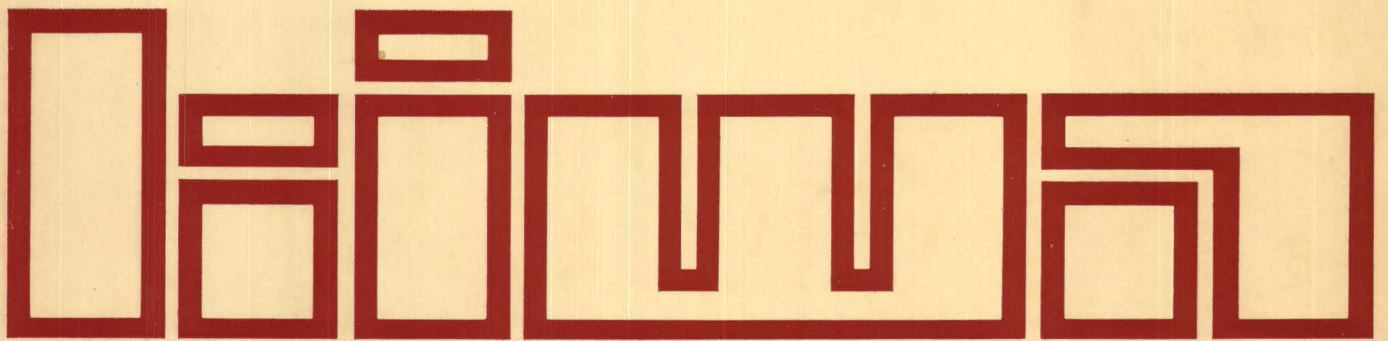


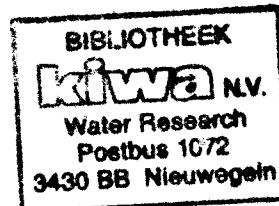
mededeling
nr. 46

boorspoelingen

Serie NG



keurings
instituut
voor
waterleiding
artikelen
kiwa n.v.



BOORSPOELINGEN

door

C. Deelder (DGV-TNO)

Mededeling nr. 46 van het KIWA

Rapport van de Werkgroep Onderzoek Boringen

Rijswijk, maart 1976

INHOUD

	<u>blz.</u>
SAMENVATTING	
SUMMARY	
1. INLEIDING	1
2. FUNKTIES BOORSPOELINGEN	3
2.1. Algemeen	3
2.2. Bevorderen boorsnelheid	3
2.3. Vertikale opvoer van boorgruis	3
2.4. Voorkomen van instroming	4
2.5. Uitoefenen van tegendruk op het gesteente	5
2.6. Afpleisteren van permeabele lagen	5
2.7. Samenvatting	6
3. THEORIE KLEI-WATER SYSTEMEN	7
3.1. Algemeen	7
3.2. Structuur van kleimineralen	7
3.3. Eigenschappen van kleimineralen	8
3.3.1. Specifiek oppervlak	8
3.3.2. Oppervlakte lading	9
3.4. Eigenschappen van klei-water systemen	9
3.4.1. Kationenadsorptie	9
3.4.2. Anionenadsorptie	10
3.4.3. Zwelling bij wateropname	11
3.4.4. Flocculatie en peptisatie	11
3.4.5. Thixotropie en gelsterkte	13
4. CONTROLE EN REGELING DER SPOELINGEIGENSCHAPPEN	14
4.1. Algemeen	14
4.2. Stabiliteit	14
4.3. Viskositeit, vloeigrens en thixotropie	15
4.4. Soortelijk gewicht	19
4.5. Afpleisterend vermogen	19
4.6. Spoelingtonsten in het veld	21
4.7. Spoelingtonsten in het laboratorium	22

INHOUD (vervolg)

	<u>blz.</u>
5. SAMENSTELLING VAN KLEILAGEN IN NEDERLAND	23
5.1. Algemeen	23
5.2. Onderzoekmethoden	23
5.3. Samenstelling en eigenschappen	24
5.4. Samenvatting	25
6. OVERZICHT SPOELINGINGREDIENTEN	26
6.1. Natuurlijke kleien	26
6.2. Bentonieten	26
6.3. Dispergerende middelen (thinners, peptisatoren)	27
6.4. Stoffen die de afpleistering verbeteren	29
6.5. Verzwaringmiddelen	31
7. OVERZICHT VAN ENKELE BELANGRIJKE SPOELINGTYPEN	32
7.1. Algemeen	32
7.2. Natuurlijke spoeling	32
7.3. Fosfaatspoeling	32
7.4. Quebracho-spoeling	33
7.5. Kalkspoeling	34
7.6. Zoutwaterspoeling	34
7.7. Polymeerspoeling	35
7.8. Slotopmerking	35
8. SPOELINGPROBLEMEN IN DE PRAKTIJK EN HUN REMEDIES	36
8.1. Spoelingverlies	36
8.2. Instabiele kleiformaties	37
8.3. Overgang zoet-zout formatiewater	38
LITERATUUR	39

SAMENVATTING

Onder auspiciën van de Werkgroep Onderzoek Boringen is een onderzoek uitgevoerd op het gebied van boorspoelingen. Er is studie gemaakt van de diverse functies en eigenschappen van een boorspoeling en van de mogelijkheden om de eigenschappen te controleren en aan te passen.

Om het gedrag van een spoeling te verklaren en inzicht te krijgen in de mogelijkheden hierin wijzigingen aan te brengen, is aandacht geschonken aan de structuur en eigenschappen van kleimineralen en aan die van klei-water systemen. In dit verband wordt ingegaan op verschijnselen zoals kationen- en anionenadsorptie, op zwellings van klei bij wateropname en op verschijnselen zoals flocculatie en peptisatie.

Een poging is gedaan het gedrag van de in Nederland voorkomende kleilagen te karakteriseren wanneer deze worden doorboord. De ervaringen die worden opgedaan bij het boren door sommige kleilagen (b.v. potklei) blijken overeen te komen met hetgeen op grond van de samenstelling van deze lagen kan worden verwacht.

Een overzicht wordt gegeven van de meest gebruikte spoelingsrediënten en van de belangrijkste spoelings typen. De resultaten van een onderzoek naar de eigenschappen van diverse bentonietproducten als spoelingsrediënt worden hierbij vermeld.

Tot slot worden enkele vaak voorkomende spoelingsproblemen behandeld en wordt op de mogelijkheden ingegaan deze op te lossen en te voorkomen.

SUMMARY

Under the auspices of the "Working Committee on the Investigation of Boreholes" an investigation has been carried out into the use of drilling muds. A study has been made of the various functions of a drilling mud, of its properties and of the possibilities to check and adjust these properties.

Attention has been paid to the structure and properties of clay minerals and to those of clay-water systems, in order to account for the character of a drilling fluid as well as to get an insight into the possibilities of modifying them. Cation and anion exchange, swelling of clay as a result of water adsorption are being discussed along with phenomena such as flocculation and peptisation.

An attempt has been made to describe the characteristics of the clay layers occurring in the Netherlands during the drilling process. Experiences obtained from drilling through some of the clay layers turn out to agree with what could be expected on account of the composition of these layers.

A survey is given of the most usual mud additives and of the most important types of drilling fluids. In this context the results of a research into the properties of various bentonite products used as mud additives are mentioned.

Finally, some frequently occurring problems in the field of drilling muds and the possibilities of solving and preventing them are being discussed.

1. INLEIDING

De onderhavige verhandeling aangaande boorspoelingen is tot stand gekomen onder auspiciën van de Werkgroep Onderzoek Boringen, welke ressorteert onder de Commissie Putten van het KIWA N.V. te Rijswijk. De werkzaamheden ten behoeve van de opstelling van dit stuk konden worden bekostigd uit middelen, die daartoe door de Vereniging van Boorondernemers en Buizenleggers (BOLEGBO), het Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen (KIWA) N.V. en de Dienst Grondwaterverkenning TNO ter beschikking werden gesteld alsmede uit subsidie van de Rijksoverheid.

De verhandeling is in eerste instantie bestemd voor de boorbedrijven, die in Nederland werkzaam zijn ten behoeve van het geohydrologisch onderzoek en de waterwinning. Daarnaast mag worden voorzien, dat deze verhandeling ook zijn nut zal hebben voor de opdrachtgevers van exploratie- en exploitatieboringen op hydrologisch gebied. Gepoogd is onder meer om, zonder al te zeer in details te treden, het hoe en waarom van spoelingsrediënten uiteen te zetten en om richtlijnen te geven voor de samenstelling van spoelingen en voor de controle van de spoeling tijdens het boren.

Bij de opstelling van enkele hoofdstukken is mede gebruik gemaakt van het collegedictaat Boortechnologie petroleumwinning, afkomstig van de Afdeling der Mijnbouwkunde (Prof. Ir. W.H. van Eek) van de Technische Hogeschool Delft. Ook zijn de uitkomsten van een door de Dienst Grondwaterverkenning TNO uitgevoerd onderzoek naar de eigenschappen van enkele commercieel beschikbare ingrediënten in een aantal bijlagen verwerkt.

Samenstelling van de Werkgroep Onderzoek Boringen:

Drs. F. Walter, voorzitter	Dienst Grondwaterverkenning TNO
Ing. P.J. van Winsen, secretaris	Keuringsinstituut voor Waterleiding- artikelen KIWA N.V.
Ir. M.C. Brandes	Rijksinstituut voor Drinkwater- voorziening
Ing. W.A.A. van Eyden	Afdeling Waterhuishouding van de Rijkswaterstaat-Deltadienst
Ir. B.P. Hageman	Rijks Geologische Dienst
M. Haitjema	Grondboorbedrijf H. Haitjema en Zn. B.V.
Dr. E.J.M. Kobus	Keuringsinstituut voor Waterleiding- artikelen KIWA N.V.
G.H.J. ten Pas	Verenigde Grondboorbedrijven Van Es-Rossmark B.V.
Ir. H.J. Tjaden	Tjaden B.V. Grondboorbedrijf
Dr. W.H. Zagwijn	Rijks Geologische Dienst
Ir. G. Zoet	N.V. Waterleiding Maatschappij "Noord-West-Brabant"

2. FUNKTIES BOORSPOELINGEN

2.1. Algemeen

De spoeling heeft tijdens de uitvoering van een boring diverse functies, die afhankelijk van de omstandigheden (aard van de formatie, totale diepte van de boring) van meer of minder belang zijn. Zij stellen soms tegenstrijdige eisen aan de spoelingeigenschappen, maar kunnen niettemin bij een optimale combinatie van deze eigenschappen in voldoende mate worden vervuld om veilig en snel boren mogelijk te maken. De functies zullen hieronder in willekeurige volgorde worden toegelicht.

2.2. Bevorderen boorsnelheid

Doorgaans treedt in doorlatende formaties een druk op die slechts weinig afwijkt van de hydrostatische druk. In het boorgat zelf heerst, tengevolge van het soortelijk gewicht en totale lengte van de spoelingskolom, een hogere druk. Als gevolg hiervan worden de bij het boren ontstane gesteenteschilfers tegen de bodem van het boorgat gedrukt en dit resulteert in een vertraging van de boorsnelheid.

De boorsnelheid kan worden vergroot door verlaging van het soortelijk gewicht (s.g.) van de spoeling en door verslechtering van de afpleisterende eigenschappen. Verlaging van het s.g. kan worden bereikt door verdunning met water of door verwijdering van het opgenomen boorgruis uit de spoeling.

2.3. Vertikale opvoer van boorgruis

Volgens de wet van Stokes bedraagt de valsnelheid van een bolvormig deeltje door een viskeuze vloeistof:

$$v_d = \frac{2}{9} \cdot g \cdot \frac{r^2(\rho_d - \rho_{sp})}{\eta}$$

waarin: v_d = valsnelheid deeltje (cm/s)

g = versnelling van de zwaartekracht (cm/s²)

De afpleistering van permeabele lagen vindt plaats, omdat als gevolg van de overdruk in het boorgat een neiging tot indringen van spoeling in de lagen bestaat. De spoeling zal worden afgefiltreerd, d.w.z. het aanwezige water zal als filtraat in het "zandfilter" dringen. De in de spoeling aanwezige vaste deeltjes (klei, silt, fijn zand) zullen zich afzetten tegen de zandwand. De zeer fijne deeltjes zullen aanvankelijk met het spoelingfiltraat in de laag dringen; de wat grovere zullen als eerste tegen het zand worden afgezet. Daar de in het zand aanwezige capillairen een grotere diameter hebben dan de capillairen van de pleisterkoek, zal al spoedig de pleisterkoek de mate van filtratie gaan bepalen; zelfs zeer fijne kleideeltjes zullen worden afgezeefd. Zeer permeabele lagen met wijde capillairen zullen het best en snelst worden afgepleisterd als de spoeling grovere delen bevat. De afpleisterende eigenschappen van een spoeling kunnen in het algemeen worden verbeterd door chemische behandelingen.

2.7. Samenvatting

Recapitulerend zien we dat aan een spoeling tegenstrijdige eisen worden gesteld:

Funktie		Eisen gesteld aan	
	s.g.	viskositeit	thixotropie
1. Bevorderen boorsnelheid	laag		
2. Verwijderen boorgruis:			
a. uit het boorgat	hoog	hoog	hoog
b. uit spoeling bovengronds	laag	laag	gering
3. Verhinderen instroming	hoog		
4. Uitoefenen tegendruk gesteente	tussen grenzen		
5. Afpleistering		waterverlies zo laag mogelijk	

3. THEORIE KLEI-WATER SYSTEMEN

3.1. Algemeen

De meest gebruikte boorspoelingen bestaan uit colloïdale klei-water systemen. Om inzicht te verkrijgen in de eigenschappen van deze spoelingen is het noodzakelijk eerst een inleiding te geven over de structuur en de eigenschappen van kleimineralen en klei-water mengsels. Onder klei (lutum) verstaat men de gronddeeltjes kleiner dan 2μ die onder natuurlijke omstandigheden voorkomen. De deeltjes bestaan in hoofdzaak uit kleimineralen, kwarts, ijzer-, aluminium- en mangaan-verbindingen en organische stoffen. Klei ontleent zijn bijzondere eigenschappen, zoals adsorptie van kationen, zwellings door wateropname, plasticiteit etc. in hoofdzaak aan de kleimineralen.

Veel kleimineralen vormen met water een colloïdaal systeem. Dat wil zeggen dat de kleideeltjes in het water gedispergeerd blijven en niet uitzakken zoals b.v. zandkorrels in een zand-water mengsel. De samenstelling van de kleideeltjes speelt echter een belangrijke rol in de eigenschappen van het systeem. De samenstelling van de in Nederland voorkomende kwartaire en tertiaire kleilagen wordt besproken in hoofdstuk 5.

Belangrijke kleimineralen zijn:

- montmorilloniet (bentoniet)
- illiet
- kaoliniet
- attapulgiëet

3.2. Structuur van kleimineralen

Alle kleimineralen zijn opgebouwd uit twee eenheden n.l. silicium-tetraeders en aluminiumoctaeders. Een Si-tetraeder (= viervlak) bestaat uit één Si-atoom in het centrum van de tetraeder en vier hydroxylgroepen (-OH groepen) op de hoekpunten (zie figuur 1). Een Al-octaeder (= achthoek = dubbele pyramide) bestaat uit één Al-atoom in het centrum van de octaeder en zes hydroxylgroepen op de hoekpunten. In figuur 1^a is een Al-octaeder aangegeven, zodanig dat de boven- en onderzijde uit hydroxylgroepen bestaan. Deze groepen zijn in een patroon van driehoeken gerangschikt.

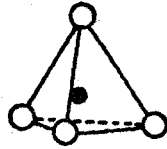


Fig. 1^a

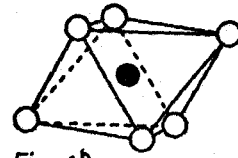


Fig. 1^b

○ : hydroxylgroep (-OH)

● : silicium atoom

● : aluminium atoom

Fig.1. Schematische afbeelding van een siliciumtetraeder (a) en een aluminiumoctaeder (b).

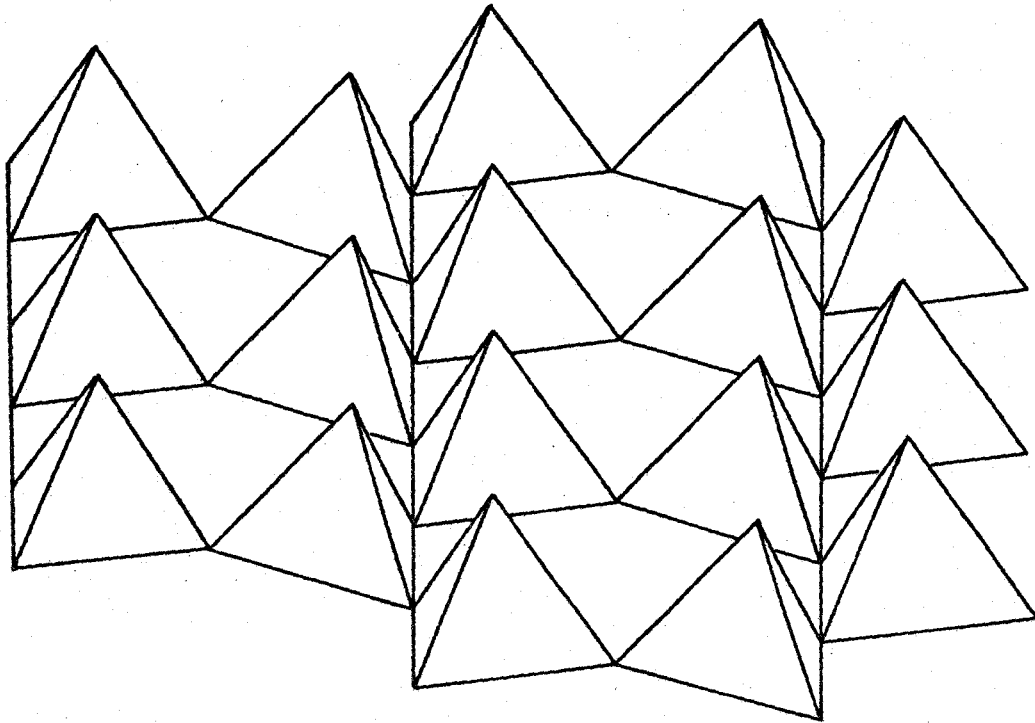


Fig. 2. Schematische afbeelding van een siliciumtetraederplaat.

Zowel de Si-tetraeders als de Al-octaeders kunnen door polymerisatie grote plaatvormige eenheden vormen. Een Si-tetraederplaat is afgebeeld in figuur 2. De basis van deze plaat bestaat uit zuurstof atomen welke in een zeshoekig patroon zijn gerangschikt. Dit heeft tot gevolg dat er tussen deze O-atomen grote holten voorkomen. De toppen van de tetraeders bestaan uit OH-groepen. Polymerisatie van Al-octaeders levert platen waarvan de boven- en onderzijde bestaan uit OH-groepen, terwijl de Al-atomen in het midden voorkomen.

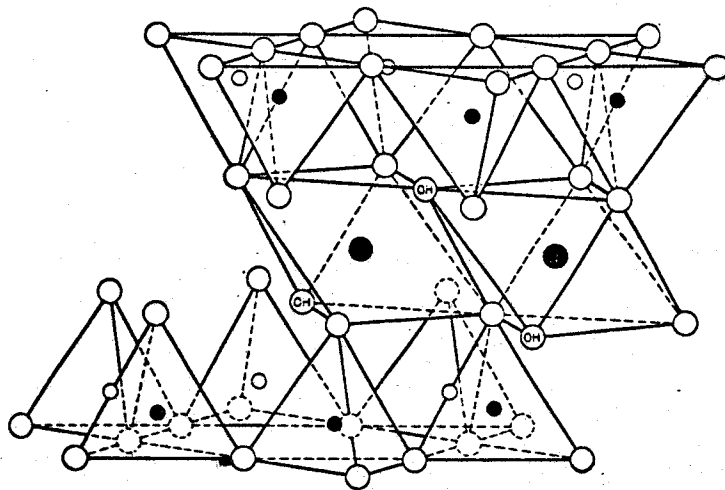
De OH-groepen van de Si-tetraederplaat kunnen met de OH-groepen van de Al-octaederplaat een chemische reactie aangaan. Aangezien de Al-octaederplaat zowel aan boven- als onderzijde uit OH-groepen bestaat kunnen zich aan beide zijden Si-tetraederplaten hechten. Op grond hiervan kunnen de volgende twee structuren optreden: een structuur bestaande uit één octaeder- en één tetraederplaat (TO-TO-TO volgorde) en een structuur bestaande uit één octaederplaat gecombineerd met twee tetraederplaten (TOT-TOT-TOT volgorde). (Zie figuur 3.)

