

Klei,
bestekseisen t.b.v. constructie
en uitvoering, overzicht huidige
kennis en onderzoeksvoorstel,
S-81.023

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen
J.A. Muijs
oktober 1984

<u>Inhoud</u>	<u>blz.</u>
I <u>Bestekseisen voor klei, waarom?</u>	
I.1. Toepassing van klei in de dijkbouw; constructieve eisen	03
- ontwerpaspecten: type waterkering, belastingen, constructie-eigenschappen, materiaaleigenschappen	
- uitvoeringsaspecten	
- onderhoudsaspecten	
I.2. Huidige proeven voor de keuring van klei	07
- bepaling van de korrelverdeling	
- bepaling van het gehalte aan organisch materiaal	
- eisen t.a.v. de korrelverdeling en het gehalte aan organisch materiaal	
- consistentiegrenzen	
I.3. Conclusies t.a.v. de huidige gang van zaken	14
II <u>Samenstelling van eigenschappen van kleigrond</u>	
II.1. Wat is klei?	
- mineralen in de klei en kleimineralen, ontstaanswijze	15
- bouw van de kleimineralen	
II.2. Eigenschappen van enkele belangrijke kleimineralen	20
II.3. Klei beschouwd als colloid	22
- krachten tussen de deeltjes	
- effect van ionen	
- flocculatie en peptisatie	
- kleideeltjes en water, zwellings.	
II.4. Enkele praktijkvoorbeelden	28
- Flocculatie en peptisatie	
- Zwellen en krimpen	
III <u>Nieuw onderzoek, richting en wenselijkheid</u>	30
- Huidige kennis	
- Aard van het verdere onderzoek	
- Onderwerpen voor onderzoek	
- Conclusie t.a.v. een eerste onderzoek	

I. Bestekseisen voor klei, waarom?

I.1. Toepassing van klei in de dijkbouw; constructieve eisen

Als men constructies ontwerpt zal men rekening houden met (te verwachten) eigenschappen van de bouwmaterialen. Bij de uitvoering van de constructie dient men dan ook na te gaan of de eigenschappen van het bouw materiaal overeenkomen met die, welke men bij het ontwerpen heeft aangenomen.

Men zal dus in het bestek eisen ten aanzien van de materiaaleigenschappen dienen op te nemen. Natuurlijk geldt deze wisselwerking tussen constructieve vormgeving en materiaal-eigenschappen ook bij ontwerp en aanleg van waterkeringen.

Waterkeringen bestaan qua volume voor het belangrijkste deel uit grond. Bij verbetering en nieuwe aanleg past men voornamelijk zand en klei toe. In het verleden won men deze materialen in de buurt van het werk. De ontwerpers en de uitvoerders kenden uit ervaring de toepassingsmogelijkheden van de lokale kleien en zandsoorten, ook zonder deze materialen aan uitgebreide proeven te onderwerpen.

Tegenwoordig wordt men door de aan ontgrondingen opgelegde beperkingen gedwongen klei en zand in te voeren uit verder, soms zeer ver, van het werk af gelegen gebieden. Ook zal men grond gebruiken die door menselijk handelen sterk is geroerd en misschien van samenstelling is veranderd ten opzichte van natuurlijk afgezette grond. Denk hierbij aan gerijpt baggerslib uit de Europoorthavens of aan Neckar-klei. Ervaring met deze materialen heeft men ter plaatse van de dijkwerken (nog) niet. Men heeft er nog geen gevoel voor en men durft soms nog niet te werken met de informatie uit enkele eenvoudige keuringsproeven (zoals "gehalte afslibbaar"). De wens wordt geuit, met name in de kringen van bij rivierdijkverbeteringen betrokken instanties, om te kunnen beschikken over eenduidige getalscriteria voor de keuring van klei. Tot nu toe is er nogal wat verschil tussen de in de bestekken - uit verschillende regio en van verschillende instanties - gebruikte keuringscriteria. Dit probleem geldt vooral voor klei; keuring van zand is in de wegenbouw bekeken.

