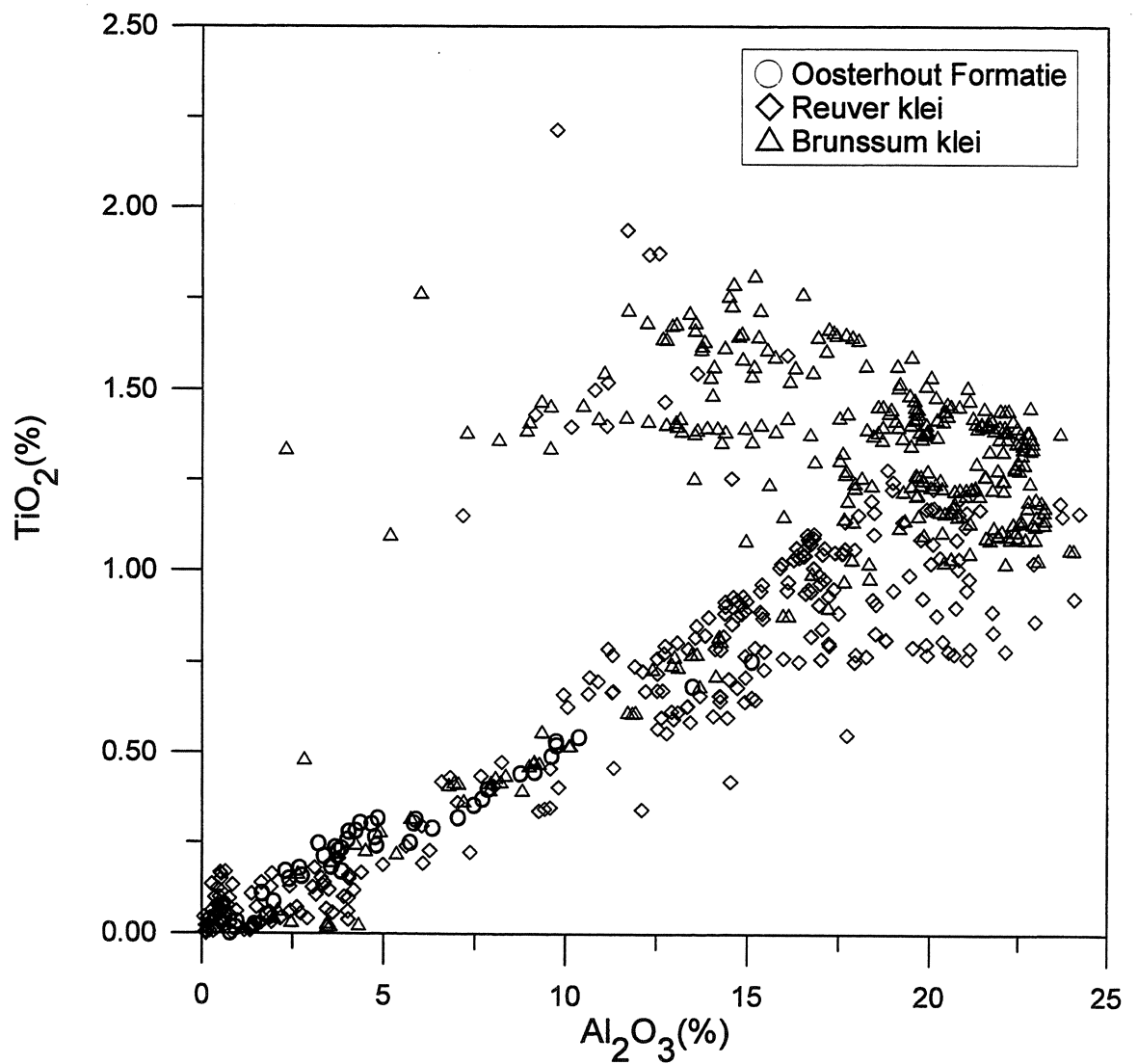


Fig. 3.4 Variatie in de relatie  $\text{TiO}_2$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  in de Klei van Oosterhout, Reuver en Brunssum.



### 3.3.3 Geohydrologische parameters

De beschikbare analyses laten een toename van het kleigehalte (korrels < 2  $\mu\text{m}$ ) in zuidelijke richting van Nederland en naar de diepte zien van enkele procenten naar meer dan 10 % (RGD, 1984). Er is geen duidelijke relatie tussen lutum en/of slibgehalte en de permeabiliteit gevonden. De doorlatendheid varieert tussen  $3 \times 10^{-6}$  m/s (gecorrigeerd Breddin) voor kleiige afzettingen tot  $3,6 \times 10^{-5}$  m/s (kernbepaling) voor zandiger afzettingen. Van de kernen met de hoogste slibgehalten zijn helaas geen doorlatendheden bepaald. Deze bepalingen zijn verricht aan monsters afkomstig van boringen nabij Lauwerszee, Overijssel en Midden-Nederland (boringen 3C17, 16G92, 26C120).

De Klei van Brunssum is in de Groeve Hendrik nabij Brunssum onderzocht. Deze fluviatile afzetting bestaat uit lagen met wisselende samenstelling variërend van matig siltig zand tot zwak siltige klei. Het grofste zand is matig fijn. De kleien zijn rijk aan organisch materiaal. Ook komen regelmatig bruinkoollagen voor.

Voor de permeabiliteit van de meer zandige pakketten van de Formatie van Oosterhout wordt verwezen naar Bijlage Q.

<i>parameter</i>	<i>waarde</i>	<i>locatie</i>
<b>Formatie van Oosterhout</b>		
lutumgehalte (<2 $\mu\text{m}$ )	0 - 10 %	3C17, 16G92, 26C120
porositeit <i>n</i>	35 %	idem
doorlatendheid <i>K</i>	$3 \times 10^{-6}$ - $3,6 \times 10^{-5}$ m/s	idem
doorlatendheid <i>K</i>	$2,1 \times 10^{-4}$ - $8,3 \times 10^{-8}$ m/s	Waterwinning Oosterhout (kaartblad 44W)
doorlatendheid <i>K</i>	$10^{-7}$ - $10^{-9}$ m/s	Kijkduin 30D-206 255 m -NAP
<b>Klei van Brunssum</b>		
silt gehalte	14 - 98 %	Groeve Hendrik, Zuid- Oost Limburg
doorlatendheid <i>K</i>	$10^{-5}$ - $7 \times 10^{-10}$ m/s	Groeve Hendrik

### 3.4 Formatie van Breda

#### 3.4.1 Geomechanische parameters

In het offshore profiel is de basis van de het pakket geïnterpreteerd en zijn er geomechanische parameters afgeleid van de sonic log (Bijlage B).

In de rapportage van CAR-Fase I staat enige relevante geomechanische informatie van kleiige sedimenten van de Formatie van Breda:

<i>parameter</i>	<i>waarde</i>	<i>locatie</i>
Vloeigrens $w_L$	70,5 %	Ockenburg 30D-206 433 m -mv
Plasticiteitsgrens $w_p$	25,6 %	idem
Plasticiteits Index $I_p$	44,9 %	idem

#### 3.4.2 Geochemische parameters

Van de Formatie van Breda is een serie van tien geochemische analyses beschikbaar van een glauconiethoudend grof zandpakket. De monsters die hier gepresenteerd worden zijn dus zeker niet representatief voor kleipakketten.

De meest opvallende kenmerken van de zanden van Breda zijn de hoge gehalten aan  $K_2O$ , wat veroorzaakt wordt door de aanwezigheid van glauconiet in de monsters. Naast  $K_2O$  zijn ook elementen als As, Cr, Ni, Pb, Zn en V aanwezig in de glauconiet. Op verschillende niveaus in de Formatie van Breda komen lagen voor met fosforietbrokken. Deze bestaan met name uit apatiet ( $Ca_5(PO_4)_3(OH,F,Cl)$ ), maar bevatten daarnaast een reeks aan andere elementen (Tabel 2).

#### 3.4.3 Geohydrologische parameters

De Formatie van Breda bestaat uit een heterogeen pakket van afwisselend klei en zandlagen. In Noord-Nederland en de Roerdal Slenk zijn dikke pakketten zanden aanwezig (RGD, 1985).

De analyses zijn uitgevoerd op monsters van boringen gelegen in Midden-Nederland. Van de onderzochte monsters ligt het lutumpercentage tussen de 10 en 20 %. Er zijn slechts weinig permeabiliteitsmetingen aan kernen uitgevoerd.

Met behulp van korrelgrootteparameters (Breddin) enkele permeabiliteitswaarden geschat (RGD, 1985):

<i>parameter</i>	<i>grootte</i>	<i>locatie</i>
lutumgehalte	10 - 19 %	Boringen: 16G92, 26C120, 27F36, 31E149, 31F256, 32C205, 40B306
doorlatendheid <i>K</i>	$10^{-6}$ - $2 \times 10^{-5}$ m/s	idem
doorlatendheid <i>K</i> (klei)	$10^{-9}$ m/s	26C120 op diepte 356,2 m
porositeit <i>n</i>	27,2 - 29,8 %	16G92

	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>	<i>Ni</i>	<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>As</i>	<i>Se</i>	<i>Sr</i>
Fosforiet 1	12	308	17378	3	5	3	12	97	0,22	925
Glaucaniet 1	104	88	91936	6	8	11	49	47	0,32	84
	<i>Y</i>	<i>Mo</i>	<i>Ba</i>	<i>La</i>	<i>Ce</i>	<i>Pr</i>	<i>Nd</i>	<i>Sm</i>	<i>Eu</i>	<i>Gd</i>
Fosforiet 1	15	0,56	124	16	31	3	14	3	0,5	3
Glaucaniet 1	18	0,88	44	66	232	16	66	12	1,66	9
	<i>Tb</i>	<i>Dy</i>	<i>Ho</i>	<i>Er</i>	<i>Tm</i>	<i>Yb</i>	<i>Lu</i>	<i>Pb</i>	<i>Th</i>	<i>U</i>
Fosforiet 1	0,5	3	0,61	2	0,24	2	0,23	5	2	45
Glaucaniet 1	1,21	6	0,85	2	0,24	1	0,18	14	7	5

**Tabel 2** Chemische samenstelling van een fosforiet en van glaucaniet-rijk zand uit de Formatie van Breda van de boring Reusel (ICP-MS analyses in ppm).

### 3.5 Klei van Veldhoven

#### 3.5.1 Geomechanische parameters

De Klei van Veldhoven is in het offshore-gebied geheel geërodeerd. In het onshore gebied zijn geen geomechanische gegevens bekend.

#### 3.5.2 Geochemische parameters

De Klei van Veldhoven is in het offshore-gebied geheel geërodeerd. In het onshore gebied zijn geen geochemische gegevens bekend.

#### 3.5.3 Geohydrologische parameters

De Klei van Veldhoven is in het offshore-gebied geheel geërodeerd. In het onshore gebied zijn er geen geohydrologische gegevens bekend van de Klei van Veldhoven bekend, maar slechts van het eronder liggende Zand van Voort. De zanden van Voort komen in Zuid-Nederland voor. Genoemde permeabiliteiten zijn gemeten aan kernen:

<i>parameter</i>	<i>grootte</i>	<i>locatie</i>
lutumgehalte	10 - 21 %	boringen: 46C2, 52C26, 52D23, 58B1, 58E45, 58E61,
porositeit <i>n</i>	40 - 50 %	idem
doorlatendheid <i>K</i>	$2,1 \times 10^{-7} - 8 \times 10^{-6}$ m/s	idem

## 3.6 Klei van Rupel

Van de Klei van Rupel is relatief veel bekend. Er zijn zowel geomechanische parameters bekend uit offshore boringen als op de verschillende projectlocaties, zoals de Westerschelde (WOV) en Mol-België (SCK-CEN). Om de inventarisatie van parameters overzichtelijk te houden zijn de gegevens van de verschillende locaties gescheiden gehouden. Vanwege de verschillen in geologische ontwikkeling, diepteligging, meetmethodiek en aard van de gegevens zijn niet alle ogenschijnlijk dezelfde gegevens direct vergelijkbaar. Correlaties van parameters worden in Hoofdstuk 6 besproken.

### 3.6.1 Geomechanische parameters

#### Profiel Oosterschelde-Ameland

Op basis van een set boorgatmetingen zijn een vijftal geomechanische parameters geanalyseerd en berekend:  $dt$  met sonic, de bulk massa  $\rho_b$  met FDC, porositeit  $n$  met CNL, watergehalte  $w$  met CNL en elasticiteits modulus  $E_{dyn}$  met sonic log. De berekeningsmethodiek en werkmethode staan beschreven Bijlage S.2).

De gemiddelde ultrasone snelheden in de Klei van Rupel variëren van 147 tot 167  $\mu\text{s}/\text{ft}$  en vertonen een lineair verband op logaritmisch schaal tegen de diepte (Bijlage C). De gemiddelde bulkdichtheid  $\rho_b$  neemt toe van 1,95 op 220 m diepte tot 2,08  $\text{gr}/\text{cm}^3$  op een diepte van 720 m. Vergeleken met het volumieke massa  $\rho_b$  van de Klei van Asse en de Klei van Ieper heeft de Klei van Rupel relatief hoge waarden.

De porositeit  $n$  van de Klei van Rupel neemt naar een diepte van 720 m af tot 36 % in het Noordzee Bekken. Deze verlaging betekent een aanzienlijke verlaging van het watergehalte van 25 % in de Westerschelde tot 18 % bij Ameland. Het gemiddelde watergehalte  $w$  van de Klei van Rupel in de boring S05-01 bedraagt 24 % en is daar bijna gelijk aan 23 % op de locatie Mol (diepteligging van 230 m).

Wanneer bij de berekening van de dynamische elasticiteitsmodulus  $E_{dyn}$  de ongedraineerde poisson's ratio gebruikt wordt ( $\nu = 0,4 - 0,45$ ), volgt uit de waarde  $dt$  van de bestudeerde kleipakketten een  $E_{dyn}$  van 2250-3500 MPa (Bijlage G). Voor het afleiden van de statische E-modulus dient een reductie-factor te worden toegepast. Deze kan, afhankelijk van de grootte van de rek in een triaxiaal proef, 0,1 tot 0,7 bedragen (Hardin & Drnevich). De grootte van de E-modulus is dan vergelijkbaar met de  $E_{stat}$  die bepaald is met ongedraineerde triaxiaalproeven van de Klei van Rupel bij de Westerschelde.

#### Zuid en Oost-Nederland

Geomechanische classificatie parameters de volumieke massa  $\rho_b$ , de Atterbergse grenzen en de void ratio, verschillen weinig tussen de lokaties Westerschelde,

Groenlo en Mol (Schokking & Nooy van der Kolff, 1995). De geologische opbouw is weliswaar niet identiek, maar de grootte van geotechnische classificatie parameters verschilt weinig, ondanks de variaties in lithologie, diepteligging van de monsters (resp. 43 m, 107-125 m en 247 m). De sterkte in Mol is echter vijf maal zo groot als in de Westerschelde, resp. 200-230 kPa en 2 MPa (zie par. 3.6).

### **3.6.2 Geochemische parameters**

Voor geochemische en kleimineralogische gegevens van de (Nederlandse) Klei van Rupel en de (Belgische) Klei van Boom wordt verwezen naar par. 3.6.4c en 3.6.5c.

### **3.6.3 Geohydrologische parameters**

Voor geohydrologische gegevens van de Klei van Rupel wordt verwezen naar par. 3.6.4d en 3.6.5d.

### 3.6.4 Dataset Westerschelde

Voor deze paragraaf is veel van de informatie ontleend aan RGD (1992), WOV/GD (1994, 1995a, 1995b, 1995c, 1995d) en NITG-TNO (1998). De gegevens zijn afkomstig uit geotechnische onderzoeken van de Klei van Rupel onder de Westerschelde ten behoeve van de aanleg van een vaste oeververbinding.

#### 3.6.4a Geologische parameters

De Formatie van Rupel bestaat uit mariene afzettingen van Midden-Oligocene ouderdom. Er worden twee lithostratigrafische eenheden onderscheiden: de Klei van Rupel en de Zanden van Vessem.

De Klei van Rupel is onder de Westerschelde 4 tot 40 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). De Klei van Rupel onder de Westerschelde 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 onderen toe afnemende gamma-waarde van boorgatmetingen (NITG-TNO, 1998).

##### *Korrelgrootte distributie*

De lutumfractie ( $< 2 \mu\text{m}$ ) van de Klei van Rupel varieert van 20 tot 70 % (Bijlage H). De basis van de Klei van Rupel is zandiger en gaat geleidelijk over in het Zand van Berg (Vessem Laagpakket) dat direct onder de Klei van Rupel ligt. Slechts in de onderste helft van de Klei van Rupel worden significante silten en klei- en silthoudende zandige laagjes gevonden.

Het lateraal monotone 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. Verschillen in het kleigehalte, het organische stofgehalte, de mineralogische samenstelling en de hoeveelheid kalkhoudende niveaus zijn het gevolg van verschuivingen in het sedimentatiemilieu tijdens de afzetting.

De uit het gebied rond Antwerpen bekende septaria-lagen zijn in het onderzochte tracé van de Westerscheldetunnel niet aangetroffen. Septariën zijn kalkachtige concreties die in specifieke horizonten voorkomen. De horizontale lengte van de septariën 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.

De basis van de Klei van Rupel in de boringen en sonderingen 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 (RGD, 1992).

### 3.6.4b Geomechanische parameters

#### *Geotechnische indeling Klei van Rupel*

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

*Zone 43* Klei van Rupel (door WOV/GD Boomse Klei genoemd), zwak tot matig siltig incidenteel enkele dunne zandlaagjes of zandlenzen (dikte < 2mm).

*Zone 44* Klei van Rupel, 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).

#### *Atterbergse grenzen*

De plasticiteitsgrens van de Klei van Rupel varieert tussen 10 en 30 % (gemiddelde is 22%) en de vloeigrens varieert van 30 tot 100 % (gemiddelde 70 %; Bijlage I en Fig. 3.5).

De Klei van Rupel wordt op basis van deze gegevens in een Casagrande chart geclassificeerd als hoog plastische klei (categorie CH; Bijlage O).

#### *Eenheidsgewichten*

Het natte volumieke gewicht van de Klei van Rupel varieert van 19 tot 21 kN/m<sup>3</sup>, het droge volumieke gewicht van 15 tot 16 kN/m<sup>3</sup>. De volumieke gewichten van de Klei van Rupel variëren weinig, terwijl het watergehalte grote verticale variatie vertoont. Binnen een meter in een boring kan het watergehalte 10 % hoger of lager worden (Bijlage J).

#### *Watergehalte*

Het gemiddelde watergehalte van de Klei van Rupel onder de Westerschelde bedraagt 25 %, welke waarde erg dicht bij de gemiddelde waarde van de plasticiteitsgrens van 22 % ligt. Het natuurlijk watergehalte (bij 105 °C drogen) bedraagt 17 tot 33 % (Bijlage J en Fig. 3.5). Het watergehalte versus lutumgehalte van de Klei van Rupel onder de Westerschelde staat weergegeven in Fig. 3.6. De relatie geeft aan het lutumgehalte onafhankelijk is van het watergehalte is.



*Porositeit*

De porositeit van de Klei van Rupel vertoont, analoog aan het watergehalte, een grote variatie van 33 tot 49 % (Bijlage K).

*Volumieke korrelgewicht van klei*

Het gemiddelde volumiek korrelgewicht bedraagt 26,7 kN/m<sup>3</sup> (Bijlage L).

*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 Rupel is groot en is waarschijnlijk het gevolg van verstoring van de korrelstructuur tijdens monstername. De ongedraineerde schuifsterkte van de Klei van Rupel kan ook worden geschat met de conusweerstand  $q_c$  van de Klei van Rupel. De conusweerstand vertoont een homogeen beeld en bedraagt gemiddeld 4 á 5 MPa (aan top ca. 6 á 7 MPa). De omgerekende ongedraineerde sterkte  $f_{u,qc}$  van 200-325 kPa (aan de top 300 - 450 kPa) komt goed overeen met de ongedraineerde sterkte  $f_{uu}$  triaxiaal van 297 - 300 kPa die in het laboratorium bepaald is (Bijlage M). De omrekening van conusweerstand  $q_c$  naar ongedraineerde sterkte  $f_u$  is uitgevoerd volgens de methode van Robertson & Campanella (1983).

*Overconsolidatie*

Uit een nadere beschouwing van de oedometerproefresultaten lijkt de preconsolidatiespanning tussen ca. 1000-2000 kPa te liggen (WOV/GD, 1995c). Dit impliceert dat de overconsolidatie (OCR) ter plaatse van de WOV tussen ca. 5 en 10 ligt. De overconsolidatieratio (OCR) is de verhouding tussen de opgelegde grenspanning en de berekende verticale effectieve spanning:

$$OCR = \rho_g' / \sigma_{v0}'$$

$\rho_g'$  grensspanning [kN/m<sup>2</sup>]

$\sigma_{v0}'$  effectieve verticale spanning [kN/m<sup>2</sup>]

Preconsolidatie kan verschillende oorzaken hebben. Gezien de ouderdom van de Klei van Rupel kan een groot deel toegeschreven worden aan 'aging'. Verder wordt aangenomen dat er erosie heeft plaatsgevonden na een opheffingsfase, waardoor de belasting door het bovenliggende pakket is afgenomen.

Schokking & Nooy Van der Kolff (1995) rapporteren weinig invloed van de verschillende geologische begravingsdiepten op geotechnische parameters (samendrukbaarheid, schuifsterkte, permeabiliteit).

**Tabel 3** Geomechanische en geohydrologische parameters van de Klei van Rupel onder de Westerscheldetunnel.

parameter	Klei van Rupel
Mineralogie (XRD, relatief)	Kaolinit 18 % Illiet 35 % Montmorill. 47 %
Korrelfractie < 0,002 mm (%) *	46
$w_L$ (%) *	70
$w_p$ (%) *	22
$I_p$ (%) *	48
$\gamma_n$ (kN/m <sup>3</sup> ) *	19,5
$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> ) *	15,4
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> ) *	26,7
$w_{105}$ (%) *	25
S (%) *	96
$f_{undr}$ (kPa) CPT	200-235
$f_{uu\ undr}$ (kPa) triaxiaal, ongedr.	290-300

\* *gemiddelde waarde*

$w_L$	vloeigrens	$\gamma_n$	eenheidsgewicht nat sediment
$w_p$	plasticiteitsgrens	$\gamma_d$	eenheidsgewicht droog sediment
$I_p$	plasticiteitsindex	$\gamma_s$	eenheidsgewicht van de korrels
$w_{105}$	watergehalte (105 °C drogen)	$f_{undr}$	ongedraineerde sterkte
S	waterversadigingsgraad		
$k_v$	verticale doorlatendheid		

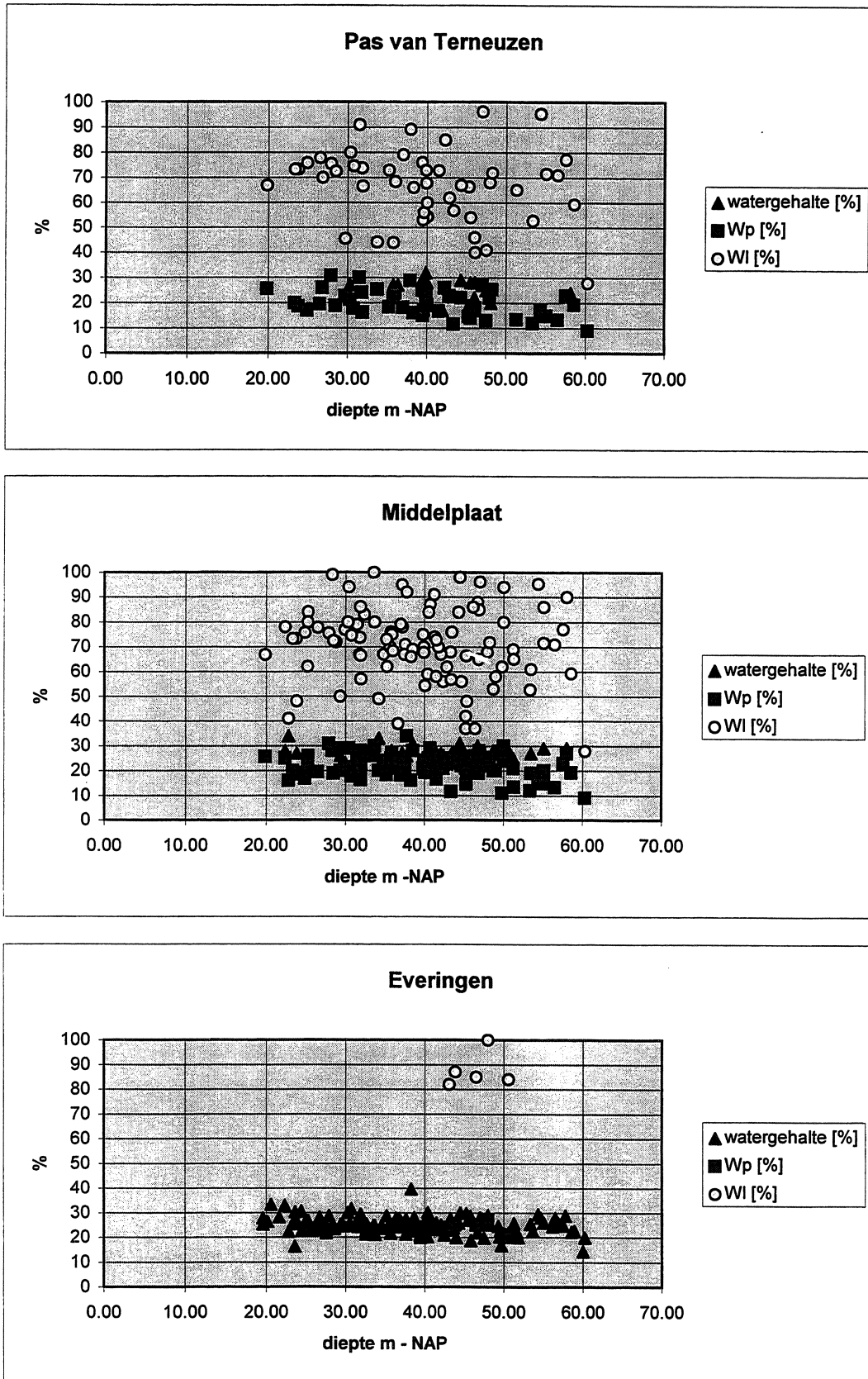


Fig. 3.5 Watergehalte, plasticiteits- en vloeigrens versus diepte van de Klei van Rupel in het gebied van de Westerschelde (NITG, 1998).