De kleimineralen montmorilloniet en illiet bezitten een TOT-structuur. De afstand tussen een zekere plaat in een TOT-structuur en de corresponderende plaat in de volgende TOT-structuur bedraagt in droge toestand 10 \AA of meer. Kaoliniet behoort tot de TO-groep. De afstand tussen twee corresponderende platen bedraagt hier ca. 7 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ meter). De structuur van attapulgië wijkt af van de hierbovengenoemde. Het kristalliseert in tegenstelling tot de andere kleimineralen uit in de vorm van lange naalden.

3.3. Eigenschappen van kleimineralen

3.3.1. Specifiek oppervlak

Het specifiek oppervlak is gedefinieerd als het oppervlak per gewichtseenheid vaste stof. Het specifiek oppervlak van een kleimineraal dat volledig in elementaire plaatjes voorkomt, b.v. montmorilloniet, bedraagt dan ($d = 10 \text{ \AA}$): ca $8 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{kg}$. Illiet komt voornamelijk in pakketjes voor bestaande uit ongeveer 5 eenheden, met een resulterend specifiek oppervlak van ca. $1,6 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{kg}$. Kaoliniet komt in nog grotere pakketjes voor. Aangezien kleimineralen plaatvormig zijn is het oppervlak van de rand zeer klein ten opzichte van de plaatszijde.



geadsorbeerde kationen

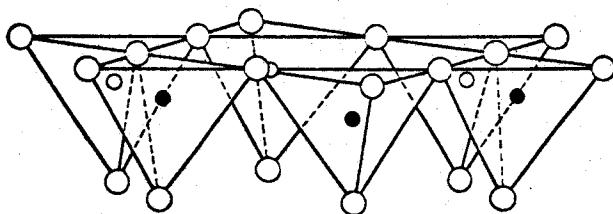


Fig. 3^a Schematische afbeelding van de structuur van montmorilloniet (naar Hofmann, Endell en Wilm (1933); Marshall (1935); en Hendricks (1942)).

- zuurstofatoom
- OH hydroxylgroep
- aluminiumatoom
- siliciumatomen (plaatselijk vervangen door aluminium)

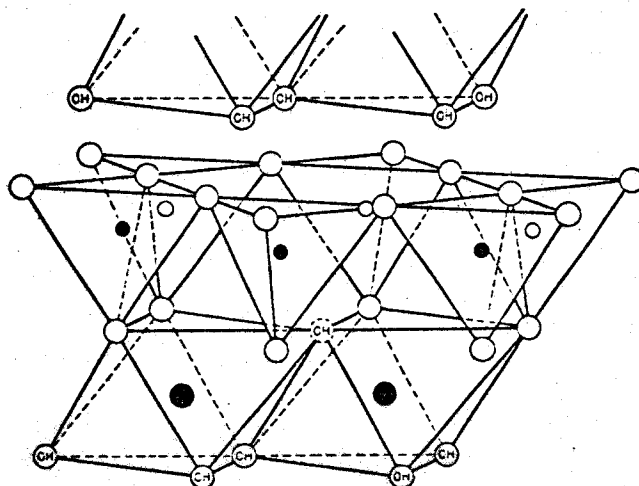
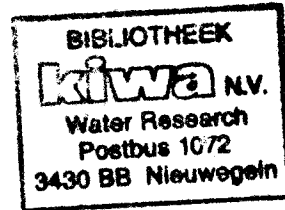


Fig. 3^b Schematische afbeelding van de structuur van kaolinitiet. (naar Gruner (1932))



BOORSPOELINGEN

door

C. Deelder (DGV-TNO)

Mededeling nr. 46 van het KIWA

Rapport van de Werkgroep Onderzoek Boringen

Rijswijk, maart 1976

INHOUD

blz.

SAMENVATTING

SUMMARY

1.	INLEIDING	1
2.	FUNKTIES BOORSPOELINGEN	3
2.1.	Algemeen	3
2.2.	Bevorderen boorsnelheid	3
2.3.	Vertikale opvoer van boorgruis	3
2.4.	Voorkomen van instroming	4
2.5.	Uitoefenen van tegendruk op het gesteente	5
2.6.	Afpleisteren van permeabele lagen	5
2.7.	Samenvatting	6
3.	THEORIE KLEI-WATER SYSTEMEN	7
3.1.	Algemeen	7
3.2.	Structuur van kleimineralen	7
3.3.	Eigenschappen van kleimineralen	8
3.3.1.	Specifiek oppervlak	8
3.3.2.	Oppervlakte lading	9
3.4.	Eigenschappen van klei-water systemen	9
3.4.1.	Kationenadsorptie	9
3.4.2.	Anionenadsorptie	10
3.4.3.	Zwelling bij wateropname	11
3.4.4.	Flocculatie en peptisatie	11
3.4.5.	Thixotropie en gelsterkte	13
4.	CONTROLE EN REGELING DER SPOELINGEIGENSCHAPPEN	14
4.1.	Algemeen	14
4.2.	Stabiliteit	14
4.3.	Viscositeit, vloeigrens en thixotropie	15
4.4.	Soortelijk gewicht	19
4.5.	Afpleisterend vermogen	19
4.6.	Spoelingtonsten in het veld	21
4.7.	Spoelingtonsten in het laboratorium	22

INHOUD (vervolg)

	<u>blz.</u>
5. SAMENSTELLING VAN KLEILAGEN IN NEDERLAND	23
5.1. Algemeen	23
5.2. Onderzoekmethoden	23
5.3. Samenstelling en eigenschappen	24
5.4. Samenvatting	25
6. OVERZICHT SPOELINGINGREDIENTEN	26
6.1. Natuurlijke kleien	26
6.2. Bentonieten	26
6.3. Dispergerende middelen (thinners, peptisatoren)	27
6.4. Stoffen die de afpleistering verbeteren	29
6.5. Verzwaringmiddelen	31
7. OVERZICHT VAN ENKELE BELANGRIJKE SPOELINGTYPEN	32
7.1. Algemeen	32
7.2. Natuurlijke spoeling	32
7.3. Fosfaatspoeling	32
7.4. Quebracho-spoeling	33
7.5. Kalkspoeling	34
7.6. Zoutwaterspoeling	34
7.7. Polymeerspoeling	35
7.8. Slotopmerking	35
8. SPOELINGPROBLEMEN IN DE PRAKTIJK EN HUN REMEDIES	36
8.1. Spoelingverlies	36
8.2. Instabiele kleiformaties	37
8.3. Overgang zoet-zout formatiewater	38
LITERATUUR	39

SAMENVATTING

Onder auspiciën van de Werkgroep Onderzoek Boringen is een onderzoek uitgevoerd op het gebied van boorspoelingen. Er is studie gemaakt van de diverse functies en eigenschappen van een boorspoeling en van de mogelijkheden om de eigenschappen te controleren en aan te passen.

Om het gedrag van een spoeling te verklaren en inzicht te krijgen in de mogelijkheden hierin wijzigingen aan te brengen, is aandacht geschonken aan de structuur en eigenschappen van kleimineralen en aan die van klei-water systemen. In dit verband wordt ingegaan op verschijnselen zoals kationen- en anionenadsorptie, op zwelling van klei bij wateropname en op verschijnselen zoals flocculatie en peptisatie.

Een poging is gedaan het gedrag van de in Nederland voorkomende kleilagen te karakteriseren wanneer deze worden doorboord. De ervaringen die worden opgedaan bij het boren door sommige kleilagen (b.v. potklei) blijken overeen te komen met hetgeen op grond van de samenstelling van deze lagen kan worden verwacht.

Een overzicht wordt gegeven van de meest gebruikte spoelingrediënten en van de belangrijkste spoelings typen. De resultaten van een onderzoek naar de eigenschappen van diverse bentonietproducten als spoelingrediënt worden hierbij vermeld.

Tot slot worden enkele vaak voorkomende spoelingproblemen behandeld en wordt op de mogelijkheden ingegaan deze op te lossen en te voorkomen.

1. INLEIDING

De onderhavige verhandeling aangaande boorspoelingen is tot stand gekomen onder auspiciën van de Werkgroep Onderzoek Boringen, welke ressorteert onder de Commissie Putten van het KIWA N.V. te Rijswijk. De werkzaamheden ten behoeve van de opstelling van dit stuk konden worden bekostigd uit middelen, die daartoe door de Vereniging van Boorondernemers en Buizenleggers (BOLEGBO), het Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen (KIWA) N.V. en de Dienst Grondwaterverkenning TNO ter beschikking werden gesteld alsmede uit subsidie van de Rijksoverheid.

De verhandeling is in eerste instantie bestemd voor de boorbedrijven, die in Nederland werkzaam zijn ten behoeve van het geohydrologisch onderzoek en de waterwinning. Daarnaast mag worden voorzien, dat deze verhandeling ook zijn nut zal hebben voor de opdrachtgevers van exploratie- en exploitatieboringen op hydrologisch gebied. Gepoogd is onder meer om, zonder al te zeer in details te treden, het hoe en waarom van spoelingsrediënten uiteen te zetten en om richtlijnen te geven voor de samenstelling van spoelingen en voor de controle van de spoeling tijdens het boren.

Bij de opstelling van enkele hoofdstukken is mede gebruik gemaakt van het collegedictaat Boortechnologie petroleumwinning, afkomstig van de Afdeling der Mijnbouwkunde (Prof. Ir. W.H. van Eek) van de Technische Hogeschool Delft. Ook zijn de uitkomsten van een door de Dienst Grondwaterverkenning TNO uitgevoerd onderzoek naar de eigenschappen van enkele commercieel beschikbare ingrediënten in een aantal bijlagen verwerkt.

SUMMARY

Under the auspices of the "Working Committee on the Investigation of Boreholes" an investigation has been carried out into the use of drilling muds. A study has been made of the various functions of a drilling mud, of its properties and of the possibilities to check and adjust these properties.

Attention has been paid to the structure and properties of clay minerals and to those of clay-water systems, in order to account for the character of a drilling fluid as well as to get an insight into the possibilities of modifying them. Cation and anion exchange, swelling of clay as a result of water adsorption are being discussed along with phenomena such as flocculation and peptisation.

An attempt has been made to describe the characteristics of the clay layers occurring in the Netherlands during the drilling process. Experiences obtained from drilling through some of the clay layers turn out to agree with what could be expected on account of the composition of these layers.

A survey is given of the most usual mud additives and of the most important types of drilling fluids. In this context the results of a research into the properties of various bentonite products used as mud additives are mentioned.

Finally, some frequently occurring problems in the field of drilling muds and the possibilities of solving and preventing them are being discussed.

Samenstelling van de Werkgroep Onderzoek Boringen:

Drs. F. Walter, voorzitter	Dienst Grondwaterverkenning TNO
Ing. P.J. van Winsen, secretaris	Keuringsinstituut voor Waterleiding- artikelen KIWA N.V.
Ir. M.C. Brandes	Rijksinstituut voor Drinkwater- voorziening
Ing. W.A.A. van Eyden	Afdeling Waterhuishouding van de Rijkswaterstaat-Deltadienst
Ir. B.P. Hageman	Rijks Geologische Dienst
M. Haitjema	Grondboorbedrijf H. Haitjema en Zn. B.V.
Dr. E.J.M. Kobus	Keuringsinstituut voor Waterleiding- artikelen KIWA N.V.
G.H.J. ten Pas	Verenigde Grondboorbedrijven Van Es-Rossmark B.V.
Ir. H.J. Tjaden	Tjaden B.V. Grondboorbedrijf
Dr. W.H. Zagwijn	Rijks Geologische Dienst
Ir. G. Zoet	N.V. Waterleiding Maatschappij "Noord-West-Brabant"

2. FUNKTIES BOORSPOELINGEN

2.1. Algemeen

De spoeling heeft tijdens de uitvoering van een boring diverse functies, die afhankelijk van de omstandigheden (aard van de formatie, totale diepte van de boring) van meer of minder belang zijn. Zij stellen soms tegenstrijdige eisen aan de spoelingeigenschappen, maar kunnen niettemin bij een optimale combinatie van deze eigenschappen in voldoende mate worden vervuld om veilig en snel boren mogelijk te maken. De functies zullen hieronder in willekeurige volgorde worden toegelicht.

2.2. Bevorderen boorsnelheid

Doorgaans treedt in doorlatende formaties een druk op die slechts weinig afwijkt van de hydrostatische druk. In het boorgat zelf heerst, tengevolge van het soortelijk gewicht en totale lengte van de spoelingskolom, een hogere druk. Als gevolg hiervan worden de bij het boren ontstane gesteenteschilfers tegen de bodem van het boorgat gedrukt en dit resulteert in een vertraging van de boorsnelheid.

De boorsnelheid kan worden vergroot door verlaging van het soortelijk gewicht (s.g.) van de spoeling en door verslechtering van de afpleisterende eigenschappen. Verlaging van het s.g. kan worden bereikt door verdunning met water of door verwijdering van het opgenomen boorgruis uit de spoeling.

2.3. Vertikale opvoer van boorgruis

Volgens de wet van Stokes bedraagt de valsnelheid van een bolvormig deeltje door een viskeuze vloeistof:

$$v_d = \frac{2}{9} \cdot g \cdot \frac{r^2(\rho_d - \rho_{sp})}{\eta}$$

waarin: v_d = valsnelheid deeltje (cm/s)

g = versnelling van de zwaartekracht (cm/s²)

r = straal deeltje (cm)

ρ_d = s.g. deeltje (g/cm^3)

ρ_{sp} = s.g. spoeling (g/cm^3)

η = dynamische viskositeit (poises = $g/s \cdot cm$)

Deze formule gaat niet exakt op in een circulerende boorspoeling omdat door de turbulentie van de stroming neveneffekten ontstaan, doch geeft goed aan welke factoren een rol spelen. v_d kan worden verlaagd door het verhogen van ρ_{sp} en η . De opvoer van het boorgruis wordt dus bevorderd door verhoging van het soortelijk gewicht (s.g.) van de spoeling en van de viskositeit, of door vergroting van de circulatiesnelheid van de spoeling. Hierbij dient opgemerkt te worden dat verhoging van het s.g. niet alleen een ongunstige invloed heeft op de boorvordering maar ook op de benodigde pompenergie. Verhoging van de viskositeit heeft als nadelig effect dat het boorgruis bovengronds moeilijker uitzakt.

De meeste spoelingen hebben thixotrope eigenschappen, d.w.z. dat zij opstijven bij stilstand. Voor het uitzakken van boorgruis bovengronds is thixotropie dus ongewenst. Thixotropie is echter noodzakelijk om tijdens stagnatie van de spoelingcirculatie het uitzakken van het boorgruis in het boorgat te voorkomen.

2.4. Voorkomen van instroming

Om instroming van grondwater uit ontsloten lagen in het boorgat te voorkomen, dient de druk in het boorgat groter te zijn dan de druk in de poriën van het gesteente. De druk in het boorgat wordt geregeld met het s.g. van de spoeling. Met klei kan het s.g. tot maximaal 1,25 worden opgevoerd. Verdere verhoging van het s.g. met klei blijkt in de praktijk te grote viskositeit en thixotropie van de spoeling te geven. In dat geval kan men beter uitgaan van de klei-water spoeling met s.g. ca. 1,10 en hieraan inert verzwaringsmateriaal van hoog eigen s.g. toevoegen.

N.B.: 1. Verzwaringsmiddelen zullen bij een zware-mineraalonderzoek aan de boorgruismonsters deel uit maken van de zware fraktie!

2. Bij snel trekken van het boorgereedschap kunnen als gevolg van viskositeit en/of thixotropie aanzienlijke drukverlagingen in het boorgat ontstaan (zuigeffect)!

2.5. Uitoefenen van tegendruk op het gesteente

Om naval te voorkomen dient, afhankelijk van de formatie en de oorspronkelijke spanningsverdeling in de ondergrond, het s.g. van de spoeling binnen bepaalde grenzen te liggen. De boorgatmechanica laat zien dat wanneer deze grenzen worden overschreden, de verhouding van de hoofdspanningen in het gesteente rondom het boorgat te groot wordt. Dit resulteert in het ontstaan van afschuivingsbreuken.

2.6. Afpleisteren van permeabele lagen

De afpleisterende eigenschappen van een spoeling zijn erg belangrijk. Afpleistering moet verhinderen dat overmatig spoelingverlies optreedt bij het doorboren van permeabele lagen tengevolge van de overdruk in het boorgat. Vooral bij het doorboren van potentiële waterproductieve lagen is het belangrijk dat weinig spoeling en spoelingfiltraat de formatie indringt en dat de pleisterkoek dun is. Ingedrongen kleideeltjes uit de spoeling, zwelling van aanwezige kleideeltjes in de watervoerende laag, en achtergebleven spoelingskoekrestanten kunnen de permeabiliteit in de onmiddellijke omgeving van de put aanzienlijk verlagen, hetgeen een belangrijke verslechtering in de opbrengst van de put betekent (skineffekt). Bovendien moet niet uit het oog worden verloren dat het indringen van spoeling of spoelingfiltraat in potentiële waterproductieve lagen gepaard gaat met een verontreiniging door alle in de spoeling aanwezige chemicaliën en organismen. Omdat in iedere boorspoeling bacteriën aanwezig zijn en veelal organische spoelingschemicaliën, moet niet worden uitgesloten dat onder gunstige lokale condities de groei van bepaalde soorten bacteriën voor korte of lange tijd wordt gestimuleerd en dat verontreiniging in de watervoerende laag optreedt. Een goede afpleistering is nog uit een ander oogpunt gezien belangrijk. Het uitoefenen van voldoende tegendruk op het gesteente en het voorkomen van instroming van artesisch water is slechts mogelijk indien de overdruk in het boorgat kan worden gehandhaafd. Valt de overdruk in het boorgat weg door overmatig spoelingverlies bij het doorboren van zeer permeabele lagen dan zal water uit hoger gelegen lagen kunnen toestromen en leiden tot de instorting van het boorgat.

De afpleistering van permeabele lagen vindt plaats, omdat als gevolg van de overdruk in het boorgat een neiging tot indringen van spoeling in de lagen bestaat. De spoeling zal worden afgefiltreerd, d.w.z. het aanwezige water zal als filtraat in het "zandfilter" dringen. De in de spoeling aanwezige vaste deeltjes (klei, silt, fijn zand) zullen zich afzetten tegen de zandwand. De zeer fijne deeltjes zullen aanvankelijk met het spoelingfiltraat in de laag dringen; de wat grovere zullen als eerste tegen het zand worden afgezet. Daar de in het zand aanwezige capillairen een grotere diameter hebben dan de capillairen van de pleisterkoek, zal al spoedig de pleisterkoek de mate van filtratie gaan bepalen; zelfs zeer fijne kleideeltjes zullen worden afgezeefd. Zeer permeabele lagen met wijde capillairen zullen het best en snelst worden afgepleisterd als de spoeling grovere delen bevat. De afpleisterende eigenschappen van een spoeling kunnen in het algemeen worden verbeterd door chemische behandelingen.

2.7. Samenvatting

Recapitulerend zien we dat aan een spoeling tegenstrijdige eisen worden gesteld:

Functie		Eisen gesteld aan	
	s.g.	viskositeit	thixotropie
1. Bevorderen boorsnelheid	laag		
2. Verwijderen boorgruis:			
a. uit het boorgat	hoog	hoog	hoog
b. uit spoeling bovengronds	laag	laag	gering
3. Verhindere instroming	hoog		
4. Uitoefenen tegendruk gesteente	tussen grenzen		
5. Afpleistering		waterverlies zo laag mogelijk	

3. THEORIE KLEI-WATER SYSTEMEN

3.1. Algemeen

De meest gebruikte boerspelingen bestaan uit colloïdale klei-water systemen. Om inzicht te verkrijgen in de eigenschappen van deze spelingen is het noodzakelijk eerst een inleiding te geven over de structuur en de eigenschappen van kleimineralen en klei-water mengsels. Onder klei (lutum) verstaat men de gronddeeltjes kleiner dan 2μ die onder natuurlijke omstandigheden voorkomen. De deeltjes bestaan in hoofdzaak uit kleimineralen, kwarts, ijzer-, aluminium- en mangaan-verbindingen en organische stoffen. Klei ontleent zijn bijzondere eigenschappen, zoals adsorptie van kationen, zwellings door wateropname, plasticiteit etc. in hoofdzaak aan de kleimineralen.