Ontwerpaspecten

Hiervoor is omschreven waarom men eisen dient te stellen aan de eigenschappen van een klei die men in een dijkconstructie wil toepassen. Welke eisen men dient te stellen hangt af van de rol en plaats van de klei in de dijkconstructie. De constructie hangt weer in hoge mate af van de belasting, d.w.z. de aard van het te keren water. Men kan de volgende hoofdgroepen onderscheiden bij waterkeringen, met enkele te verwachten belastingen:

type waterkering	belasting door:
- zeedijken	- kortdurende hoge waterstanden (ca. 0,5 - 2 dagen) - golfslag - getij - zout en zoet water (regen)
- rivierdijken (benedenrivieren)	- getij - middellange hoge waterstanden (ca. 2 - 10 dagen) - stroom en golfslag - scheepvaart - zout en zoet water
- rivierdijken	- hoge waterstanden van langere duur (ca. 3 - 15 dagen) - stroom en golfslag - scheepvaart - wegverkeer
- boezemkaden, kanaal- en meerdijken	- vrijwel constante waterstand - golfslag - wegverkeer - scheepvaart

De verschillende belastingen doen een beroep op de volgende eigenschappen van de constructie:

belastingen	constructie-eigenschappen
- keren van waterstanden	- stabiliteit van de dwarsprofiel - kruinhoogte zettingsongevoelig - waterdichtheid
- stroom, golfslag, scheepvaart	- erosiebestendigheid van het buitentalud
- golfklappen	- verwekingsbestendigheid van het buitentalud
- wegverkeer	- stabiliteit van het dwarsprofiel

De eigenschappen van de constructie hangen weer samen met eigenschappen van het materiaal. Overigens zijn nog lang niet alle verbanden bekend.

constructie-eigenschappen	materiaaleigenschappen
- stabiliteit en zettings- ongevoeligheid	- gewicht - wrijvingseigenschappen - consolidatie-eigenschappen - doorlatendheid - krimpgevoeligheid - ?
- waterdichtheid	- doorlatendheid (van onge- scheurde klei) - krimpgevoeligheid en scheurvorming - ?
- erosiebestendigheid	- erosiegevoeligheid - structuur (landbouwkundig) - mogelijkheid voor grasgroei - ?
- verwekingsbestendigheid	- ?

Voorname materiaaleigenschappen kan men direct met proeven bepalen, zonder verder in te gaan op de fysische achtergrond van deze materiaaleigenschappen. Voorbeelden van zulke proeven zijn: cel- en triaxiaalproeven ter bepaling van wrijvingseigenschappen, proeven voor bepaling van de doorlatendheid (van ongescheurde klei) in het laboratorium, infiltratieproeven op dijktafuds (in situ), erosieproeven in het laboratorium of in situ. Voor verscheidene eigenschappen kan men op deze wijze een direct verband bepalen tussen proef en werkelijkheid.

Niet alle eigenschappen kan men op deze wijze beschrijven met enkele parameters. Ook beschikt men niet altijd over een relatief eenvoudige proef om eventuele parameters te bepalen. In deze gevallen kan men wellicht meer over de eigenschappen te weten komen als men de samenstelling en de eigenschappen van de samenstellende delen kent.

Uitvoeringsaspecten

Ook de uitvoering stelt eisen aan de eigenschappen van klei. De aspecten zijn hier:

uitvoeringsaspecten	afgeleide aspecten
- verwerkbaarheid tijdens winning, transport en spreiding - aanpasbaarheid van kleieigenschappen	- consistentie-index - vochtgehalte - verdichting - wrijvingseigenschappen

Onderhoudsaspecten

Het onderhoud dient zo gering mogelijk te zijn.

De twee hoofdaspecten en de daaruit voortvloeiende aspecten zijn:

onderhoudsaspecten	afgeleide aspecten
- grasmat op klei - klei	- goede groeiomstandigheden - te onderhouden door maaien of beweiden - zo min mogelijk erosie (zie Ontwerpaspecten: erosiebestendigheid)

Bij deze opsomming van constructieve aspecten moet men wel bedenken, dat het van de plaats en functie van een bepaalde klei in de constructie afhangt welke aspecten en eigenschappen voor die klei van belang zijn.

I.2. Huidige proeven voor de keuring van klei

Bij de huidige proeven wordt vaak slechts één eigenschap of karakteristiek van de onderzochte klei bepaald, zoals bijv. de korrelverdeling, om conclusies te trekken ten aanzien van andere eigenschappen, zoals krimpgevoeligheid of erosiegevoeligheid. De huidige proeven moeten worden gezien als relatief eenvoudige herkenningproeven om tot een juiste benaming en karakterisering van de onderzochte klei te komen (9).