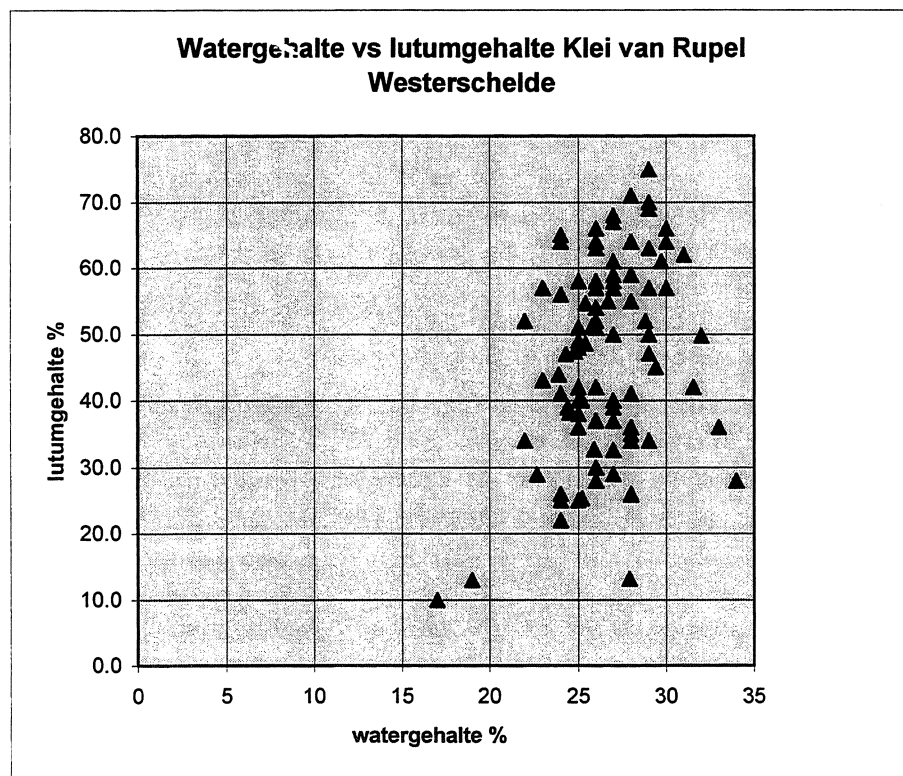


Fig. 3.6 Watergehalte versus lutumgehalte van de Klei van Rupel onder de Westerschelde (NITG, 1998).

### 3.6.4c Geochemische parameters

Van de Klei van Rupel onder de Westerschelde zijn de hoofdelementen beschikbaar (Fig. 3.7 en 3.8). De  $\text{Na}_2\text{O}$ -gehaltenes van de Klei van Rupel liggen in het algemeen vrij laag (0-0,5 %). Deze  $\text{Na}_2\text{O}$  is waarschijnlijk vooral aanwezig in de veldspaten. Een uitzondering hierop is de top van het pakket, waar de  $\text{Na}_2\text{O}$ -gehaltenes oplopen tot 1 % (Fig. 3.8).

De monsters vertonen extreem hoge  $\text{K}_2\text{O}$ -gehaltenes t.o.v.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , wat waarschijnlijk het gevolg is van de aanwezigheid van glauconiet. De gehaltenes aan  $\text{TiO}_2$  zijn vergelijkbaar met de Pliocene kleien (Oosterhout, Reuver, Brunssum). De  $\text{MgO}$ -,  $\text{CaO}$ - en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -gehaltenes zijn in sommige monsters verhoogd (Fig. 3.8). Dit komt waarschijnlijk door de aanwezigheid van carbonaten (calciet, sideriet, evt. dolomiet) en mogelijk sulfides (pyriet). Vandenberghe (1978) rapporteert S-gehaltenes tot 2%. De  $\text{P}_2\text{O}_5$ -gehaltenes zijn in het algemeen laag, maar in enkele gevallen lopen ze op tot rond de 1%. Dit duidt er op dat zeer plaatselijk diagenetische fosfaat-mineralen aanwezig zijn, bijvoorbeeld vivianiet ( $\text{Fe}(\text{PO}_4)_2$ ) of apatiet ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$ ). De  $\text{Na}_2\text{O}$ -gehaltenes van de klei van Boom liggen in het algemeen vrij laag (0-0,5 %). Deze  $\text{Na}_2\text{O}$  is waarschijnlijk vooral aanwezig in veldspaten. Een uitzondering hierop is de top van het pakket, waar de  $\text{Na}_2\text{O}$ -gehaltenes op lopen tot 1 %. Uit de Cl-gehaltenes in het poriënwater (NITG-TNO, 1998) blijkt dat deze verhoogde  $\text{Na}_2\text{O}$ -gehaltenes samen hangen met samen met het binnendringen van recent zeewater vanuit de Westerschelde in het kleipakket.

#### Kleimineralogie

De Klei van Rupel bij de Westerschelde bevat een hoog gehalte van 45 tot 50 % aan zwellende klei, smectiet (Bijlage N en Fig. 3.8). Het gehalte kaoliniet van de Klei van Rupel in de Westerschelde is lager dan in Mol, maar identiek aan het vergelijkbare stratigrafische niveau in de klei-groeve van Terhagen in België (zie verder par. 3.6.5c).

Het is niet duidelijk of dit verschil wordt veroorzaakt door een verschil in de XRD-kwantificering, of doordat er verschillende brongebieden van het sediment zijn. Om deze reden kunnen de kleimineralogisch gegevens niet direct met elkaar vergeleken worden (bijvoorbeeld met Vandenberghe, 1978).

#### Activiteit van klei

Een methode, waarmee de invloed van de mineralogie van de klei kan worden beschreven is de Activiteit van de klei. De Activiteit van de Klei van Rupel bij de Westerschelde is weergegeven in de Bijlage P. Uit de vergelijking met de grafiek van Skempton (1953) blijkt dat de BK1 eenheid (Schittekat, 1983) zich gedraagt als een illiet-klei (gemiddeld 0,9). De Activiteit van de eenheid BK2 is gemiddeld iets hoger: 1,0.

De gegevens suggereren dat het gehalte aan smectiet lager is dan uit de XRD proef blijkt (Bijlage P en Fig. 3.8). Mogelijk worden de resultaten van beide proeven beïnvloed door verschillen in consolidatie. Feit is wel dat ook in Mol een lage Activiteit is waargenomen, die gerelateerd kan worden aan een laag smectietgehalte.

#### Zoutgehalte

De gemeten pH-waarde van het water in de Klei van Boom is 7. In de Westerschelde-boringen 48G160 (Borsele) is het zoutgehalte in het poriënwater van de Klei van Rupel bekend (Fig. 3.9). Hieruit blijkt dat in het bovenste deel van de Klei van Rupel (bovenste twee monsters van iedere boring) het zoutgehalte van het poriënwater ongeveer 20.000 mg/l bedraagt. Vanaf de bovenkant van de Klei van Rupel 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 Rupel geen zout in het poriënwater aanwezig.

Uit de beschikbare gegevens van de Klei van Rupel onder het WOV-traject blijkt dat het poriënwater in de bovenkant van de Klei van Rupel (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 Rupel een hydraulische verbinding heeft met de Westerschelde en hiermee met het zoute water van de Westerschelde vrij uitwisselt.

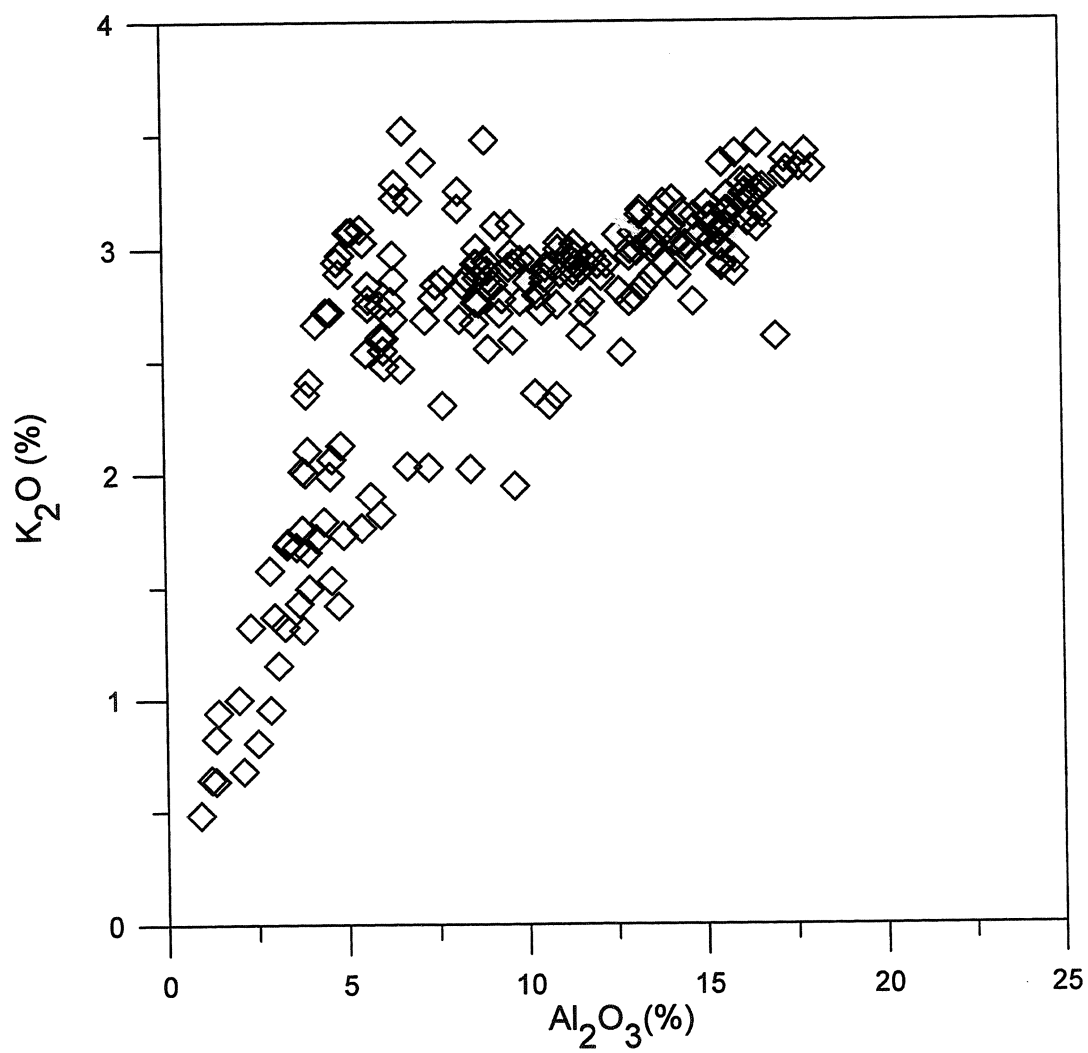
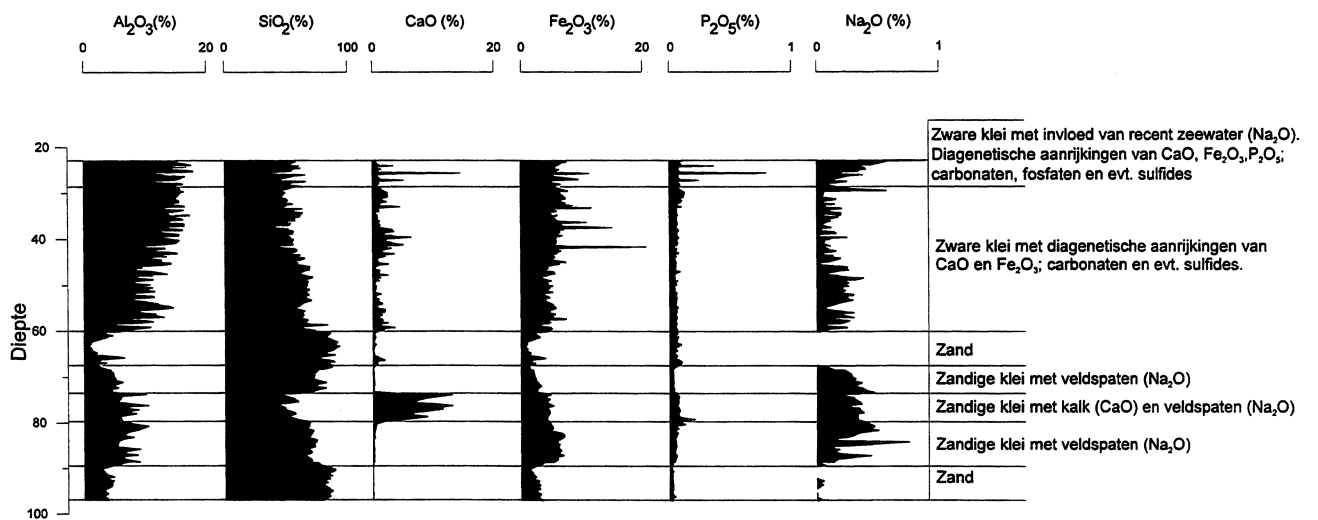
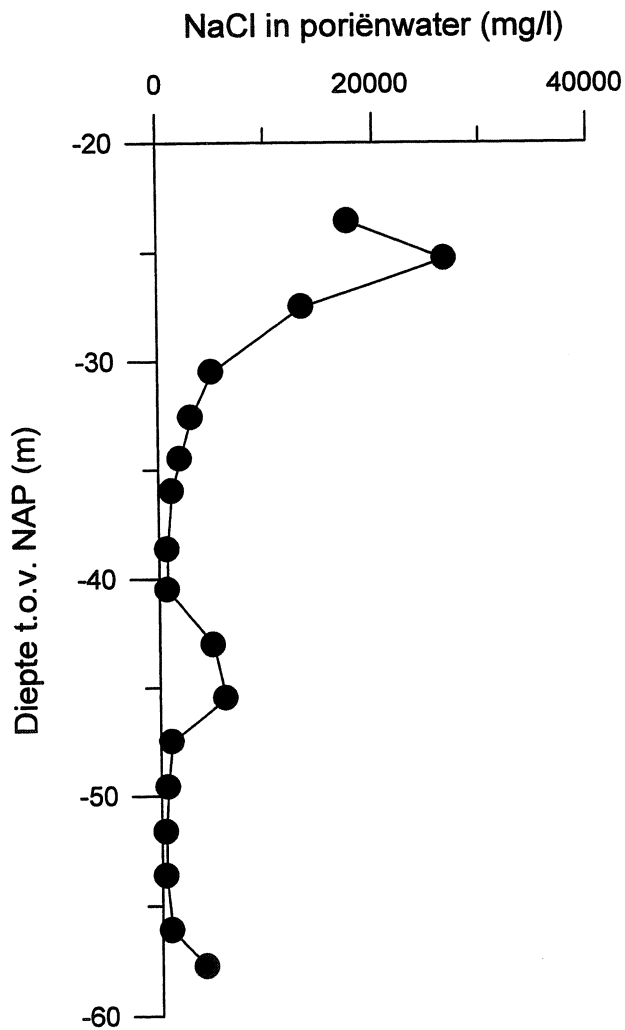


Fig. 3.7 Variatie in de relatie van  $K_2O$ - $Al_2O_3$  in de Klei van Rupel.



*Fig. 3.8* Diepteprofielen van een aantal hoofdelementen in de Formatie van Breda, Klei van Rupel en Zand van Vesseem (Boring Borssele/48G160).





*Fig. 3.9* Profiel van  $\text{Cl}^-$ -gehalten in de top van de Klei van Rupel (boring Borssele / 48G160). De sterke toename aan  $\text{Cl}^-$  in het bovenste bereik toont aan dat recent zeewater uit de Westerschelde de Klei van Rupel binnen dringt.

#### 3.6.4d Geohydrologische parameters

De verticale doorlatendheid is gemeten van de eenheden BK1 en BK2 (eenheid van de Klei van Boom in België 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  $40 \times 10^{-9}$  m/s (RGD, 1992). Voornoemde metingen suggereren een toename van de doorlatendheid naar de basis van de Klei van Rupel. 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 Rupel (naar de top van de Zanden van Vessem) tot ca.  $1 \times 10^{-5}$  m/s. Deze verwachting is gebaseerd op een toenemende zandfractie naar de basis van de Klei van Rupel bij de Westerschelde.

### 3.6.5 Dataset Mol

Ten behoeve van de aanleg van het ondergrondse laboratorium te Mol in de jaren '80 zijn geologische onderzoeken uitgevoerd. Deze zijn tevens uitgevoerd ter ondersteuning van het geomechanische en geohydrologische testprogramma van het SCK-CEN. Voor deze paragraaf is informatie ontleend aan Beaufeys et al. (1992), Decler et al. (1983), De Smet et al. (1996), Dierckx (1997), EUR 11766 (1988), EUR 122027 (1989), EUR 13400 (1991), EUR 14154 (1992), Funcken et al. (1983), Volckaert et al. (1997) en Wouters & Vandenberghe (1994).

#### 3.6.5a Geologische en lithologische parameters

Op de locatie Mol bestaat de Klei van Boom uit een rythmische opeenvolging van klei, siltige klei en fijne zanden. De Klei van Boom wordt in Mol aangetroffen op een diepte van -186 m tot -259 m en helt licht richting NNW. De Klei van Boom ligt concordant op het Zand van Berg (Onder-Rupelien) en wordt aan de top bedekt door de Zanden van Rupel en de Zanden van (Vandenberghe & Laga, 1988).

De korrelgrootteverdeling van de Klei van Boom toont een rythmiek, die eveneens terug te vinden is in de concentratie organische stoffen en carbonaat-rijke horizonten. De periode van deze rythmiek heeft op basis van granulometrie een lengte van 1 m (Fig. 3.10). Op verschillende dieptes worden carbonaat-rijke lagen worden in de vorm van septaria (kalksteenconcreties) aangetroffen. Tussen -160 m en -180 m bevindt zich een overgangszone met siltige klei en zware klei met fijn zand (Zand van Voort). De Klei van Boom wordt op -219 m, -237 m -254 m en -257 m onderbroken door fijn zandige, siltige kleien. Hieronder staan enkele gegevens van de Klei van Boom samengevat:

<i>parameter</i>	<i>beschrijving</i>
Stratigrafische eenheid	Formatie van Rupel
Stratigrafische ouderdom	Rupelian (Midden-Oligoceen) 30-35 miljoen jaar
Dikte	40-120 m (100 m gemiddeld)
Lithologie	grijze klei met pyriet en kalkseptaria; - midden deel is bijna homogeen klei (60 m) - basis bevat siltige lagen - top is ritmisch afwisseling silt en klei
Afzettingsmilieu	mariene afzetting
Begravingsdiepte	180 m (top Klei van Boom)
Maximale begravingsdiepte	400 tot 600 m (op basis van $Rm^1 = 0,3 \%$ ) 300 m (op basis van 5 - 6 MPa)

---

$Rm^1 = \text{reflectiviteit van kool}$

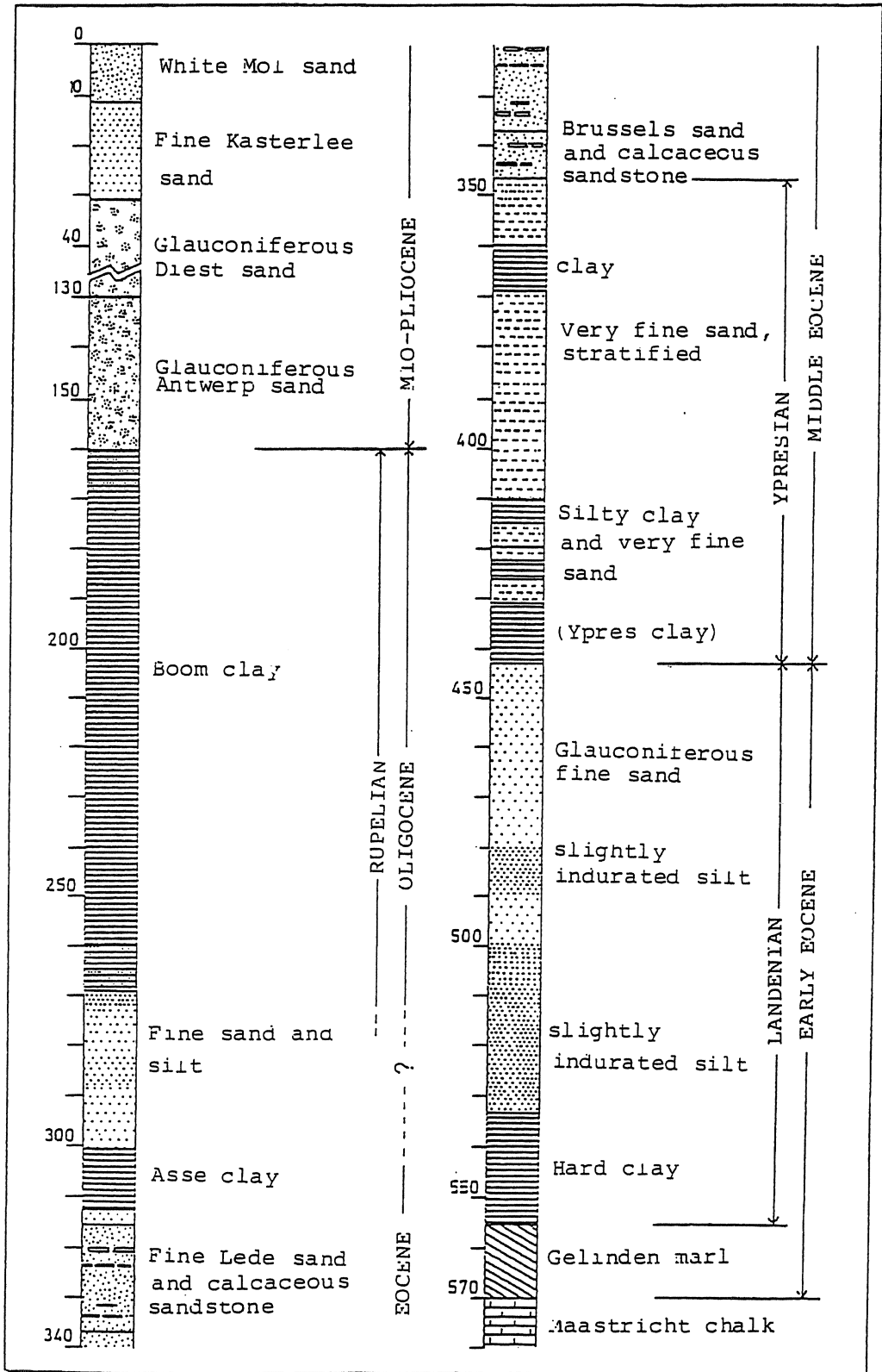


Fig. 3.10 Stratigrafische sectie van de eerste geologische boring op de Mol site te België (EUR 1776, 1988).

### 3.6.5b Geomechanische parameters

Onderstaande geomechanische karakteristieken van de Klei van Boom zijn voornamelijk ontleend aan Volckaert (1997) en karakteristiek voor de Klei van Boom zoals deze in België wordt aangetroffen.

<i>parameter</i>	<i>waarde</i>
<b>Volumieke parameters:</b>	
Massa bulk nat $\rho_b$	1,9 - 2,1 ton/m <sup>3</sup> (ongestoorte monsters Mol) dichtheid neemt toe met diepte gemiddeld 2 ton/m <sup>3</sup>
Massa bulk droog $\rho_d$	1,3 - 1,5 ton/m <sup>3</sup>
Gemiddelde korrel dichtheid $\rho_s$	2,65 ton/m <sup>3</sup>
Totale porositeit $p$	35-40 % (van migratie experimenten)
Watergehalte $w$	18-29 % (ongeroerd, Mol): gemiddeld 22,3 % 25-32 % (ongeroerd, België)
Plasticiteitsgrens $w_p$	23 - 29 %
Vloeigrens $w_L$	55 - 80 %
Plasticiteits Index $I_p$	32 - 51
Casagrande chart	CH en MH: (zeer) hoog plastische klei en silt
Activiteit A	0,4 - 0,6 (weinig 'actieve' klei)
Seismische snelheid $V_p$	1300 m/s (laboratorium monsters) 1852 m/s (sonic logging, $V_s = 526$ m/s) 1700 m/s (uphole sonic logging) 2000 m/s (seismische snelheidsanalyse)
Zwellingsdruk	0,9 MPa
Zwellingsvervorming	5 - 10 %
<b>Ongedraineerde sterkte parameters:</b>	
Ongedraineerde sterkte $q_u$	2,0 - 2,2 MPa
Youngs modulus $E_u$	200 - 400 MPa
Poisson's ratio $\nu_u$	0,4 - 0,45
Cohesie $c_u$	0,9 - 1 MPa (bij compressie test) 0,7 - 0,8 MPa (bij extensie test)
Interne wrijvingshoek $\phi_u$	4 °
<b>Gedraineerde sterkte parameters:</b>	
Youngs modulus $E$	300 MPa
Poisson's ratio $\nu$	0,125 - 0,2
Cohesie $c'$	300 kPa
Interne wrijvingshoek $\phi'$	18 - 22 °
Helling consolidatie lijn $\lambda$	0,11 - 0,16
Helling elasticiteit lijn $\kappa$	0,02 tot 0,05
Preconsolidatie druk $p'_c$	5 - 6 MPa

Geomechanisch onderzoek is in België uitgevoerd om het geomechanisch gedrag te bestuderen. Tevens is studie verricht naar het effect van bevriezing op de structuur en het gedrag van de Klei van Boom. Onder andere in het kader van deze onderzoeken heeft Thimus (1989; 1991) geomechanische eigenschappen van de Klei van Boom gepubliceerd (Tabel 4).