Veel kleimineralen vormen met water een colloïdaal systeem. Dat wil zeggen dat de kleideeltjes in het water gedispergeerd blijven en niet uitzakken zoals b.v. zandkorrels in een zand-water mengsel. De samenstelling van de kleideeltjes speelt echter een belangrijke rol in de eigenschappen van het systeem. De samenstelling van de in Nederland voorkomende kwartaire en tertiaire kleilagen wordt besproken in hoofdstuk 5.

Belangrijke kleimineralen zijn:

- montmorilloniet (bentoniet)
- illiet
- kaoliniet
- attapulgiëet

Zowel de Si-tetraeders als de Al-octaeders kunnen door polymerisatie grote plaatvormige eenheden vormen. Een Si-tetraederplaat is afgebeeld in figuur 2. De basis van deze plaat bestaat uit zuurstof atomen welke in een zeshoekig patroon zijn gerangschikt. Dit heeft tot gevolg dat er tussen deze O-atomen grote holten voorkomen. De toppen van de tetraeders bestaan uit OH-groepen. Polymerisatie van Al-octaeders levert platen waarvan de boven- en onderzijde bestaan uit OH-groepen, terwijl de Al-atomen in het midden voorkomen.

De OH-groepen van de Si-tetraederplaat kunnen met de OH-groepen van de Al-octaederplaat een chemische reactie aangaan. Aangezien de Al-octaederplaat zowel aan boven- als onderzijde uit OH-groepen bestaat kunnen zich aan beide zijden Si-tetraederplaten hechten. Op grond hiervan kunnen de volgende twee structuren optreden: een structuur bestaande uit één octaeder- en één tetraederplaat (TO-TO-TO volgorde) en een structuur bestaande uit één octaederplaat gecombineerd met twee tetraederplaten (TOT-TOT-TOT volgorde). (Zie figuur 3.)

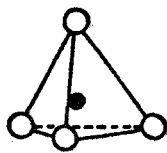


Fig. 1^a

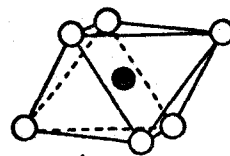


Fig. 1^b

○ : hydroxylgroep (-OH)

● : silicium atoom

● : aluminium atoom

Fig.1. Schematische afbeelding van een siliciumtetraeder (a) en een aluminiumoctaeder (b).

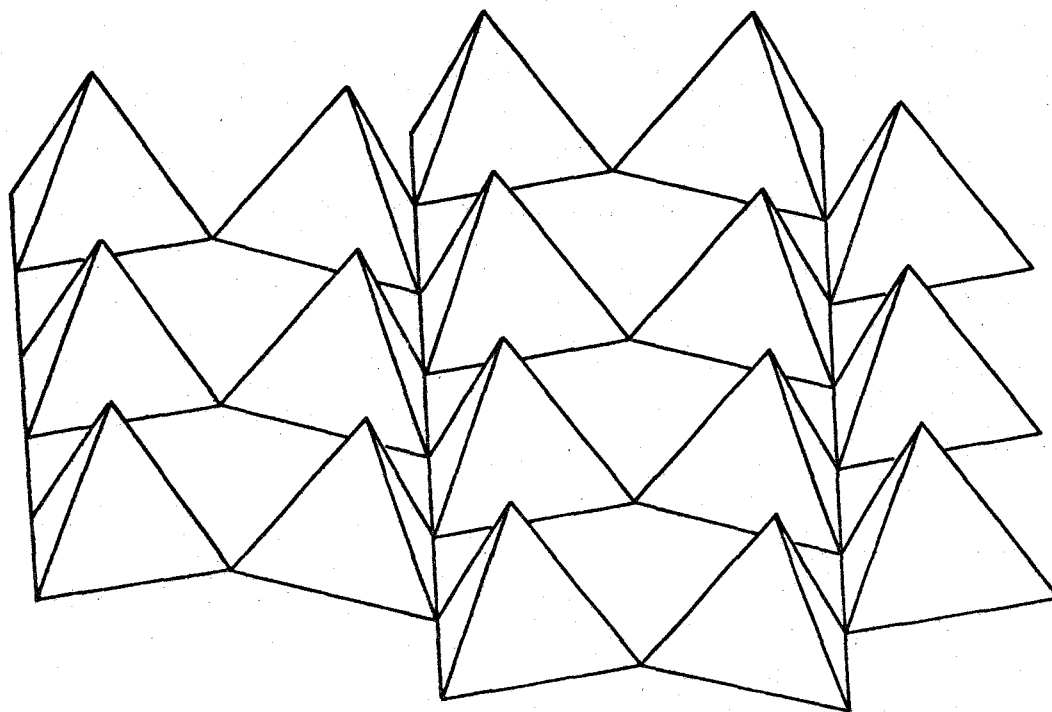
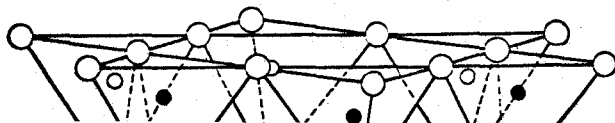


Fig. 2. Schematische afbeelding van een siliciumtetraederplaat.



Zowel de Si-tetraeders als de Al-octaeders kunnen door polymerisatie grote plaatvormige eenheden vormen. Een Si-tetraederplaat is afgebeeld in figuur 2. De basis van deze plaat bestaat uit zuurstof atomen welke in een zeshoekig patroon zijn gerangschikt. Dit heeft tot gevolg dat er tussen deze O-atomen grote holten voorkomen. De toppen van de tetraeders bestaan uit OH-groepen. Polymerisatie van Al-octaeders levert platen waarvan de boven- en onderzijde bestaan uit OH-groepen, terwijl de Al-atomen in het midden voorkomen.

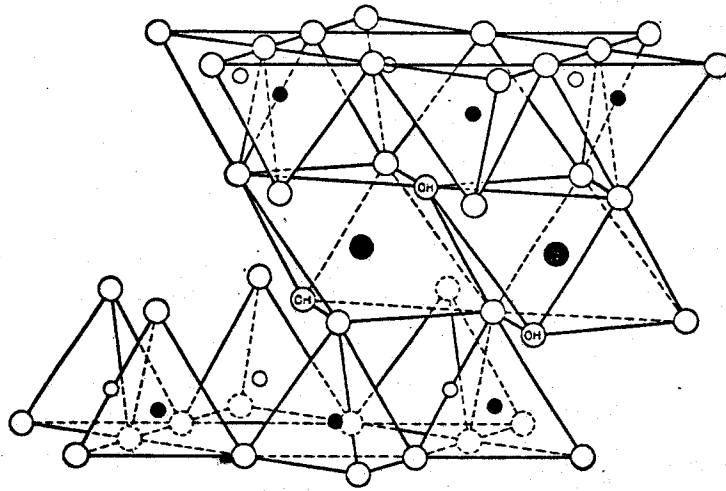
De OH-groepen van de Si-tetraederplaat kunnen met de OH-groepen van de Al-octaederplaat een chemische reactie aangaan. Aangezien de Al-octaederplaat zowel aan boven- als onderzijde uit OH-groepen bestaat kunnen zich aan beide zijden Si-tetraederplaten hechten. Op grond hiervan kunnen de volgende twee structuren optreden: een structuur bestaande uit één octaeder- en één tetraederplaat (TO-TO-TO volgorde) en een structuur bestaande uit één octaederplaat gecombineerd met twee tetraederplaten (TOT-TOT-TOT volgorde). (Zie figuur 3.)

De kleimineralen montmorilloniet en illiet bezitten een TOT-structuur. De afstand tussen een zekere plaat in een TOT-structuur en de corresponderende plaat in de volgende TOT-structuur bedraagt in droge toestand 10 \AA of meer. Kaoliniet behoort tot de TO-groep. De afstand tussen twee corresponderende platen bedraagt hier ca. 7 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ meter). De structuur van attapulgiëet wijkt af van de hierbovengenoemde. Het kristalliseert in tegenstelling tot de andere kleimineralen uit in de vorm van lange naalden.

3.3. Eigenschappen van kleimineralen

3.3.1. Specifiek oppervlak

Het specifiek oppervlak is gedefinieerd als het oppervlak per gewichtseenheid vaste stof. Het specifiek oppervlak van een kleimineraal dat volledig in elementaire plaatjes voorkomt, b.v. montmorilloniet, bedraagt dan ($d = 10 \text{ \AA}$): ca $8 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{kg}$. Illiet komt voornamelijk in pakketjes voor bestaande uit ongeveer 5 eenheden, met een resulterend specifiek oppervlak van ca. $1,6 \times 10^5 \text{ m}^2/\text{kg}$. Kaoliniet komt in nog grotere pakketjes voor. Aangezien kleimineralen plaatvormig zijn is het oppervlak van de rand zeer klein ten opzichte van de plaatzijde.



geadsorbeerde kationen

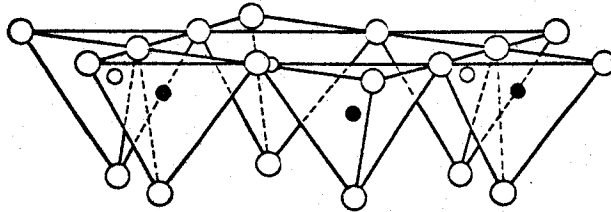


Fig. 3^a Schematische afbeelding van de structuur van montmorilloniet (naar Hofmann, Endell en Wilm (1933); Marshall(1935); en Hendricks(1942)).

- zuurstofatoom
- ⊙ hydroxylgroep
- aluminiumatoom
- siliciumatomen (plaatselijk vervangen door aluminium)

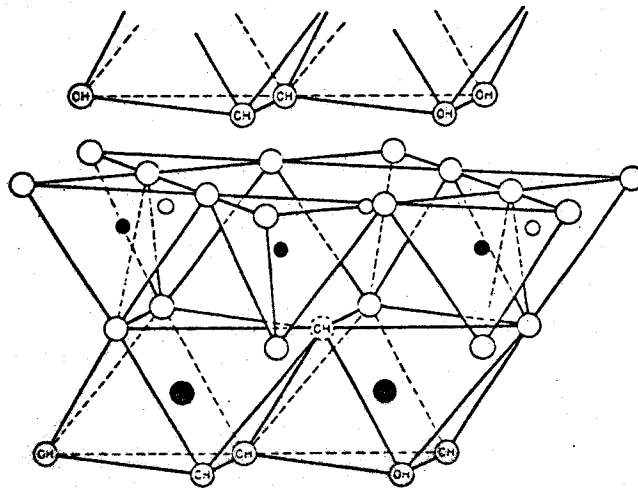


Fig. 3^b Schematische afbeelding van de structuur van kaolinitiet. (naar Gruner(1932))

3. THEORIE KLEI-WATER SYSTEMEN

3.1. Algemeen

De meest gebruikte boerspelingen bestaan uit colloïdale klei-water systemen. Om inzicht te verkrijgen in de eigenschappen van deze spelingen is het noodzakelijk eerst een inleiding te geven over de structuur en de eigenschappen van kleimineralen en klei-water mengsels. Onder klei (lutum) verstaat men de gronddeeltjes kleiner dan 2μ die onder natuurlijke omstandigheden voorkomen. De deeltjes bestaan in hoofdzaak uit kleimineralen, kwarts, ijzer-, aluminium- en mangaan-verbindingen en organische stoffen. Klei ontleent zijn bijzondere eigenschappen, zoals adsorptie van kationen, zwellings door wateropname, plasticiteit etc. in hoofdzaak aan de kleimineralen.

Veel kleimineralen vormen met water een colloïdaal systeem. Dat wil zeggen dat de kleideeltjes in het water gedispergeerd blijven en niet uitzakken zoals b.v. zandkorrels in een zand-water mengsel. De samenstelling van de kleideeltjes speelt echter een belangrijke rol in de eigenschappen van het systeem. De samenstelling van de in Nederland voorkomende kwartaire en tertiaire kleilagen wordt besproken in hoofdstuk 5.

Belangrijke kleimineralen zijn:

- montmorilloniet (bentoniet)
- illiet
- kaoliniet
- attapulgiëet

3.2. Structuur van kleimineralen

Alle kleimineralen zijn opgebouwd uit twee eenheden n.l. silicium-tetraeders en aluminiumoctaeders. Een Si-tetraeder (= viervlak) bestaat uit één Si-atoom in het centrum van de tetraeder en vier hydroxylgroepen (-OH groepen) op de hoekpunten (zie figuur 1). Een Al-octaeder (= achthoek = dubbele pyramide) bestaat uit één Al-atoom in het centrum van de octaeder en zes hydroxylgroepen op de hoekpunten. In figuur 1^a is een Al-octaeder aangegeven, zodanig dat de boven- en onderzijde uit hydroxylgroepen bestaan. Deze groepen zijn in een patroon van driehoeken gerangschikt.

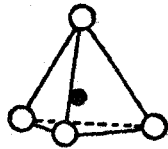


Fig. 1^a

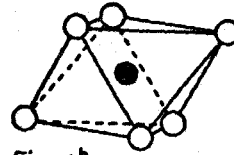


Fig. 1^b

- : hydroxylgroep (-OH)
- : silicium atoom
- : aluminium atoom

Fig.1. Schematische afbeelding van een siliciumtetraeder (a) en een aluminiumoctaeder (b).

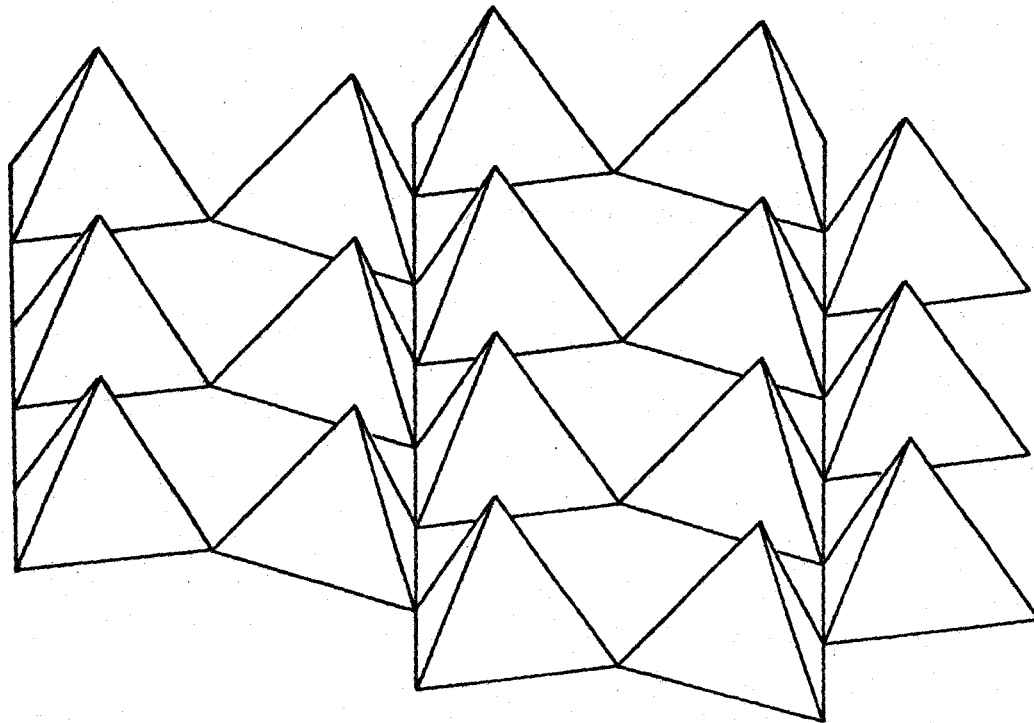


Fig. 2. Schematische afbeelding van een siliciumtetraederplaat.

3.3.2. Oppervlakte lading

Tijdens de vorming van de kleimineralen zijn niet altijd alle ionen in de juiste verhouding aanwezig. In plaats van het benodigde ion worden dan ionen ingebouwd welke een ongeveer gelijke afmeting hebben (isomorfe substitutie), bijvoorbeeld Al^{3+} in plaats van Si^{4+} in de tetraederlaag en Mg^{2+} in plaats van Al^{3+} in de octaederlaag. Ten gevolge van deze vervanging bezit het kleimineraal een gefixeerd tekort aan positieve lading en is derhalve negatief geladen. Om het tekort te compenseren wordt aan het oppervlak van de TOT en TO eenheden een equivalente hoeveelheid kationen geadsorbeerd, zoals Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ en K^+ .

Aangezien kleimineralen een eindige afmeting bezitten komen aan de randen allerlei defecten voor, welke aanleiding geven tot een randlading waarvan de aard pH gevoelig is: positief bij lage pH en negatief bij hoge pH. De grootte van de randlading wordt eveneens beïnvloed door de zoutconcentratie. De orde van grootte van de randlading bedraagt 1 à 5 % van de negatieve plaatlading.

Bij montmorilloniet treedt isomorfe substitutie vaak op. De geadsorbeerde kationen zijn vrij beweeglijk en makkelijk uitwisselbaar. Bij illiet zijn de geadsorbeerde kationen moeilijker uitwisselbaar; de bindende krachten in het inwendige van een kleiplaatpakketje tussen de kationen en de aangrenzende TOT eenheden zijn sterker. De randladingen van illiet zijn zwak. Dit heeft tot gevolg dat illiet chemisch weinig actief is. Kaoliniet bezit nagenoeg geen oppervlaktelading omdat substitutie bij dit mineraal vrijwel niet optreedt. Het is een niet reactief kleimineraal dat met water geen colloïdaal systeem vormt.

3.4. Eigenschappen van klei-water systemen

3.4.1. Kationen adsorptie

Zoals reeds genoemd bezit een kleimineraal een negatief geladen plaatoppervlak en een pH afhankelijke lading aan de randzijde. Het ladingtekort aan de plaatzijde resulteert in de adsorptie van kationen aan het oppervlak (zie figuur 4). Zodra een droog kleimineraal in water wordt gebracht zullen de geadsorbeerde kationen trachten zich homogeen over het water te verdelen (diffusietendens). Anderzijds zijn tussen de kationen en het kleimineraal electrostatische krachten aanwezig, welke juist in een aantrekking resulteren. Als gevolg van deze wisselwerking ontstaat rond

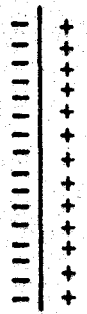


Fig. 4^a

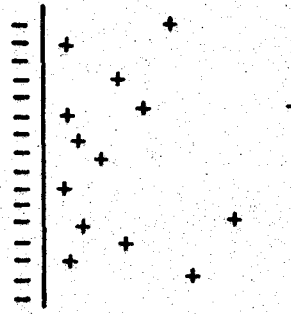


Fig. 4^b

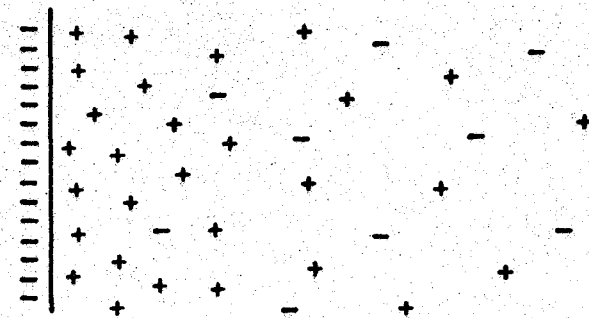


Fig. 4^c

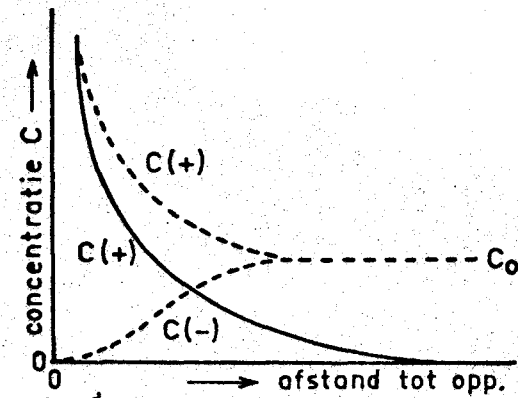


Fig. 4^d

Fig. 4. Modelvoorstelling van de elektrische dubbellaag.