Wel worden keuringseisen gesteld, die zijn gebaseerd op de resultaten van deze proeven. Men gaat er dan vanuit, dat een klei die aan de in de praktijk gegroeide eisen voldoet de voor toepassing gewenste eigenschappen bezit (2).

Dit heeft wel tot gevolg, dat de kennelijk op plaatselijke ervaringen gestoelde eisen die door verschillende instanties en in verschillende regio's worden gesteld, nogal uiteenlopen.

Proeven die momenteel worden gebruikt zijn:

- bepaling korrelverdeling
- gehalte aan organisch materiaal
- consistentiegrenzen
- gehalte aan calciumcarbonaat

In het volgende gedeelte zullen deze proeven, de resultaten en ervaringen en de op de proeven gebaseerde eisen worden behandeld.

Bepaling van de korrelverdeling

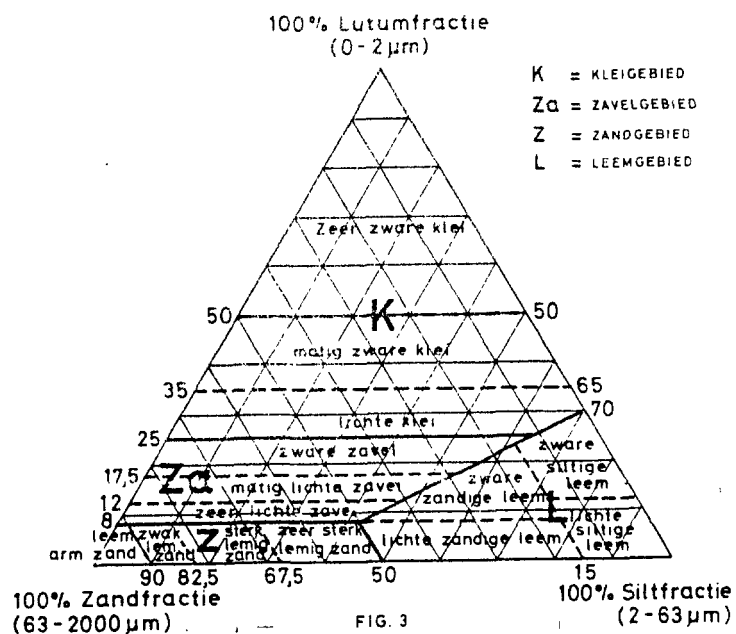
Dit geschiedt voor korrelafmetingen groter dan 2 μm door droge of natte zeping ((10), proef 6) en voor korrelafmetingen kleiner dan 2 μm door areometrering ((10), proef 1). Zo verkrijgt men inzicht in de hele korrelverdeling in alle fracties. Ook kan men zich beperken tot het bepalen van hoofdfracties ((10), proeven 2,9). Men moet wel bedenken, dat verschillende methoden om het monster te dispergeren verschillende korrelverdelingsbepalingen kunnen opleveren (schudden met peptisator, koken met peptisator, zeven in su-prageluid).

Voor het herkennen van grondsoorten beperkt men zich tot de onderlinge verhouding van enkele hoofdfracties. Voor klei (en kleihoudende grond) zijn de volgende hoofdfracties van belang:

naam fractie	korreldiameter	opmerkingen
zand	> 60 μm	te bepalen met zeef 63 μm
silt	2 - 60 μm	
lutum	< 2 μm	
organische stof- fractie	-	zie verderop