Tabel 4 Geomechanische parameters Klei van Boom (Thimus, 1989; 1991)

parameter	Klei van Boom
Mineralogie	Kaolinet 40 % Illiet 25 % Montmorill. 35 %
Klei-gehalte (%)	45
Soortelijk opp. (m <sup>2</sup> /gr)	39,1
w <sub>L</sub> (%)	67,5
w <sub>p</sub> (%)	26,2
I <sub>p</sub> (%)	41,3
γ <sub>n</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	20,14
γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	16,32
γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	26,4
w <sub>105</sub> (%)	22,2
S (%)	100
n (%)	39

w <sub>L</sub>	vloeigrens	γ <sub>n</sub>	eenheidsgewicht nat sediment
w <sub>p</sub>	plasticiteitsgrens	γ <sub>d</sub>	eenheidsgewicht droog sediment
I <sub>p</sub>	plasticiteitsindex	γ <sub>s</sub>	eenheidsgewicht van korrels

w<sub>105</sub> watergehalte (105 °C drogen)

S waterverzadigingsgraad

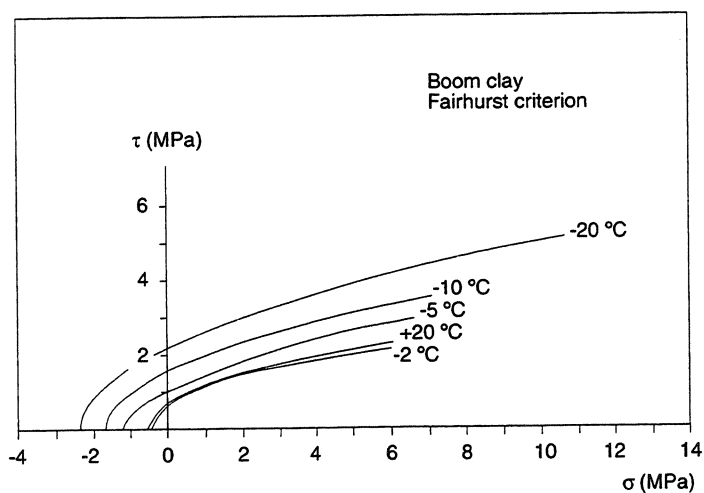
n porositeit

Een groot aantal geomechanische testen is uitgevoerd op monsters van de Klei van Boom om het mechanische en rheologische gedrag gedurende kunstmatige bevriezing te bepalen (Thimus 1989, 1991). Uni-axiale/triaxiale compressie testen en uni-axiale extensie testen zijn uitgevoerd bij +20, -2, -5, -10, -20 en -30 °C. De resultaten in Tabel 5 laten een lichte afname van sterkte-eigenschappen zien voor

temperaturen rond  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  en een toename onder  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De bezwijkcriteria zijn gedefinieerd door uni-axiale en triaxiale druk- en trekproeven; de sterkte neemt toe met lagere temperatuur (Fig. 3.11).

*Tabel 5* Uni-axiale druksterkte van Klei van Boom (Thimus, 1993).

temperatuur ( $^{\circ}\text{C}$ )	aantal monsters	sterkte (MPa)
+ 20	13	2,44
- 2	3	2,75
- 5	3	2,44
- 10	30	4,36
- 20	11	7,73
- 30	5	9,71



*Fig. 3.11* Bezwijkcriteria van de Klei van Boom en de invloed van temperatuur (Thimus, 1993).

### 3.6.5c Geochemische parameters

#### *Mineralogie van de Klei van Boom*

De Klei van Boom is opgebouwd uit klei en silt. De siltfractie bestaat uit kwarts, veldspaat (10-30% in de <53 µm fractie) en zware mineralen (toermalijn, epidoot, granaat, hoornblende, zirkoon, rutiel, anataas, stauroliet, kyaniet en andalusiet. De klei-fractie bestaat voornamelijk uit chloriet, smectiet, illiet. Hieronder staan de resultaten van analyses samengevat (Volckaert et al., 1996).

<i>parameter</i>	<i>beschrijving</i>	
Kleimineralen:		
- illiet	60	% droog gewicht
- smectiet	20-30	idem
- chloriet	5-20	idem
- kaoliniet	15-30	idem
- illiet/smectiet omzettingen	5-10	idem
- chloriet/smectiet omzettingen	5-10	idem
Kwarts	20	idem
Veldspaat-K	5-10	idem (3% albiet)
Carbonaten:		
- calciet	1-5	%
- sideriet, dolomiet, ankeriet	aanwezig	
Pyriet	1-5	%
Organische koolstof	1-5	%
Zware mineralen	rutiel, anataas, ilmeniet, zirkoon, monaziet, xenotiem	
Overige mineralen	glauconiet, calcium, fosfaat	
CEC (cation exchange capacity) Ag -TU	30 ± 3,9 meq/100 g klei	
	Sr 24,4 ± 3,4 meq/100 g klei	
	Ca 23,3 ± 3,1 meq/100 g klei	
Rm vitriniet-reflectiviteit	0,3 %	
Total Organic Contents	41,3 -144 mg C/l	

Vandenberghe (1978) rapporteert een serie kleimineralogische analyses, waaruit blijkt dat kaoliniet, illiet en smectiet de belangrijkste kleimineralen zijn in de Klei van Boom. Het blijkt dat er vooral veel variatie is in de kristalliniteit van de smectiet, die varieert van redelijk/goed tot slecht kristallijn. Daarnaast komen onregelmatige illiet-smectiet interstratificaties voor. Vandenberghe geeft de volgende algemene schattingen voor de kleimineralogische samenstelling van de Klei van Boom:



<i>Mineraal</i>	<i>percentage droog gewicht van de kleifractie</i>
Illiet	0-50 %
Illiet-Smectiet interstratificatie	0-20 %
Smectiet	10-20 %
Kaoliniet	20 %
Gedegradeerde chloriet	5 %

Thimus (1989) presenteert kleianalyses (in percentage droog gewicht) van verschillende plaatsen, en uit de literatuur (montmorilloniet = smectiet):

<i>Mineraal</i>	<i>Mol</i>	<i>Terhagen</i>	<i>?</i>	<i>?</i>	
Illiet/Mica	25-28	-	15	25	19
Illiet-Smectiet interstratificatie	15-17	11	-	15	-
Smectiet	15-20	46	15	20	22
Kaoliniet	39-40	43	35	-	29
Chloriet	sporen	-	-	10	-
Vermiculiet	-	-	-	30	-
Kwarts	-	-	25	-	30
Carbonaat	-	-	2	-	-
Veldspaat	-	-	5	-	-
Anders	-	-	3	-	-

#### *Gehalte SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na en K van sediment*

Op basis van monsters van de verkenningsboring in Mol zijn een groot aantal geochemische waarden van het sediment gemeten.

Gehalte SiO <sub>2</sub>	75-95 %
Gehalte Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4-13 %
Gehalte Na	4-10 mg/g
Gehalte K	3-8 mg/g

#### *Natuurlijke radioactiviteit van het sediment*

De natuurlijke radioactiviteit van de Boomse klei is gemeten middels boorgatmetingen van de verkenningsboring te Mol.

Natuurlijke radioactiviteit <sup>40</sup> K	4-5 μ Ci / 200 gr. klei <sup>1</sup>
Natuurlijke radioactiviteit <sup>226</sup> Ra	2-4 μ Ci / 200 gr. klei <sup>1</sup>
Natuurlijke radioactiviteit <sup>232</sup> Th	1-3 μ Ci / 200 gr. klei <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Omrekening SI-eenheden: 1Ci = 3,7 x 10<sup>10</sup> Bq

*Geochemie van het formatiewater van de Klei van Boom*

Hieronder worden enige karakteristieke parameters gegeven. De samenstelling van het formatie water van de Klei van Boom is gegeven door Volckeart et al. (1996).

<i>parameter</i>	<i>beschrijving</i>
water type	natrium bicarbonaat $1,25$ tot $2 \times 10^{-2}$ M
pH	8,2 - 8,5
Eh	250 - 350 mV
conductiviteit	1,4 MscM

### 3.6.5d Geohydrologische parameters

Onderstaande geohydrologische parameters zijn de resultaten van onderzoek aan de Klei van Boom van de locatie Mol (Volckaert et al., 1996).

<i>parameters</i>	<i>beschrijving</i>
Hydraulische doorlatendheid K	
- Laboratorium experimenten	vert. $1,3-3,4 \times 10^{-12}$ m/s; horiz. $3,5-7,9 \times 10^{-12}$ m/s
- In-situ veld testen	vert. $2,1 \times 10^{-12}$ m/s; horiz. $4,5 \times 10^{-12}$ m/s

### 3.6.5e Geothermische en thermodynamische parameters

Onderstaande parameters zijn de resultaten van onderzoek aan de Klei van Boom van de locatie Mol (Volckaert et al., 1996).

<i>parameter</i>	<i>beschrijving</i>
Specifieke warmte	1400 J/kgK
Thermale conductiviteit	1,68 W/mK
Warmte capaciteit	2,8 MJ/m <sup>3</sup> K
Thermale diffusiviteit	18,8 m <sup>2</sup> /a
Thermogravimetrie	gebonden water komt vrij bij 160 °C chemisch gebonden water komt vrij bij 600 °C

### **3.7 Klei van Asse**

Van de Klei van Asse zijn weinig geomechanische, geochemische en geohydrologische parameters bekend. Hieronder worden enige uit boorgatmetingen afgeleide parameters gegeven.

#### **3.7.1 Geomechanische parameters**

In twee boringen van het gecorreleerde profiel zijn gegevens over bulkdichtheden  $\rho_b$  meten (die relatief laag zijn vergeleken met overige Tertiaire kleien): 1,90 tot 1,95 gr/cm<sup>3</sup> op dieptes van 350 m tot 720 m (Bijlage D).

De gemiddelde ultrasone snelheden  $\Delta t$  in de Klei van Assen variëren van 150 tot 175  $\mu$ s/ft en vertonen een lineaire trend (op een logaritmisch schaal) met de diepte (Bijlage D). De trend van hogere sonic snelheden met toenemende diepte lijkt te duiden op een maximaal diepteligging van de Klei van Asse.

#### **3.7.2 Geochemische parameters**

Geen parameters bekend.

#### **3.7.3 Geohydrologische parameters**

Geen parameters bekend.

## 3.8 Klei van Ieper

### 3.8.1 Geomechanische parameters

Geomechanische gegevens van de Klei van Ieper die zijn afgeleid uit boorgatmetingen. De bulkdichtheid  $\rho_b$  van de Klei van Ieper vertoont op grote diepten lage waarden van 1,8 tot 1,9 gr/cm<sup>3</sup>. Bij dit beeld passen de hoge porositeit  $n$  van 45 tot 50 % op diepte van 565 tot 855 m. De omgerekende equivalente watergehalten  $w$  van 25 tot 27 % zijn hoger dan de watergehalten van de Klei van Rupel bij de Oosterschelde en Mol op een veel lagere diepte. Ook vergeleken met andere Tertiaire kleipakketten wordt de Klei van Ieper gekarakteriseerd door hoge watergehalten.

De Klei van Ieper vertoont een relatief hoge bulkdichtheid  $\rho_b$  van 2,0 gr/cm<sup>3</sup> in de boringen S05-01 en Q01-Helm-A-02 de Voorne Trog en op het Kijkduin Hoog. In vergelijking met de dichtheden van de Klei van Ieper in het Noordzee Bekken zijn de bulkdichtheden op het Kijkduin Hoog hoog. Deze verschillen kunnen verklaard worden door een andere lithologische ontwikkeling van de Klei van Ieper in het noorden of door tektonische inversie van het Kijkduin Hoog. Dit betekent dat de Klei van Ieper gedurende het Laat-Eoceen op groter dieptes heeft gelegen dan de huidige diepte.

### 3.8.2 Dataset Mol

De Klei van Ieper bevindt zich onder de Klei van Boom op de locatie Mol en bestaat daar uit zeer fijne zanden met klei-lenzen.

#### 3.8.2a Geologische parameters

Karakteristieke geologische parameters van de Klei van Ieper zijn gepubliceerd door Volckaert et al. (1997):

<i>parameter</i>	<i>beschrijving</i>
Stratigrafische eenheid	Formatie van Kortrijk, Ieper Klei
Stratigrafische ouderdom	Ypresien (Vroeg-Eoceen), 50-54 milj. jaar
Dikte	100-140 m (120 m gemiddeld) bij Mol
Lithologie	grijze klei - basis zeer homogeen - midden deel is siltig
Afzettingsmilieu	mariene afzetting
Begravingsdiepte	130 - 400 m (van de top)

### 3.8.2b Geomechanische parameters

In onderstaande Tabel 6 staan enige karakteristieke geomechanische parameters van de Klei van Ieper in België.

Tabel 6 Geomechanische parameters Klei van Ieper (Thimus, 1989; 1991b)

parameter	Klei van Ieper
Mineralogie	Smectiet 50 % Illiet 25 % Kaoliniet 25 %
Klei-gehalte (%)	23
Soortelijk opp. (m <sup>2</sup> /gr)	39
w <sub>L</sub> (%)	77,5
w <sub>p</sub> (%)	25,8
I <sub>p</sub> (%)	51,7
γ <sub>n</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	20,49
γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	16,11
γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	26,96
w <sub>105</sub> (%)	21,39
S (%)	85,63
n (%)	40,3

w <sub>L</sub>	vloeigrens	γ <sub>n</sub>	eenheidsgewicht nat sediment
w <sub>p</sub>	plasticiteitsgrens	γ <sub>d</sub>	eenheidsgewicht droog sediment
I <sub>p</sub>	plasticiteitsindex	γ <sub>s</sub>	eenheidsgewicht van korrels

w<sub>105</sub> watergehalte (105 °C drogen)

S waterverzadigingsgraad

n porositeit

### 3.8.2c Geochemische parameters

#### *Mineralogie van de Klei van Ieper*

De Klei van Ieper wordt opgebouwd uit siltige klei en zandig silt. De siltfractie bestaat uit kwarts en veldspaat. De klei-fractie is opgebouwd uit illiet, smectiet en kaoliniet. Hieronder staan de resultaten van analyses samengevat (De Smet et al.,

1996). Onderstaande gegevens zijn geanalyseerd in het Lab. voor Fysico-Chemische Geologie (Rijks Universiteit Gent).

<i>parameter</i>	<i>beschrijving</i>		
	<i>siltige klei</i>	<i>zandig silt</i>	
<b>Kleimineralen:</b>			
- Illiet/mica	5	2	% droog gewicht
- Illiet-Smectite interstrat.	0	0	idem
- Smectiet	45	15	idem
- Kaolinit	< 1	~ 1	idem
- Chloriet	0	0	idem
- Vermuciliet	-	-	
Kwarts	31	66	idem
Veldspaat	< 2	< 2	idem
Calciet	0	0,5	idem
Pyriet	0,3	0,4	idem
Organische koolstof	0,5	0,4	idem

De totalen zijn geen 100 % omdat de fractie 2-5  $\mu\text{m}$  niet bepaald kon worden. De fractie 2-5  $\mu\text{m}$  is ongeveer 15 % van het totaal. Aangezien het niet duidelijk is welke rekenmethode gebruikt is om tot percentages te komen, zijn deze getallen kwantitatief niet vergelijkbaar met de resultaten afkomstig uit andere studies.

### 3.8.3 Geohydrologische parameters

Onderstaande parameters zijn afkomstig van Speelman & Breunese (1985).

<i>parameter</i>	<i>grootte</i>	<i>locatie</i>
lutumgehalte	17 %	Kortemark (België)
siltgehalte	73 %	idem
porositeit $n$	32 %	boring: 44G77
doorlatendheid $K$ (kern)	$2 \times 10^{-8}$ m/s	idem

### 3.9 Klei van Landen

#### 3.9.1 Geomechanische parameters

In een aantal boringen van het correlatieprofiel zijn gegevens van de Klei van Landen over de bulkdichtheid  $\rho_b$  en de CNL-porositeit gemeten. De bulkdichtheid en cnl-porositeit in de Klei van Landen hebben een relatief hoge spreiding vergeleken met de overig onderzochte kleien. De gemiddelde ultrasone snelheden  $\Delta t$  in de Klei van Landen variëren van 135 tot 165  $\mu\text{s}/\text{ft}$  en vertonen geen duidelijke relatie met verband (Bijlage F).

De onderzochte geomechanische gegevens van de Klei van Landen hebben een grote variatie die veroorzaakt lijkt te worden door verschillen in lithologische ontwikkeling in het profiel Oosterschelde-Ameland.

#### 3.9.2 Geohydrologische parameters

Onderstaande geohydrologische data zijn afkomstig van de boring 44G77 nabij Breda.

<i>parameter</i>	<i>grootte</i>	<i>locatie</i>
porositeit $n$	15 - 17 %	boring 44G77
permeabiliteit $K$	$< 10^{-8}$ m/s	idem



## **4 Temperatuurgegevens van de ondergrond in Nederland**

### **4.1 Gegevensanalyse**

Temperatuurkaarten van de ondergrond van Nederland zijn opgenomen om een indruk te geven van de temperatuur in de ondergrond.  $T_{500}$  en  $T_{1000}$  zijn parameters die gebruikt worden voor rekenmodellen in het mijnbouwkundig ontwerp en veiligheidsstudies.

De kaarten zijn samengesteld op basis van 464 boringen in zowel het onshore als het offshore gebied van Nederland. Metingen in boringen zijn uitgevoerd gedurende het boorproces en tijdens productietesten van olie- en gasboringen. Voor de compilatie van kaarten met de onverstoorde 'in-situ' temperaturen zijn de temperatuurmetingen gecorrigeerd (Ramaekers, 1992).

### **4.2 Temperatuurkaarten**

De geothermische gradient in Nederland varieert van 2,6 °C/100m tot ca. 4 °C/100 m. Op een diepte van 500 m bedraagt de temperatuur 20 to 30 °C; op 1000 m diepte bedraagt de temperatuur 38 tot 55 °C (Bijlage R).

De contouren van temperatuur-anomalieën corresponderen met omtrekken van structurele eenheden van Laat-Jura/Vroeg Krijt ouderdom. Hoog gelegen breukblokken en platforms worden gekarakteriseerd door lage temperaturen (Texel-IJsselmeer Hoog/Friesland Platform, London-Brabant Massif en Groningen Hoog en Vlieland Hoog), terwijl bekkens een hoge temperaturen laten zien (Centraal-Nederlands Bekken en Breeveertien Bekken). Uitzonderingen hierop zijn de Kenozoische Roer dal Slenk/West-Nederlands Bekken en enige horstblokken ten noorden van deze bekkens, die resp. een lage en hoge temperatuur laten zien. Lokale temperatuur-anomalieën zijn aanwezig in het noordoosten van Nederland, welke veroorzaakt worden door zoutstructuren (Rijkers & Van Doorn, in druk).

## 5 Waterkwaliteit in de ondergrond van Nederland

### 5.1 Zoutgehalte van formatiewater

Het zoutgehalte van grondwater in Nederland (vaak uitgedrukt in mg Cl<sup>-</sup> per liter) varieert sterk van nul (zoet) tot meer dan 20.000 mg Cl<sup>-</sup>/l (zout zeewater).

Het zoutgehalte in kleipakketten is afhankelijk van het type afzetting (mariene of continentaal), de doorlatendheid, de positie van nabije waterdoorlatende pakketten en de duur van verziltings- of verzoetingsperioden gedurende de geologische geschiedenis. In Nederland neemt het zoutgehalte in principe toe met de diepte.

Nabij het maaiveld van Nederland worden chloridegehalte van 5 tot 50 mg Cl<sup>-</sup>/l aangetroffen. Op basis van grondwatermonsters, boorgatmetingen en geoelektrische metingen is het diepste zoet-brakgrensvlak (150 mg Cl<sup>-</sup>/l) in de ondergrond van Nederland samengesteld op een schaal van 1:500.000 (RGD, 1985). Aan de kust van West-Nederland bedraagt de diepte van het zoet-brak grensvlak meer dan 100 m, terwijl in Groningen en Friesland de zoet-brak grensvlak lokaal varieert tot meer dan 300 m.

### 5.2 Zoutconcentraties van Tertiaire kleien in Nederland

De grootste diepten tot het zoet-brak grensvlak komen voor in gebieden waar sprake is van infiltratie (in zandige pakketten), zoals de Veluwe (> 350 m), de Utrechtse Heuvelrug (> 200 m), ten zuiden van Eindhoven (> 500 m), de duingebieden (> 100 m) en in Gaasterland (>300 m). In de overige delen van Nederland ligt het zoet-brak grensvlak ondieper dan 150 m.

In een aantal gebieden wordt in mariene afzettingen op relatief kleine dieptes geen zout water aangetroffen als gevolg van recente verzoeting.

Voorbeelden hiervan zijn de Klei van Rupel in de Westerschelde en Laat-Tertiaire klei-afzettingen op de Peelhorst. In Twente ligt het zoet-brak grensvlak juist ondieper dan 50 m als gevolg van de langzame verzoeting van mariene kleiafzettingen.

Voor dieptes groter dan 400 m moet er rekening gehouden worden met zoutgehaltes van 150 tot 20.000 mg Cl<sup>-</sup>/l, omdat de kleipakketten veelal mariene klei-afzettingen zijn en er voorts geen aanwijzingen zijn voor lokaties van zoet water in mariene kleipakketten in de ondergrond van Nederland. De kleipakketten van Tertiaire ouderdom op dieptes van 500 m of meer hebben alle brak tot zout poriënwater, waarbij de concentratie afhangt van de regionale situatie. Ondieper in het Kwartair is het zoutgehalte afhankelijk van lokale omstandigheden.

## **6 Synthese en conclusies**

### **6.1 Algemeen**

De beschikbaarheid van geomechanische, geochemische en geohydrologische gegevens van Tertiaire kleien in Nederland varieert. Omvangrijke gegevensbestanden van geomechanische gegevens zijn beschikbaar van de Klei van Rupel bij de Westerschelde en van de lokatie Mol in België.

Met de compilatie van het geologisch profiel Oosterschelde – Ameland zijn inzichten verkregen in de lithologische ontwikkeling van kleipakketten in verschillende structureel-geologische eenheden van Nederland.

In Tabel 7 staat een overzicht gegeven van de verzamelde parameters van Tertiaire kleipakketten. Deze tabel geeft het een overzicht van de karakteristieke eigenschappen van Tertiaire kleipakketten die relevant zijn voor het CORA-onderzoeksprogramma.

### **6.2 Geologische aspecten van Tertiaire kleien**

De Formatie van Oosterhout en van Breda zijn beide zandig ontwikkeld, heterogeen van aard en in vergelijking met de dieper gelegen Tertiaire kleipakketten minder geschikt voor mijnbouwactiviteiten vanwege hoge waterdoorlatendheden.

De Klei van Rupel is in Zuid-Nederland aanwezig met een behoorlijke dikte, terwijl deze klei in Midden-Nederland sterk geërodeerd is of zelfs door erosie geheel afwezig. In het noordelijk deel van Nederland heeft de Klei van Rupel geringere dikten en is de lithologie meer mergelig ontwikkeld in vergelijking tot het zuiden van Nederland. De Klei van Rupel vertoont naar het noorden een grotere lithologische variatie.

De Klei van Asse en Ieper liggen in het profiel Oosterschelde-Ameland op dieptes tot ca. 1300 m. In het noordelijk deel van Nederland zijn deze dieptes overigens lager. Op basis van het offshore profiel wordt geconstateerd dat de lithologische eigenschappen van de Klei van Asse en de Klei van Ieper aan minder variatie onderhevig zijn dan de Klei van Rupel. De maximale dikte van de Klei van Asse bedraagt in het noorden van Nederland ca. 300 m.

De Klei van Landen is ontwikkeld met een weinig homogene lithologie en heeft een maximale dikte van 30 m.

### 6.3 Geomechanische aspecten van Tertiaire kleien

Een aantal volumetrische en fysische parameters kan worden afgeleid uit boorgatmetingen. Deze parameters zijn volumiek bulk massa ( $\rho$ ), volumiek gewicht ( $\gamma$ ), porositeit ( $n$ ), watergehalte ( $w$ ), ultrasone snelheid ( $dt$ ) en elasticiteitsmodulus ( $E$ ).

De gemeten en berekende parameters vertonen een begravingstrend en duiden op verandering van compactie en korrelstructuur met toenemende dieptes. Er bestaan echter nog geen gegevens om de verandering van geomechanische parameters nauwkeurig te beschrijven (zoals cohesie  $c$  en interne wrijving  $\phi$ ). Veranderingen van bijvoorbeeld het watergehalte ( $w$ ) en de volumieke bulk massa ( $\rho$ ) vertonen slechts een geringe verhoging bij de toename van diepte tot 800 m.

Op basis van verschillen in sterkte-parameters van de Klei van Rupel bij verschillende diepteligging blijkt dat de variatie in sterkte-eigenschappen groot is. Bij extrapolatie van geomechanische parameters naar diepten van 500 tot 800 m lijkt een aantal geomechanische eigenschappen weinig tot slechts geringe veranderingen te ondergaan. Volumieke massas en watergehalten zijn bekend van boorgatmetingen en verschillen maar gering met de in het laboratorium gemeten waarden van de Klei van Rupel bij de Westerschelde en in Mol. De verwachting is dat sterkte-eigenschappen van Tertiaire klei toenemen bij dieptes van 500 tot 800 m.

Op basis van de beschikbare gegevens wordt geconcludeerd dat de sterkte van de Klei van Rupel bij de Westerschelde ongeveer vijf keer zo gering is als de Klei van Boom in Mol. De waargenomen verschillen in sterkte-karakteristieken van de Klei van Rupel (Westerschelde) en de Klei van Boom (Mol) kunnen verklaard worden door een hogere pre-consolidatie. Verschillende meetmethodieken en monsterbehandeling kunnen hierbij ook een rol spelen. Hierdoor kunnen de testresultaten niet eenvoudig met elkaar vergeleken worden. De verschillende huidige diepteliggingen, kleimineralogie en zoutgehalten kunnen mede een rol spelen. De verwachting is dat de Klei van Rupel onder het Nederlandse vaste land op een diepte van 500 tot 800 m een sterkte heeft die overeenkomt met de Klei van Boom in Mol of hoger. De variatie van het watergehalte van de Klei van Rupel (Klei van Boom) op de locatie Westerschelde en de locatie Mol is bijna identiek, (nl. 20-25 %). Het watergehalte zal licht afnemen in het dieptebereik van 500-800 m.

### 6.4 Geochemische aspecten van Tertiaire kleien

Er bestaat veel variatie in chemische en kleimineralogische eigenschappen in de onderzochte kleien. Parameters kunnen op dm-schaal variëren. Dit geldt met name voor organische stof, zandlagen, carbonaatafzettingen en sulfides. Deze

parameters hebben belangrijke implicaties voor porositeit, sterkte en chemische reactiviteit. Hierbij moet ook rekening gehouden worden met mijnbouwactiviteiten in sulfide-rijke afzettingen. Deze zorgen voor sulfide-oxidatie, waarbij metalen vrijkomen en verzuring optreedt. Dergelijke verzuring kan ondergrondse constructies aantasten. Een belangrijk aandachtspunt bij stabiliteitsanalyses van ondergrondse mijnbouwactiviteiten is de aanwezigheid van zwellende kleimineralen.