- a) aan het oppervlak van droge zoutvrije klei.
- b) bij zoutvrije klei in water (suspensie).
- c) bij klei in een zoutoplossing (suspensie)
- d) het concentratieverloop met de afstand bij een zoutvrije klei-suspensie (doorgetrokken lijn) en bij een suspensie in evenwicht met een zoutoplossing (gebroken lijn).

het kleimineraal een atmosferische verdeling van kationen, die steeds ijler wordt naarmate de afstand tot het kleimineraal toeneemt (zie fig. 4). Deze concentratie verdeling wordt wel de elektrische of de diffuse dubbellaag genoemd, waarbij de ene laag bestaat uit het negatief geladen kleimineraaloppervlak en de andere uit de geadsorbeerde kationen.

De uitgestrektheid van de dubbellaag, dit is de afstand waarover de kationen concentratie groter is dan die in de oplossing, wordt bepaald door de waardigheid van de geadsorbeerde kationen en de zoutconcentratie in de oplossing. Een tweewaardig kation, zoals Ca^{2+} , wordt krachtiger door het kleimineraal aangetrokken dan een éénwaardig kation, zoals Na^+ , hetgeen resulteert in een geringere uitgestrektheid van de diffuse dubbellaag. Anderzins zal de neiging van de geadsorbeerde kationen om zich gelijkmatig over de vloeistof te verdelen groter zijn naarmate de concentratie van de oplossing lager is (een groot concentratie verschil geeft een grote neiging tot diffusie), hetgeen resulteert in een grotere uitgestrektheid van de diffuse dubbellaag.

Samenvattend zal de diffuse dubbellaag van een natriumklei (klei waarvan het adsorptiecomplex is bezet met Na^+) in gedestilleerd water een aanzienlijk grotere uitgestrektheid bezitten dan een calciumklei in een geconcentreerde zoutoplossing.

In een oplossing welke verschillende kationen bevat, zal een klei de kationen met de hoogste waardigheid preferent adsorberen. Dit betekent dat de diffuse dubbellaag naar verhouding meer meerwaardige kationen zal bevatten dan de oplossing. De preferente adsorptie van kationen kan als volgt worden samengevat:

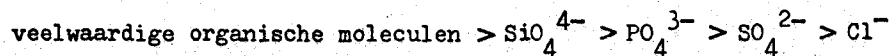


Indien de samenstelling van de evenwichtsooplossing wordt veranderd zal ook de samenstelling van de elektrische dubbellaag veranderen. Een nieuw evenwicht stelt zich evenwel in het algemeen spoedig in.

3.4.2. Anionen adsorptie

Zoals reeds genoemd komt aan de randen van een kleimineraal een geringe, pH afhankelijke lading voor. Bij lage pH is deze lading positief, bij hoge pH negatief. Dit heeft tot gevolg dat alleen bij lage pH waarden een (geringe) adsorptie van anionen aan de randen van de kleiplaatjes mogelijk is.

Op analoge wijze als voor de kationen is ook voor de anionen een voorkeursreeks op te stellen:



3.4.3. Zwelling bij wateropname

Zoals reeds is aangeduid zal een kleimineraal dat in contact met water wordt gebracht trachten een volledige diffuse dubbellaag te vormen. Bij montmorilloniet zullen zowel de kationen aan het uitwendige als het inwendige oppervlak van de kleipakketjes zich met water omhullen. De inwendige wateropname heeft tot gevolg dat de elementaire TOT plaatjes uiteen worden gedrukt en dit resulteert in zwelling. De elementaire plaatjes kunnen daarbij los van elkaar komen. Bij illiet treedt geen inwendige wateropname op. Het ontbreken hiervan wordt veroorzaakt door de sterke electrostatische aantrekking bij dit mineraal tussen de geadsorbeerde kationen en de twee aangrenzende geladen elementaire plaatjes. Bij kaoliniet treedt isomorfe vervanging nagenoeg niet op. De weinige compenserende kationen bevinden zich uitsluitend aan het uitwendige oppervlak van de TO-pakketjes. Illiet en kaoliniet zwellen dientengevolge bij bevochtiging niet of nauwelijks op.

In onderstaande tabel zijn de eigenschappen van de besproken kleimineralen samengevat (Bolt e.a., 1969; Grim, 1962):

Kleimineraal	specifiek oppervlak m ² /g	ladingsdichtheid me/cm ²	adsorptiecapaciteit me/100 g
montmorilloniet	400 - 800	1 x 10 ⁻⁷	80 - 150
illiet	50 - 200	3 x 10 ⁻⁷	10 - 40
kaoliniet	1 - 40	2 x 10 ⁻⁷	3 - 15
attapulgit			20 - 30

3.4.4. Flocculatie en peptisatie

Flocculatie of coagulatie noemt men het verschijnsel dat oorspronkelijk dispers in water verdeelde kleideeltjes tot vlokken samenklonteren en uitzakken. Het herstellen van de oorspronkelijke disperse verdeling van

de kleideeltjes wordt peptisatie genoemd.

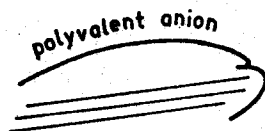
Flocculatie treedt op wanneer de kleiplaatjes elkaar dicht naderen waardoor bindende electrostatische krachten ontstaan tussen de positief geladen randen van de kleiplaatjes en de negatief geladen plaatoppervlakken (kaartenhuisstructuur). Ook kunnen de kleiplaatjes zich evenwijdig aan elkaar rangschikken (kaartenpakstructuur), waarbij de bindende krachten worden bewerkstelligd door o.a. Van der Waalskrachten. Een en ander is slechts mogelijk indien de uitgestrektheid van de diffuse dubbellaag rondom de kleideeltjes gering is waardoor de deeltjes elkaar kunnen naderen. Dit is het geval wanneer het adsorptiecomplex is bezet met hoogwaardige kationen (b.v. Ca^{2+}) of de oplossing een hoge concentratie bezit.

Bij flocculatie treedt in de kleisuspensie een scheiding op: heldere vloeistof bovenin en bezinksel onderin.

Peptisatie wordt bereikt indien het adsorptiecomplex wordt bezet door een laagwaardig kation (Na^+) en de concentratie in de oplossing gering is. Onder deze omstandigheden is namelijk de diffuse dubbellaag het meest uitgestrekt en worden de deeltjes verhinderd zich tot binnen de onderlinge aantrekkende invloedssfeer te naderen.

Een hoge pH bevordert de peptisatie. Bij een hoge pH wordt namelijk de randlading van de kleiplaatjes negatief, waardoor eventuele aantrekkende electrostatische krachten worden teniet gedaan. Hoogwaardige organische moleculen of polyfosfaten hebben een soortgelijk effect. De polyvalente, volumineuze anionen zullen zich aan positieve randen hechten, terwijl slechts enkele van de vele negatieve ladingen van deze anionen voldoende zijn om de randlading te neutraliseren. Dit heeft tot gevolg dat negatieve wolken aan de randen van de kleiplaatjes worden gevormd, waardoor het gehele deeltje een negatieve lading krijgt. De hieruit voortvloeiende onderlinge afstoting van de deeltjes resulteert in een homogene, disperse verdeling van de kleiplaatjes in de suspensie. Vanwege het geringe randoppervlak van de kleiplaatjes is de adsorptiecapaciteit voor anionen klein waardoor men kan volstaan met kleine hoeveelheden van peptiserende middelen.

Bij gebruik van een Na-zout met een polyvalent anion blijkt een kleiwater suspensie een merkwaardige eigenschap te hebben verkregen: zij is tot op zekere hoogte immuun geworden tegen de invloed van een verhoogde NaCl concentratie welke anders uitvlokking veroorzaakt zou hebben (concentratieverhoging). De polyvalente anionen blijken te fungeren als schutcolloïden. Het verschijnsel kan als volgt worden



verklaard: een polyvalent anion hecht zich aan de rand van het kleideeltje; de anionwolk bereidt zich uit over een groot deel van het oppervlak en beschut de diffuse dubbellaag tegen de hoge zoutconcentratie. Voegt men aan een klei-water suspensie éérst NaCl toe en vervolgens het polyvalente Na-zout, dan blijkt van het anion een geringere beschuttende werking uit te gaan: het krijgt minder gelegenheid zich aan de randen te hechten. Hieruit blijkt dat de volgorde van toevoeging van belang is bij de chemische behandeling van klei-water systemen en/of boorspoelingen.

Zoals reeds genoemd bevordert een hoge pH de peptisatie. Naast de gegeven verklaring is ook het volgende van belang: bij hoge pH (NaOH toevoeging) slaan slecht oplosbare hydroxyden neer waardoor vreemde (meerwaardige) kationen vervangen worden door Na^+ . Dit resulteert in een grotere uitgesterktheid van de diffuse dubbellaag en in peptisatie. Hetzelfde kan worden bereikt door toevoeging van Na_2CO_3 of NaHCO_3 . In de praktijk vindt peptisatie van een boorspoeling plaats in twee achtereenvolgende stappen:

- 1^e: vervanging van vreemde kationen (Ca^{2+} , Mg^{2+} , H^+) door Na^+ .
Gebruikelijke chemicaliën voor dit doel: NaOH, Na_2CO_3 ,
 NaHCO_3 en Na_2SiO_3
- 2^e: toevoeging van eigenlijke "thinners", zoals Quebracho, Kembreak en XP₋₂₀.

3.4.5. Thixotropie en gelsterkte

De zwakke bindingen die in een klei-water systeem voor enige samenhang (kaartenhuisstructuur) zorgen, worden verbroken zodra de suspensie wordt geroerd. Het systeem wordt dan "dunner" vloeibaar (de viscositeit wordt geringer). Is het klei-water systeem in rust dan zal de structuur zich weer ontwikkelen en de gelsterkte toenemen. Het verschijnsel dat de samenhang (viscositeit) door beroering kan veranderen wordt thixotropie genoemd.

4. CONTROLE EN REGELING DER SPOELINGEIGENSCHAPPEN

4.1. Algemeen

Om een boorspoeling in staat te stellen haar diverse functies naar behoren te vervullen, moeten verschillende spoelingeigenschappen geregeld worden gecontroleerd en aangepast. De functies stellen soms tegenstrijdige eisen aan de spoelingeigenschappen. Een optimale combinatie van de eigenschappen tracht men te bereiken door toevoeging van veelal chemische actieve stoffen aan het basissysteem. De chemische behandeling is voornamelijk gericht op de beïnvloeding van het elektrostatische gedrag van de kleideeltjes in de spoeling, waarover reeds in het vorige hoofdstuk werd gesproken.

De voornaamste spoelingeigenschappen worden gekarakteriseerd door de volgende grootheden:

- stabiliteit
- viskositeit, vloeigrens, thixotropie
- soortelijk gewicht
- afpleisterend vermogen.

4.2. Stabiliteit

De boorspoeling dient onder alle omstandigheden stabiel te zijn, dat wil zeggen het gesuspendeerde materiaal (klei, boorgruis, eventueel bariet) moet in suspensie worden gehouden. Bij onvoldoende stabiliteit kunnen zware deeltjes uitzakken (bodemuitzakking) of kan een heldere kolom water ontstaan boven de suspensie (topuitzakking).

Nadelige gevolgen van een slechte stabiliteit van de spoeling kunnen zich manifesteren bij onderbreking van de spoelingcirculatie: instroming van formatiewater tengevolge van het uitzakken van de vaste deeltjes en instorting van het boorgat tengevolge van de instroming en het onvoldoende uitoefenen van tegendruk op het gesteente.

Bodemuitzakking kan worden bestreden door verbetering van de "kaartenhuis" structuur van de spoeling. Dit is mogelijk door verhoging van het gehalte aan colloïdale klei (bentoniet). Toevoeging van hydrofiële macromoleculen zoals carboxy methyl cellulose (CMC) en zetmeelderivaten ("Flocgel", "My-Lo-Jel") geven eveneens een verbetering in de structuur. De thixotropie zal door toevoeging van bentoniet worden vergroot, door de toevoeging van de organische produkten nauwelijks. Enige

thixotropie is vereist, een hoge thixotropie is echter ongewenst vanwege de afscheiding van het boorgruis bovengronds.

Topuitzakking is het gevolg van een te geringe dispersie in de suspensie. Het kan worden bestreden door peptisatie (zie hoofdstuk 3.4.4.). Bekende peptisatoren ("thinners") zijn natrium polyfosfaten ("Calgon"), tanninen ("Quebracho"), lignosulfonaten ("Kembreak", "Spersene", "Q-broxin", "Unical"), ligninen ("XP 20") en diverse oppervlak-actieve stoffen. Dispersie bevordert het afpleisterend vermogen.

Controle van de stabiliteit van een spoeling is mogelijk door een spoelingmonster 24 uur te laten staan in een 250 ml maatglas, diameter 37,5 mm, zoals wordt aanbevolen in de gestandaardiseerde test-procedure voor boorspoelingen van het "American Petroleum Institute" (A.P.I.).

4.3. Viskositeit, vloeigrens en thixotropie

De vloeibaarheidseigenschappen welke bepaald worden door de viskositeit, vloeigrens en thixotropie spelen een belangrijke rol in de verpompaarheid van de spoeling en in de verwijdering van het boorgruis uit het boorgat. Een boorspoeling gedraagt zich als regel niet als een ware (Newtonse) vloeistof, maar als een pseudoplastische vloeistof, welke pas gaat stromen boven een zekere vloeigrens. De vloeibaarheids-grootheid dynamische viskositeit, die het viskeuze gedrag van Newtonse vloeistoffen beschrijft, kan voor pseudoplastische vloeistoffen niet worden gehanteerd. Men gebruikt hier de begrippen plastische viskositeit, schijnbare viskositeit, zwichtspanning en Binghamwaarde van de schuifspanning (Bingham yield value). Ter verduidelijking:

$$\text{Voor Newtonse vloeistoffen geldt: } \tau = \eta \cdot \frac{dv}{dz}$$

$$\text{Voor pseudoplastische vloeistoffen geldt: } \tau - \tau_B = \eta_p \cdot \frac{dv}{dz}$$

- τ = schuifspanning
- η = viskositeit (dynamische)
- $\frac{dv}{dz}$ = snelheidsgradiënt
- τ_B = Binghamwaarde
- η_p = plastische viskositeit

De schuifspanning waarbij de pseudoplastische vloeistof in beweging komt, heet de vloeigrens of zwichspanning (τ_z). Deze kan al naar gelang de grootte van de thixotropie met de tijd variëren. Een en ander is weergegeven in figuur 5.

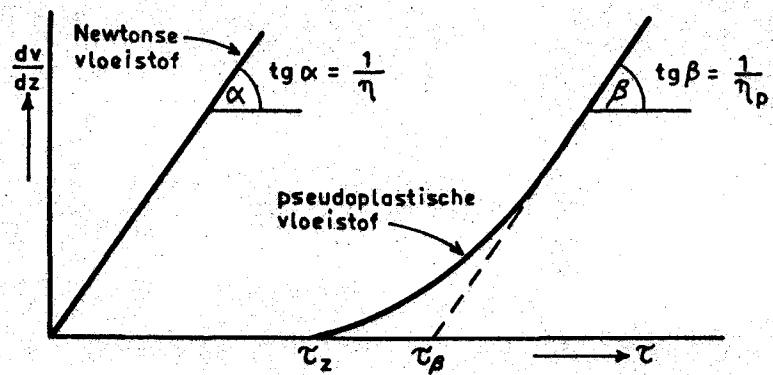
De schijnbare viskositeit is de dynamische viskositeit die de pseudo-plastische vloeistof schijnt te hebben en wordt door zowel de Bingham-waarde als de plastische viskositeit beïnvloed. De schijnbare viskositeit wordt meestal gemeten aan de hand van de uitstroomsnelheid uit een trechter.

De viskositeit van een suspensie van een inerte stof (b.v. zand) in water heeft het karakter van die van een Newtonse vloeistof; de grootte ervan is alleen afhankelijk van de wrijvingen tussen de deeltjes onderling en met de continue fase, en kan worden benaderd met de volgende formule:

$$\eta = \eta_0 (1 + k\varphi)$$

- waarin: η = viskositeit suspensie
 η_0 = viskositeit continue fase (hier: water)
 k = constante afhankelijk van s.g., grootte en vorm van de deeltjes
 φ = fraktie van het totale volume door de deeltjes in beslag genomen.

De viskositeit van een suspensie van colloïdale klei in water wordt naast de relatief geringe wrijvingskrachten daarentegen hoofdzakelijk bepaald door elektrostatische en Van der Waals-krachten tussen de kleideeltjes. De sterkte van de structuur en dus de grootte van de



Stromingsdiagram voor Newtonse en pseudoplastische vloeistoffen.

Fig. 5.

viskositeit is afhankelijk van de concentratie van de kleideeltjes en van het type klei. Bijlagen 1 tot en met 5 geven het verband weer tussen de concentratie van verschillende in Nederland gebruikte bentonietprodukten en de schijnbare viskositeit, de Marsh Funnel viskositeit, de plastische viskositeit en de Binghamwaarde zoals in het kader van het spoelingsonderzoek in 1972 aan de hand van laboratoriumproeven door DGV-TNO werd bepaald. De bijlagen laten zien dat tussen de produkten grote verschillen bestaan, die het gevolg moeten zijn van verschil in chemische structuur van de kleideeltjes. Het zij evenwel opgemerkt dat de toenemende wrijvingsweerstand bij concentratieverhoging hier een relatief grote invloed op de viskositeit uitoefenen omdat bij concentratieverhoging alléén geen sprake kan zijn van een sterke chemische verandering van het systeem. De viskositeit van een boerspoeling tenslotte wordt zowel bepaald door de interne wrijvingsweerstand als door de elektrochemische krachten. Het totale vloeibaarheidsgedrag van een spoeling is dientengevolge opgebouwd uit twee componenten: η_p (interne wrijving) en τ_B (elektrochemische krachten). Metingen van deze vloeibaarheidsgrootheden zijn derhalve uitermate belangrijk in het opsporen van de oorzaak van een te grote (schijnbare) viskositeit. Blijkt dat een toename van de viskositeit het gevolg is van verhoging van η_p dan zal het gehalte aan vaste deeltjes (klei, boorgruis) in de spoeling te groot zijn; wordt daarentegen de viskositeit uitsluitend beïnvloed door τ_B dan zal de oorzaak een verandering zijn in de chemische samenstelling, zoals door contaminatie van gips, anhydriet, zout of cement. Verlaging van η_p kan worden verkregen door verdunning van de spoeling met water, of door de spoeling te leiden over speciale zeven teneinde het zandgehalte te verlagen. Vermindering van τ_B is mogelijk door peptisatie. Verdunning met water teneinde τ_B te verlagen is alleen zinvol wanneer de concentraties van de vaste deeltjes relatief laag zijn. Bij hoge concentraties moet namelijk veel verdund worden waardoor de overige spoelingeigenschappen te sterk worden beïnvloed. Nadelige gevolgen van een te grote viskositeit en gelsterkte zijn:

1. de noodzaak van grote pompdrukken om de gelsterkte te breken en om de spoeling te laten circuleren.

2. optreden van zuigeffekten bij het optrekken van het boorgereedschap, hetgeen kan leiden tot instroming van formatiewater en instorting van het boorgat
3. overmatige slijtage van het boorgereedschap indien de hoge viskositeit veroorzaakt wordt door een hoog zandgehalte.

Controle van de viskositeit en thixotropie is mogelijk met behulp van een "Marsh Funnel" (fig. 6) of een Fann V-G meter (fig. 7). De "Marsh Funnel" wordt universeel gebruikt voor het testen van de viskositeit in het veld. Ze bestaat uit een trechter van gestandaardiseerde afmetingen voorzien van een uitstroomcapillair. De tijd waarin de spoeling door de trechter stroomt, is een maat voor de schijnbare viskositeit en wordt opgegeven in seconden Marsh Funnel. In het algemeen geldt dat de Marsh-Funnel viskositeit voor normale spoelingen mag variëren van 30-40 seconden en voor verzwaarde spoelingen van 40-50 seconden.

De Fann V-G wordt veelal gebruikt voor het bepalen van de fundamentele viskositeitsgrootheden in het laboratorium. Ze bezit twee cylinders, waarvan de buitenste met een konstante rotatiesnelheid kan worden aangedreven. De binnenste cylinder ondervindt door de meeroterende spoeling een torsie: rotatie wordt echter verhinderd door een torsie-veer. Uit de grootte van de torsiehoek bij twee verschillende rotatiesnelheden kunnen η_p en τ_B direkt worden berekend. De thixotropie kan worden bepaald door de verandering in gelsterkte te meten na een zekere periode van rust: volgens API standaard testprocedure na resp. 10 seconden en 10 minuten.