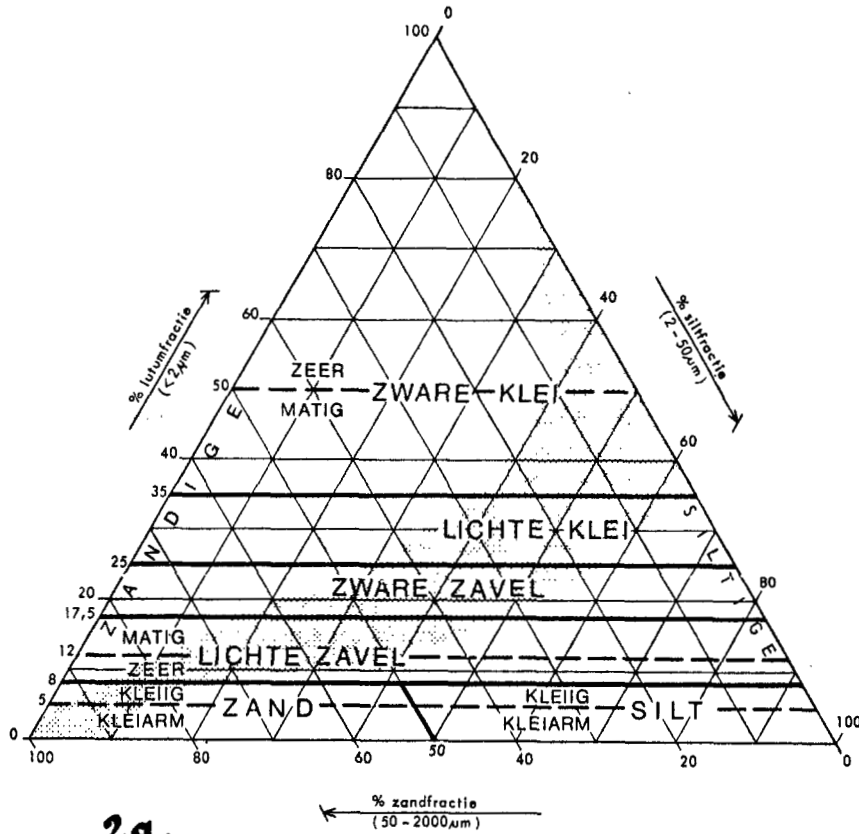
Een vroeger vaak (en ook nu nog wel) gebruikte hoofdfractie bij herkennen en beoordelen van klei is de slibfractie volgens N 209; dit is de hoofdfractie 16 μm . Het uitzetten van de drie eerdergenoemde minerale hoofdfracties in een driehoeksdiagram maakt indeling makkelijk.

In Nederland worden meerdere indelingen voor classificatie gehanteerd. De twee meest gebruikte zijn die van de Rijks Geologische Dienst en die van de Stichting voor Bodemkartering (bij deze agrarisch gerichte indeling ligt de grens tussen zand en silt op 50 μm).



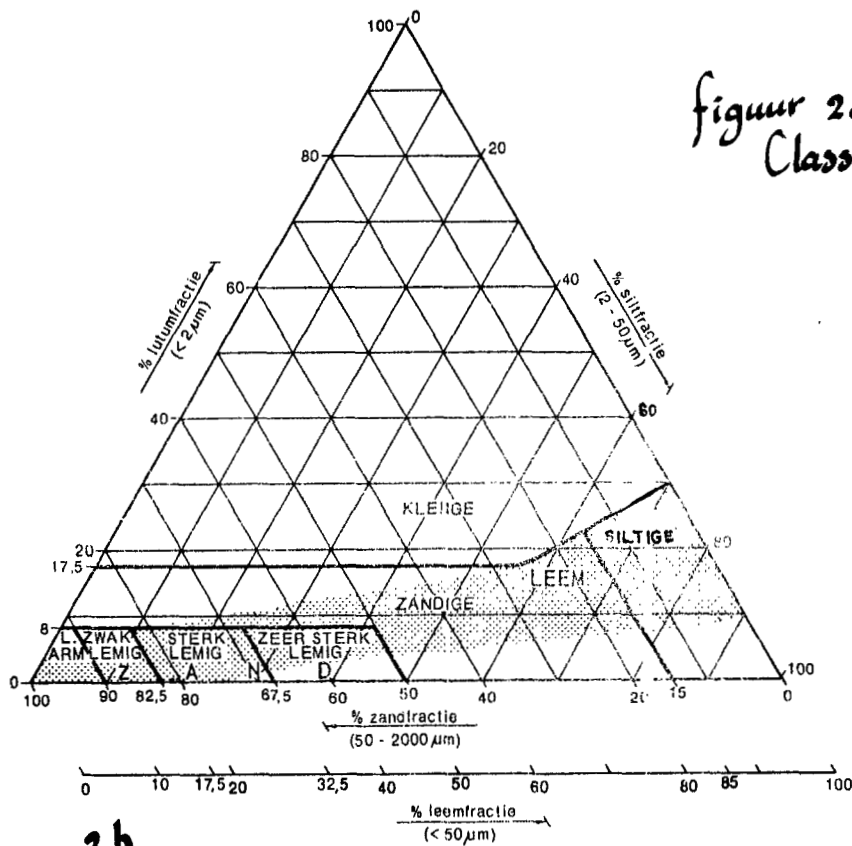
figuur 1,

Classificatiedriehoek voor mengsels (en op 100% gestelde delen van mengsels) met een zand-, een silt- en een lutumfractie



2a,

Indeling en benaming naar het lutumgehalte (percentage $< 2 \mu\text{m}$). Het merendeel van de monsters uit rivier- en zeeleigebieden ligt in de grijze zone.