### 6.5 Geohydrologische aspecten van Tertiaire kleien

Geohydrologische parameters zijn sterk afhankelijk van lithologische ontwikkeling en begravingsgeschiedenis. Als gevolg van deze afhankelijkheid kan de doorlatendheid van sediment zowel verticaal als lateraal zeer snel variëren. Onderzochte kleien hebben een doorlatendheid die doorgaans kleiner is dan  $1 \times 10^{-8}$  m/s. De doorlatendheid van homogene kleien zoals de Klei van Ieper en de Klei van Asse zal op dieptes van 500-800 m (bij identieke lithologische ontwikkeling) lager zijn. De heterogeen ontwikkelde Klei van Rupel heeft richting het noorden van Nederland een onvoorspelbare ontwikkeling van de doorlatendheid als gevolg van zijn mergelige ontwikkeling.

Tabel 7 Resultaat van inventarisatie van geomechanische, geochemische en geohydrologische parameters van Tertiaire kleipakketten. Het type data in de grijze balken worden gebruikt bij de projecten TRUCK en METRO.

Geowetenschappelijke parameter	eenheid	Formaat van Oosterhout	Formaat van Breda	Klei van Veldhoven	Klei van Rupel	Klei van Rupel	Klei van Rupel	Klei van Boom	Klei van Asse	Klei van Ieper	Klei van Landen
<b>Lithol. en geochemische parameters</b>											
Klei gehalte (<2µm)	%	0-10	10-19	10-21			20-70	45		23	
Kleinminerale (Klei=100%)	%	plekhoogte					plekhoogte				
Illiet	%	25					35	25		25	
smectiet	%	20-60					47	35		50	
kaolinet	%	60-30					18	40		25	
pH poriënwater	%						7	8.2-8.5			
<b>Geomechanische parameters</b>											
Volumieke massa bulk nat. op	gr/cm3				1.95-2.08			1.9-2.1	1.9-1.95	1.8-1.9	
Volumieke massa bulk droog pdr	gr/cm3							1.3-1.5			
Volumieke massa korrel ps	gr/cm3						2.68	2.65			
Nat volumiek gewicht	kN/m3						19-21	20.1		20.5	
Droog volumiek gewicht	kN/m3						15-16	16.3		16.1	
Volumiek gewicht korrels	kN/m3						26.7	26.4		27.0	
Natuurlijk watergehalte w	%	25			18-25		17-33	18-29		21.4	
Plasticiteitsgrens wp	%		25.6				[10-30]	23-29		25.8	
Voceigrens wi	%		70.5				30-100	55-60		77.5	
Plasticiteitsindex IP	%		44.9				48	32-51		51.7	
Ongedraineerde schuifsterkte f <sub>undr</sub>	kN/m2	100			[bijn] 2250-3500		200-450	1000-1100			
Elasticiteitsmodulus E	MPa						[slag] 200-400	900-1000			
Ongedraineerde cohesie (triaxiaal) c	kPa							4			
Ongedraineerde inwendige wrijving φ	g							300			
Effectieve cohesie (triaxiaal) c'	kPa							19-22			
Effectieve inwendige wrijving φ'	g							1852	1742-2898		1847-2258
Ultrasone snelheid v <sub>p</sub>	m/s				1825-2073		0.9-1	0.4-0.6			
Activiteit van Klei A	%										
<b>Geohydrologische parameters</b>											
Hydraulische doorlatendheid K	m/s	2.1e-4 - 1e-9	2e-5 - 1e-9	8e-6 - 2.1e-7			1e-11 - 40e-9	1.3e-12 - 3.4e-12		2e-8	<1e-8
Porositeit n	%	35	27.2	40-50	36		33-49	35-40		40.3-60	15-17
<b>Thermodynamische parameters</b>											
Specifieke warmte c	J/kg.K							1400			
Thermische geleidbaarheid λ	W/m.K							1.68			
Warmte capaciteit	MJ/m <sup>3</sup> .K							2.8			
Thermische diffusiviteit α	m <sup>2</sup> /s							18.8			
Temperatuur op 500 m - NAP T500	°C		22-28	22-28	22-28		nvt	nvt	22-28	22-28	nvt
Temperatuur op 1000 m - NAP T1000	°C		42-50	42-50	42-50		nvt	nvt	42-50	42-50	42-50

## **7 Implicaties van de resultaten van CAR-II voor het CORA onderzoeksprogramma**

### **7.1 Leemten in kennis van geowetenschappelijke parameters ten behoeve van het CORA-onderzoeksprogramma**

Karakteristieke parameters die bekend zijn van Tertiaire kleipakketten in Nederland zijn in Tabel 7 samengevat. Leemten in kennis over geowetenschappelijke parameters van tertiaire kleipakketten worden met zes punten hieronder toegelicht.

#### *Dieptebereik*

Geomechanische parameters veranderen met toenemende diepte, waardoor de laboratoriumwaarden van de Westerschelde en Mol niet direct gebruikt kunnen worden voor geomechanische modelberekeningen van een ondergrondse mijn op grotere diepte. Met de toenemende diepte zal een groot aantal geomechanische parameters veranderen door hoge verticale spanningen. Grond wordt in principe stijver en sterker bij toenemende druk op grotere diepten zodat bij gebruik van parameters afkomstig van Mol en de Westerschelde een veilige marge garandeert voor de eerste modelberekeningen van een ondergrondse opslagfaciliteit op 500-800 m.

#### *Gebied*

De informatie over geomechanische, geohydrologische en geochemische aard van Tertiaire kleipakketten is niet gelijkmatig verdeeld over Nederland. In Zuid-Nederland zijn meer geotechnische, geochemische en geohydrologische gegevens bekend van Tertiaire kleipakketten dan in Midden- en Noord-Nederland. Dit heeft onder te maken met de ondiepe ligging van het Tertiair in Zuid-Nederland.

#### *Lithologie*

Op het land is de lithologische ontwikkeling van de Tertiaire kleipakketten slecht bekend. Er zijn enige rapporten waaruit indicaties ontleend kunnen worden over de lithologie en facies-ontwikkeling op het land (CAR-I en RGD 1984/1985).

De Klei van Rupel, Klei van Asse en de Klei van Ieper lijken geschikt voor toekomstig onderzoek t.b.v. opslag in Tertiaire kleipakketten. De Formatie van Oosterhout, Formatie van Breda en de Klei van Veldhoven zijn minder geschikt voor mijnbouwactiviteiten m.b.t. terugneembare opslag van radio-actieve stoffen. Dit vanwege de hoge variatie in lithologie ontwikkeling en de relatief hoge waterdoorlatendheden van deze formaties.

#### *Geomechanisch gegevens*

Van de Formatie van Oosterhout, Formatie van Breda en de Klei van Veldhoven zijn nauwelijks geomechanische parameters bekend. Vanwege hun diepteligging

van 100 tot 500 m - NAP zijn deze pakketten nauwelijks geotechnisch onderzocht. De rapportage van CAR-II voorziet eveneens niet in experimenteel bepaalde geotechnische sterkte-gegevens (interne wrijving  $\phi$ , cohesie  $c$  en elasticiteitsmodulus  $E$  van kleipakketten op dieptes van 500 tot 800 m. De eerste resultaten van berekeningen binnen TRUCK I lijken gevoelig te zijn voor deze geomechanische parameters. Het is niet bekend wat het verband van deze parameters met een toenemende diepte is. Ook de consolidatie-constanten en doorlatendheden veranderen met toenemende diepten, maar het is niet bekend in welke mate.

#### *Geohydrologische gegevens*

Geohydrologische gegevens van kleien in de Nederlandse ondergrond op dieptes van 500 tot 800 m zijn niet bekend. Hiervoor kunnen (extrapolatie-) schattingen uitgevoerd worden op basis van empirisch opgestelde formules. Deze worden in deze rapportage niet uitgevoerd.

#### *Thermodynamische gegevens*

Thermodynamische parameters zijn slechts bekend van de monsters van de lokatie Mol. Er zijn geen thermodynamische gegevens van kleimonsters uit Nederland van dieptes van 500 tot 800 m bekend.

## **7.2 Betekenis van de resultaten van CAR-II voor TRUCK I/II en METRO**

### Aansluiting CAR-II en TRUCK-I

TRUCK I heeft tot doelstelling een eerste mijnbouwconcept voor ondergrondse opslagruimte te ontwerpen waarbij stabiliteitsberekeningen worden uitgevoerd met parameters die representatief zijn voor de Nederlandse situatie. De onderstaande parameters zijn allen beschikbaar geworden voor overige CORA-projecten middels dit onderzoek. De geschiktheid voor gebruik van deze parameterwaarden voor diepten van 500-800 m is besproken in de vorige paragraaf.

#### *Geomechanische parameters:*

$\gamma_n$	volumiek gewicht bulk nat
$\gamma_{dr}$	volumiek gewicht bulk droog
w	porositeit
$c'$	effectieve cohesie
$\phi'$	effectieve interne wrijving
E	elasticiteitsmodulus

#### *Geohydrologische parameters:*

n	watergehalte
K	hydraulische doorlatendheid



*(Geo-)thermische parameters:*

$T_{500}$	temperatuur op 500 m diepte
$c_p$	specifieke warmte
$\lambda$	thermische geleidbaarheid
$\alpha$	thermische diffusiviteit

*Aansluiting CAR-II en TRUCK-II*

TRUCK II heeft tot doel het eerste mijnontwerp (TRUCK I) te optimaliseren en te evalueren voor terugneembare eindberging in klei. Bovenstaande parameters zullen wederom gebruikt worden voor analyse van stabiliteit van de mijngangen.

Dit rapport voorziet in bovenstaande parameters, maar kan niet direct gebruikt worden voor een dieptebereik van 500 tot 800 m. Met name de geomechanische parameters zijn diepte-afhankelijk, terwijl de waarden van een aantal essentiële parameters in dit rapport slechts representatief zijn voor dieptes minder dan 300 m (zie ook par. 7.1). In TRUCK II wordt gestreefd naar een optimaal geomechanisch model bij het mijnmodel, waardoor parameters voor het dieptebereik van 500 tot 800 m zullen moeten worden gecorrigeerd. Bij het gebruik van niet-representatieve geomechanische waarden zullen ook de berekeningen van de kostenevaluaties binnen TRUCK II onjuist zijn.

*Aansluiting CAR-II en METRO*

De doorlatendheid van de kleien is een belangrijk aspect van de METRO veiligheidsstudie. Binnen de modellen wordt gerekend met retardatiefactoren R. Deze factor is een functie van de adsorptiecapaciteit van gronddeeltjes en verschilt als zodanig per element. Geohydrologische parameters die in dit rapport vermeld zijn, worden in het project METRO vergeleken met de retardatiefactor R.

### **7.3 Aandachtsgebieden Tertiaire kleivoorkomens op het land**

Een aantal gebieden in Nederland met voor opslag geschikte eigenschappen zoals diepteligging, dikte kleipakket, homogene lithologie, zijn in Nederland aangewezen.

Wanneer de "randvoorwaarden" worden gesteld: (1) de diepteligging van de Tertiaire klei bedraagt 500 tot 800 m, en (2) een minimale dikte van 150 m kleipakket, kunnen op het Nederlandse vaste land een aantal gebieden worden aangewezen die voor toekomstig onderzoek geschikt zijn. De gebieden met Tertiaire kleipakketten die voldoen aan bovengestelde "randvoorwaarden" worden hieronder toegelicht.

De *Klei van Asse* is geschikt voor toekomstig onderzoek in het gebied van de Waddenzee. De *Klei van Ieper* heeft een voldoende diepteligging en dikte in de provincies Drenthe, Groningen en in de Waddenzee en het meest noordelijke deel

van het IJsselmeer. In deze gebieden zijn dikke, homogene Klei van Ieper aanwezig. De diepteligging van de kleipakketten is onregelmatig door dieper gelegen zoutstructuren en Tertiaire tektonische bewegingen.

In een groot deel van *Midden-Nederland* zijn alle Tertiaire kleipakketten niet aanwezig als gevolg van opheffing en erosie. In het *oostelijk deel van Gelderland* zijn synclinale structuren aanwezig, waar de Klei van Rupel aan de gestelde randvoorwaarden voldoet.

In de *Voorne Trog* van Zeeland en het zuidelijk deel van Zuid-Holland zijn locaties aanwezig waar de Klei van Rupel, de Klei van Asse en de Klei van Ieper lokaal ondieper ligt dan 500 m, maar waar de dikte en de lithologische samenstelling voldoende homogeen is om als aandachtsgebied te worden aangemerkt. De diepteligging van de Klei van Rupel in *Noord-Brabant* (Roer Valley Graben) varieert van 800 tot 1700 m bij een dikte-ontwikkeling van 50 tot 125 m.

## 8 Aanbevelingen

Analyse van boorgatmetingen om de lithologische ontwikkeling van sedimenten om volumetrische geomechanische eigenschappen van Tertiaire kleipakketten te berekenen is mogelijk. Het behoeft aanbeveling om deze analyse met landboringen te herhalen wanneer deze gegevens beschikbaar worden.

Voor modelberekeningen van stabiliteit bestaan er te weinig betrouwbare (experimenteel bepaalde) parameters die representatief zijn voor diepten van 500 tot 800 m. In deze fase van het CORA onderzoeksprogramma zou voorradig monstermateriaal van Tertiaire kleipakketten onderzocht moeten worden om de lithologische, geomechanische, geohydrologische en geochemische eigenschappen te analyseren die representatief zijn voor een diepteligging van 500 tot 800 m.

Tevens dienen de parameters die bekend zijn van de Westerscheldetunnel en het ondergrondse laboratorium te Mol te worden aangepast voor temperaturen hoger dan 15 °C. Niet alleen omdat de natuurlijke temperatuur van de aarde toeneemt met de diepte, maar ook vanwege de opwarming van het kleimassief direct rond de opslagfaciliteit. Aangezien er temperaturen van meer dan 50 °C bereikt kunnen worden, dient de invloed van deze temperatuur te worden meegenomen bij berekeningen van stabiliteit en veiligheid van een ondergrondse opslagfaciliteit.

Hiertoe zouden monsters getest moeten worden bij verschillende begravingsdiepte en temperatuur. Om de invloed van begravingsdiepte en temperatuur te testen moeten kleimonsters in het laboratorium beproefd worden bij verschillende (in-situ) drukken en temperaturen.

## Referenties

Athy, L.F. (1980)

*Density, porosity and compaction of sedimentary rocks*. Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., 14, 1

Beer, de E.E. (1976) *Shear strength characteristics of the Boom Clay*. Geotechn. Conf. Oslo, Vpl. 3, pp. 83-88

British Standard Institution (1981) *Code of practise for Site Investigations*, BS 5930: 1981

Beaufays R., W. Blommaert, J. Bronders, P. Canniere, M. Del Marmol, P. Henrion, M. Monsecour, J. Patyn & M. Put (1992) *Characterization of the Boom Clay and its multilayered hydrogeological environment*. SCK-CEN R-2499

Decler, J., W. Viane & N. Vandenberghe (1983) *Relationships between chemical, physical and mineralogical characteristics of the Rupelian Boom clay, Belgium*. Clay Minerals, No. 18, p. 1-10

De Smet, D., W. De Breuck, L. Wouters. & P. Manfroy (1996) *Characteristics of argillaceous rocks: Kortrijk Formation (Ieper Clay)*. A catalogue of the Characteristics of Argillaceous Rocks studied with respect to radioactive waste disposals issues: Belgium, Canada, France, Germany, Italy, Japan, Spain, Switzerland, United Kingdom and United States. SCK-CEN int. report

Dierckx, A. (1997) *Boom Clay in situ porewater chemistry*. SCK-CEN, BLG-734, 97/CO720223/AD/mvo/P-20

Domenico, P.A. & F.W. Schwartz (1990) *Physical and chemical hydrogeology*

EUR 11776 (1988) *PAGIS, Disposal in Clay Formation*, (ed. J. Marivoet), CEN-SCK R 2748

EUR 12027 (1989) *Geomechanics of clays for radioactive waste disposal*, (ed. B.Côme), DG SRD, Proceedings of a technical session, Brussels, 1 and 2 December 1988

EUR 13400 (1991) *Faults in clays-their detection and properties*, Final report DG SRD

EUR 14154 (1992) *Geomechanical behaviour of Boom clay under ambient and elevated temperature conditions*, Final report DG SRD

Funcken, R., P. Gonze, P. Vranken, P. Manfroy & B. Neerdael (1983) *Construction of an experimental laboratory in deep clay formation*. Eurotunnel '83 Conference, Basel, Switzerland, paper 9., p. 79-85

Hardin, B.O. & V.P. Drnevich (1981) *Shear modulus and damping soils*. J. Soils Mech. and Found. Div. (Proc. ADCE)

Hoeven, K.M.L.J. (1995) *Hydrogeologische karakterisering van Boven-Tertiaire en Onder-Kwartaire afzettingen in Limburg*, GB 2493, LUW

Huisman, D.J. (1998) *Geochemical characterization of subsurface sediments in the Netherlands*, Proefschrift Landbouwniversiteit Wageningen, 175 pp.

Letsch W.J. & W. Sissingh (1983) *Tertiary stratigraphy of the Netherlands*. Geol. en Mijnbouw 62, pp. 305-318.

Magara, K. (1969) *Porosity-permeability relationship of shale*. Can. Well Logging Soc. Jour., v.2, p. 47-93

Magara, K. (1980) *Comparison of porosity-depth relationships of shale and sandstone*. J. of Petrol. Geology 3, 2, pp. 175-185

Magara, K. (1986) *Porosity-depth relationships during compaction in hydrostatic and non-hydrostatic cases*. In: Thermal modeling in sedimentary basins, 1st IFP exploration Research conference Carcans, France, June 3-7, 1985

Marechal & Laga (1988) *Voorstel lithostratigrafische indeling van het Paleogeen - Nationale Commissies voor Stratigrafie*. Commissie: Tertiair, Belg. Geol. Dienst, Brussel, 208 pp.

Mitchell, J.K. (1976) *Fundamentals of soil behaviour*. Wiley N.Y.

NAM & RGD (1980) *Stratigraphic Nomenclature of the Netherlands* - Verh. Kon. Ned. Geol. Mijnbouwk. Gen., 32, 77 pp.

Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen-TNO (1998) *Het effect van een vries-dooi cyclus op het mechanisch gedrag van de Klei van Boom bij de Westerscheldetunnel*, rap. nr. NITG 98-22-B

Ramaekers, J. (1991) *Atlas of subsurface Temperatures in the European Community*, EUR 6578, contribution of The Netherlands

Rider, M.H. (1986) *The geological interpretation of well logs*. (ed. John Wiley and Sons) London

- Rijkers, R.H.B. & Th.H.M. Van Doorn (in druk) *New European geothermal Atlas, contribution of The Netherlands*, Hanover
- Rijks Geologische Dienst (1984) *Inventarisatie van slecht-doorlatende laagpakketten in de ondergrond van het Nederlandse vaste land*, rapp. nr. OP 6009, pp. 131, 12 bijlagen
- Rijks Geologische Dienst (1985) *Aardwarmtewinning en grootschalige warmteopslag in tertiaire en kwartaire afzettingen*, Haarlem. rap. nr. 85KAR02EX
- Rijks Geologische Dienst (1992) *Ingenieursgeologische onderzoek Westerschelde Oeververbinding (WOV-tunnel)*, Rapport 11016
- Rijks Geologische Dienst (1996) *Kartering slecht-doorlatende laagpakketten van Tertiaire Formaties, Project CAR - Fase I (rapp. nr. GB2514)*, pp. 27, 15 kaarten
- Robertson, P.K. & R.G. Campanelle (1983) *Interpretation of cone penetration tests. Part II: Clay*, Can. Geotech. J, vol. 20. 1983, pp. 734-745
- Schokking F. & A.H. Nooy van der Kolff (1995) *History and geotechnical properties of the marine Boom Clay XI Proc. of the European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, ECSMF, Vol.7, pp. 7.141-7.148
- Schön, J.H. (1996) *Physical properties of rocks, fundamentals and principles of petrophysics*, Vol. 18 of Handbook of Geophysical Exploration (ed. K. Helbig and S. Treitel), Pergamon Austria
- Schittekat, J., J.P. Henriët & N. Vandenberghe (1983) *Geology and geotechnique of the Scheldt barrier, characteristics of an overconsolidated clay*, In: Proc. 8th International Harbour Congress, K.N.V. Antwerpen 1983
- Skempton, A.W. (1953) *The colloidal activity of clays*. Proc. 3rd Inter. Conf. Soil Mech. Found. Eng. (Switzerland), Vol. I, p. 57
- Speelman, H. & Breunese, J.N. (1985) *Permeabiliteit, porositeit en kleigehalte van tertiaire en onder-kwartaire afzettingen in Nederland*, rap nr 84KAR13EX
- Terzaghi, K. (1943) *Theoretical soil mechanics*, John Wiley and Sons, New York
- 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, P. Colin & 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

Van Adrichem Boogaert, H.A. & W.F.P. Kouwe (1993-1997) *Stratigraphic nomenclature of the Netherlands, revision and update by RGD and NOGEPa*, Mededelingen Rijks Geol. Dienst (Haarlem)

Van den Bosch, M., Cadée, M.C. & A.W. Jansen (1975) *Lithostratigraphical and biostratigraphical subdivision of tertiary deposits (Oligocene-Pliocene) in the Winterswijk-Almelo region (eastern part of The Netherlands)* - Scripta Geologica, 29, p. 1-167

Van den Bosch, M. & Hager, H. (1984) *Lithostratigraphic correlation of Rupelian deposits (Oligocene) in the Boom area (Belgium), the Winterswijk area (The Netherlands) and the Lower Rhine District (F.R.G.)* - Meded. werkgr. Tert, Kwart. Geol. 21(3), p. 123-138

Van den Bosch, M. (1984) *Lithostratigraphy of the of the Brinkheurne Formation (Oligocene, Rupelian) in the eastern part of The Netherlands* - Meded. werkgr. Tert, Kwart. Geol. 21(2), p. 93-113.

Vandenberghe, N. (1978) *Sedimentology of the Boom Clay (Rupelian) in Belgium*, *Verhandelingen van de Koninklijke Academie voor Wetenschappen en Schone Kunsten*, nr. 147, 1978

Vandenberghe, N. & Laga, P. (1986) *The septaria of the Boom Clay (Rupelian) in the type area in Belgium*. Aardkundige Mededelingen, Vol. 3., p. 229-238.

Volckaert, G., B. Neerdael & Ph. Laliëux (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.

Vroonhof, K. (1996) *Geohydrologische gegevens van Nederlandse grondwaterwinningen*, RGD-Haarlem

WOV/GD (1994) *Bijzondere metingen, Feitelijke eindrapportage veldonderzoek*, CO-350690/346

WOV/GD (1995a) *Voorlopige eindrapportage veldonderzoek*. CO-350690/173

WOV/GD (1995b) *Laboratoriumonderzoek, feitelijk eindrapport*, CO-350690/351

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

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

Wouters, L. & N. Vandenberghe (1994) *Geologie van de Kempen* - NIRAS/ONDRAF, Brussel, 208 pp.