De thixotropie moet in de praktijk laag worden gehouden. Alhoewel het opstijven bij stilstand gunstig is in verband met het uitzakken van boorgruis in het boorgat, is een grote gelsterkte ongewenst vanwege de noodzakelijke grote pompcapaciteit om de spoelingcirculatie op gang te brengen. Spoelingen met s.g. tot 1,2 fungeren bevredigend bij 10 min. gelsterkten tot ca. 12 lbs/100 ft².



Fig.6 "Marsh Funnel"



Fig.7 "Fann V-G meter"

4.4. Soortelijk gewicht

Het soortelijk gewicht van de spoeling dient binnen bepaalde grenzen te liggen teneinde instroming van grondwater en het optreden van naval te voorkomen. Regeling van het s.g. vindt in eerste instantie plaats door variatie in het kleigehalte. In verband met de vloeibaarheids-eigenschappen wordt het s.g. met klei tot maximaal 1,25 opgevoerd. Voor verdere verhoging wordt bijna altijd bariet (s.g. 4,25) gebruikt. Een goede spoeling om een boring mee te beginnen heeft een s.g. van ca. 1,04.

In de praktijk neemt het s.g. van de spoeling tijdens de boring toe vanwege de opname van klei en zand uit de doorboorde lagen. Bij deze wijze van verzwaring van de spoeling is het soms nodig peptisatoren toe te voegen om de viskositeit te verlagen.

Een praktisch apparaat om het zandgehalte van een spoeling te meten staat afgebeeld in figuur 8. Met deze set (Baroïd) kan het zandgehalte rechtstreeks in volume-procenten worden afgelezen. In de praktijk tracht men het zandgehalte beneden 2 à 3% te houden. Ter controle van het s.g. in het veld wordt veelal gebruik gemaakt van de "Baroïd Mud Balance" (figuur 9). Deze balans heeft een nauwkeurigheid van ca. 0,01. Areometers vinden minder vaak toepassing.

4.5. Afpleisterend vermogen

In hoofdstuk 2.6. werd reeds ingegaan op de noodzaak van een goede afpleistering van het boorgat. De afpleistering kan in het algemeen in de praktijk worden verbeterd door toevoeging van colloïdale stoffen zoals bentoniet of C.M.C.. Peptisatie bevordert eveneens de afpleistering. Worden grove zanden of grindlagen doorboord dan is het mogelijk dat de vorming van een afpleisterende spoelingkoek niet optreedt en de spoeling in de formatie wegloopt. Men kan deze spoelingsverliezen slechts verhinderen door grovere deeltjes aan de spoeling toe te voegen. Men gebruikt hiervoor plaatvormige, vezelachtige en gelatineuze stoffen zoals respektievelijk mica, asbest en zetmeelkorrels. In zeer ernstige gevallen wordt een cementbrij in de poreuse formatie gepompt.

Controle van het afpleisterend vermogen kan in het laboratorium worden uitgeoefend met behulp van de "Barold Wall-Building Tester" (fig. 10). Volgens de API standaard testprocedure wordt gedurende 30 minuten het filtraatverlies gemeten van een spoelingmonster in een stalen cylinder, op de bodem waarvan een metaalgaasje en filtreerpapiertje is gelegd, bij een overdruk van 7 atm. In het algemeen geldt dat een filtraatverlies van ca. 20 ml na 30 minuten nog redelijk is. Een verlies van 10 ml of minder is zeer goed. De pleisterkoek behoort niet dikker te zijn dan 2 mm.

Men realiseert zich dat de situatie aan de boorgatwand verschilt met die in de Wall-Building Tester. Naast het feit dat variatie in de doorlatendheid van de formaties niet in de Wall-Building Tester kan worden nagebootst, heersen in het boorgat dynamische condities en in de laboratoriumtest nagenoeg statische. Tijdens de proef zal de filterkoek voortdurend dikker worden en de hoeveelheid filtraat per minuut afnemen.

In het boorgat echter wordt de spoelingkoek bloot gesteld aan de spoelingstroom en wordt een evenwicht benaderd tussen erosie en afpleistering. Pas wanneer de circulatie gestopt wordt, groeit de filterkoek weer aan. Het filtraatverlies zal dus steeds voortgaan tijdens de boring, zij het dan ook in geringe mate. Er zijn nog andere factoren die oorzaak zijn dat de pleisterproef weinig overeenkomst vertoont met de situatie in het boorgat. Bij de pleisterproeven blijkt dat de afpleistering van een goede spoeling snel terugloopt als deze met zand of boorgruis wordt verontreinigd. De kleiplaatjes van een gepeptiseerde spoeling dekken de permeabele laag dakpansgewijs af. Ten opzichte van de plaatjes zijn zandkorrels en boorgruis enorme rotsblokken die de afpleistering verstoren. Aangezien gedurende het boren iedere spoeling zand en gruis bevat, zal de afpleistering ondergronds te wensen overlaten. In dit verband is een snelle verwijdering van zand en boorgruis uit de spoeling bovengronds belangrijk.

Het is duidelijk dat er geen eenvoudige correlatie bestaat tussen het statische en het dynamische filtratiegedrag van een spoeling. Er bestaat evenwel geen eenvoudig apparaat waarmee de dynamische filtratie kan worden bepaald. Men is slechts in staat op grond van de resultaten van laboratoriumproeven richtlijnen te geven voor de

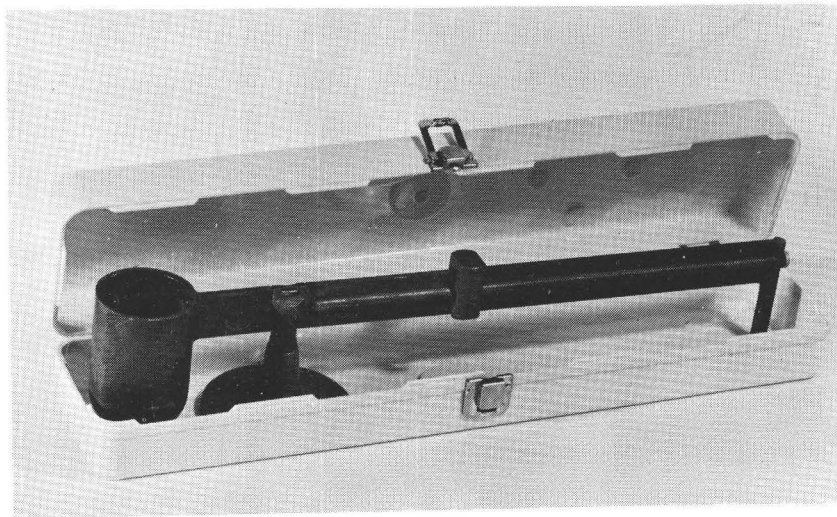


Fig.9 "Mud balance"

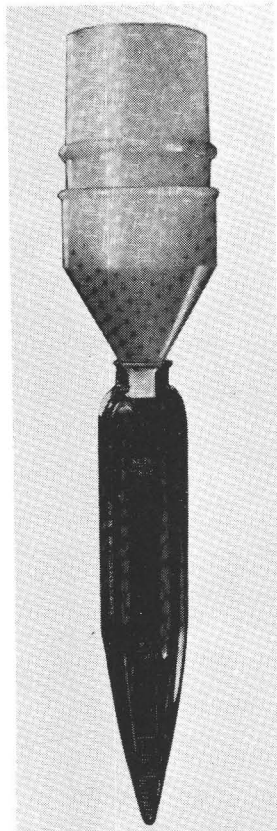


Fig.8 Set ter bepaling van het zandgehalte



Fig.10 "Wall-building tester"

effektiviteit van bepaalde chemische behandelingen.

Het afpleisterend vermogen van de meest gebruikte bentonietprodukten, zoals in het kader van het spoelingonderzoek door DGV-TNO werd bepaald, is weergegeven in bijlage 5.

4.6. Spoelingtonsten in het veld

Omdat de eigenschappen van een spoeling gedurende de boring aan veranderingen onderhevig zijn, moeten zij regelmatig tijdens de boorvordering worden gecontroleerd. In diepe, zeer kostbare boringen (t.b.v. oliewinning) worden bijvoorbeeld na regelmatige intervallen gemeten: η_p , τ_B , schijnbare viskositeit, gelsterkte, s.g., filtraatverlies, zandgehalte, percentage vaste deeltjes, pH, elektrische weerstand, chloridegehalte, alkaniteit en kalkgehalte, totale hardheid en kationuitwisselend vermogen. Hoewel bij boringen ten behoeve van de waterwinning, de spoelingeigenschappen niet deze aandacht behoeven, is niettemin van belang dat controle op enkele eigenschappen wordt uitgeoefend teneinde ongewenste veranderingen in het totale gedrag van de spoeling te onderkennen en te corrigeren.

Voor het meten van de schijnbare viskositeit, het s.g., het filtraatverlies en het zandgehalte zijn apparaten ontworpen speciaal voor gebruik in het veld, te weten respectievelijk de Marsh Funnel (zie 4.3.), de Baroïd Mud Balance (zie 4.4.), de Baroïd Wall-Building Tester (zie 4.5.) en de zand-zeefset (zie 4.4.). Het zij opgemerkt dat het gebruik van de Wall-Building Tester toch enige faciliteiten bij de boring vraagt. Voor het meten van de pH kan gebruik worden gemaakt van diverse soorten papieren indikatorstrookjes. Hoewel de pH geen direkte informatie verstrekt over het gedrag van de spoeling tijdens het boren, kan deze wel worden gebruikt als indikator bij behandelingen ter regeling van de viskositeit, gelsterkte of filtraatverlies. In hoofdstuk 7. wordt het gebied genoemd waarbinnen de pH normaliter voor verschillende spoelingtypen varieert.

Naast de controlebepalingen tijdens de boring van de schijnbare viskositeit, het s.g., de pH en eventueel het filtraatverlies, welke van direkt belang zijn voor het verloop der boorwerkzaamheden, verdient het aanbeveling om vast te leggen met welk spoelingtype wordt geboord, wat de spoelingsrediënten zijn, in welke hoeveelheden deze zijn toegevoegd, hoe groot de spoelingsverliezen zijn en welke moeilijkheden zich bij het boren voordoen. Met behulp van een betrouwbare en over-

5. SAMENSTELLING VAN KLEILAGEN IN NEDERLAND

5.1. Algemeen

Kleilagen zijn opgebouwd uit deeltjes die bestaan uit kleimineralen (met inbegrip van glimmers), niet-kleimineralen en organische stoffen. Naast de samenstelling en hoeveelheid van de verschillende mineralen kunnen ook de deeltjesgrootteverdeling en de ionbezetting van de kleimineralen variëren. De kleimineralen die in de Nederlandse kleien voorkomen, zijn voornamelijk tussenvormen van illiet en montmorilloniet (intermediaten) met daarnaast geringe hoeveelheden kaolinite en chloriet. Kwarts vormt vaak een belangrijk deel van de kleilagen, terwijl ook voorkomen: veldspaten, carbonaten, ijzerverbindingen en organische stoffen.

5.2. Onderzoekmethoden

Er bestaan verschillende methoden om kleien te onderzoeken.

Mineralogisch onderzoek

- a. röntgen-diffractie
- b. differentiaal-thermische en thermogravimetrische analyse
- c. dilatometrie.

Chemisch onderzoek

- a. totaal analyse, gloeiverlies, humus, pH, s.g.
- b. oplosbaarheid in 25% HCl
- c. oplosbaarheid in water
- d. ionbezetting en ionenuitwisselend vermogen.

Fysisch onderzoek

- a. granulometrie
- b. specifiek oppervlak (totale oppervlak van de deeltjes per gram monster)
- c. evenwichtswatergehalte bij verschillende relatieve vochtigheden
- d. Atterberg konstanten: vloeigrens, uitrolgrens, plasticiteitsindex
- e. verband tussen aanmaakwatergehalte en Pfefferkorn stuikhoogte
- d. uitzetting door vocht opneming bij 75% relatieve vochtigheid.

overschaduw te worden door de variatie in de hoeveelheden kleimineralen in de monsters. Op grond van de resultaten van het onderzoek lijkt de veronderstelling gerechtvaardigd dat de combinatie van de granulometrische samenstelling (t.w. % $< 10\mu$) met het specifiek oppervlak overwegend karakteristiek is voor een klei en derhalve bepalend zal zijn voor het gedrag van een kleilaag bij het doorboren. Ter illustratie wordt verwezen naar figuur 11 waaruit de uitzonderlijke positie van de potklei (monster 3) ten opzichte van vele andere, hoofdzakelijk Nederlandse kleien, is af te lezen.

Hoe verder de punten bij een bepaald percentage $< 10\mu$ naar rechts liggen des te rijker zullen de monsters aan montmorilloniet zijn, hoe verder naar links des te rijker aan kaoliniet.

De potklei kenmerkt zich naast een zeer hoog gehalte aan deeltjes $< 10\mu$ (klei) ook door een vrij hoog gehalte aan montmorilloniet. Monster 34, afkomstig uit een zeer vette klei gevonden in een kleigroeve nabij Zevenbergen (N.-B.), bevat het hoogste gehalte aan klei alsmede het relatief hoogste gehalte aan montmorilloniet. Monsters relatief rijk aan kaoliniet zijn nr. 14 en 9, respectievelijk afkomstig uit een glaciale klei uit Noorwegen en Brunssumse klei nabij Tegelen (Zuid-Limburg). De kleimonsters 15 en 1 gelijken het meest op de potklei en zijn respectievelijk gevonden in komklei in de Bommelerwaard (Velddriel) en Roodoornklei in de omgeving van Marum (Gr.).

Bijlage 8 geeft een tabellarisch overzicht van de onderzochte kleimonsters en de belangrijkste meetresultaten. Voor gedetailleerde informatie betreffende de meetresultaten en beschrijving van de onderzoekingen aan de kleimonsters wordt verwezen naar de betreffende publikatie.

5.4. Samenvatting

Resumerend kan gezegd worden dat de samenstelling van de Nederlandse kleilagen, voor zover deze van belang is voor de bepaling van het gedrag bij het doorboren van deze lagen, voldoende gekarakteriseerd wordt door twee eigenschappen: gehalte aan deeltjes $< 10\mu$ en het specifiek oppervlak. Met deze twee grootheden ligt het totaalgehalte aan montmorilloniet vast. Vanwege de bekende zwellende eigenschappen van dit mineraal zullen kleilagen rijk aan montmorilloniet problemen tijdens het boren kunnen geven. Dit wordt duidelijk bevestigd door de ervaringen bij het boren door potklei.

6. OVERZICHT SPOELINGINGREDIENTEN

6.1. Natuurlijke kleien

Onder natuurlijke kleien worden verstaan kleien afkomstig van lokale ontsluitingen en kleien die bij het doorboren in de boorspoeling worden opgenomen. Ze bestaan hoofdzakelijk uit illiet en intermediaten terwijl ook kaoliniet aanwezig kan zijn. De kleimineralen zijn veelal geassocieerd met fijn zand en silt voornamelijk bestaand uit kwarts. De kleien bezitten meestal geringe colloïdale eigenschappen, dragen wel bij tot verhoging van het s.g. van de spoeling doch verschaffen de spoeling slechte afpleisterende eigenschappen. Dit laatste kan resulteren in het diep indringen van spoeling en/of spoelingfiltraat in potentiële waterproductieve lagen waardoor een "skineffect" kan optreden.

Kleipoeders zoals "Borex", "Gram", "F", "T" en "BA306", welke vaak aan boorspoelingen worden toegevoegd, moeten tot de natuurlijke kleien worden gerekend. Zij zijn uit lokale ontsluitingen in Nederland en Duitsland afkomstig. Een nadeel van het gebruik van kleipoeders is, dat stratigrafisch onderzoek aan boorgruismonsters door middel van pollenanalyse zeer wordt bemoeilijkt. De polleninhoud van de kleipoeders wordt in de boorspoeling gemengd met die uit de doorboorde lagen en een juiste interpretatie van de gevonden associaties is dan niet of moeilijk meer te geven.

6.2. Bentonieten

Bentoniet is de handelsnaam van een natuurprodukt dat hoofdzakelijk bestaat uit montmorilloniet. In Amerika en Canada komen grote afzettingen voor, terwijl in vele andere landen o.a. Frankrijk, Duitsland en Italië eveneens afzettingen te vinden zijn. In de olie-industrie wordt hoofdzakelijk bentoniet gebruikt afkomstig uit de staat Wyoming. Deze bentoniet bezit sterke colloïdale eigenschappen omdat het adsorptiecomplex van de kleimineralen voor een groot deel door Na wordt bezet. Veel van de bentonieten die buiten Wyoming gewonnen worden zijn Ca-bentonieten en bezitten geringere colloïdale eigenschappen. De laatste jaren houdt men zich intensief bezig met de

Complexe fosfaten hebben een sterke verdunnende werking op een beto-
niet-suspensie. Toevoeging van 0,2-0,6 gram per liter spoeling geeft
vaak al een verlaging van de viskositeit. De volgende polyfosfaten
worden gebruikt:

- Na-hexametafosfaat , $(\text{NaPO}_3)_6$ (o.a. Calgon)
- tetra-Na-pyrofosfaat, $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$
- Na-zuur-pyrofosfaat , $\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$
- Na-tetrafosfaat , $\text{Na}_6\text{P}_4\text{O}_{13}$

Omdat complexe fosfaten het effect van Ca-ionen tegenwerken, kunnen
zij eveneens de contaminatie van geringe hoeveelheden anhydriet (CaSO_4),
gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en cement opvangen. Bij grotere Ca^{2+} -concentraties
gaat echter de werking verloren en treedt sterke verdikking op.
Polyfosfaten verliezen hun effectiviteit bij hoge temperaturen en hoge
zoutconcentraties en worden zelden gebruikt in spoelingen met een
 $\text{pH} > 10$. De pH van spoelingen welke behandeld zijn met fosfaten wordt
gehandhaafd tussen 7,5 en 9,5.

Tanninen zijn de meest gebruikte dispergerende middelen. Het zijn
extrakten van bepaalde houtsoorten; zo wordt Quebracho geëxtraheerd
uit de stam van de Quebrachoboom welke voornamelijk in Argentinië
groeit. Vooral in spoelingen met $\text{pH} > 10$ zijn tanninen effectief en
ze vinden daarom veel toepassing in kalkspoelingen (zie 7.5.). Bij
 $\text{pH} < 8$, hoge zoutconcentraties en hoge Ca^{2+} -gehalten verliezen de
tanninen hun werkzaamheid.

Vanwege het zure karakter van de tanninen en het feit dat het optimale
werkzaamheidsgebied boven een pH van 10 ligt, moeten ze altijd met een
voldoende hoeveelheid NaOH aan de spoeling worden toegevoegd. Quebracho
wordt in de praktijk gemengd met NaOH in de verhouding van 1:1 tot
4:1 gewichtsdelen.

Lignieten zijn humuszuren. Chemisch is weinig van deze vegetatie-
rottingsprodukten bekend, doch uit de praktijk blijkt dat het optimale
 pH -gebied ligt tussen 8,5 en 9,5. Evenals de tanninen moeten lignieten
altijd worden toegevoegd tesamen met NaOH om de werking ervan te stimu-
leren. Toevoeging aan de spoeling vindt veelal plaats in de verhouding

ondergaan zwelt het korrelige eindprodukt onder de meest uiteenlopende omstandigheden snel op en kan zodoende in alle typen spoelingen worden gebruikt. De binding van water enerzijds en de afdichting van kleine gaatjes in de spoelingskoek anderzijds maken dat de sponsachtige stijfselkorreltjes uitstekend helpen in de verlaging van het filtraatverlies.

CMC wordt in verscheidene kwaliteiten gefabriceerd, die in zuiverheid en gelvormende eigenschappen variëren. De zuivere vorm, die de grootste viskositeitsvergroting geeft, schijnt niet te gisten. Door substitutie van bepaalde groepen in de celluloseketting kunnen aan de polymeren speciale eigenschappen worden gegeven. Verschillende polymeren zijn ontwikkeld die goede resultaten boeken in de strijd tegen het zwellen en desintegreren van kleilagen. CMC is een effectief middel ter verlaging van het filtraatverlies van de meeste spoelingen, maar is het meest werkzaam in kalkspoelingen. In spoelingen met een NaCl-gehalte groter dan 50 g/l wordt de werkzaamheid evenwel minder.