2b,

Indeling en benaming naar het leemgehalte (percentage $< 50 \mu\text{m}$). Het merendeel van de monsters uit dekzand- en lössgebieden ligt in de grijze zone.

figuur 2a, 2b
Classificatie volgens Stiboka

Het systeem van het Studiecentrum Wegenbouw voor zand sluit aan op de RGD-classificatie.

Classificatie van grond aan de hand van de korrelgrootteverdeling dient slechts voor herkennen en benoemen. Het zegt op zich niets over de fysische en mechanische eigenschappen van de grond (12), hoewel de 3 hoofdfracties ieder hun specifieke inbreng zullen hebben in de eigenschappen van het "mengsel" grond.

Door ervaringen met proeven en uitvoering kan men aan classificatie wel aanwijzingen ontleen over de eigenschappen van de grond (11).

Toch wordt de geschiktheid van klei vaak in verband gebracht met de verhouding tussen de drie hoofdfracties.

Verschillende instanties stellen dan ook eisen aan de grootte van de fracties met het oog op de geschiktheid voor verschillende toepassingen.

Bepaling van het gehalte aan organisch materiaal

Voor een benoeming van de grondsoort is naast de korrelgrootteverdeling ook het gehalte aan organisch materiaal van belang. De naam kan men met behulp van figuur 3 bepalen (12).

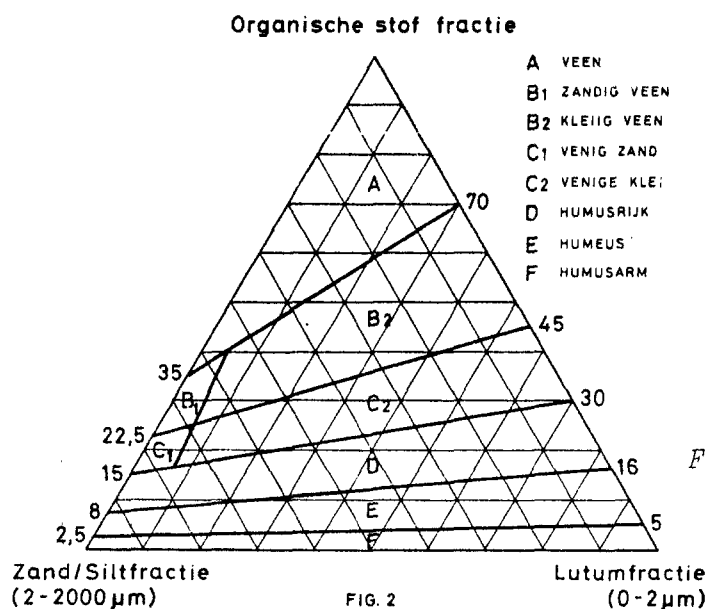


Fig. 3: Classificatiedriehoek voor mengsels met een organische stof-, een zand/silt- en een lutumfractie

Het gehalte aan organisch materiaal van zand voor de wegenbouw bepaalt men met de gloeiproef ((10, proef 7)). Bij het gloeien verdwijnt echter ook aan de kleideeltjes gebonden water, dat bij de droogtemperatuur gebonden blijft. Men zal dus een te hoog "gehalte aan organisch materiaal" bepalen bij kleihoudende grond.

Voor naamgeving wordt vaak de term "humus" gebruikt voor organisch materiaal of organische stof; humus is echter in de

bodem omgezet (verteerd) organisch materiaal. De aard van het organisch materiaal wordt beïnvloed door het milieu en de wijze van sedimentatie.