Wyllie, M.R.J., A.R Gregory & L.W. Gardner (1956) *Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media*, *Geophysics*, 21(1), p. 41-70



# **Inventarisatie geomechanische, geochemische en geohydrologische eigenschappen van Tertiaire kleipakketten - CAR Fase II**

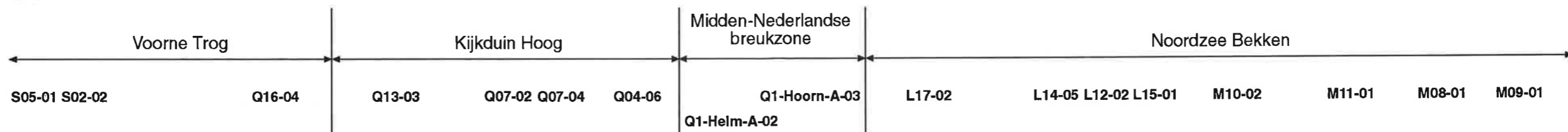
Eindrapport

## **Bijlage A.1 Geologisch profiel Oosterschelde-Ameland**

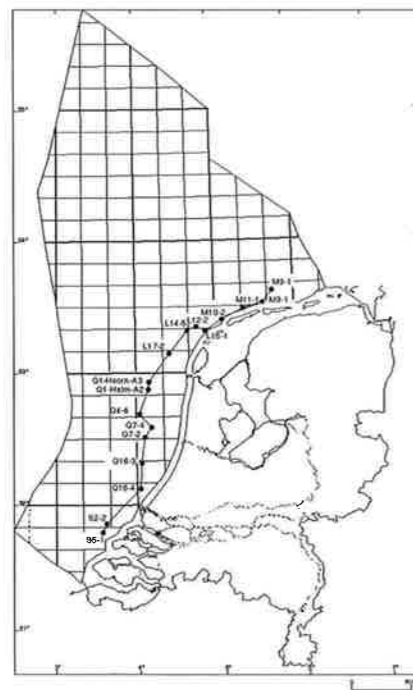
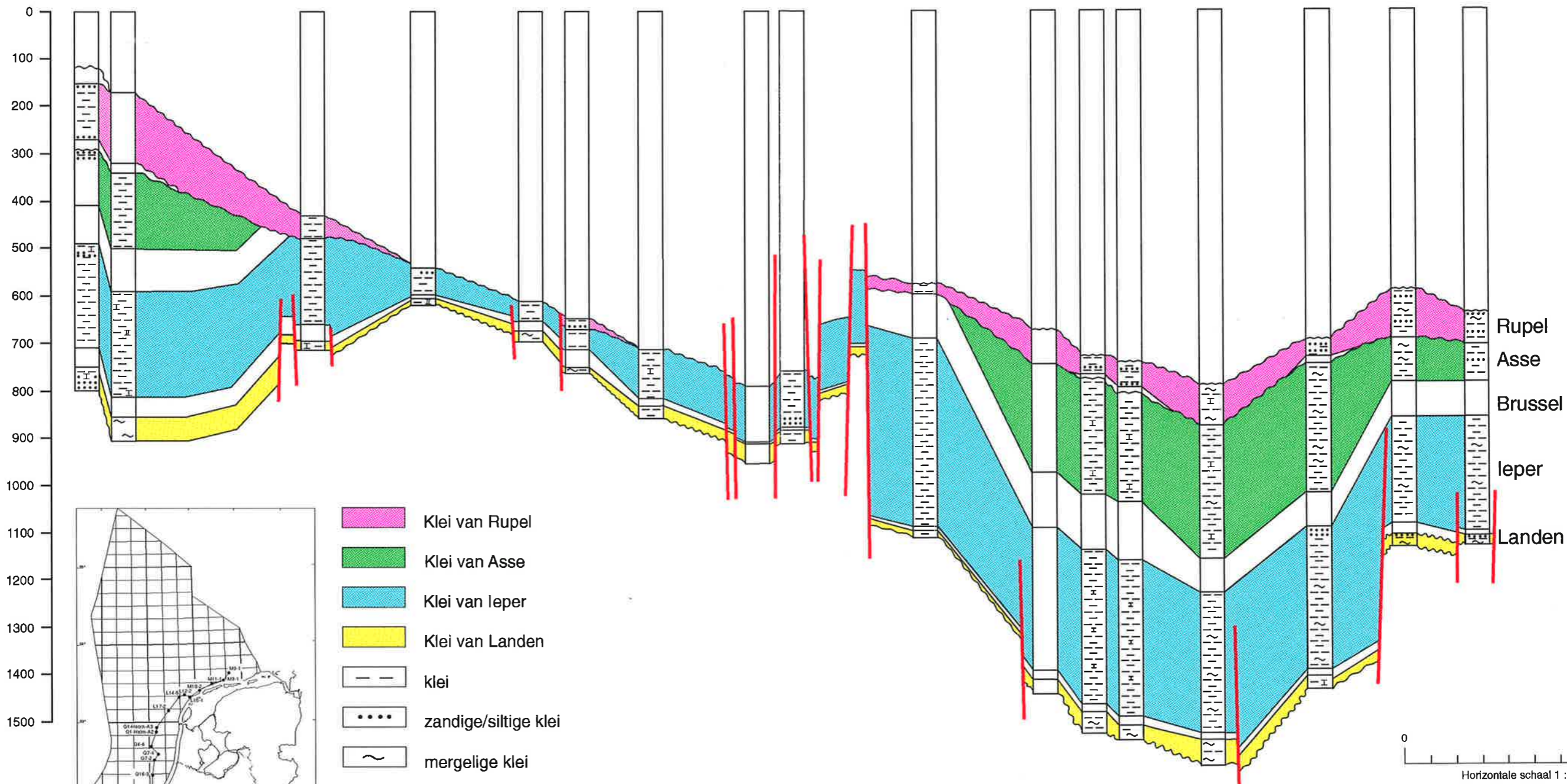


Zuid

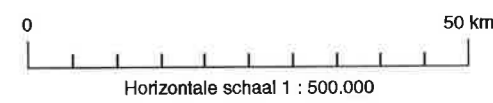
Noord



Diepte in m beneden gemiddeld zee niveau



- Klei van Rupel
- Klei van Asse
- Klei van Ieper
- Klei van Landen
- klei
- zandige/siltige klei
- mergelige klei
- I kalkige klei
- breuk
- discordantie



Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO

**Bijlage A: Geologisch Profiel Oosterschelde Ameland**

Geomechanisch Onderzoek mei 1998 RR/NP/RvdK

Rapport nr. NITG 98-90B

## Bijlage A.2 Lijst van gebruikte boringen in profiel Oosterschelde-Ameland

Offshore put	X-coord (UTM-3)	Y-coord (UTM-3)	maatsch.	jaar
M09-01	679,966.0	5,943,649.0	NAM	1968
M08-01	671,888.0	5,933,324.0	NAM	1982
M11-01	656,900.0	5,928,249.0	NAM	1982
M10-02	638,409.0	5,918,069.0	NAM	1982
L15-01	624,602.0	5,908,457.0	NAM	1978
L12-02	617,306.0	5,911,682.0	NAM	1976
L14-05	609,502.0	5,908,423.0	Placid	1985
L17-02	594,100.0	5,888,776.0	Union Oil	1979
Q01-HOORN-A-03	577,337.0	5,864,708.0	Union Oil	1983
Q01-HELM-A-02	576,875.0	5,858,818.0	Union Oil	1982
Q04-06	569,217.0	5,838,188.0	Unocal	1985
Q07-04	579,615.0	5,826,992.0	NAM	1982
Q07-02	574,409.0	5,818,436.0	NAM	1978
Q13-03	571,721.0	5,796,810.0	Amoco	1982
Q16-04	570,497.0	5,774,656.0	BP	1985
S02-02	541,942.0	5,745,321.0	Mobil	1983
S05-01	538,850.0	5,738,236.0	NAM	1981

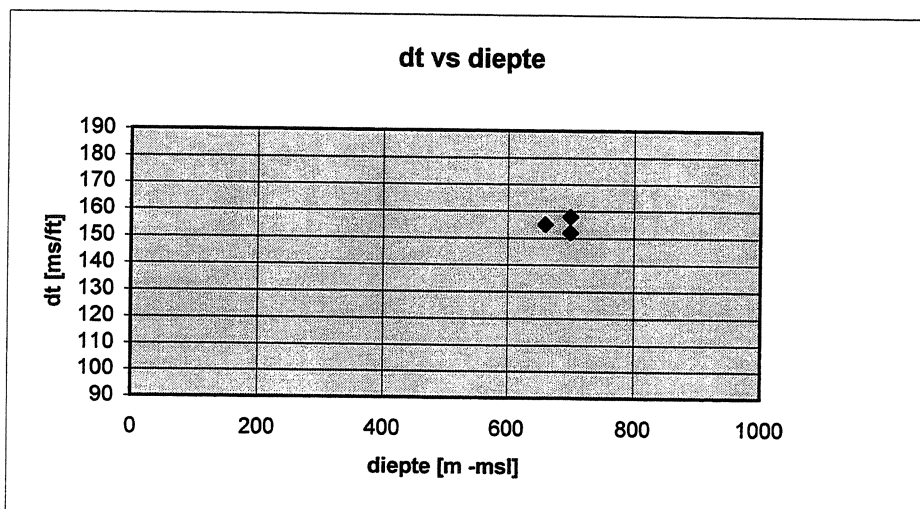
**Bijlage B.1 Geomechanische gegevens Formatie van Breda***Offshore boringen Oosterschelde-Ameland*

<b>F. van Breda</b>						
<i>putnaam</i>	<i>diepte -msl</i> <i>m</i>	<i>dt SL (klei)</i> <i>ms/ft</i>	<i>ro-bulk FDC</i> <i>gr/cc</i>	<i>por FDC</i> <i>%</i>	<i>por CNL</i> <i>%</i>	<i>w CNL</i> <i>%</i>
Q04-06	700	158	-	-	-	-
L12-02	660	155	-	-	-	-
M10-02	700	152	-	-	-	-

## **Bijlage B.2    Sonic snelheden vs diepte Formatie van Breda**

*Offshore boringen Oosterschelde-Ameland*

F. van Breda





## Bijlage C.1 Geomechanische gegevens Klei van Rupel

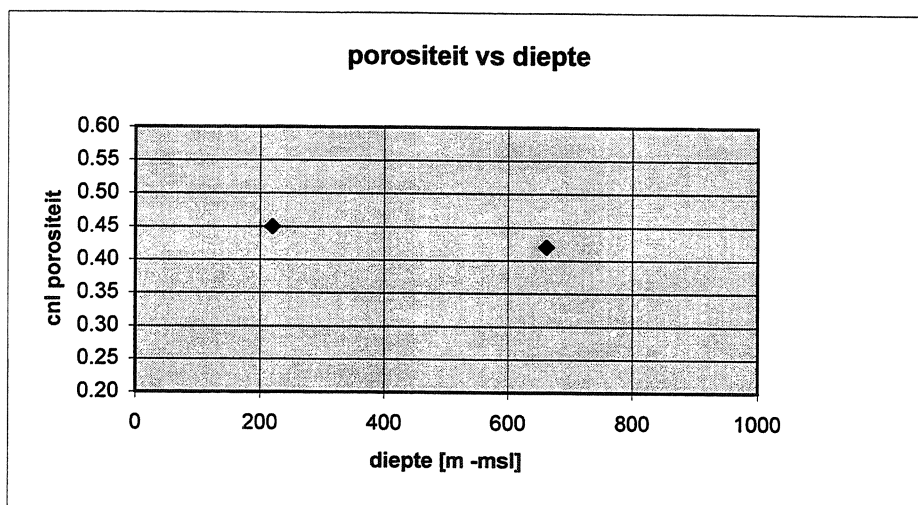
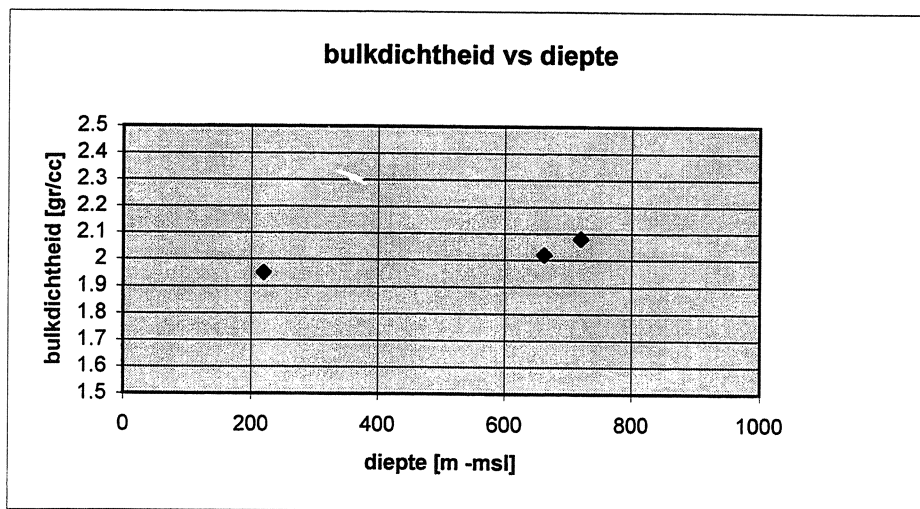
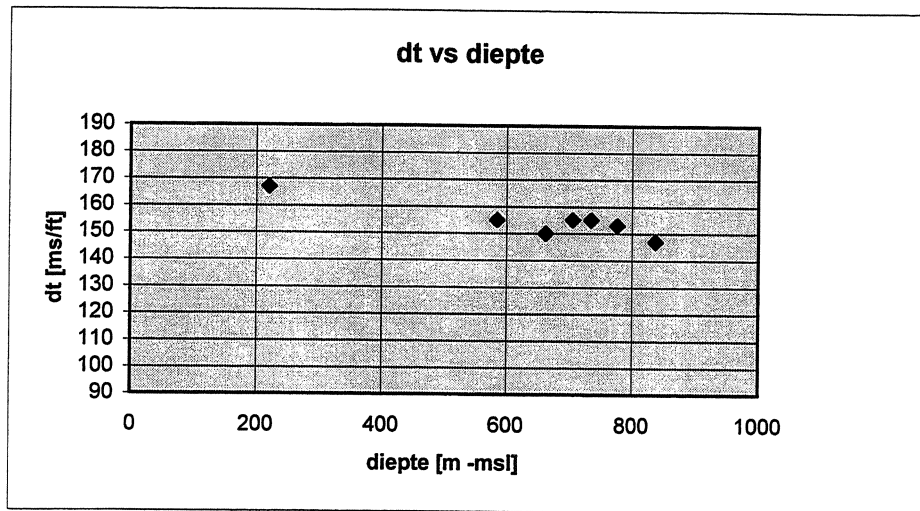
*Offshore boringen Oosterschelde-Ameland*

<b>Klei van Rupel</b>						
<i>putnaam</i>	<i>depth -msl</i> m	<i>dt SL (klei)</i> ms/ft	<i>ro-bulk FDC</i> gr/cm3	<i>por FDC</i> %	<i>por CNL</i> %	<i>w CNL</i> %
S05-01	220	167	1.95	0.45	0.45	0.24
Q07-04	662	150	2.02	0.41	0.42	0.22
L17-02	585	155	-	-	-	-
L14-05	705	155	-	-	-	-
L12-02	735	155	-	-	-	-
L15-01	776	153	-	-	-	-
M10-02	838	147	-	-	-	-
M11-01	720	-	2.08	0.36	-	-

**Bijlage C.2    Sonic snelheden, bulkdichtheden en cnl-  
porositeiten vs diepte Klei van Rupel**

*Offshore boringen Oosterschelde-Ameland*

## Klei van Rupel



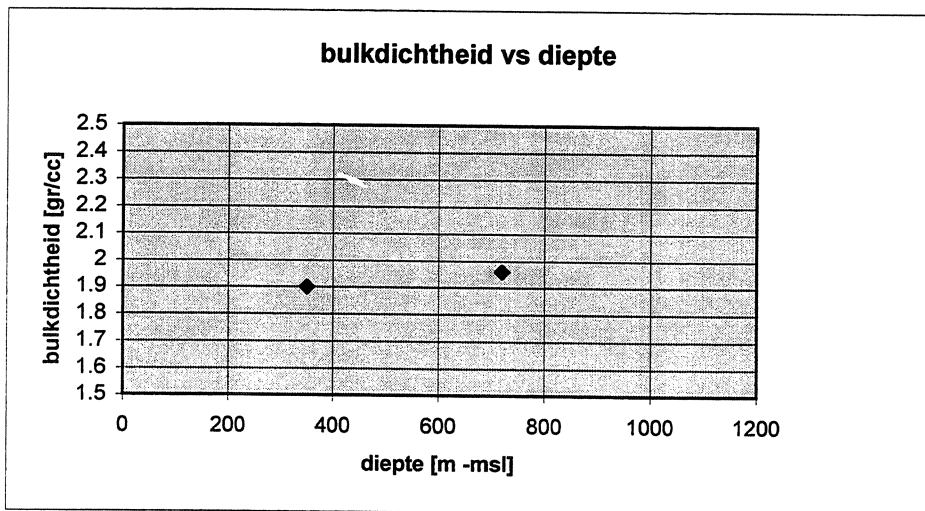
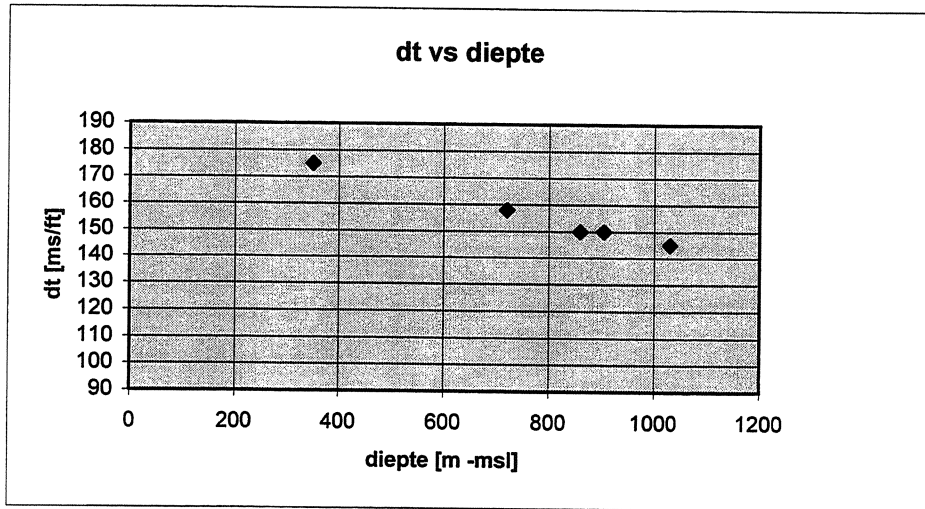
**Bijlage D.1 Geomechanische gegevens Klei van Asse***Offshore boringen Oosterschelde-Ameland*

<b>Klei van Asse</b>						
<i>putnaam</i>	<i>depth -msl</i>	<i>dt SL (klei)</i>	<i>ro-bulk FDC</i>	<i>por FDC</i>	<i>por CNL</i>	<i>w CNL</i>
	<i>m</i>	<i>ms/ft</i>	<i>gr/cc</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
S05-01	350	175	1.9	0.469	-	-
L14-05	860	150	-	-	-	-
L12-02	905	150	-	-	-	-
M10-02	1030	145	-	-	-	-
M08-01	720	158	1.96	0.431	-	-

## **Bijlage D.2    Sonic snelheden en bulkdichtheden vs diepte Klei van Asse**

*Offshore boringen Oosterschelde-Ameland*

## Klei van Asse



## Bijlage E.1 Geomechanische gegevens Klei van Ieper

*Offshore boringen Oosterschelde-Ameland*

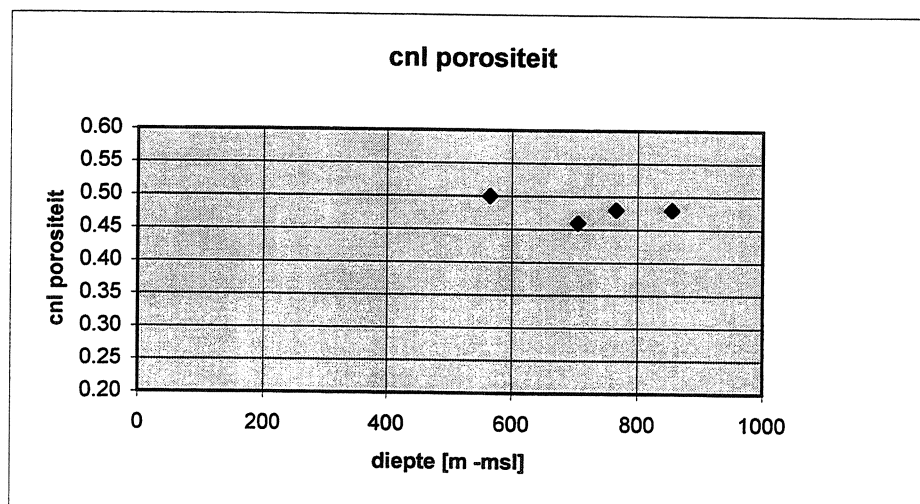
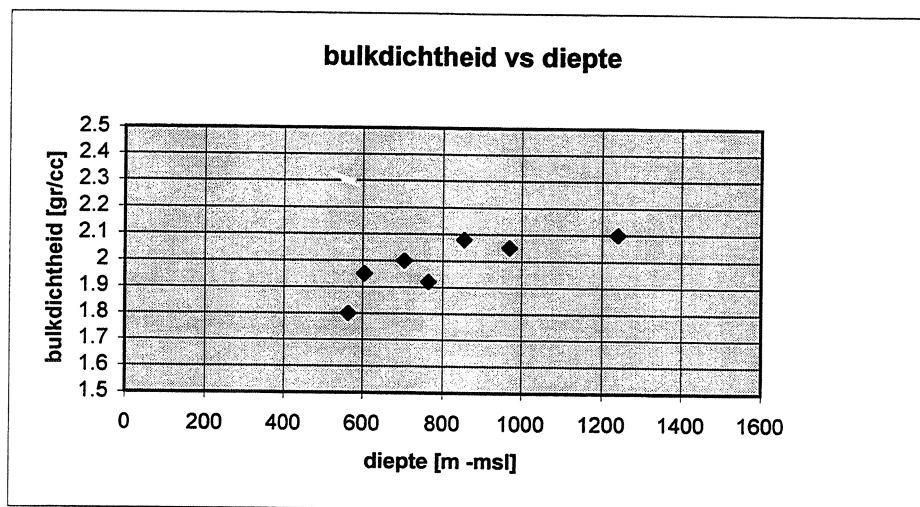
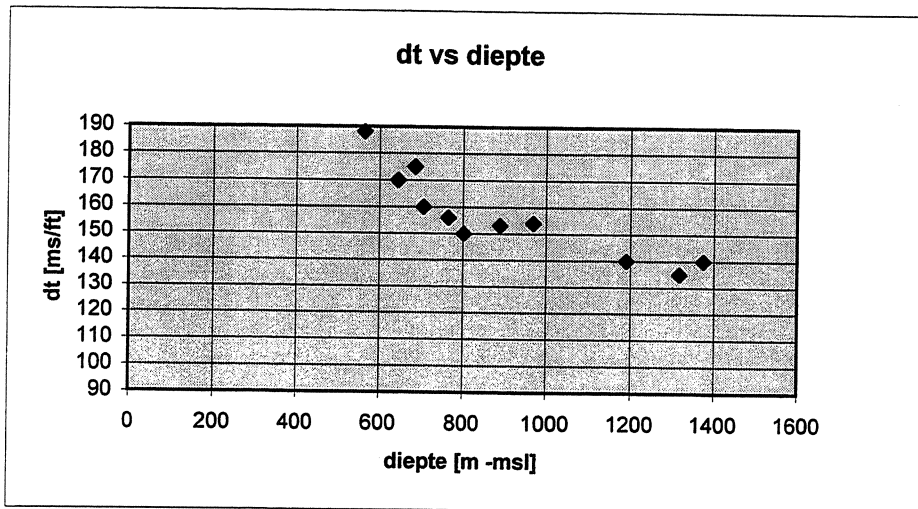
<b>Klei van Ieper</b>						
<i>putnaam</i>	<i>depth -msl</i>	<i>dt SL (klei)</i>	<i>ro-bulk FDC</i>	<i>por FDC</i>	<i>por CNL</i>	<i>w CNL</i>
	<i>m</i>	<i>ms/ft</i>	<i>gr/cc</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
S05-01	605	155	1.95	0.44	-	-
S02-02	685	175	-	-	-	-
Q16-04	565	188	1.8	0.55	0.50	0.28
Q07-04	705	160	2	0.41	0.46	0.25
Q07-02	645	170	-	-	-	-
Q04-06	765	156	1.92	0.46	0.48	0.27
Q01-Helm-A-02	855	-	2.08	0.36	0.48	0.27
Q01-Hoorn-A-03	802	150	-	-	-	-
L17-02	890	153	-	-	-	-
L14-05	1190	140	-	-	-	-
L15-01	1318	135	-	-	-	-
M10-02	1375	140	-	-	-	-
M11-01	1240	-	2.10	0.34	-	-
M08-01	970	154	2.05	0.38	-	-

**Bijlage E.2    Sonic snelheden, bulkdichtheden en cnl-  
porositeiten vs diepte Klei van Ieper**

*Offshore boringen Oosterschelde-Ameland*



## Klei van leper



## Bijlage F.1 Geomechanische gegevens Klei van Landen

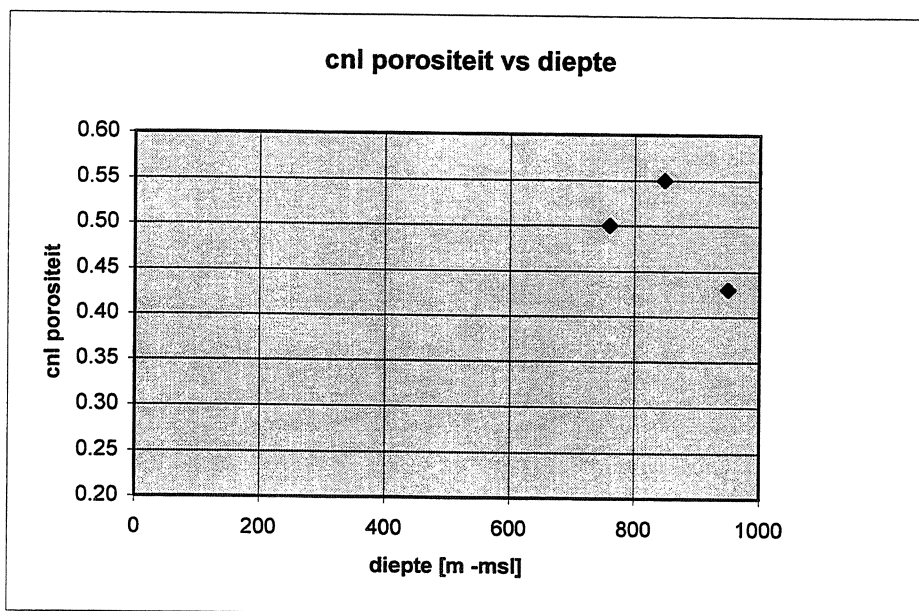
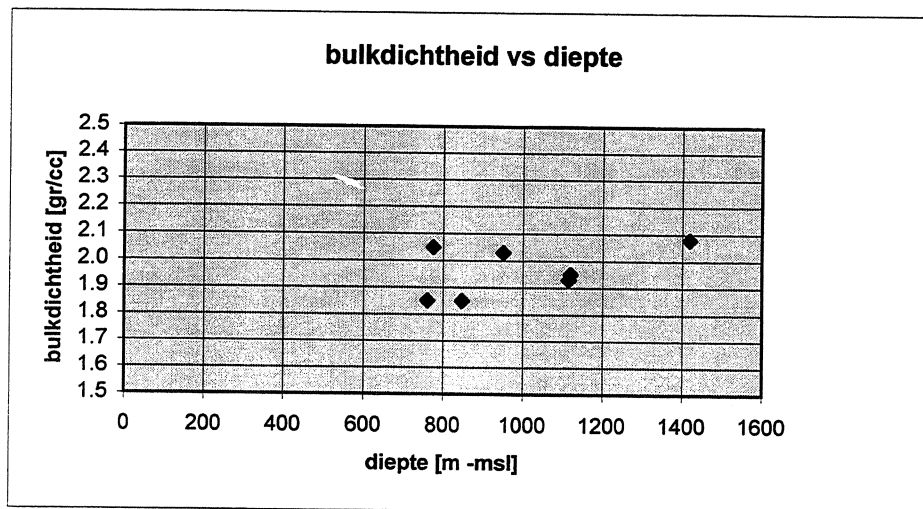
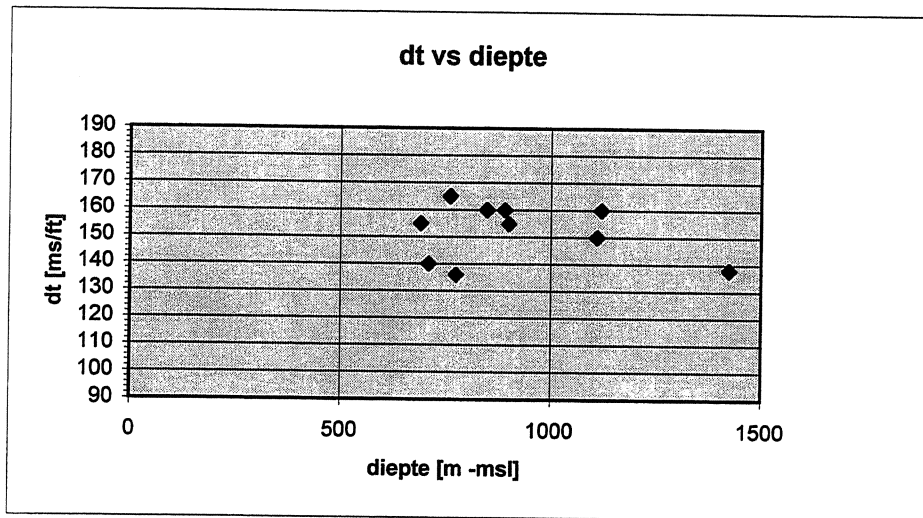
*Offshore boringen Oosterschelde-A meland*