Na-poly-acrylaat wordt soms als vervangingsmiddel van CMC gebruikt en wel met name in zoutwaterspoelingen. In spoelingen met Ca-verontreiniging voldoen deze synthetische polymeren niet, maar ze zijn, in tegenstelling tot CMC en stijfsel, wel stabiel bij hoge temperaturen.

Natuurlijke gommen, de kleverige, doorschijnende vloeistof die uit spleten of insnijdingen in sommige bomen vloeit, vormen met water een viskeuze colloïdale suspensie. Dankzij de speciale eigenschappen van deze suspensies gaan de meeste gommen het waterverlies sterk tegen. Toepassing vindt slechts op beperkte schaal plaats, hoewel de gommen in alle typen spoelingen effectief werkzaam zijn. De bekendste gommen zijn Ghatti en Karaya. Guar-gom vindt meer toepassing, maar dan als flocculatiemiddel in plaats van middel ter verbetering van de afpleistering.

Is overmatig spoelingsverlies het gevolg van het weglopen van de spoeling in grove zand- of grindlagen dan moeten stoffen worden toegevoegd die in staat zijn de grote poriën in de laag af te dichten. Hierop wordt in hoofdstuk 8.1. nader ingegaan.

7. OVERZICHT VAN ENKELE BELANGRIJKE SPOELINGTYPEN

7.1. Algemeen

Spoelingen kunnen op meerdere manieren worden ingedeeld, b.v. op hun colloïdale inhoud, pH, belangrijkste thinner of type aanmaakwater. Er bestaat geen gestandaardiseerde nomenclatuur voor de verschillende spoelings typen. Omdat de konsekvente doorvoering van een indeling van alle spoelingssoorten buiten het bestek van dit overzicht valt, worden hieronder slechts die typen omschreven welke van belang kunnen zijn in de waterwinning. De gekozen indeling maakt derhalve geen aanspraak op volledigheid.

7.2. Natuurlijke spoeling

Een natuurlijke spoeling kan worden gebruikt bij het boren van ondiepe gaten, waarbij de aangeboorde kleilagen het colloïdale suspensiemateriaal leveren. Over het algemeen vereisen deze spoelingen grote hoeveelheden water, zowel om het filtraat- en spoelingverlies te compenseren als om de viskositeit en het s.g. op een laag peil te houden. Worden weinig kleien doorboord dan kan bentoniet of natuurlijke klei worden toegevoegd.

Veelal worden boringen aangezet met een natuurlijke spoeling en al naar gelang de omstandigheden vroeg of laat gewijzigd in een der onderstaande typen. Is het aanmaakwater hard dan verdient het aanbeveling met soda (Na_2CO_3) de Ca onschadelijk te maken voordat bentoniet of klei wordt toegevoegd.

7.3. Fosfaatspoeling

Dit type spoeling wordt alleen gebruikt waar zacht aanmaakwater ter beschikking is (tot ca. 12°D) en waar kleien doorboord worden welke goede colloïdale eigenschappen aan de spoeling geven. De fosfaten moeten in kleine hoeveelheden worden gebruikt (max. 0,6 g/l), aangezien grote hoeveelheden een tegengesteld effect hebben. Meestal wordt bentoniet toegevoegd om de spoelingeigenschappen te verbeteren.

7.5. Kalkspoeling

Dit spoelings-type wordt gemaakt door kalk aan een natuurlijke of bentonietspoeling toe te voegen. De Ca flocculeert de klei en dit resulteert in een grote gelsterkte en een slechte afpleistering. Deflocculatie wordt bewerkstelligd door Quebracho, Ca-lignosulfaat of lignieten tezamen met NaOH; stijfsel of CMC wordt toegevoegd om het filtraatverlies te beperken. De spoeling dient een overmaat aan kalk te bevatten en voldoende NaOH om de oplosbaarheid en adsorptie van Ca te beperken tot waarden die een lage viscositeit en gelsterkte geven. Is genoeg NaOH aanwezig (pH = 12,5), dan zal toevoeging van extra kalk weinig effect hebben op de spoelingeigenschappen omdat in dat geval de oplosbaarheid van Ca beperkt is.

Kalkspoelingen zijn derhalve ongevoelig voor Ca-verontreinigingen en geven weinig problemen bij het boren door kleien (welke hoofdzakelijk Ca-houdend zijn, zie bijlage 8), omdat hydratatie en dispersie worden beperkt.

De samenstelling van een kalkspoeling varieert nogal. De Ca kan worden verkregen uit $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaSO_4 of cement. Toevoeging van deze stoffen aan de spoeling zal resulteren in verhoging van de viscositeit en gelsterkte. Daarom worden eerst NaOH en een thinner toegevoegd, veelal in de volgende hoeveelheden per liter spoeling:

NaOH	:	4 - 8 g/l
thinner	:	6 - 10 g/l
kalk	:	10 - 20 g/l

Kalkspoelingen kunnen zoutverontreinigingen opvangen tot een totale zoutconcentratie van ca. 50 g/l. Bij contaminatie van zout dient de pH regelmatig te worden gecontroleerd en op peil te worden gehouden. Verhoging van de Na-ionenconcentratie dringt namelijk het dissociatieevenwicht van NaOH terug en resulteert in een verlaging van de pH.

7.6. Zoutwaterspoeling

Voor zoutverontreinigingen tot ca. 50 g/l kan een kalkspoeling worden gebruikt. Bij nog hogere zoutconcentraties voldoet echter een bentonietspoeling niet langer en moet worden overgeschakeld op een attapulgietsklei. Deze klei behoudt zijn colloïdale eigenschappen ook in aanwezigheid van hoge elektrolytconcentraties. Het filtraatverlies wordt geregeld

8. SPOELINGPROBLEMEN IN DE PRAKTIJK EN HUN REMEDIES

8.1. Spoelingverlies

In normale gevallen geeft een dispers klei-water systeem een goede afpleistering. De permeabiliteit van de spoelingkoek is zeer gering terwijl de viskositeit en thixotropie van de spoeling laag blijven.

Hard en zout water hebben een ongunstige werking op de stabiliteit van het disperse systeem. Geringe hoeveelheden Ca en Mg kunnen onschadelijk worden gemaakt door NaHCO_3 of Na_2CO_3 . Schutcolloïden kunnen kleine hoeveelheden NaCl opvangen. CMC heeft in het algemeen een stabiliserende werking.

Bij het doorboren van grove zanden of grindlagen, waar van vorming van een spoelingkoek geen sprake kan zijn, verdient soms een geflocculeerd systeem de voorkeur. De verhoogde thixotropie en viskositeit van dit systeem vertragen de stroming in de formatie; het afpleisterend vermogen van de spoeling wordt echter geringer. Flocculatie is mogelijk door toevoeging van kalk (Ca(OH)_2), gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) of cement.

Zijn de spoelingverliezen aanzienlijk dan kan beter toevlucht worden genomen tot middelen die de afpleistering verbeteren. Gebruikt worden: mica, asbest, kleibrokken, cokes, stro, houtwol, erwten, bonen, rijst, katoen, katoenzaaddoppen, notedoppen, cellofaan, bietenpulp, zaden, mos, veren, cellulose vlokken, veen, graan, kurk, sponzen, vermicelli en allerlei soorten vezels. Vele van deze middelen zijn echter niet acceptabel bij boringen voor de waterwinning. De korrelgrootteverdeling kan erg belangrijk zijn. In het algemeen bevordert een grote korrelgroottespreiding de afdichting.

Omdat grove zanden en grindlagen vaak potentiële waterproductieve lagen zijn, moeten de problemen van het spoelingverlies bij het doorboren van deze afzettingen met de nodige aandacht worden bestreden. Het flocculeren van de spoeling en het gebruik van afpleisterende middelen zullen weliswaar het spoelingverlies kunnen terugdringen maar tevens een nageenough onherstelbare permeabiliteitsvermindering in de directe omgeving van het boorgat teweegbrengen. Het gebruik van organische producten, die na verloop van tijd (enkele dagen) ontbinden en derhalve weinig of geen verslechtering in de doorlatendheid veroorzaken, is uit productie-technisch oogpunt gezien aantrekkelijk, doch kan bij de waterwinning

deling rond het boorgat oorzaak is van een uitbreiding van deze micro-verbrotting en van het afkalven van de boorgatwand. Formules uit de boorgatmechanica geven aan dat het optreden van naval gereduceerd kan worden door verhoging van het s.g. van de spoeling. Neemt de vloeistofspanning in de kleien/schaliën toe tot waarden boven de hydrostatische, dan moet het s.g. zeer hoog worden opgevoerd. Omdat in het algemeen te weinig bekend is van de te doorboren kleien en verhoging van het s.g. van de spoeling weer verhoging van het spoelingverlies kan betekenen, zullen kleien, met name die met hoge vloeistofdrukken, altijd problemen blijven scheppen. Wel is bij herhaling gebleken dat formatie-naval aanzienlijk beperkt kan worden door vermindering van turbulentie in het boorgat. Verhoging van de viscositeit vermindert de turbulentie.

Meestal komen alleen in jonge formaties op geringe diepte zeer plastische kleien voor. Dergelijke kleien voldoen niet aan de wetten van de spanningsleer doch gedragen zich in principe als een vloeistof met s.g. > 1. Soms komt de klei in de vorm van kneedbare worsten met de spoeling aan de oppervlakte. Deze lagen kunnen het beste met een zware spoeling en grote snelheid worden doorboord. Het boorgat wordt slechts geleidelijk dichtgedrukt.

8.3. Overgang zoet-zout formatiewater

Zout (NaCl) heeft een schadelijke werking op de stabiliteit van een kleiwater spoeling. Het veroorzaakt bovendien een toename in de viscositeit en een verslechtering in het afpleisterend vermogen. Zolang het zoutgehalte kleiner is dan 10 g/l wordt veelal de kleispoeling gehandhaafd en de stabiliteit met CMC op peil gehouden. Wordt het gehalte groter, dan is het noodzakelijk dat de spoeling wordt gewijzigd in één die ongevoeliger is voor zout-contaminatie.

Een quebracho-spoeling (zie 7.4.) is ongevoelig voor zoutverontreinigingen tot ca. 8 g/l. Een kalkspoeling (zie 7.5.) kan zoutverontreiniging opvangen tot ca. 50 g/l.

Complexe fosfaten hebben een sterke verdunnende werking op een beto-
niet-suspensie. Toevoeging van 0,2-0,6 gram per liter spoeling geeft
vaak al een verlaging van de viscositeit. De volgende polyfosfaten
worden gebruikt:

- Na-hexametafosfaat , $(\text{NaPO}_3)_6$ (o.a. Calgon)
- tetra-Na-pyrofosfaat, $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$
- Na-zuur-pyrofosfaat , $\text{Na}_2\text{H}_2\text{P}_2\text{O}_7$
- Na-tetrafosfaat , $\text{Na}_6\text{P}_4\text{O}_{13}$

Omdat complexe fosfaten het effect van Ca-ionen tegenwerken, kunnen
zij eveneens de contaminatie van geringe hoeveelheden anhydriet (CaSO_4),
gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en cement opvangen. Bij grotere Ca^{2+} -concentraties
gaat echter de werking verloren en treedt sterke verdikking op.
Polyfosfaten verliezen hun effectiviteit bij hoge temperaturen en hoge
zoutconcentraties en worden zelden gebruikt in spoelingen met een
 $\text{pH} > 10$. De pH van spoelingen welke behandeld zijn met fosfaten wordt
gehandhaafd tussen 7,5 en 9,5.

Tanninen zijn de meest gebruikte dispergerende middelen. Het zijn
extrakten van bepaalde houtsoorten; zo wordt Quebracho geëxtraheerd
uit de stam van de Quebrachoboom welke voornamelijk in Argentinië
groeit. Vooral in spoelingen met $\text{pH} > 10$ zijn tanninen effectief en
ze vinden daarom veel toepassing in kalkspoelingen (zie 7.5.). Bij
 $\text{pH} < 8$, hoge zoutconcentraties en hoge Ca^{2+} -gehalten verliezen de
tanninen hun werkzaamheid.

Vanwege het zure karakter van de tanninen en het feit dat het optimale
werkzaamheidsgebied boven een pH van 10 ligt, moeten ze altijd met een
voldoende hoeveelheid NaOH aan de spoeling worden toegevoegd. Quebracho
wordt in de praktijk gemengd met NaOH in de verhouding van 1:1 tot
4:1 gewichtsdelen.

Lignieten zijn humuszuren. Chemisch is weinig van deze vegetatie-
rottingsprodukten bekend, doch uit de praktijk blijkt dat het optimale
pH-gebied ligt tussen 8,5 en 9,5. Evenals de tanninen moeten lignieten
altijd worden toegevoegd tesamen met NaOH om de werking ervan te stimu-
leren. Toevoeging aan de spoeling vindt veelal plaats in de verhouding

met NaOH van 1:1 tot 6:1. Lignieten zijn niet effectief bij hoge Ca^{2+} -concentraties en slechts gedeeltelijk werkzaam onder hoge zoutgehaltenes.

Lignosulfonaten komen voor in het hout van coniferen. Het zijn bijprodukten van de papierindustrie. Vermoedelijk bestaan ze uit complexe polymeren. Dankzij de grootte van het molecuul zijn lignosulfonaten voortreffelijke schutcolloïden en thinners, vooral als Cr^{3+} aanwezig is. Cr-lignosulfonaten kunnen in alle spoelings typen worden gebruikt, zowel in hoge als lage pH-spoelingen, in zout of met Ca verontreinigde spoelingen. Ca-lignosulfonaat vindt slechts toepassing in kalkspoelingen. Lignosulfonaten worden meestal aan de spoeling toegevoegd met NaOH in de verhouding 4:1. Ze verminderen niet alleen de viscositeit, gelsterkte en het filtraatverlies van een spoeling maar gaan ook kleizwellingsproblemen tegen. Vooral Cr-lignosulfonaten bezitten derhalve veelzijdige toepassingsmogelijkheden. Basische oplossingen van tanninen, lignieten en lignosulfonaten zijn sterk gekleurd.

6.4. Stoffen die de afpleistering verbeteren

Wordt overmatig filtraatverlies veroorzaakt door flocculatie van de spoeling als gevolg van verontreiniging met zout, Ca of cement dan helpt gewoonlijk toevoeging van stijf sel of carboxymethylcellulose. Deze organische poly-elektrolytische stoffen bestaan uit opgerolde lange kettingsmoleculen, die bij oplossing in water dissociëren, elkaar afstoten en een gestrekte vorm aannemen. Door de hechting aan kleideeltjes worden deze beschermd tegen het flocculerende effect van zouten.

Stijf sel is een goedkoop produkt om het filtraatverlies in zoutwater spoelingen te reduceren. Toepassing vindt ook in zoetwaterspoelingen plaats. Is het NaCl-gehalte kleiner dan 240 gr/l of is de pH van de spoeling lager dan 11,5 dan treedt na enkele dagen echter gisting op. Dit kan slechts worden vermeden door toevoeging van conserveringsmiddelen, welke over het algemeen sterke vergiften zijn. Toevoeging van 1 à $1\frac{1}{2}$ gram paraformaldehyde per liter spoeling voorkomt reeds gisting. Het merendeel van de in de boorwereld gebruikte stijf selprodukten wordt gemaakt van maïs. Dankzij de speciale behandelingen die de maïskorrels

ondergaan zwelt het korrelige eindprodukt onder de meest uiteenlopende omstandigheden snel op en kan zodoende in alle typen spoelingen worden gebruikt. De binding van water enerzijds en de afdichting van kleine gaatjes in de spoelingkoek anderzijds maken dat de sponsachtige stijfselkorreltjes uitstekend helpen in de verlaging van het filtraatverlies.

CMC wordt in verscheidene kwaliteiten gefabriceerd, die in zuiverheid en gelvormende eigenschappen variëren. De zuivere vorm, die de grootste viskositeitsvergroting geeft, schijnt niet te gisten. Door substitutie van bepaalde groepen in de celluloseketting kunnen aan de polymeren speciale eigenschappen worden gegeven. Verschillende polymeren zijn ontwikkeld die goede resultaten boeken in de strijd tegen het zwellen en desintegreren van kleilagen. CMC is een effectief middel ter verlaging van het filtraatverlies van de meeste spoelingen, maar is het meest werkzaam in kalkspoelingen. In spoelingen met een NaCl-gehalte groter dan 50 g/l wordt de werkzaamheid evenwel minder.

Na-poly-acrylaat wordt soms als vervangingsmiddel van CMC gebruikt en wel met name in zoutwaterspoelingen. In spoelingen met Ca-verontreiniging voldoen deze synthetische polymeren niet, maar ze zijn, in tegenstelling tot CMC en stijfsel, wel stabiel bij hoge temperaturen.

Natuurlijke gommen, de kleverige, doorschijnende vloeistof die uit spleten of insnijdingen in sommige bomen vloeit, vormen met water een viskeuze colloïdale suspensie. Dankzij de speciale eigenschappen van deze suspensies gaan de meeste gommen het waterverlies sterk tegen. Toepassing vindt slechts op beperkte schaal plaats, hoewel de gommen in alle typen spoelingen effectief werkzaam zijn. De bekendste gommen zijn Ghatti en Karaya. Guar-gom vindt meer toepassing, maar dan als flocculatiemiddel in plaats van middel ter verbetering van de afpleistering.

Is overmatig spoelingverlies het gevolg van het weglopen van de spoeling in grove zand- of grindlagen dan moeten stoffen worden toegevoegd die in staat zijn de grote poriën in de laag af te dichten. Hierop wordt in hoofdstuk 8.1. nader ingegaan.

6.5. Verzwaringsmiddelen

Om het s.g. van een spoeling te verhogen, wordt bariet (BaSO_4) het meest gebruikt. Het handelsprodukt bevat kleine hoeveelheden ijzeroxyde, kwarts en andere mineralen en heeft een s.g. van 4,2. Wordt bariet aan een spoeling toegevoegd, dan is het noodzakelijk dat deze viskeus is (40-50 Marsh Funnel sekonden) en enige thixotropie vertoont, daar anders uitzakking plaatsvindt. Bij voorkeur moet worden uitgegaan van een zuivere bentonietspoeling die 1 á 3 dagen is "gerijpt". Door toevoeging van bariet zal de viscositeit van de spoeling, vooral bij hoge bariet-gehalten, toenemen.

Haematiet (Fe_2O_3) en magnetiet (Fe_3O_4), beide met s.g. van ca. 5,2, worden als vervangingsmiddel van bariet gebruikt, zij het slechts op zeer beperkte schaal. In de waterwinning schijnt nagenoeg geen ervaring met het gebruik van deze ijzeroxyden als verzwaringsmiddel te bestaan. Verzwaringsmiddelen zullen bij een zware mineralenonderzoek deel uitmaken van de zware fraktie. Bariet, in fijn vergruisde vorm, is zeer moeilijk van andere doorschijnende zware mineralen te onderscheiden en kan als zodanig het onderzoek verstoren. Kennis van de samenstelling van de spoeling is met het oog op de juiste interpretatie van de resultaten van dit onderzoek van groot belang.

7. OVERZICHT VAN ENKELE BELANGRIJKE SPOELINGTYPEN

7.1. Algemeen

Spoelingen kunnen op meerdere manieren worden ingedeeld, b.v. op hun colloïdale inhoud, pH, belangrijkste thinner of type aanmaakwater. Er bestaat geen gestandaardiseerde nomenclatuur voor de verschillende spoelings typen. Omdat de konsekvente doorvoering van een indeling van alle spoelingssoorten buiten het bestek van dit overzicht valt, worden hieronder slechts die typen omschreven welke van belang kunnen zijn in de waterwinning. De gekozen indeling maakt derhalve geen aanspraak op volledigheid.

7.2. Natuurlijke spoeling

Een natuurlijke spoeling kan worden gebruikt bij het boren van ondiepe gaten, waarbij de aangeboorde kleilagen het colloïdale suspensiemateriaal leveren. Over het algemeen vereisen deze spoelingen grote hoeveelheden water, zowel om het filtraat- en spoelingverlies te compenseren als om de viskositeit en het s.g. op een laag peil te houden. Worden weinig kleien doorboord dan kan bentoniet of natuurlijke klei worden toegevoegd.