Organisch materiaal heeft invloed op de eigenschappen van klei: het houdt 3 tot 6 maal zoveel water vast als lutum en het is onderhevig aan oxidatie, waardoor het op den duur verdwijnt. Het organische stofgehalte heeft daardoor invloed op de krimpgevoeligheid en op het volume. Een direct verband met de erosiegevoeligheid is niet zo duidelijk aanwezig.

In de literatuur zijn verschillende eisen te vinden ten aanzien van het gehalte aan organisch materiaal.

Eisen t.a.v. de korrelverdeling en het gehalte aan organisch materiaal

Hierna wordt in tabelvorm een aantal eisen samengevat die in literatuur zijn gevonden: het betreft eisen uit Leidraden, Leidraadontwerpen en handboeken voor zowel zee- als rivierdijken.

De eisen zijn per aspect gegeven.

doorlatendheid van niet gescheurde klei is t.o.v. zand gering

lit.	< 2 μ m	> 63 μ m	org.mat.	opmerkingen
(1)	20-30%	< 40%	-	Zorg voor goede vulling van poriën tussen grotere fracties door kleinere. Binnentalud mag doorlatender zijn dan buitentalud.

krimpgevoeligheid van klei is groter naarmate hij meer lutum en meer organisch materiaal bevat

lit.	< 2 μ m	> 63 μ m	org.mat.	opmerkingen
(1)	< 25%	-	< 5%	lutum + o.m. moeten ruimten in zandkorrelskelet vullen
(2)	-	-	< 5%	bekledingsklei
(2)	-	-	< 7%	kern
(3)	< 37%	-	-	en zo klein mogelijk verschil tussen uitrolgrens en krimp-grens

erosiegevoeligheid. Een minimaal lutumgehalte voor tegengaan van erosie is nodig; scheurvorming stelt een bovengrens aan het lutumgehalte

lit.	< 2 µm	> 63 µm	org.mat.	opmerkingen
(3)	22-55%	-	-	
(1)	>20%	25-10%	<5%	rivierdijken buitentalud
(1)	>15%	25-50%	<5%	rivierdijken binnentalud
(4)	20-40 à 50%	<25%	<3%	klei onder betonblokkenbekleding
(5)	>20%	<25%	-	en goed verdicht

verwerkbaarheid wordt bepaald door de plasticiteitsgrenzen en het vochtgehalte. Het lutumgehalte beïnvloedt de plasticiteitsgrenzen

lit.	< 2 µm	> 63 µm	org.mat.	opmerkingen
(7)	20-50%	-	-	klei onder steenzettingen
(3)	19-37%	-	-	

grasgroei. Voor de ontwikkeling van een dichte zode moet de klei niet te vet zijn

lit.	< 2 µm	> 63 µm	org.mat.	opmerkingen
(1)	<20-25%	-	-	

Voorname aspecten en de daaruit volgende (deel-)eisen in acht nemend, komt men tot de volgende samenvattende of algemene eisen:

lit.	< 2 µm	> 63 µm	org.mat.	opmerkingen
(3)	20-35%	-	-	en 40-70% 16 µm, voor ophogingen en bekledingen
(1)	20-30%	25-40%	-	bekleding buitentalud rivierdijken
(1)	15-30%	25-50%	-	bekleding binnentalud rivierdijken
(2)	25-40%	-	-	Gelders rivierengebied
(5)	>10%	<40%	<10 (à 15)%	bekleding buitentalud op zand
of	<30%	-	<10 (à 15)%	zeedijken

lit.	<16 μ m	org.mat.	opmerkingen
(2)	35-55%	-	bekleding buitentalud, bureau Dijkversterking Oosterschelde
(2)	30-55%	-	bekleding binnentalud, Dijkversterking Oosterschelde

Hoewel de meningen in de verschillende bronnen omtrent de invloed van de 3 hoofdfracties en het gehalte aan organisch materiaal op de vier hier behandelde eigenschappen vaak met elkaar overeenstemmen, zijn er nogal verschillen tussen de gestelde of gewenste eisen t.a.v. de fractiegrootten.