<b>Klei van Landen</b>						
<i>putnaam</i>	<i>depth -msl</i>	<i>dt SL klei)</i>	<i>ro-bulk FDC</i>	<i>por FDC</i>	<i>por CNL</i>	<i>w CNL</i>
	<i>m</i>	<i>ms/ft</i>	<i>gr/cc</i>	<i>%</i>	<i>%</i>	<i>%</i>
S05-01	775	136	2.05	0.375	-	
S02-02	890	160				
Q16-04	710	140				
Q07-04	760	165	1.85	0.500	0.500	0.284
Q07-02	690	155				
Q04-06	843	160	1.85	0.531	0.550	0.326
Q01-Helm-A-02	950	-	2.03	0.388	0.430	0.230
Q01-Hoorn-A-03	900	155				
L17-02	1110	150				
L14-05	1425	138				
M11-01	1420	-	2.08	0.356		
M08-01	1120	160	1.95	0.438		
M09-01	1115	-	1.93	0.45		

**Bijlage F.2    Sonic snelheden, bulkdichtheden en cnl-  
porositeiten vs diepte Klei van Landen**

*Offshore boringen Oosterschelde-Ameland*

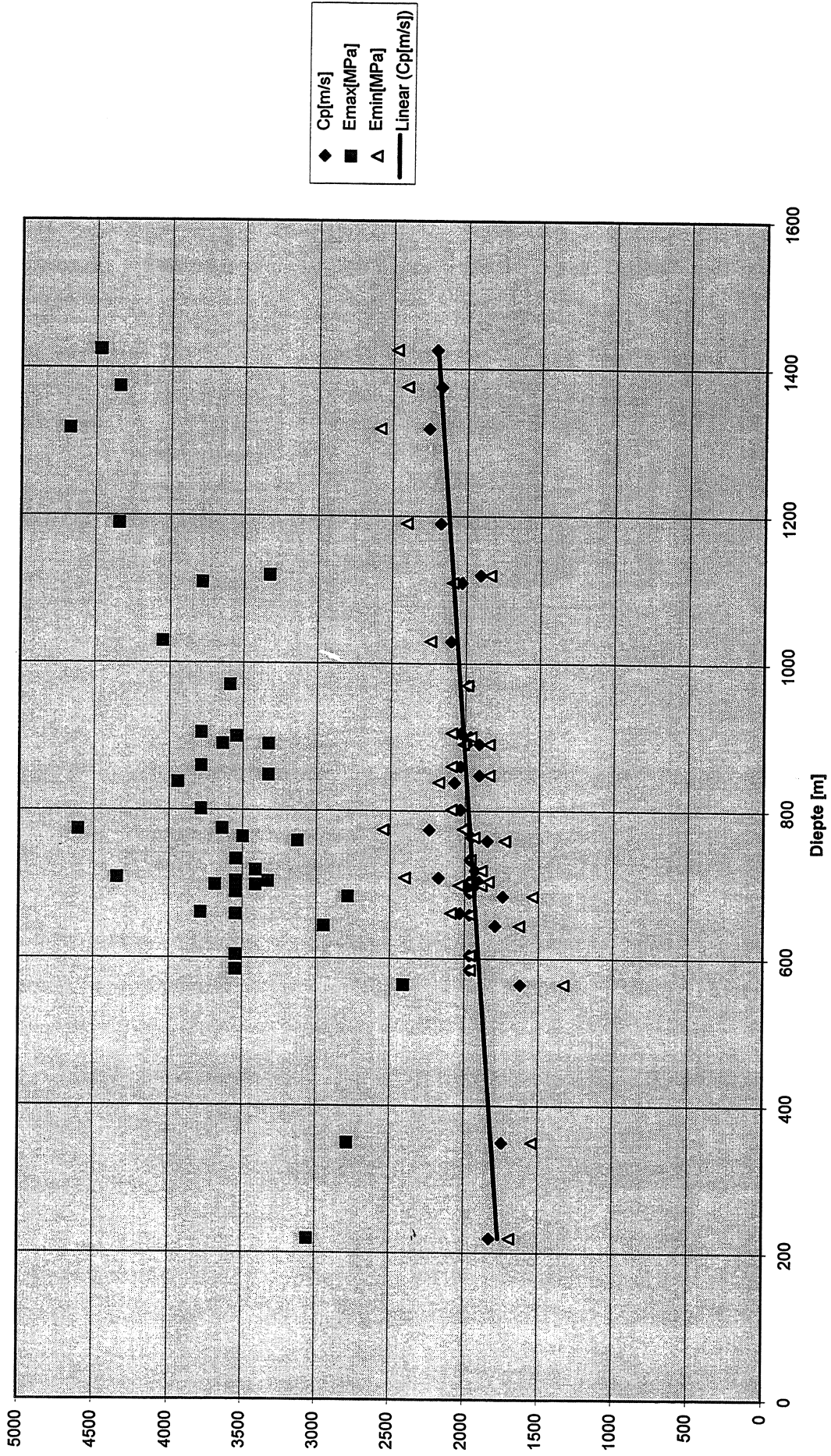
# Klei van Landen



## **Bijlage G      Compressiegolf en Young's modulus versus diepte**

*Offshore boringen Oosterschelde-Ameland*

# Compressiegolf snelheid en Young's modulus vs diepte



**Bijlage H      Korrelfractie < 2  $\mu\text{m}$**

*Westerschelde Klei van Rupel*

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	Korrelfractie < 2 µm [%]
54E0290	B-06	44322	374356	31.45	64.0
				39.35	34.0
				42.00	10.0
				45.30	13.0
54E0293	B-09	44327	374668	39.45	40.0
				45.50	36.0
				47.50	25.0
54E0295	B-011	44373	374880	42.20	36.0
				45.86	34.0
54E0296	B-011A	44374	374882	40.00	41.0
				42.25	66.0
				46.00	34.0
48G0205	B-013	44379	375066	35.70	32.6
				39.85	49.8
				44.30	47.1
				46.05	25.9
48G0206	B-014	44343	375164	34.15	36.0
				34.75	52.0
				39.90	42.0
				43.55	67.0
				45.20	25.0
48G0207	B-015	44345	375265	31.90	43.0
				37.10	58.0
				43.30	52.0
48G0208	B-016	44349	375467	22.35	55.0
				25.25	65.0
				28.35	75.0
				32.35	63.0
				35.55	48.0
				36.60	26.0
				40.40	37.0
				41.45	36.0
				45.20	22.0
				46.70	57.0
48G0209	B-017	44361	375864	30.40	69.0
				37.15	50.0
				42.10	29.0
48G0210	B-018	44370	376266	29.95	57.0
				37.40	49.0
				37.70	64.0
				43.45	50.0
48G0211	B-019	44381	376664	22.80	28.0



NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	Korrelfractie < 2 µm [%]
				23.85	39.0
				28.80	71.0
				29.35	51.0
				33.60	68.0
				39.80	51.0
				44.65	42.0
				48.70	34.0
				50.00	59.0
48G0212	B-021	44396	377164	35.20	58.0
				40.70	59.0
				45.33	30.0
48G0213	B-022	44399	377264	35.70	64.0
				50.00	66.0
				46.35	26.0
48G0214	B-023	44400	377365	31.85	58.0
				35.80	64.0
				38.45	62.0
				41.75	57.0
				46.90	54.0
				49.80	37.0
				53.45	40.0
				57.95	57.0
48G0215	B-024	44404	377465	41.20	63.0
				44.30	57.0
				46.85	41.0
				51.20	38.0
48G0216	B-025	44404	377566	40.54	63.0
				46.12	57.0
				49.02	35.0
				55.03	50.0
48G0218	B-027	44417	377963	43.85	65.0
				46.50	61.0
				50.60	56.0
48G0219	B-028	44424	378165	43.10	58.0
				48.00	70.0
48G160		44300	377200	23.35	48.6
				24.88	28.0
				26.50	54.7
				28.50	43.9
				30.73	42.0
				31.88	45.0
				35.15	52.0
				36.93	55.0
				41.48	51.3
				45.25	61.0

<b>NITG- nummer</b>	<b>boor nummer</b>	<b>x-coord</b>	<b>y-coord</b>	<b>diepte m - NAP</b>	<b>Korrelfractie &lt; 2 µm [%]</b>
				48.23	25.3
				51.28	32.7
				55.83	39.0
				60.80	13.2
54E268		44330	373950	26.77	47.4
				29.84	40.0
				33.68	28.9
				35.78	38.2
				39.42	47.0
				42.28	10.2
				43.57	17.0

**Bijlage I      Atterbergse grenzen  $w_P$ ,  $w_L$  en  $I_P$**

*Westerschelde Klei van Rupel*

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	W <sub>p</sub> [%]	W <sub>i</sub> [%]	I <sub>p</sub> [%]
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 <sub>p</sub> [%]	W <sub>i</sub> [%]	I <sub>p</sub> [%]
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 <sub>p</sub> [%]	W <sub>i</sub> [%]	I <sub>p</sub> [%]
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 J      Volumieke gewichten  $\gamma_n$ ,  $\gamma_d$  en watergehalte  $w$**

*Westerschelde Klei van Rupel*

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	watergehalte [%]	eenheids gewicht nat	eenheids gewicht droog
					$w_g$ 105	$\gamma_{nat}$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{dr}$ kN/m <sup>3</sup>
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
					$w_g$ 105	$\gamma_{nat}$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{dr}$ kN/m <sup>3</sup>
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	44361	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
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
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 gewicht nat	eenheids gewicht droog
					$w_{g\ 105}$	$\gamma_{nat}$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{dr}$ kN/m <sup>3</sup>
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
					$w_g 105$	$\gamma_{nat} \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{dr} \text{ kN/m}^3$
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
					$w_{g 105}$	$\gamma_{nat} \text{ kN/m}^3$	$\gamma_{dr} \text{ kN/m}^3$
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	-	-

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	watergehalte	eenheids gewicht nat	eenheids gewicht droog
					[%]	$\gamma_{nat}$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{dr}$ kN/m <sup>3</sup>
					$W_g$ 105		
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
						$\gamma_{nat}$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{dr}$ kN/m <sup>3</sup>
					$w_g$ 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	44361	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 gewicht nat	eenheids gewicht droog
						$w_g$ 105	$\gamma_{nat}$ kN/m <sup>3</sup>
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
					$w_g$ 105	$\gamma_{nat}$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{dr}$ kN/m <sup>3</sup>
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
					$w_g$ 105	$\gamma_{nat}$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_{dr}$ kN/m <sup>3</sup>
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 K      Porositeit $n$ en verzadigingsgraad $s$**

*Westerschelde Klei van Rupel*

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	m - NAP	porositeit n [%]	verzadigingsgraad S [%]
54E0290	B-06	44322	374356	30.30	43	96
				31.45	47	89
				36.30	42	99
				39.35	45	97
				42.00	33	92
				45.30	36	91
54E0293	B-09	44327	374668	39.45	41	97
				45.50	43	97
				47.50	40	99
54E0294	B-010	44332	374766	48.10	36	97
				58.10	40	97
54E0296	B-011A	44374	374882	40.00	44	97
				42.25	40	100
				46.00	39	91
48G0205	B-013	44379	375066	35.70	43	95
				39.85	47	96
				44.30	46	93
				46.05	44	97
48G0206	B-014	44343	375164	25.27	40	100
				31.75	40	88
				34.15	47	98
				34.75	40	88
				37.50	41	96
				39.90	42	92
				42.35	42	92
				43.55	42	100
				44.45	46	99
				45.20	42	87
48G0207	B-015	44345	375265	25.20	32	95
				31.45	39	99
				31.90	38	100
				33.50	42	100
				37.10	41	100
				41.25	41	98
				43.30	41	99
48G0208	B-016	44345	375265	22.35	44	98
				25.25	39	100
				28.35	45	97
				32.35	41	100
				33.40	42	100
				35.55	41	96
				36.60	42	89
				40.40	45	85
				41.45	43	92
				41.60	41	97
				45.20	44	83

<b>NITG-nummer</b>	<b>boor nummer</b>	<b>x-coord</b>	<b>y-coord</b>	<b>m - NAP</b>	<b>porositeit n [%]</b>	<b>verzadigingsgraad S [%]</b>
48G0208	B-016	44345	375265	46.70	45	99
48G0209	B-017	44361	375864	30.40	43	100
				37.15	43	96
				42.10	44	92
48G0210	B-018	44370	376266	29.95	39	97
				37.40	41	96
				37.70	42	99
				43.45	43	96
48G0211	B-019	44381	376664	22.80	49	94
				23.85	42	97
				28.80	43	100
				29.35	42	95
				33.60	42	99
				39.80	41	98
				44.65	42	98
				48.70	45	94
				50.00	44	95
48G0212	B-021	44396	377164	35.20	40	96
				40.70	42	100
				45.33	43	92
48G0213	B-022	44399	377264	35.70	40	96
				50.00	45	98
				46.35	44	95
48G0214	B-023	44400	377365	31.85	43	93
				35.80	42	100
				38.45	46	97
				41.75	42	96
				45.95	41	98
				46.90	41	97
				49.80	43	94
				50.60	43	96
				53.45	42	97
				57.95	44	97
48G0215	B-024	44404	377465	41.20	43	100
				44.30	43	98
				46.85	40	97
				51.20	43	88
48G0216	B-025	44404	377566	40.54	40	100
				46.12	42	99
				49.02	45	91
				55.03	45	95
48G0218	B-027	44417	377963	43.85	41	99
				46.50	41	100
				50.60	40	97

<b>NITG- nummer</b>	<b>boor nummer</b>	<b>x-coord</b>	<b>y-coord</b>	<b>m - NAP</b>	<b>porositeit n [%]</b>	<b>verzadigings- graad S [%]</b>
48G0219	B-028	44424	378165	43.10	41	97
				48.00	44	100

**Bijlage L      Volumiek gewicht van kleikorrel  $\gamma_k$**

*Westerschelde Klei van Rupel*

<b>NITG- nummer</b>	<b>boor nummer</b>	<b>x-coord</b>	<b>y-coord</b>	<b>diepte m - NAP</b>	<b>eenheids- gewicht van klei [kN/m3]</b>
48G0206	B-014	44343	375164	25.50	26.61
				31.60	26.63
				37.40	26.70
				42.20	26.71
				43.35	26.88
				44.30	26.86
48G0207	B-015	44345	375265	25.00	26.63
				31.30	26.70
				35.30	26.63
				41.10	26.78
48G0159	-	44360	375675	39.60	26.73
				42.82	26.84
				47.65	26.88
				49.85	26.86
				55.25	26.60
				58.55	26.62

**Bijlage M    Ongedraineerde sterkte  $f_{\text{undr}}$**

*Westerschelde Klei van Rupel*



NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	$f_{\text{undr}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] vrije prisma	$f_{\text{undr}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] UU	$f_{\text{undr}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] penetro	$f_{\text{undr}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] torvane
54E0290	B-06	44322	374356	30.30	70	-	-	-
				31.45	21	-	-	-
				36.30	103	-	-	-
				39.35	76	-	-	-
				42.00	9	-	-	-
				45.30	21	-	-	-
54E0293	B-09	44327	374668	39.45	102	-	-	-
				45.50	83	-	-	-
				47.50	96	-	-	-
54E0294	B-010	44332	374766	48.10	9	-	-	-
				58.10	15	-	-	-
54E0296	B-011A	44374	374882	40.00	61	-	-	-
				42.25	151	-	-	-
				46.00	50	-	-	-
48G0205	B-013	44379	375066	35.70	50	-	-	-
				39.85	18	-	-	-
				44.30	41	-	-	-
				46.05	23	-	-	-
48G0206	B-014	44343	375164	34.15	20	-	-	-
				34.75	243	-	-	-
				39.90	101	-	-	-
				43.55	359	-	-	-
				45.20	51	-	-	-
48G0207	B-015	44345	375265	31.90	278	-	-	-
				37.10	246	-	-	-
				43.30	157	-	-	-
48G0208	B-016	44349	365467	22.35	70	-	-	-
				25.25	107	-	-	-
				28.35	76	-	-	-
				32.35	266	-	-	-
				33.40	253	297	-	-
				35.55	163	-	-	-
				36.60	60	-	-	-
				40.40	58	-	-	-
				41.45	91	300	-	-
				45.20	30	-	-	-
46.70	95	-	-	-				
48G0209	B-017	44361	375864	30.40	230	-	-	-
				37.15	42	-	-	-
				42.10	49	-	-	-
48G0210	B-018	44370	376266	29.95	185	-	-	-
				37.40	122	-	-	-
				37.70	210	-	-	-
				43.45	121	-	-	-

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	$f_{\text{undr}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] vrije prisma	$f_{\text{undr}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] UU	$f_{\text{undr}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] penetro	$f_{\text{undr}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] torvane
48G0211	B-019	44381	376664	22.80	10	-	-	-
				23.85	53	-	-	-
				28.80	120	-	-	-
				29.35	55	-	-	-
				33.60	241	-	-	-
				39.80	96	-	-	-
				44.65	152	-	-	-
				48.70	43	-	-	-
				50.00	108	-	-	-
48G0212	B-021	44396	377164	35.20	215	-	-	-
				40.70	202	-	-	-
				45.33	63	-	-	-
48G0213	B-022	44399	377264	35.70	121	-	-	-
				50.00	61	-	-	-
				46.35	47	-	-	-
48G0214	B-023	44400	377365	31.85	42	-	-	-
				35.80	92	-	-	-
				38.45	58	-	-	-
				41.75	128	-	-	-
				46.90	114	-	-	-
				49.80	77	-	-	-
				53.45	98	-	-	-
57.95	169	-	-	-				
48G0215	B-024	44404	377465	41.20	106	-	-	-
				44.30	74	-	-	-
				46.85	184	-	-	-
				51.20	61	-	-	-
48G0216	B-025	44404	377566	40.54	182	-	-	-
				46.12	224	-	-	-
				49.02	27	-	-	-
				55.03	66	-	-	-
48G0218	B-027	44417	377963	46.50	97	-	-	-
				50.60	223	-	-	-
48G0219	B-028	44424	378165	43.10	183	-	-	-
				48.00	95	-	-	-
54E0268		44330	373950	26.75	-	-	287	-
				26.84	-	-	357	-
				26.85	-	-	-	215
				27.50	-	-	276	-
				29.40	-	-	278	-
				29.71	-	-	230	30
				30.55	-	-	149	-
				31.60	-	-	283	-
				32.55	-	-	177	-
				33.50	-	-	148	-
				33.68	-	-	59	40
34.50	-	-	228	-				

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	$f_{\text{undr}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] vrije prisma	$f_{\text{undr}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] UU	$f_{\text{undr}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] penetro	$f_{\text{undr}}$ [kN/m <sup>2</sup> ] torvane
				35.50	-	-	229	-
				36.60	-	-	232	-
				37.55	-	-	131	-
				37.87	-	-	-	-
				38.55	-	-	209	-
				39.55	-	-	185	-
				40.40	-	-	73	-
				41.70	-	-	62	-
								-
49G0160		44360	377200	22.85	-	-	625	-
				23.60	-	-	668	-
				24.50	-	-	703	-
				24.88	-	-	-	-
				25.30	-	-	578	-
				26.50	-	-	-	-
				26.65	-	-	640	-
				27.50	-	-	1014	-
				28.20	-	-	715	-
				28.52	-	-	-	-
				30.30	-	-	-	-
				30.50	-	-	852	-
				30.73	-	-	-	-
				31.88	-	-	-	-
				32.60	-	-	902	-
				33.65	-	-	962	-
				34.50	-	-	782	-
				35.13	-	-	-	-
				36.00	-	-	725	-
				36.93	-	-	-	-
				37.30	-	-	927	-
				38.25	-	-	-	-
				38.65	-	-	795	-
				39.40	-	-	1086	-
				40.03	-	-	-	-
				40.50	-	-	782	-
				41.48	-	-	-	-
				41.80	-	-	723	-
				43.05	-	-	755	-
				43.35	-	-	-	-
				44.00	-	-	543	-
				46.70	-	-	743	-
				47.50	-	-	606	-
				49.60	-	-	434	-
				50.60	-	-	533	-
				51.65	-	-	297	-
				53.65	-	-	536	-
				54.65	-	-	616	-
				56.10	-	-	454	-
				56.80	-	-	518	-
				57.75	-	-	242	-
				58.90	-	-	538	-
				60.00	-	-	409	-
								-
48G0159		44360	375675	19.60	-	-	124	-
				19.85	-	-	211	50

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	diepte m - NAP	<i>f</i> <sub>undr</sub> [kN/m <sup>2</sup> ] vrije prisma	<i>f</i> <sub>undr</sub> [kN/m <sup>2</sup> ] UU	<i>f</i> <sub>undr</sub> [kN/m <sup>2</sup> ] penetro	<i>f</i> <sub>undr</sub> [kN/m <sup>2</sup> ] torvane
				21.65	-	-	118	-
				22.35	-	-	293	-
				23.65	-	-	186	-
				27.92	-	-	-	190
				27.95	-	-	379	-
				31.77	-	-	388	190
				35.55	-	-	315	-
				35.92	-	-	338	120
				37.60	-	-	88	-
				38.30	-	-	246	-
				38.50	-	-	-	240
				39.30	-	-	232	-
				39.90	-	-	-	170
				40.70	-	-	361	-
				41.50	-	-	276	-
				42.50	-	-	290	-
				42.82	-	-	189	100
				43.70	-	-	224	-
				44.50	-	-	251	-
				45.60	-	-	300	-
				45.76	-	-	-	235
				46.60	-	-	278	-
				47.32	-	-	-	-
				47.35	-	-	288	-
				47.65	-	-	-	210
				47.92	-	-	168	140
				48.05	-	-	-	165
				49.50	-	-	314	-

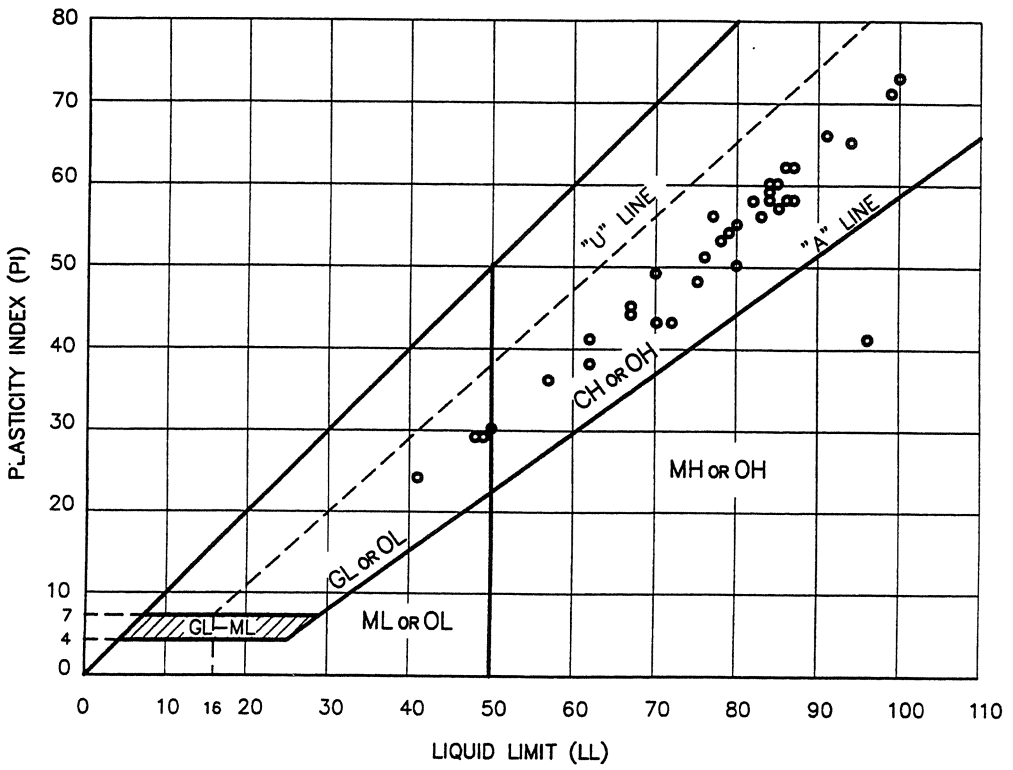
## **Bijlage N    Kleimineralogie**

*Westerschelde Klei van Rupel*

NITG-nummer	boor nummer	x-coord	y-coord	monster	diepte - m NAP	smectiet [%]	vermiculiet [%]	illiet [%]	kaolinit [%]	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 rontgendiffractie opnamen						46.75		34.75	18.25		

**Bijlage O Casagrande geotechnische classificatie (ASTM D 2487) BK1 en BK2**

*Westerschelde Klei van Rupel*



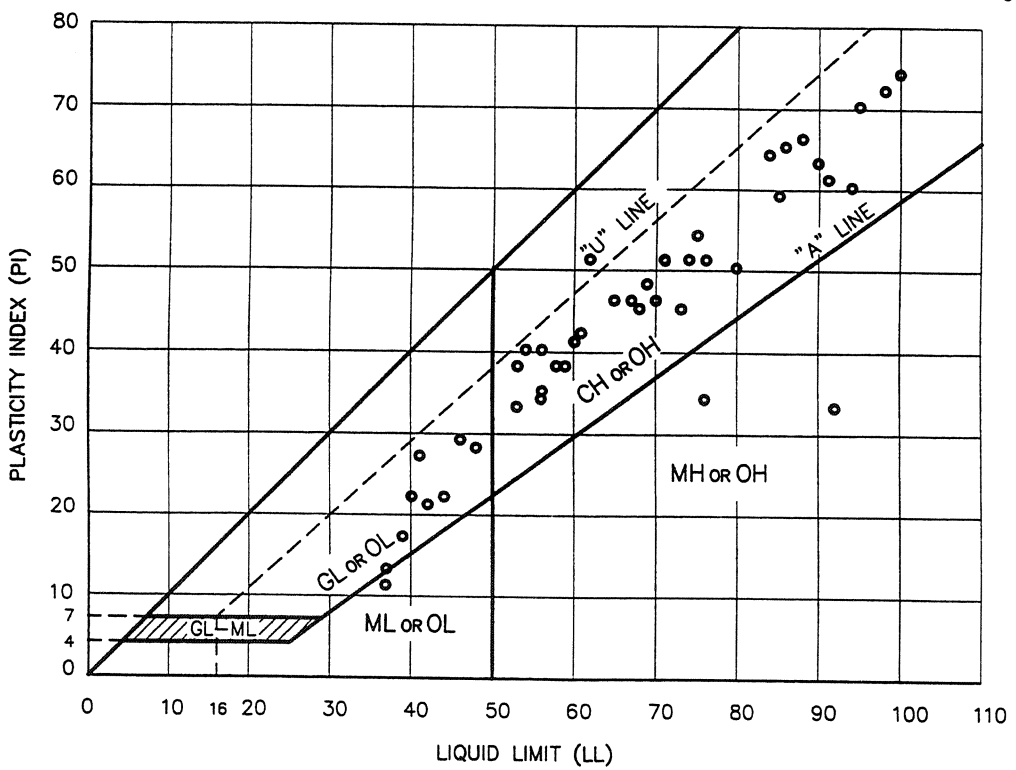
GRONDMEECHANICA Postbus 69, 2600 AB Delft  
 WESTERSCHELDE OEVERVERBINDING  
 GEOTECHNISCHE LAAG BK1  
 DIAGRAM VAN VAN CASAGRANDE (uit ASTM D 2487)