Veelal worden boringen aangezet met een natuurlijke spoeling en al naar gelang de omstandigheden vroeg of laat gewijzigd in een der onderstaande typen. Is het aanmaakwater hard dan verdient het aanbeveling met soda (Na_2CO_3) de Ca onschadelijk te maken voordat bentoniet of klei wordt toegevoegd.

7.3. Fosfaatspoeling

Dit type spoeling wordt alleen gebruikt waar zacht aanmaakwater ter beschikking is (tot ca. 12°D) en waar kleien doorboord worden welke goede colloïdale eigenschappen aan de spoeling geven. De fosfaten moeten in kleine hoeveelheden worden gebruikt (max. 0,6 g/l), aangezien grote hoeveelheden een tegengesteld effect hebben. Meestal wordt bentoniet toegevoegd om de spoelingeigenschappen te verbeteren.

De keuze uit de poly-fosfaten wordt voornamelijk bepaald door de pH van de spoeling. Bij gebruik van Na-zuur-pyrofosfaat en Na-hexametafosfaat wordt altijd NaOH met quebracho (1:12 tot 1:4) toegevoegd, ter voorkoming van pH-verlaging. De pH van fosfaatspoelingen dient te variëren tussen 7,5 en 9,5.

7.4. Quebracho-spoeling

Dit is een zeer stabiel spoelings-type, met een pH tussen 8 en 10 (lage pH). Het wordt gewoonlijk gemaakt door menging van een natuurlijke spoeling met een oplossing van NaOH-quebracho (1:2) en wat bentoniet. Hoewel boor-spoelingen reeds met zeer geringe hoeveelheden ($\pm 0,1\%$) worden gepeptiseerd bezit een quebracho-spoeling meestal 1 à 2% quebracho.

In tegenstelling tot polyfosfaten flocculeert quebracho de klei in de spoeling niet bij verhoogde concentraties.

Quebracho-spoelingen hebben het voordeel doorboorde kleien minder makkelijk te desintegreren dan spoelingen met lage concentraties aan peptisatiemiddelen. Dit lijkt in strijd met de peptiserende werking van quebracho maar kan gemakkelijk worden verklaard. Voordat peptisatiemiddelen hun werking kunnen uitoefenen dienen eerst de kleideeltjes uit de doorboorde laag te worden vrijgemaakt. Dit is slechts mogelijk indien water tussen de elementaire kleiplaatjes dringt en deze van elkaar scheidt. In tegenstelling tot een spoeling met een lage concentratie aan peptisatiemiddelen onderdrukt echter de hoge electrolytconcentratie in de quebracho spoeling de swelling van de klei vanwege het indrukken van de uitgestrektheid van de diffuse dubbellaag. Daardoor blijven de randen van de kleiplaatjes ontoegankelijk voor de peptiserende anionen en wordt het desintegratie proces vertraagd.

In de praktijk varieert de viskositeit tussen 30 en 45 seconden en is het waterverlies gering ($\pm 10 \text{ cm}^3$). De spoelingen zijn weinig vatbaar voor verontreinigingen en vertonen lage gelsterkten.

Soms wordt door toevoeging van extra NaOH-quebracho de pH van de spoeling opgevoerd tot 10 à 11,5 (hoge pH). In dit pH gebied vertoont de spoeling de beste stabiliteit en de laagste viskositeit en gelsterkte. Bovendien fermenteert eventueel toegevoegd stijfsel bij een pH van 11,5 niet en is de spoeling ongevoelig geworden voor zoutverontreiniging tot ca. 8 g/l.

Quebracho spoelingen bezitten evenals het filtraat een diep rode kleur.

7.5. Kalkspoeling

Dit spoelingtype wordt gemaakt door kalk aan een natuurlijke of bentonietspoeling toe te voegen. De Ca flocculeert de klei en dit resulteert in een grote gelsterkte en een slechte afpleistering. Déflocculatie wordt bewerkstelligd door Quebracho, Ca-lignosulfaat of lignieten tezamen met NaOH; stijfsel of CMC wordt toegevoegd om het filtraatverlies te beperken. De spoeling dient een overmaat aan kalk te bevatten en voldoende NaOH om de oplosbaarheid en adsorptie van Ca te beperken tot waarden die een lage viscositeit en gelsterkte geven. Is genoeg NaOH aanwezig (pH = 12,5), dan zal toevoeging van extra kalk weinig effect hebben op de spoelingeigenschappen omdat in dat geval de oplosbaarheid van Ca beperkt is.

Kalkspoelingen zijn derhalve ongevoelig voor Ca- verontreinigingen en geven weinig problemen bij het boren door kleien (welke hoofdzakelijk Ca-houdend zijn, zie bijlage 8), omdat hydratatie en dispersie worden beperkt.

De samenstelling van een kalkspoeling varieert nogal. De Ca kan worden verkregen uit $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaSO_4 of cement. Toevoeging van deze stoffen aan de spoeling zal resulteren in verhoging van de viscositeit en gelsterkte. Daarom worden eerst NaOH en een thinner toegevoegd, veelal in de volgende hoeveelheden per liter spoeling:

NaOH	: 4 - 8 g/l
thinner:	6 - 10 g/l
kalk	: 10 - 20 g/l

Kalkspoelingen kunnen zout verontreinigingen opvangen tot een totale zoutconcentratie van ca. 50 g/l. Bij contaminatie van zout dient de pH regelmatig te worden gecontroleerd en op peil te worden gehouden. Verhoging van de Na-ionenconcentratie dringt namelijk het dissociatieevenwicht van NaOH terug en resulteert in een verlaging van de pH.

7.6. Zoutwaterspoeling

Voor zoutverontreinigingen tot ca. 50 g/l kan een kalkspoeling worden gebruikt. Bij nog hogere zoutconcentraties voldoet echter een bentonietspoeling niet langer en moet worden overgeschakeld op een attapulgietsklei. Deze klei behoudt zijn colloïdale eigenschappen ook in aanwezigheid van hoge elektrolytconcentraties. Het filtraatverlies wordt geregeld

met stijfsel, Na-poly-acrylaat en eventueel CMC. Totale zoutconcentraties groter dan 50 g/l komen echter in Nederland op diepte geringer dan 500 m niet of nauwelijks voor (het totale zoutgehalte van zeewater en zout grondwater bedraagt minder dan 35 g/l).

7.7. Polymeerspoeling

De ontwikkeling op het gebied van polymeerspoelingen is in volle gang. Het boren op zee noopt tot het gebruik van spoelingen die met zeewater kunnen worden aangemaakt en tot de ontwikkeling van spoelingrediënten die aan dergelijke spoelingen de vereiste eigenschappen kunnen geven. Zo worden polymeren ontwikkeld die alleen een viskositeitsverhoging geven, of alleen een verbetering in de afpleistering, die klei stabiliseren, boorgruis doen flocculeren of slechts als smeermiddel dienen. De gewenste polymeren worden verkregen door wijziging van natuurlijke verbindingen zoals zetmeel (maïs, aardappelen, bonen enz.) en gomsoorten, of door synthese van bepaalde monomeren.

Een produkt dat in Amerika zijn toepassing heeft gevonden in de waterwinning is een organisch materiaal dat de bentoniet in de spoeling volledig kan vervangen en na enkele dagen langs enzymatische weg wordt afgebroken. Een groot voordeel hiervan is dat in de put geen skin achterblijft die de opbrengst van de put zou verlagen en dat de ontwikkelingskosten nagenoeg komen te vervallen. Het produkt wordt gefabriceerd door "Johnson Well Screens" en verhandeld onder de naam "Revert".

Ervaring in Nederland met "Revert" is nog niet opgedaan. Gezien de voordelen van het produkt verdient het evenwel aanbeveling een onderzoek te verrichten naar de toepassingsmogelijkheden van "Revert" in Nederland.

7.8. Slotopmerking

In hoeverre verschillende typen boorspoelingen kunnen bijdragen tot een mogelijke verontreiniging in watervoerende lagen is onduidelijk. Hoewel bekend is dat organische spoelingtoeslagen als voedingsbodem voor bacteriën kunnen dienen, is onvoldoende bewezen dat het gebruik van deze toeslagen heeft geleid tot een langdurige schadelijke verontreiniging van opgepompt grondwater. Het achterwege laten van het gebruik van organische toeslagen lijkt wenselijk, doch impliceert dat in vele gevallen een groter filtraatverlies optreedt, waardoor aan de watervoerende lagen grote hoeveelheden vreemde stoffen en bacteriën worden toegevoegd, hetgeen kan resulteren in een sterke mate van verontreiniging van het grondwater.

8. SPOELINGPROBLEMEN IN DE PRAKTIJK EN HUN REMEDIES

8.1. Spoelingverlies

In normale gevallen geeft een dispers klei-water systeem een goede afpleistering. De permeabiliteit van de spoelingkoek is zeer gering terwijl de viskositeit en thixotropie van de spoeling laag blijven.

Hard en zout water hebben een ongunstige werking op de stabiliteit van het disperse systeem. Geringe hoeveelheden Ca en Mg kunnen onschadelijk worden gemaakt door NaHCO_3 of Na_2CO_3 . Schutcolloïden kunnen kleine hoeveelheden NaCl opvangen. CMC heeft in het algemeen een stabiliserende werking.

Bij het doorboren van grove zanden of grindlagen, waar van vorming van een spoelingkoek geen sprake kan zijn, verdient soms een geflocculeerd systeem de voorkeur. De verhoogde thixotropie en viskositeit van dit systeem vertragen de stroming in de formatie; het afpleisterend vermogen van de spoeling wordt echter geringer. Flocculatie is mogelijk door toevoeging van kalk (Ca(OH)_2), gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) of cement.

Zijn de spoelingverliezen aanzienlijk dan kan beter toevlucht worden genomen tot middelen die de afpleistering verbeteren. Gebruikt worden: mica, asbest, kleibrokken, cokes, stro, houtwol, erwten, bonen, rijst, katoen, katoenzaaddoppen, notedoppen, cellofaan, bietenpulp, zaden, mos, veren, cellulose vlokken, veen, graan, kurk, sponzen, vermicelli en allerlei soorten vezels. Vele van deze middelen zijn echter niet acceptabel bij boringen voor de waterwinning. De korrelgrootteverdeling kan erg belangrijk zijn. In het algemeen bevordert een grote korrelgroottespreiding de afdichting.

Omdat grove zanden en grindlagen vaak potentiële waterproduktieve lagen zijn, moeten de problemen van het spoelingverlies bij het doorboren van deze afzettingen met de nodige aandacht worden bestreden. Het flocculeren van de spoeling en het gebruik van afpleisterende middelen zullen weliswaar het spoelingverlies kunnen terugdringen maar tevens een nageenough onherstelbare permeabiliteitsvermindering in de directe omgeving van het boorgat teweegbrengen. Het gebruik van organische produkten, die na verloop van tijd (enkele dagen) ontbinden en derhalve weinig of geen verslechtering in de doorlatendheid veroorzaken, is uit produktie-technisch oogpunt gezien aantrekkelijk, doch kan bij de waterwinning

bezwaarlijk zijn vanwege de daarmee gepaard gaande bacteriologische verontreiniging van het water. Soms kan overmatig spoelingsverlies het gevolg zijn van een te hoog s.g. van de spoeling.

8.2. Instabiele kleiformaties

Wordt een kleilaag doorboord dan zullen de hierin voorkomende kleimineralen water uit de spoeling adsorberen. Het indringen van het water tussen de kleiplaatjes zal de klei doen desintegreren en tot gevolg hebben dat problemen kunnen ontstaan zoals uitholling van het boorgat en naval. Om deze problemen te vermijden moet worden voorkomen dat hydratatie optreedt. In de literatuur worden veel onderzoeken genoemd naar het samenstellen van spoelingen die zo min mogelijk kleilagen doen zwellen. Vele typen spoelingen zijn onderzocht: calcium-, silicaat-, kalium-, barium-, calciumacetaat-, calciumnitraat-, zout- en lignosulfonaatspoelingen alsmede spoelingen met oppervlakactieve stoffen. In het algemeen blijken lignosulfonaatspoelingen het beste resultaat te geven, alhoewel veel voorbeelden bestaan waarin andere spoelings typen (zoals Quebrachospoelingen, 7.4 en kalkspoelingen, 7.5) beter voldoen.

Het is tot op heden niet duidelijk of chemische behandelingen van de spoeling alléén voldoende kan zijn om de problemen van vergroting van het boorgat en naval op te lossen. Wel is gebleken dat een pH van de spoeling tussen ca. 8,5 en 9,5 in het algemeen een betere stabiliteit van het boorgat geeft en controle over de spoelingeigenschappen mogelijk maakt dan lagere of hogere pH-waarden.

Moderne opvattingen schrijven de problemen van de instabiele kleiformaties toe aan geheel andere oorzaken. De verklaring luidt dat naval van kleien of schalies eerder het gevolg is van de spanningsverdeling rond het boorgat, dan van verschijnselen zoals zwellen. Vaak blijkt namelijk dat klonters bentonietpoeder, in het water geworpen, niet of nauwelijks zwellen omdat door wateropname de buitenste deeltjes dichtzwellen en verdere wateropname verhinderen. Eveneens is vaak gebleken dat navalmateriaal niet uit gezwollen klontjes doch uit compacte hoekige stukjes bestaat. De gesteente-mechanica laat zien dat vorming van microbreukjes en verbrokkeling reeds snel optreedt bij gesteente met een kleine hoek van inwendige wrijving (zoals kleien en schalies). Omdat blijkt dat in kleien en schalies verbrokkeling soms reeds aanwezig is vóór het doorboren, leidt dit tot de veronderstelling dat bij het boren de veranderde spanningsver-

deling rond het boorgat oorzaak is van een uitbreiding van deze micro-verbrekking en van het afkalven van de boorgatwand. Formules uit de boorgatmechanica geven aan dat het optreden van naval gereduceerd kan worden door verhoging van het s.g. van de spoeling. Neemt de vloeistofspanning in de kleien/schalies toe tot waarden boven de hydrostatische, dan moet het s.g. zeer hoog worden opgevoerd. Omdat in het algemeen te weinig bekend is van de te doorboren kleien en verhoging van het s.g. van de spoeling weer verhoging van het spoelingsverlies kan betekenen, zullen kleien, met name die met hoge vloeistofdrukken, altijd problemen blijven scheppen. Wel is bij herhaling gebleken dat formatie-naval aanzienlijk beperkt kan worden door vermindering van turbulentie in het boorgat. Verhoging van de viscositeit vermindert de turbulentie.

Meestal komen alleen in jonge formaties op geringe diepte zeer plastische kleien voor. Dergelijke kleien voldoen niet aan de wetten van de spanningsleer doch gedragen zich in principe als een vloeistof met s.g. > 1 . Soms komt de klei in de vorm van kneedbare worsten met de spoeling aan de oppervlakte. Deze lagen kunnen het beste met een zware spoeling en grote snelheid worden doorboord. Het boorgat wordt slechts geleidelijk dichtgedrukt.

8.3. Overgang zoet-zout formatiewater

Zout (NaCl) heeft een schadelijke werking op de stabiliteit van een kleiwater spoeling. Het veroorzaakt bovendien een toename in de viscositeit en een verslechtering in het afpleisterend vermogen. Zolang het zoutgehalte kleiner is dan 10 g/l wordt veelal de kleispoeling gehandhaafd en de stabiliteit met CMC op peil gehouden. Wordt het gehalte groter, dan is het noodzakelijk dat de spoeling wordt gewijzigd in één die ongevoeliger is voor zout-contaminatie.

Een quebracho-spoeling (zie 7.4.) is ongevoelig voor zoutverontreinigingen tot ca. 8 g/l. Een kalkspoeling (zie 7.5.) kan zoutverontreiniging opvangen tot ca. 50 g/l.

LITERATUUR

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE

Recommended Practice Standard Procedure for Testing Drilling
Fluids;
A.P.I., Dallas, Texas.

AMERONGEN, H. VAN en J.H. VAN DER VELDEN

Rapport: Samenstelling en eigenschappen van 31 kleisoorten;
Centraal Technisch Instituut TNO, Delft (1970).

BOLT, G.H., A.R.P. JANSE en F.F.R. KOENIGS

Algemene Bodemkunde I, Bodemscheikunde, Syllabus;
Kandidaatscollege, Landbouwhogeschool, Wageningen (1969).

CAMPBELL, M.D. and J.H. LEHR

Water Well Technology;
Mc.Graw-Hill Book Company, London (1973).

DRESSER MAGCOBAR

Mud Engineering;
Dresser Magcobar, Division of Dresser Industries Inc.,
Houston, Texas (1968).

GRIM, R.E.

Applied Clay Mineralogy;
Mc.Graw-Hill, New York (1962)

OLPHEN, H. VAN

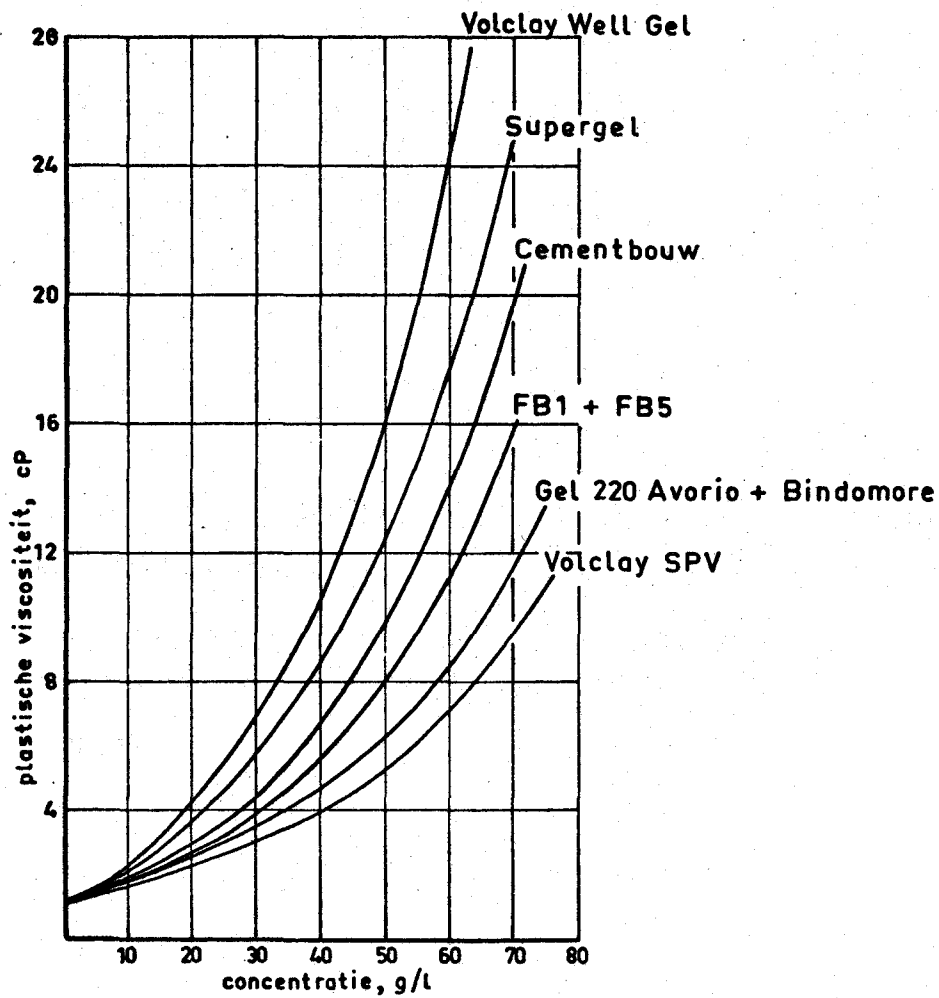
An Introduction to Clay Colloid Chemistry;
Interscience Publishers, London (1966).

ROGERS, W.F.

Composition and Properties of Oil Well Drilling Fluids;
Gulf Publishing Company, Houston, Texas (1963).