Tel: (015) 99 35 00  
 Telefax: (015) 61 06 21

1995-03-30 datum  
 CO-350690  
 BIJL. 83N2

Foto: 1  
 Afdeling: 700  
 Geplaatst: .dwg

get. KWT  
 get. A4



GRONDMEECHANICA Postbus 69, 2600 AB Delft  
 WESTERSCHELDE OEVERVERBINDING  
 GEOTECHNISCHE LAAG BK2  
 DIAGRAM VAN CASAGRANDE (uit ASTM D 2487)

Tel: (015) 99 35 00  
 Telefax: (015) 61 06 21

1995-05-30 datum  
 CO-350690  
 BIJL. 83N3

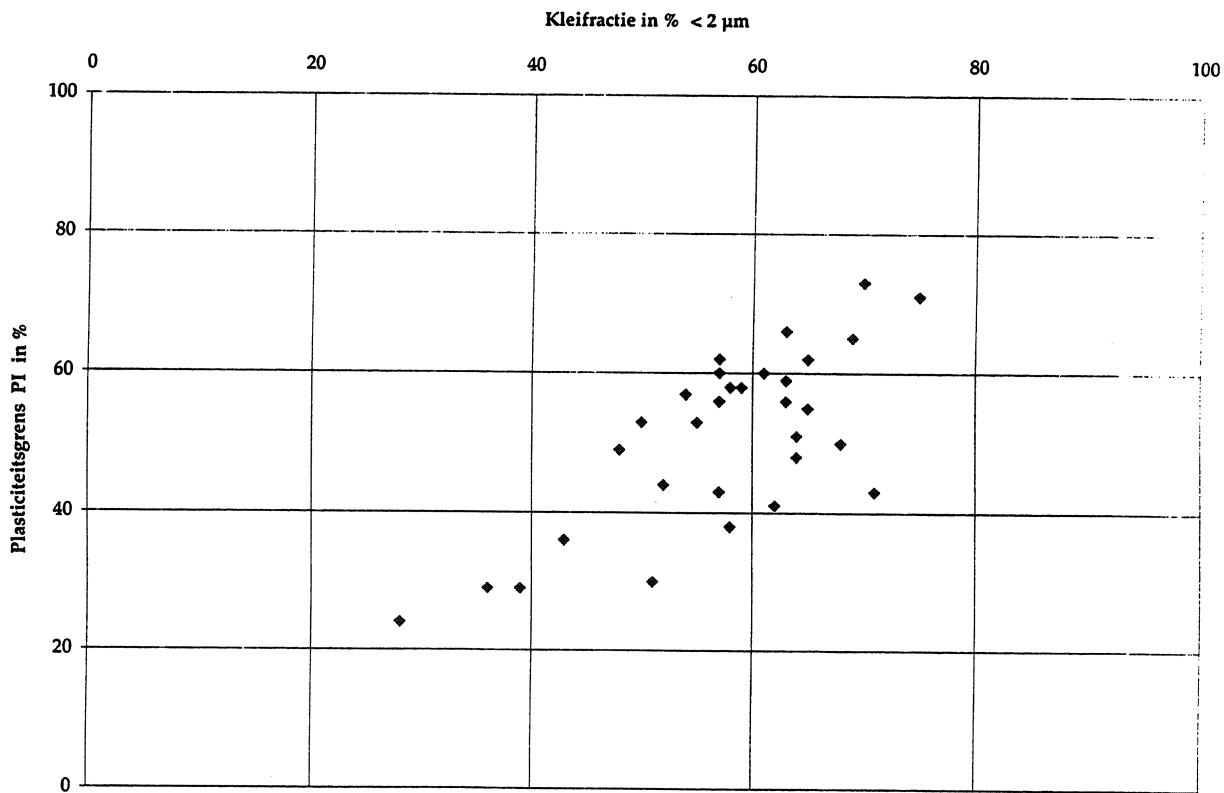
Foto: 2  
 Afdeling: 700  
 Geplaatst: .dwg

get. KWT  
 get. A4



**Bijlage P      Activiteit volgens Skempton (1953) van BK1 en BK2**

*Westerschelde Klei van Rupel*



**GRONDMECHANICA**  
**DELFT**  
 Postbus 69  
 2600 AB Delft Nederland  
 Telefoon (015) 69 35 00  
 Telefax (015) 61 08 21

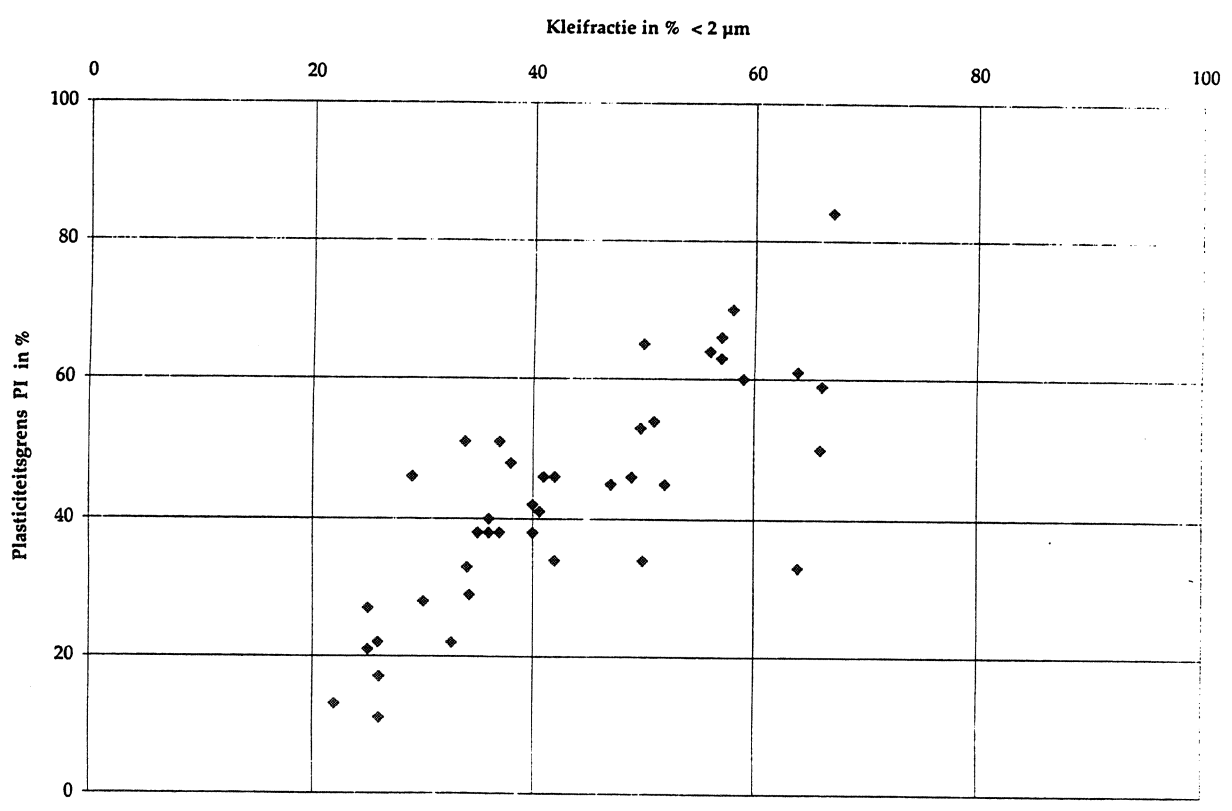
Westerschelde Oeververbinding  
 Geotechnische laag BK1

Act. ... it volgens Skempton

datum 1995-06-22  
 CO-350690

get. Kullj.  
 gez. Sia

Bijl. 8302  
 A4



**GRONDMECHANICA**  
**DELFT**  
 Postbus 69  
 2600 AB Delft Nederland  
 Telefoon (015) 69 35 00  
 Telefax (015) 61 08 21

Westerschelde Oeververbinding  
 Geotechnische laag BK2

Activiteit volgens Skempton

datum 1995-06-22  
 CO-350690

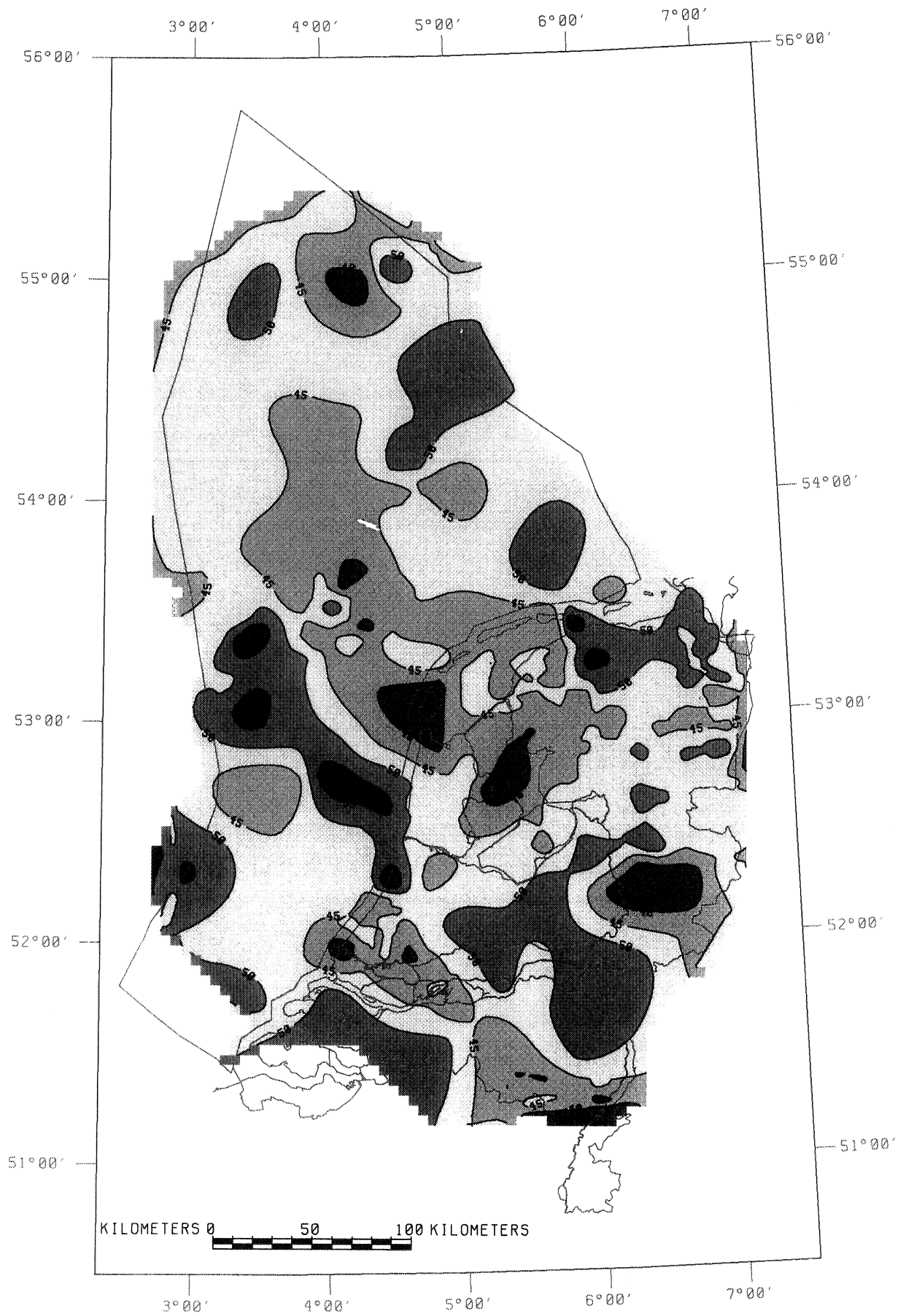
get. Kullj.  
 gez. Sia

Bijl. 8303

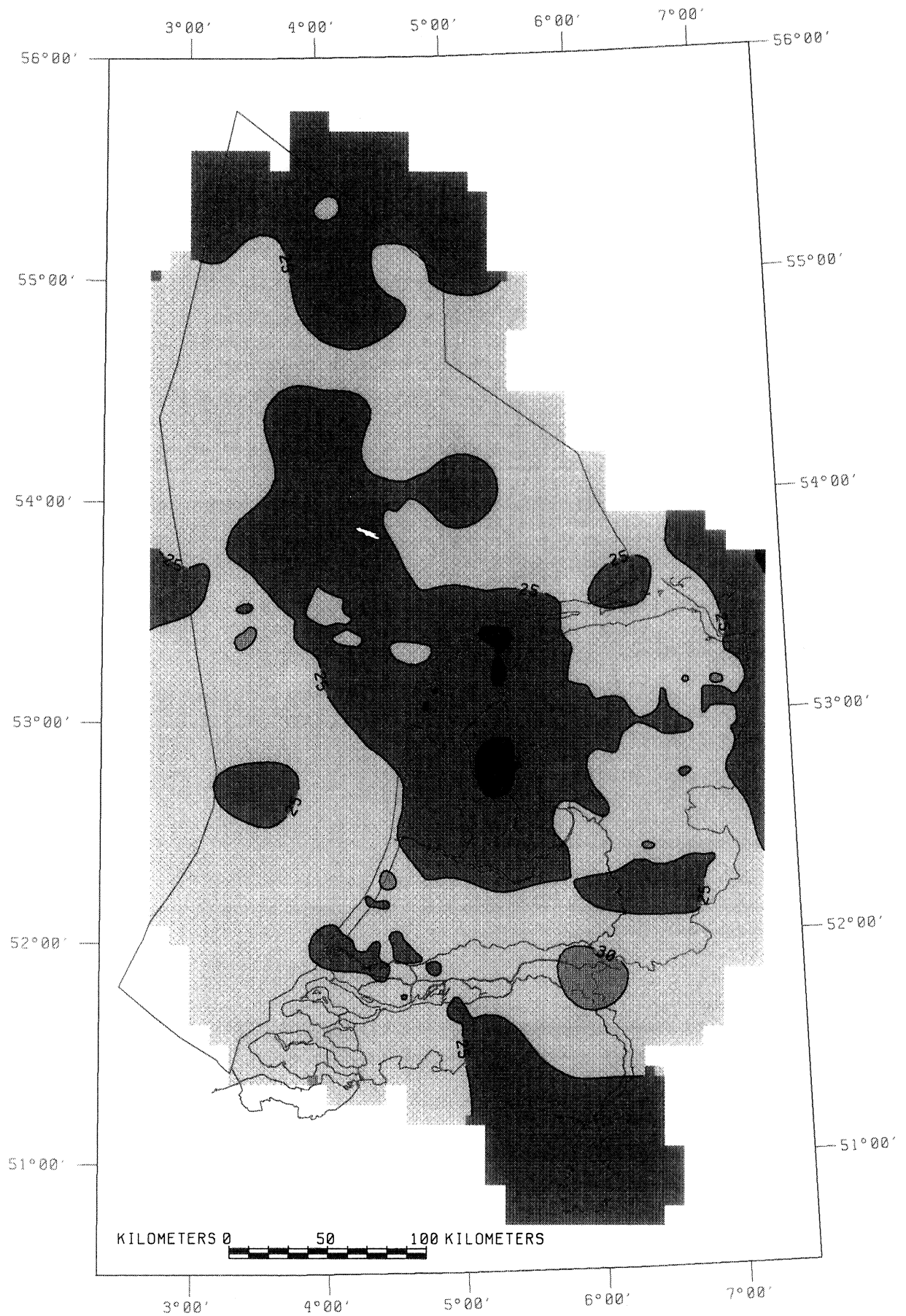
## Bijlage Q Geohydrologische gegevens Tertiaire kleipakketten

Boornummer	diepte [m]	kleigehalte [%]	porositeit n [%]	perm. k [mD]	Breiddin [D]	perm k [m/s]
<b>Formatie van Oosterhout</b>						
3C17	170	0.6			35 (ongecor.)	
"	180	6.7			0.3 (ongecor.)	
16G92	162	3.4	36.2	1646	2 (ongecor.)	
"	171.5	2.4	36.5	3564	3 (ongecor.)	
"	195	1.8	37.2	2989	6 (ongecor.)	
"	226	3.8	34.6	3056	0.5 (ongecor.)	
"	236	2.8	33.7	1180	0.5 (ongecor.)	
"	252	10.3	35.4	1198	0.3 (ongecor.)	
26C120	344	10				
"	390	15.5				
<b>Formatie van Breda</b>						
16G92	255	18.4	29.8	142		
"	258	13.7	27.3	219	2.1	
26C120	356.2			100		
"	426	10.4			2.1	
"	450	11.5			2.1	
"	474	11.2			2.1	
"	502	18.7				
"	526	15.2				
"	548	13.2			0.7	
27F36	427-432	14			2.1	
31E149	401-436	10.2			2.1	
31F256	430-451	12.6				
32C205	465-470	12			2.1	
40B306	448-453	12.5			0.7	
"	473-478	13.1			0.7	
<b>Klei van Rupel</b>						
<i>locatie Mol</i>						
lab. kv-min						1.30E-12
lab. kv-max						3.40E-12
lab. kh-min						3.50E-12
lab. kh-max						7.90E-12
veld kv						2.10E-12
veld kh						4.50E-12
<i>locatie Westerschelde</i>						
veld kv						10-40E-9
<b>Klei van Asse</b>						
28E35	210-215	21.3				
<b>Klei van Ieper</b>						
44G77	855.4		32	2000		
<b>Klei van Landen</b>						
44G77	1047.2		16	<1000		
"	1048.9		17	<1000		
"	1050.5		15	<1000		

## **Bijlage R.1    Temperatuur op 500 m diepte**



## **Bijlage R.2    Temperatuur op 1000 m diepte**



**Bijlage S.1 Toelichting consolidatie, compactie en  
begravingsgeschiedenis**



### **Consolidatie, compactie en begravingsgeschiedenis**

Kleipakketten die op zekere diepte liggen consolideren onder invloed van belasting door het bovenliggende pakket. Door de belasting vindt er een herschikking van korrels plaats als gevolg waarvan vloeibare bestanddelen uit de poriën van kleien worden. Dit proces heet consolidatie en gaat op grote diepte (bij hoge druk en temperatuur) over in compactie en diagenetische processen, waarbij mineralogische omzettingen kunnen plaatsvinden. De inkolingsgraad van organische bestanddelen zoals in bruin- en steenkoollagen neemt eveneens toe bij grotere begravingsdiepten. Door de hogere korrelspanningen met toenemende diepte wordt de pakking van de korrels verbeterd, waardoor de porositeit en de doorlatendheid verlaagd wordt (Magara, 1969; Magara, 1986; Hansen, 1996). Door deze consolidatie krijgen kleien hogere volumieke gewichten op grotere diepten. De huidige en maximale begravingsdiepte van kleipakketten hebben als gevolg van deze texturele veranderingen effect op geomechanische, geochemische en geohydrologische eigenschappen.

Bij consolidatie/compactie maakt Magara (1986) onderscheid tussen een vroege en een late fase. Bij vroege compactie (watergehalte > 50 %) blijft de hoeveelheid gebonden roosterwater onveranderd. Compactie wordt veroorzaakt door uitdrijving van vrij water en is daardoor relatief snel. Bij voortgaande compactie (watergehalte < 50 %) neemt de hoeveelheid roosterwater af. Dit suggereert dat naast mechanische compactie en vloeistofuitdrijving roosterwater kan overgaan in gebonden of vrij water. Magara (1986) concludeert verder dat de reductie van porositeit een gecombineerd effect is van toenemende korrel-korrel contacten, afnemende permeabiliteit en toenemende viscositeit van water op toenemende diepte.

De (maximale) begravingsgeschiedenis en de geologische geschiedenis van kleien is vooral van invloed op geomechanische en geohydrologische parameters. Geochemische processen, zoals mineraalomzettingen in kleien kunnen onder invloed van veranderende chemische omstandigheden, van groot belang zijn en kunnen op hun beurt belangrijke informatie verschaffen over geomechanische karakterisatie.

## **Bijlage S.2 Toelichting geomechanische parameters**

### Toelichting geomechanische parameters

Zoals eerder in deze rapportage genoemd, zijn geomechanische eigenschappen in sterke mate afhankelijk van lithologie (afzettingsmilieu), begravings- of belastingsgeschiedenis. Een aantal gehanteerde geomechanische en fysische parameters worden in deze bijlage toegelicht.

#### *Plasticiteitsgrenzen*

De Atterbergse grenzen zijn consistentiegrenzen die bepaald kunnen worden aan cohesieve grondsoorten. Twee grenzen, de vloeigrens  $w_L$  en de plasticiteitsgrens  $w_p$ , worden o.a. bepaald door lithologische eigenschappen zoals korrelgrootteverdeling, mineralogie en consolidatiegraad.

De plasticiteitsgrens  $w_p$  is gedefinieerd als het watergehalte  $w$  (in gewichtpercentage) van een grondmonster waarbij de grond te droog wordt voor plastisch gedrag. De vloeigrens  $w_L$  is gedefinieerd als het watergehalte (in gewichtpercentage) van een grondmonster waarbij de plastische fase overgaat in de vloeibare fase. Deze testen kunnen slechts uitgevoerd worden op monsters met korrels kleiner dan  $425 \mu\text{m}$ . De plasticiteitsindex is als volgt gedefinieerd:

$$I_p = w_L - w_p \quad [\%] \quad (1)$$

De plasticiteitsgrenzen  $w_L$  en  $w_p$  zijn afhankelijk van het zoutgehalte (Mitchell, 1976). De vloeigrens kan met 20 % verhoogd worden bij een hoog zoutgehalte van het poriënwater. Dit betekent dat onder zoutwater omstandigheden de klei een 20% hoger watergehalte kan hebben bij eenzelfde stijfheid onder zoetwater omstandigheden.

#### *Effectieve cohesie $c'$ en inwendige wrijving $\Phi'$*

De effectieve cohesie  $c'$  en inwendige schuifweerstand (of wrijving)  $\Phi'$  worden bepaald met een directe schuifproef of een triaxiaal testapparaat. De cohesie en inwendige wrijving zijn een maat voor de sterkte van het materiaal volgens de vergelijking,

$$\tau = c + \tan(\sigma_1 - \sigma_3) \quad [\text{kN/m}^2] \quad (2)$$

In een triaxiaal apparaat wordt de alzijdige druk gecontroleerd zodat de schuifsterkte bij verschillende drukken bepaald kan worden ( $\sigma - \tau$  relaties).

#### *Activiteit van klei*

Activiteit is een maat voor de bepaling voor zwellingspotentieel door kleisoorten als smectiet en montmorilloniet. Door Skempton (1953) is voorgesteld:

$$A = I_p / \text{gewicht fractie kleiner dan } 2 \mu\text{m} \quad [-] \quad (3)$$

De activiteit van klei is een maat van de zwellings onder toevoeging van water en is sterk afhankelijk van de kleisoort en de fractie van het sediment kleiner dan 2  $\mu\text{m}$ . Na-montmorilloniet (smectiet) is zeer gevoelig voor zwellings, terwijl illiet en kaoliniet dit veel minder zijn (Fig. S.1).

Bij de analyse en bepaling van de geomechanische parameters zijn een aantal petrofysische berekeningsmethodes gebruikt die hieronder worden toegelicht.

#### *Ongedraineerde schuifsterkte*

De ongedraineerde schuifsterkte van een klei kan met technieken bepaald worden en is een maat voor de sterkte van het monster waarbij het geteste materiaal niet de kans krijgt te draineren.

Met een penetrometer of een torvane apparaat kan de ongedraineerde schuifsterkte  $f_{undr}$  bepaald worden. De ongedraineerde schuifsterkte kan ook kwalitatief met enige eenvoudige handelingen bepaald worden. In Tabel S.1 staat het verband aangegeven tussen de metingen met een penetrometer en de methode die kwalitatief met de hand kan worden uitgevoerd.

*Tabel S.1* Het verband tussen consistentieclassen en de ongedraineerde schuifsterkte (naar BSI, 1981)

klasse	definitie	ongedraineerde schuifsterkte [kN/m <sup>2</sup> ]
zeer slap	loopt bij knijpen zeer makkelijk tussen de vingers door	< 20
slap	loopt bij knijpen nog goed tussen de vingers door	20 - 40
stevig	is met stevig knijpen nog juist tussen de vingers door te krijgen	40 - 75
stijf	niet tussen de vingers door te krijgen, of is in te drukken met duim	75 - 150
zeer stijf	met duimnagel in te drukken	150 - 200
hard	kan niet worden ingedrukt met de duimnagel, kan met een mes goed gesneden worden	200 - 400
zeer hard	kan moeilijk gesneden worden met een mes	> 400

#### *Bepaling van de porositeit met de sonic log*

Wyllie (1956) heeft een aantal empirische relaties opgesteld tussen interval transit time ( $\Delta t$  of  $dt$ ) en porositeit die gebaseerd zijn op laboratorium experimenten met

poreuze sedimenten. Het volume van de poriën plus het volume van de korrelmatrix vormen het totale volume gesteente:

$$n = \frac{V_v}{V_v + V_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

n	porositeit	[%]
$V_v$	volume van poriën	[m <sup>3</sup> ]
$V_s$	volume van matrix	[m <sup>3</sup> ]

De porties van de twee delen zijn evenredig met de transit tijd die door de sonic log in, met formatiewater *verzadigde*, sedimenten gemeten worden:

$$\Delta t = (1 - n_s) \cdot \Delta t_m + n_s \cdot \Delta t_f \quad [\mu\text{s}/\text{ft}] \quad (5)$$

$\Delta t$	interval transit tijd van het gesteente	[ $\mu\text{s}/\text{m}$ of $\mu\text{s}/\text{ft}$ ]
$n_s$	porositeit van het gesteente	[%]
$\Delta t_m$	interval transit travel tijd van de matrix	[ $\mu\text{s}/\text{m}$ of $\mu\text{s}/\text{ft}$ ]
$\Delta t_f$	interval transit travel tijd van de poriënvloeistof	[ $\mu\text{s}/\text{m}$ of $\mu\text{s}/\text{ft}$ ]

Formule (4) kan omgeschreven worden om de porositeit te berekenen:

$$n = \frac{\Delta t - \Delta t_m}{\Delta t_f - \Delta t_m} \cdot 100 \quad [\%] \quad (6)$$

Met behulp van calibratiepunten op de neutron-log (porositeit-log) kan de dichtheid van een stratigrafisch traject geanalyseerd worden. De interval transit tijd van poriënvloeistof  $\Delta t_f$  met 20% NaCl is 189  $\mu\text{s}/\text{ft}$  (Western Atlas, 1992), zodat op een diepte x de interval transit tijd van de matrix  $\Delta t_m$  berekend kan worden bij een bekende porositeit.

De porositeit n kan worden afgeleid uit een FDC- of CNL-log. Wanneer een porositeit  $n_N$  of  $n_{\text{FDC}}$  van de neutron-log bekend is kunnen de sonic logs gecalibreerd worden door met formule (5) de interval transit tijd  $\Delta t_m$  van de klei uit te rekenen. Vervolgens kan de porositeit  $n_s$  op basis van de sonic-log uitgerekend voor de boortrajecten zonder neutron-log met behulp van formule (4).

Hanssen (1996) stelde een empirische relatie voor die gebaseerd is op formules (4, 5 en 6) om de porositeit van Tertiaire kleien te berekenen:

$$n = 0.62 - 0,00018 \cdot z \quad [-] \quad (7)$$

De porositeit neemt af met de diepte van 48-55 % op een diepte van 500 m tot 38-46 % op een diepte van 1000 m. De gegevens bevatten zowel normaal, over- en onder-geconsolideerde kleien.

*Bepaling van de bulkdichtheid met de FDC-log*

De Formation Density Compensated (FDC) log meet de bulkdichtheid in het boorgat met behulp van continue gamma-bestraling en de verstrooiing ervan door de elektronen van het sediment. De porositeit wordt berekend met behulp van de formule:

$$n_{FDC} = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f} \cdot 100 \quad [\%] \quad (8)$$

$n_{FDC}$	porositeit van het gesteente	[%]
$\rho_{ma}$	dichtheid van de matrix	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_b$	bulkdichtheid	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_f$	vloeistofdichtheid	[g/cm <sup>3</sup> ]

In kleien en zanden kan voor de dichtheid van de matrix  $\rho_{ma}$  2,68 g/cm<sup>3</sup> gebruikt worden, tenzij er mineralen met hogere dichtheden voorkomen zoals glauconiet, anhydriet, haliet, gips en smectieten. Voor de vloeistofdichtheid in de diepe ondergrond is in dit onderzoek 1,1 g/cm<sup>3</sup> gebruikt.

*Bepaling van de bulkdichtheid met de CNL-log*

De CNL neutron-log geeft een continue weergave van de reactie van het sediment als gevolg van bestraling van een neutronbundel. De gemeten waarde geeft een indicatie van het gehalte aan waterstof. Met de neutron log wordt het sediment beschoten met een neutronenstraal, waaruit de dichtheid wordt bepaald ( $n_N$ ). Ook het aan kleikorrels gebonden water wordt gedetecteerd door de log. De neutronporositeit wordt gedefinieerd als het volumedeel van het kleimonster dat wordt ingenomen door waterdeeltjes.

$$n_N = \text{cnl porositeit} \quad [\%] \quad (9)$$

*Resistivity en conductiviteits logs*

Met behulp van resistivity (elektrische weerstand-logs) kunnen water-, gas- en oliehoudende poreuze lagen van kleilagen kwalitatief onderscheiden worden. Dit type log is nauwelijks gebruikt voor het loggen van Tertiaire kleipakketten door oliemaatschappijen, omdat in het Tertiaire geen olie en gasreservoirs werden verwacht.

*Sonic interval tijd naar elasticiteit*

Voor het uitrekenen van de *dynamische* E-modulus met een sonic intervalsnelheid ( $dt$ ) moet de  $C_p$  (snelheid van compressieve golven) en de poisson's ratio  $\nu$  bekend zijn:

$$E_{dyn} = \rho \cdot C_p^2 \cdot \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \quad [\text{kPa}] \quad (10)$$

$E_{\text{dyn}}$	dynamische elasticiteits modulus	[Pa]
$\rho$	natte volumiek massa	[kg/m <sup>3</sup> ]
$C_p$	compressiegolf snelheid	[m/s]
$\nu$	poissons ratio	[-]

### *Begravingsdiepte*

Een algemene relatie tussen de diepte en de porositeit wordt gegeven door Terzaghi (1923) en Athy (1930), en is van toepassing op licht tot sterk geconsolideerde sedimenten:

$$n = n^0 \cdot e^{-b \cdot \sigma_e} \quad [\%] \quad (11)$$

$n$	porositeit	[%]
$n^0$	porositeit op $z = 0$	[%]
$b$	constante	[-]
$\sigma_e$	effectieve stress	[kN/m <sup>2</sup> ]

### *De relatie tussen natuurlijk watergehalte $w$ en porositeit $n$*

Het natuurlijk watergehalte is het percentage formatiewater dat gedurende standaardprocedures in het laboratorium bepaald wordt door droging en wordt uitgedrukt als een gewichtspercentage:

$$w = W_w / W_k \cdot 100 \quad [\%] \quad (12)$$

$w$	watergehalte	[-]
$W_w$	gewicht water	[kg]
$W_k$	gewicht korrels	[kg]

Om porositeiten en watergehaltes te vergelijken, moet een berekening worden gemaakt:

$$w = \frac{n \cdot \gamma_w}{n \cdot \gamma_w + (1 - n) \cdot \gamma_k} \cdot 100 \quad [\%] \quad (13)$$

$n$	porositeit	[-]
$\gamma_w$	volumiek massa water	[gr/cm <sup>3</sup> ]
$\gamma_k$	volumiek massa vaste fase	[gr/cm <sup>3</sup> ]

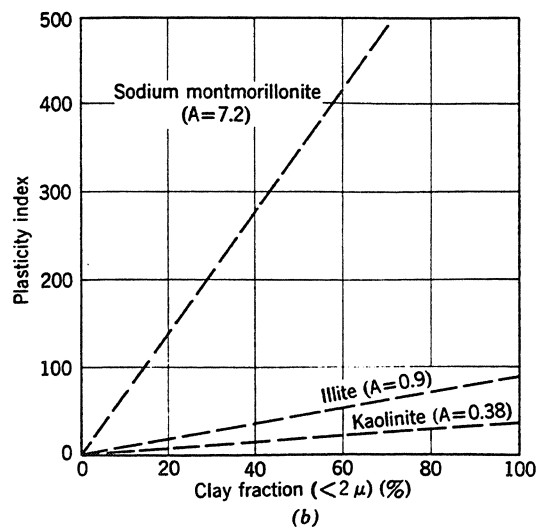


Fig. S.1 De relatie tussen de plasticiteits-index en de klei-fractie (Skempton, 1953).



### **Bijlage S.3 Toelichting lithologische en geochemische parameters**

## Toelichting lithologische en geochemische parameters

### *Korrelgrootte*

De korrelgrootteverdeling van een sediment is een eigenschap die bepaald wordt in het laboratorium. Het kleigehalte is het gewichtspercentage dat kleiner is dan 2  $\mu\text{m}$ . Bij de korrelfracties behoren de volgende afmetingen:

klei : < 2  $\mu\text{m}$

silt : 2  $\mu\text{m}$  < grootte < 63  $\mu\text{m}$

zand : > 63  $\mu\text{m}$

### *Geochemie*

De geochemische en kleimineralogische gegevens in dit rapport zijn voor het grootste deel verzameld bij grootschalig projecten, waarbij vooral de jonge formaties zijn bestudeerd (Huisman, 1998). De gegevens zijn afkomstig van de volgende boringen en groeves (Fig. S.2):

<i>Boring</i>	<i>Naam</i>	<i>Coördinaten</i>		<i>Bestudeerde kleipakketten</i>	<i>Land</i>
		<i>X</i>	<i>Y</i>		
50A337	Sprundel	102450	393750	Oosterhout	NL
50H74	Reusel	138831	375290	Oosterhout, Reuver	NL
58E269	Maalbeek 1	207992	369280	Reuver	D
58E284	Maalbeek 2	208387	368980	Reuver	D
Groeve	Brachterwald	206600	363525	Reuver	D
Groeve	Hoher Stahl	207600	366400	Reuver	D
60B130	Schalbruch	191950	341400	Reuver, Brunssum	NL
Groeve	Brunssum			Brunssum	NL
48G160	Borssele	44360	377200	Rupel	NL

Van alle monsters zijn standaard XRF-analyses beschikbaar, waarbij de concentraties aan de volgende oxides en elementen zijn gemeten:

$\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$

As, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn, S

Ba, Ga, Nb, Rb, Sr, U, Y, Zr

Van de Borssele boring zijn echter alleen de oxides beschikbaar. Daarnaast zijn er bij sommige secties additionele analyses:

- Mo, Lanthaniden (REE) ICP-MS
- $\text{C}_{\text{org}}$  (Organische koolstof) Strohlein C-Mat 5500
- Kleimineralogie XRD, Landbouwniversiteit Wageningen, Lab. voor Bodemkunde en Geologie

In de bestudeerde sedimenten is gehalte aan  $Al_2O_3$  in het algemeen een goede indicator voor het gehalte aan kleimineralen en mica's.  $SiO_2$  is direct gecorreleerd met het zandgehalte van sediment. De gehalten van de meeste andere elementen ( $TiO_2$ ,  $K_2O$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Co$ ,  $Cr$ ,  $Cu$ ,  $Ni$ ,  $Pb$ ,  $V$ ,  $Zn$ ,  $Ba$ ,  $Ga$ ,  $Nb$ ,  $Rb$ ,  $Sr$ ,  $Y$ ) vertonen een duidelijk positief verband met de  $Al_2O_3$ -concentratie doordat ook zij vooral voorkomen in kleimineralen en micas. De basis relatie tussen met name  $K_2O$  en  $MgO$  enerzijds en  $Al_2O_3$  anderzijds varieert echter door verschillen in de verhoudingen tussen de verschillende kleimineralen. Afwijkingen van de basisrelatie met  $Al_2O_3$  kunnen optreden als gevolg van een aantal sedimenteigenschappen of processen:

- de aanwezigheid van specifieke mineralen als glauconiet, fosforiet of Ti-oxides,
- de vorming van carbonaten als calciet ( $CaCO_3$ ), dolomiet ( $CaMg(CO_3)_2$ ) of sideriet ( $FeCO_3$ ),
- de vorming van sulfides (m.n. pyriet;  $FeS_2$ ),
- het aanrijken van sporenelementen in organisch-rijke lagen,
- het verweren van mineralen.

De concentraties van  $Na_2O$ ,  $P_2O_5$  en  $Zr$  zijn niet lineair gecorreleerd met  $Al_2O_3$ , maar zijn afhankelijk van de gehalten aan plagioclaas-veldspaten ( $NaAlSi_3O_8$ - $CaAl_2Si_2O_8$ ), zircon ( $ZrSiO_4$ ) en fosfaten.

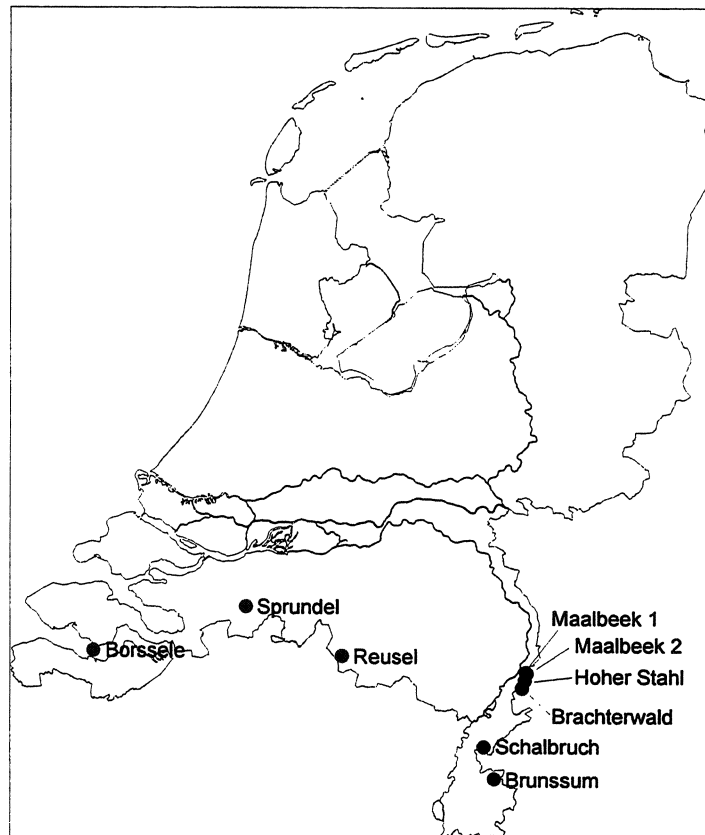
Omdat de chemie zo sterk afhankelijk is van de korrelgrootte en (lokale) diagenetische processen, is het weinig zinvol om de gemiddelde geochemische samenstelling per kleipakket te geven. Dergelijke gemiddelden zijn afhankelijk van (lokale) zandlagen of concentraties van mineralen. Daarom wordt in dit rapport per kleilaag een karakterisatie gegeven van de geochemische variatie van een aantal sleutelementen, en van de achterliggende oorzaken en eventuele implicaties.

In de bestudeerde sedimenten zijn vijf kleimineralen van belang. Het gaat daarbij om illiet (+muscoviet), smectiet, kaolinit, chloriet en vermiculiet. De kleimineralogische gegevens zijn afkomstig van een aantal bronnen (Huisman, 1998; De Smet et al., 1996; Thimus, 1989; Vandenberghe, 1978; NITG-TNO, 1998). Kleimineralogie is een belangrijk gegeven bij de bepaling van het zwellingspotentieel van kleien. In dit rapport worden van De Smet (1996), Volckaert et al, 1996), Thimus (1989) en NITG-TNO (1998) alleen de gegeven getallen gegeven. De resultaten van Huisman (1998) en Vandenberghe (1978) worden in iets meer detail besproken.

Het is moeilijk om de resultaten van de verschillende datasets met elkaar te vergelijken. Dat komt doordat het bepalen van de kleimineralogische samenstelling in procenten, zoals gegeven door De Smet et al. (1996), Thimus (1989) en NITG-TNO (1998) representatie is van een in feite kwalitatieve analysetechniek (XRD). De XRD-techniek bestraalt een monster met röntgen-straling, en bepaalt hoeveel van die straling onder welke hoek wordt afgebogen. Het resultaat is een grafiek met op de X-as de hoek, en op de Y-as de intensiteit van de straling (fig 3.2). Ieder

mineraal kan worden herkend aan zijn eigen specifieke patroon van pieken. Hoe meer van het mineraal in een monster aanwezig is, hoe groter de pieken. Echter, de piekgrootte wordt niet alleen bepaald door de gehalten van het mineraal, maar ook door de mate van kristalliniteit; Goed-kristallijne mineralen geven in het algemeen smallere en hogere pieken dan slecht-kristallijne mineralen.

Om op basis van XRD-patronen een kwantitatieve representatie te geven van de keimineralogische samenstelling wordt het percentage van een mineraal vaak uitgedrukt in de relatieve piekhoogte, d.w.z. de hoogte van de voor dat mineraal specifieke piek als procent van de opgetelde hoogte van alle representatieve pieken. Meestal wordt ook daarbij een achtergrond correctie uitgevoerd. Als (meer nauwkeurig) alternatief voor de piekhoogte wordt ook wel het relatieve piekoppervlak gebruikt. Dan worden de oppervlaktes van de pieken ofwel gemeten, ofwel geschat als  $(\text{hoogte}) \cdot (\text{breedte op de helft van de hoogte})$ . Ook hierbij kan gecorrigeerd worden voor de achtergrond. Ieder van deze methodes geeft logischerwijs verschillende uitkomsten voor de onderlinge verhoudingen en de percentages aan kleimineralen, en cijfers uit verschillende studies kunnen alleen met elkaar vergeleken worden als beide volgens dezelfde methode berekend zijn. In dit rapport worden van De Smet (1996), Thimus (1989) en NITG-TNO (1998) alleen de gegeven getallen gegeven. De diffractogrammen die door Huisman (1998) en Vandenberghe (1978) zijn geleverd kunnen in meer detail worden besproken. Onderlinge vergelijking blijft echter lastig.



*Fig. S.2* Positie van de waarnemingspunten (boringen en groeves) met geochemische en kleimineralogische informatie.

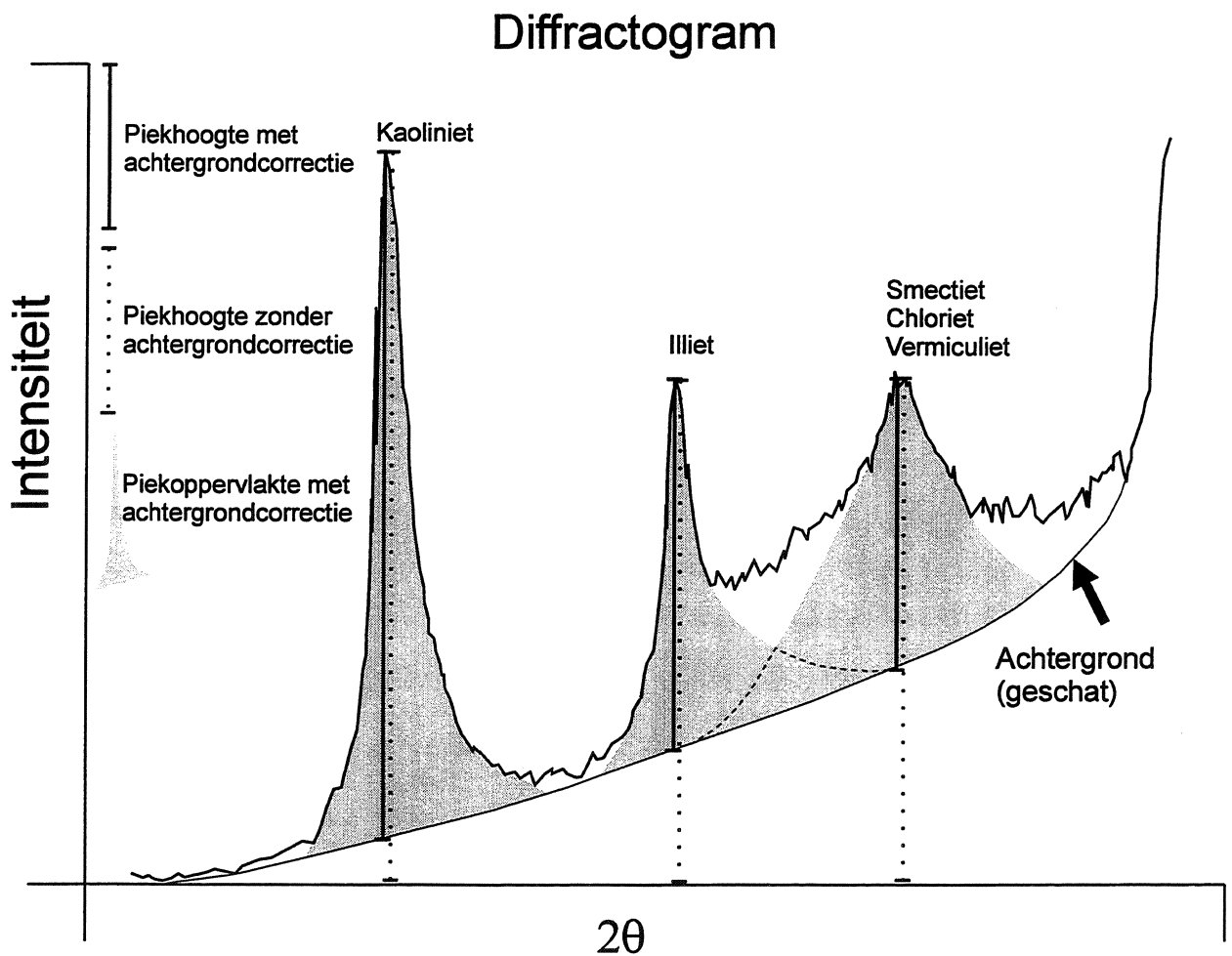


Fig. S.3 Verschillende methoden om een kwantitatieve schatting te maken van de percentages kleimineralen op basis van een XRD-diffractogram.

## **Bijlage S.4 Toelichting geohydrologische parameters**

## Toelichting geohydrologische parameters

### *Permeabiliteit en hydraulische doorlatendheid*

De permeabiliteit  $k$  is een macroscopische eigenschap van een poreus medium en is een maat voor het vermogen van het medium vloeistof door te laten. In SI-eenheden wordt de permeabiliteit uitgedrukt in  $m^2$ . Andere eenheden die gebruikt worden zijn  $cm^2$ . In de olie-exploratie wordt ook veel gebruik gemaakt van de eenheid Darcy, D, of milli-Darcy (mD). Een poreus medium heeft een permeabiliteit van één Darcy als het volledig doorstroomd wordt met een mono-fase vloeistof met een viscositeit van 1 centipoise met een debiet van  $1 cm^3/sec$  per  $cm^2$  doorstroomd oppervlak bij een druk of equivalente hydraulische gradiënt van 1 atmosfeer per cm. De volgende omrekeningsfactor volgt hieruit:  $1Darcy = 9.8697 \times 10^{-13} m^2$ . Doorlatende media hebben een permeabiliteit variërend van  $10^{-7}$  tot  $10^{-11} m^2$  ( $10^8$  tot  $10^4$  mD), slecht doorlatende eenheden hebben een permeabiliteit variërend van  $10^{-15}$  tot  $10^{-20} m^2$  (1 tot  $10^{-5}$  mD).

De hydraulische doorlatendheid  $K$  van een poreus medium is een maat voor het vermogen van het medium een *specifieke* vloeistof door te laten. In SI-eenheden wordt de hydraulische doorlatendheid uitgedrukt in m/sec. De hydraulische doorlatendheid komt voor in de wet van Darcy die laminaire 1D-stroming door een poreus medium beschrijft:

$$q = K \cdot i \quad [m/s] \quad (14)$$

q	specifiek debiet	[m/s]
K	hydraulische doorlatendheid	[m/s]
i	hydraulische gradiënt	[-]

De hydraulische doorlatendheid en permeabiliteit zijn als volgt gerelateerd:

$$K = \frac{k\gamma}{\mu} \quad [m/s] \quad (15)$$

K	hydraulische doorlatendheid	[m/s]
k	permeabiliteit	[ $m^2$ ]
$\gamma$	soortelijk gewicht van de vloeistof	[ $N/m^3$ ]
$\mu$	dynamische viscositeit van de vloeistof	[ $N \cdot sec/m^2$ ]

Uit vergelijking (14) volgt ook dat de hydraulische doorlatendheid een grootte is die zowel van het poreuze medium afhangt als van de vloeistof die erdoor heen stroomt. Eigenschappen van de vloeistof die de hydraulische doorlatendheid kunnen beïnvloeden zijn door het gehalte opgeloste stoffen en de temperatuur.



*Porositeit*

De porositeit  $n$  wordt gedefinieerd als de verhouding tussen het volume van de poriën en het bulkvolume.

*Hydraulische gradiënt*

De hydraulische gradiënt  $K$  is het verschil in stijghoogte (m) per meter afstand.

*Diffusiecoëfficiënt*

De diffusiecoëfficiënt  $D_f$  is een maat voor het mengen van twee componenten in een gasvormig of vloeibaar medium onder invloed van een concentratiegradiënt. De diffusiecoëfficiënt wordt uitgedrukt in  $m^2/sec$ . In water met een verdunde oplossing bedraagt de diffusiecoëfficiënt bij kamertempertuur ongeveer  $10^{-9} m^2/sec$ . In een poreus medium wordt het diffusieproces gehinderd door het stelsel van poriën. Hierdoor is de diffusiecoëfficiënt van water in een poriënvolume lager en bedraagt ongeveer  $10^{-10} m^2/sec$ . Dit wordt ook wel de effectieve diffusiecoëfficiënt genoemd. In klei kan de effectieve diffusiecoëfficiënt nog iets lager uitvallen.

Domenico & Schwartz (1990) geven representatieve hydraulische doorlatendheden voor verschillende type sedimenten en gesteenten:

<i>type lithologie</i>	<i>hydraulische doorlatendheid [m/s]</i>
silt	$1 \times 10^{-9} - 2 \times 10^{-5}$
klei	$1 \times 10^{-11} - 4,7 \times 10^{-9}$
siltsteen	$1 \times 10^{-11} - 1,4 \times 10^{-8}$
schalie	$1 \times 10^{-13} - 2 \times 10^{-9}$

Voor kleipakketten bij diepe begraving (Magara, 1969) en porositeit van 40% bedraagt de permeabiliteit  $10^{-1}$  tot  $10^{-2}$  mD ( $\sim 10^{-10}$  tot  $10^{-11}$  m/s). De bulkdichtheid van Oligocene kleien voor de kust van Noorwegen bedraagt 1,95 tot 1,99  $g/cm^3$  op diepten variërend van 1220 m tot 1400 m (Hansen, 1996) en liggen in de orde grootte van de waarden van de laterale equivalent Klei van Rupel. De door Hansen (1996) onderzochte kleien hebben een klei-gehalte van 58-61 %. De bulkdichtheid van Eocene kleien voor de kust van Noorwegen bedraagt 1,93 tot 2,03  $g/cm^3$  op diepten die variëren van 1440 m tot 1890 m (Hansen, 1996). De door (Hansen, 1996) onderzochte kleien hebben een klei-gehalte van 65-82 %.