A SUBCOMMITTEE OF THE A.P.I. SOUTHWESTERN DISTRICT STUDY COMMITTEE
ON DRILLING FLUIDS

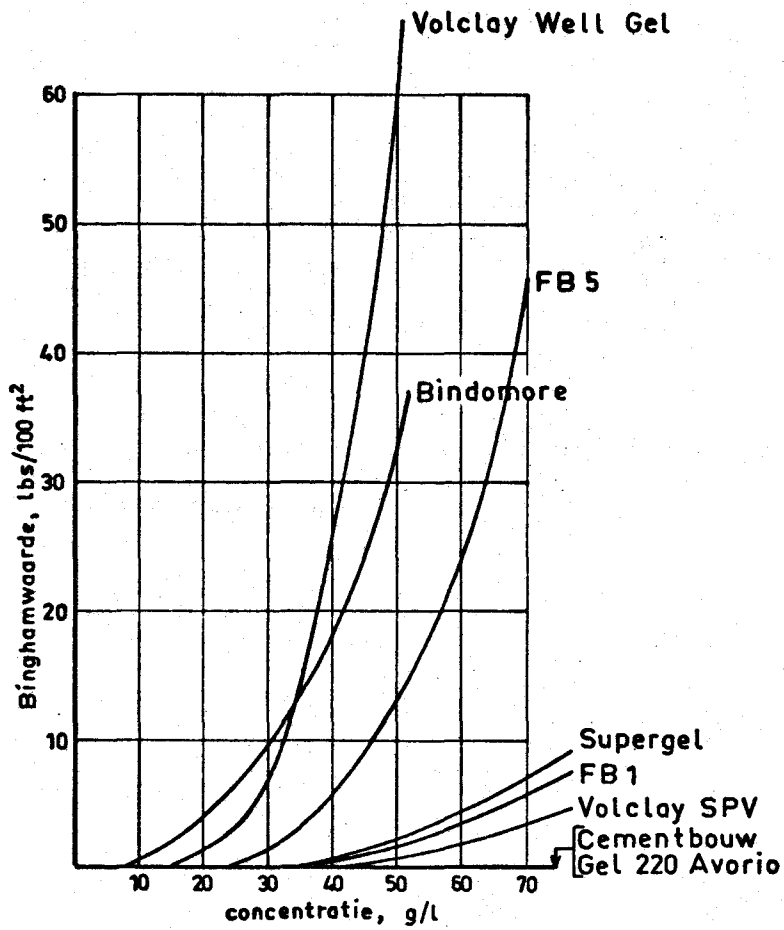
Principles of Drilling Mud Control;
Petroleum Extension Service, The University of Texas -
Division of Extension, Dallas, Texas (1955).



Spoelingen aangemaakt met leidingwater Delft, (11.8 - 20.7 °D).
 Spoelingen niet gerijpt.

Bijlagen 1 t/m 5 geven de resultaten weer van een
 door TNO (DGV) uitgevoerd spoelingonderzoek,

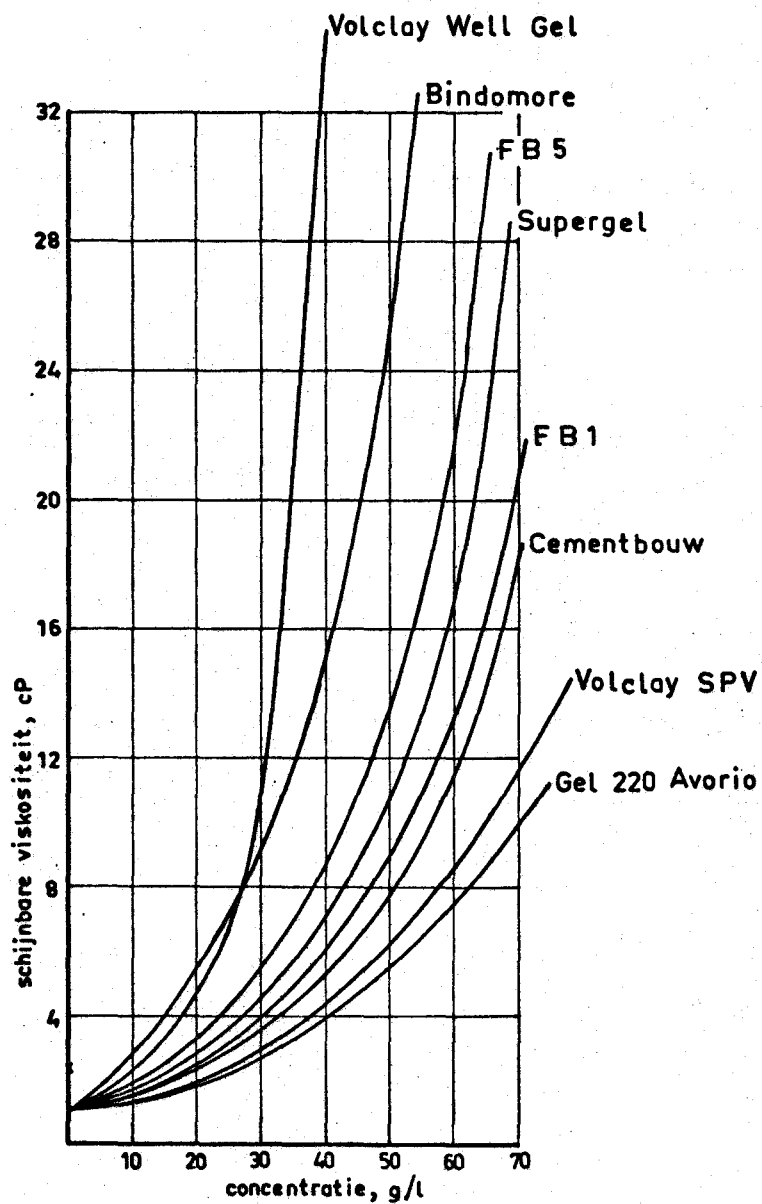
Bijlage 1.



Spelingen aangemaakt met leidingwater Delft (11.8-20.7 °D)

Spelingen niet gerijpt

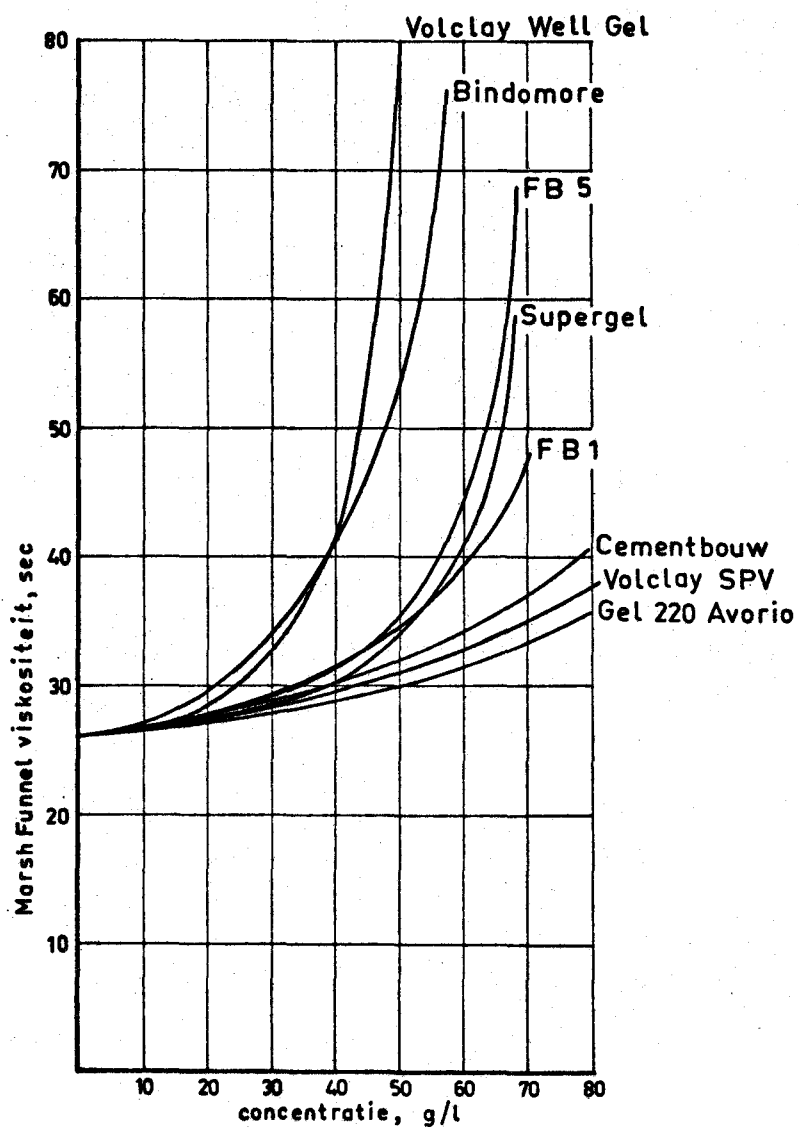
Bijlage 2.



Spoelingen aangemaakt met leidingwater Delft (11.8–20.7 °D)

Spoelingen niet gerijpt

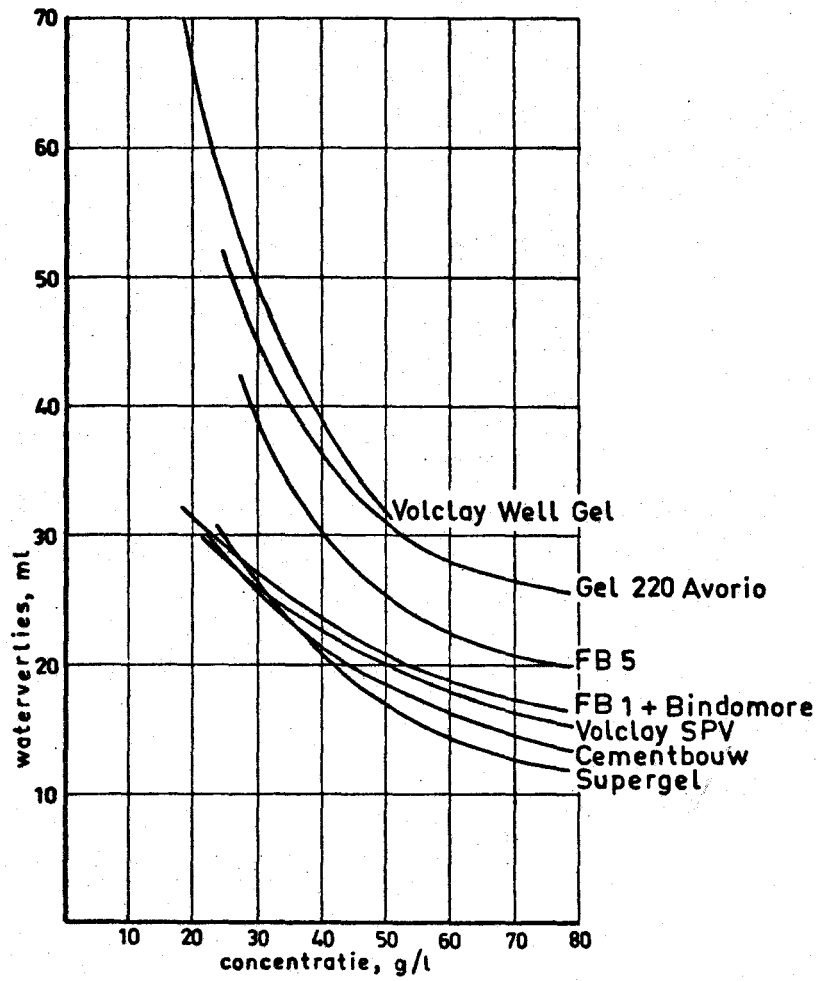
Bijlage 3.



Spoelingen aangemaakt met leidingwater Delft (11,8-207 °D)

Spoeling niet gerijpt

Bijlage 4.



Spelingen aangemaakt met leidingwater Delft (11.8-20.7 °D)
 Spelingen niet gerijpt

Bijlage 5.

SPOELINGRAPPORT

Boorfirma: _____	Boring : _____	Rapport nr. : _____	Datum: _____
_____	Lokatie : _____	Totale diepte : _____	_____
_____	Coördinaten: X = _____	Maaiveldshoogte: _____	Opgemaakt door: _____
_____	Y = _____	Boorgatdiameter: _____	_____

Omschrijving spoelingslagen	Verbruik spoelingslagen						
		1	2	3	4	5	6
1. _____	Aanvang boring						
2. _____	m						
3. _____	m						
4. _____	m						
5. _____	m						
6. _____							

Spoelings testen							
Nr.	Tijd	Diepte (m)	s.g. g/cm ³	Marsh Funnel (sek)	pH	Waterverlies (ml)	Zandgehalte %
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

Opmerkingen*:

* Opmerkingen m.b.t. spoelingsverliezen, instabiele kleilagen, enz.

Een voorbeeld van een bij de boring in te vullen spoelingsrapport.

Bijlage 6.

chronostratigrafie		lithostratigrafie	lithologie	monster nr.	
Kwartair	Holoceen		fijn zand, klei en veen	1, 2, 6, 15, 16, 18, 19, 21, 29, 30, 34	
	Boven-Pleistoceen	Twente, Kreftenheye	fijn zand	5, 32	
		Eem	klei		
	Midden-Pleistoceen	Drente	(matig) grof zand keileem klei	glaciaal fluvio- glaciaal	20
		Eindhoven	fijn zand		7
		Urk 2	matig grof tot grof zand		
		Holstein	klei		
		Peelo	fijn slibhoudend zand		3
		Urk 1	matig grof tot grof zand		
		(hiaat)			
	Enschede				
	Onder-Pleistoceen	Harderwijk			
		Tegelen	klei en zand		12, 13
		Zuidlaren	matig fijn tot matig grof zand		
Scheemda		fijn slibhoudend tot matig fijn zand			
Tertiair	Plioceen	marien Boven-Plioceen	fijn slibhoudend zand	8, 9, 31	
		marien Onder-Plioceen	fijn slibhoudend zand, klei		
	Mioceen				
	Oligoceen			28	
Eoceen			4		

Overzicht van de stratigrafie van het kwartair en tertiair in Nederland en de plaats hierin van de onderzochte kleimonsters (zie hoofdstuk 5.3.).

Bijlage 7.

NR.	VINDPLAATS	KLEISOORT	MINERALOGISCHE KARAKTERISTIEK			FYSISCHE KARAKTERISTIEK			CHEMISCHE KARAKTERISTIEK					
			gewichtsprocenten			gewichts- procenten < 10 μ	specifiek oppervlak in m ² /g	plastici- teitsin- dex	uitwisselbaar + H ₂ O oplosbaar maeq./100 g					
			inter- mediaten	mica	kaoliniet				K	Ka	Ca	Kg	Mn	Tot.
1	GRONINGEN, MARUM	ROODOORN KLEI, HOLOCEEN	33,5	9,0	10,0	76	195	69	0,49	0,22	21,1	5,1	0,03	26,9
2	GRONINGEN, DOLLARD	JONGE ZEEKLEI, HOLOCEEN	26,0	11,5	9,5	61	146	43	0,59	0,16	28,3	3,9	0,02	33,0
3	GRONINGEN, MARUM	POTKLEI, ZEER VETTE KLEI, PLEISTOCEN	46,5	11,5	14,0	88	219	62	0,92	0,90	30,6	7,1	-	39,5
4	OVERIJSSSEL, HENGELO	PYRIETHOUDEND, EOCEN	20,0	9,5	7,0	48	116	38	0,82	0,65	21,2	2,7	0,02	25,4
5	OVERIJSSSEL, HENGELO	MAGERE KLEI, WEICHELIE	8,0	8,0	5,0	24	53	17	0,36	0,26	14,8	0,3	0,03	15,8
6	LIMBURG, AFVERDEN	MAGERE RIVIERKLEI, HOLOCEEN	11,5	7,0	3,5	29	65	17	0,11	0,16	12,0	0,1	0,02	12,4
7	LIMBURG, OIRSBEK	LOSS, SAALIEN	2,5	8,0	3,5	17	38	12	0,17	0,16	11,8	0,8	-	13,0
8	LIMBURG, SUSTERSEEL	LEEM, BRUNSSUMSE KLEI, B. PLIOCEEN	28,5	9,5	6,0	64	152	51	0,83	0,26	19,8	4,9	0,06	25,8
9	LIMBURG, TEGELEN	BRUNSSUMSE KLEI, KAOLINIETHOUDEND	6,5	20,0	21,5	65	76	39	0,21	0,10	0,6	0,2	0,01	1,1
10	LIMBURG	GLAUCONIETHOUDEND	0,0	70,5	0,0	48	119	47	0,49	0,16	4,7	2,0	0,03	7,4
11	LIMBURG, KUNRADE	KLEEFARDE, LEEM, B. KRIJT	18,5	8,0	3,0	37	106	31	0,30	0,26	18,1	0,1	-	18,8
12	LIMBURG, TEGELEN	TEGELEN KLEI, VEEL CARBONATEN, TIOLIEN	9,0	13,0	10,5	56	79	29	0,32	0,16	19,1	2,1	0,02	21,7
13	LIMBURG, TEGELEN	TEGELEN KLEI, BEVAT MICA, TIOLIEN	6,0	18,5	9,5	56	100	36	0,30	0,16	13,6	2,3	0,06	16,4
14	NOORWEGEN	GLACIALE KLEI, VEEL VELDSPAAT EN MICA	0,0	26,0	12,5	80	40	24	1,68	16,8	3,7	6,6	0,02	28,7
15	GELDERLAND, VELDDRIEL	KOMKLEI, RIVIERKLEI, HOLOCEEN	27,5	9,0	10,0	78	201	62	0,28	0,28	37,6	2,4	-	40,6
16	FRISLAND	KNIPKLEI, HOLOCEEN	29,5	10,5	9,0	64	141	52	0,78	0,58	15,1	10,3	0,02	26,8
17	FRANKRIJK, DOLE	LEEM	32,0	6,5	10,0	67	175	64	0,51	0,26	11,8	4,1	0,03	16,7
18	GELDERLAND, ERLECOM	RIVIERKLEI, HOLOCEEN	8,5	15,5	8,5	42	79	27	0,26	0,26	20,4	1,2	0,01	22,1
19	GELDERLAND, ELDEN	RIVIERKLEI, HOLOCEEN	13,0	9,0	6,0	41	79	23	0,21	0,16	20,1	2,3	0,03	22,8
20	URK	KEILEEM, GLACIAAL, SAALIEN	2,0	13,0	5,0	28	44	15	0,60	1,61	8,7	2,7	-	13,6
21	GELDERLAND, CULEMBORG	RIVIERKLEI, HOLOCEEN	9,5	15,5	6,0	48	83	27	0,20	0,32	18,1	0,02	-	18,6
22	AMERIKA, ILLINOIS	ILLIETHOUDEND	0,0	57,0	9,5	80	128	39	0,78	0,58	14,8	7,5	0,12	23,8
26	DUITSLAND, BRAUNSCHWEIG	KLEISCHALIE	12,0	23,0	25,0	74	134	51	1,12	1,45	36,4	5,6	0,03	44,6
27	PORTUGAL, LISSABON	ROODARDE, GLIMMER EN KAOLINIE	0,0	21,0	24,5	61	122	41	0,80	3,07	13,8	3,7	-	21,3
28	BELGIE, BOON	BOONSE KLEI, PYRIET, M. OLIOCEEN	11,5	16,0	10,5	52	116	42	1,64	0,48	20,7	4,6	-	27,4
29	ZUID-HOLLAND, WOERDEN	VETTE RIVIERKLEI, HOLOCEEN	29,5	13,5	9,0	72	156	51	0,36	0,26	24,8	4,6	0,02	30,1
30	ZEEUW-VLAANDEREN, AARDENBURG	JONGE ZEEKLEI, KALKHOUDEND, HOLOCEEN	13,0	10,0	7,0	46	96	35	0,53	0,26	20,5	0,05	-	21,3
31	NOORD-BRABANT, TIENRAAY	VETTE LEEM, VENLO KLEI, B. PLIOCEEN	7,0	18,5	12,0	53	88	27	0,28	0,16	15,0	0,5	0,08	16,0
32	NOORD-BRABANT, UDENHOUT	BRABANTSE LEEM, WEICHELIE	4,5	11,0	5,0	22	34	10	0,26	0,26	3,9	-	0,03	4,4
33	JOEGOSLAVIE	ROODARDE, KAOLINIETHOUDEND	3,5	8,5	26,5	70	111	34	0,26	0,16	10,8	1,7	0,07	13,0
34	NOORD-BRABANT, ZEVENBERGEN	ZEER VETTE ZEEKLEI, HOLOCEEN	68,0	11,0	4,5	96	331	94	1,32	1,39	26,8	7,6	-	37,1

Overzicht van de resultaten van het onderzoek naar de samenstelling van diverse kleimonsters (zie hoofdstuk 5.3.).

Bijlage 8.