Consistentiegrenzen

De consistentiegrenzen, t.w. de uitrolgrens en de vloeigrens (dit zijn watergehalten van de klei), worden bepaald met proef 15, Eisen RWS 1978 (10). Uit deze grenzen kan men bepalen:

- de plasticiteitsindex (I_p), d.w.z. het watergehaltetraject tussen uitrolgrens en vloeigrens.
- de consistentie-index, die de ligging van het watergehalte van een bepaalde klei aangeeft t.o.v. de uitrol- en vloeigrenzen van die klei. De I_c zegt iets over de verwerkbaarheid. De I_c loopt van 0 bij de vloeigrens tot 1 bij de uitrolgrens.
- de activiteit; dit is de plasticiteitsindex gedeeld door het lutumgehalte. De activiteit is vooral van belang voor het herkennen van het soort kleimineraal (of van mengsels van verschillende kleimineralen).

De consistentiegrenzen kunnen voor twee doeleinden worden gebruikt. Ten eerste kunnen ze behulpzaam zijn bij de classificatie van grondsoorten. Ten tweede kan men ermee een indruk krijgen van de verwerkbaarheid en begaanbaarheid van de klei en de veranderingen daarvan ten gevolge van uitdrogen of bevochtigen.

De consistentiegrenzen zijn arbitrair gekozen en hebben geen fysische achtergrond (deeltjesinteractie); door ervaring ermee zijn ze desondanks redelijk bruikbaar. Zo wordt wel gesteld, dat de I_c groter moet zijn dan 0,75 voor een goede verwerkbaarheid. Toch worden er, voor zover bekend, in Nederland geen eisen gesteld aan klei t.a.v. de consistentiegrenzen. Een bezwaar van de proef op zich kan zijn, dat de grenzen worden bepaald aan sterk geroerd materiaal.

Krimprens

De krimprens is het watergehalte waaronder een (vaste) klei niet verder meer in volume afneemt. Proeven voor de bepaling zijn beschreven (27), maar niet gestandaardiseerd. Men zou ermee het risico van scheurvorming in aangebrachte en verdichte klei kunnen bepalen.

I.3. Conclusies t.a.v. de huidige gang van zaken

De in het voorgaande beschreven proeven zijn geschikt (en ook bedoeld) voor classificatie, dus herkenning en naamgeving van grond. Het doel van classificatie op zich is het groeperen van grondsoorten met gelijke eigenschappen m.b.t. een bepaalde toepassing (zoals waterdichting, erosiebescherming), of een bepaald toepassingsgebied (zoals dijkbouw, landbouw).

De classificatie zal minder specifiek kunnen zijn, naarmate het toepassingsgebied ruimer wordt gesteld.

De huidige proeven zijn toegespitst op een nogal ruim toepassingsgebied, namelijk slechts het algemeen op naam brengen van grondsoorten (is het zand, klei of veen, of een mengsel van deze?). Uit de grondsoort-benaming meent men dan eigenschappen te kunnen afleiden t.a.v. bijvoorbeeld doorlatendheid, erosiebestendigheid. In het verleden zal men, door ervaringen met een beperkt sortiment lokaal gewonnen kleien, deze verbanden hebben kunnen leggen. Bij de buiten het ervaringsgebied verkregen kleien kan men met de huidige proeven geen zekerheid verkrijgen over andere eigenschappen dan korrelsamenstelling of consistentie. Bovendien is het de vraag of men de nu ter beschikking staande proefmethoden consequent hanteert, of dat men het gevoel voor klei letterlijk "in de vingers" meent te hebben. Een enquête onder instanties in de dijkbouw kan hierin meer inzicht geven.

De belangrijkste beperking van de huidige proeven is, dat er geen inzicht mee wordt verkregen in de meeste materiaaleigenschappen. Met de proeven worden geen fysische grootheden bepaald; ze zijn niet gebaseerd op de fysische eigenschappen van de samenstellende delen.

Voor het bepalen van verschillende eigenschappen van klei, en met name van de erosiebestendigheid, blijken ze tekort te schieten.

II Samenstelling en eigenschappen van kleigrond

II.1. Wat is klei?

Klei bestaat uit deeltjes met uiteenlopende chemische samenstelling (kwarts, kleimineralen, organisch materiaal, enz.) en afmetingen. In dit hoofdstuk zal worden ingegaan op de samenstelling en het fysisch verband met de eigenschappen. Over dat verband is nog niet zoveel bekend in de civieltechnische kringen. In de bodemkunde heeft men verbanden tussen de structuur van kleibodems en de ionensamenstelling van het bodemvocht beschreven. Toch zijn er op dit moment weinig kwantitatieve fysische verbanden bekend. Uitgaande van de in hoofdstuk I genoemde constructieve aspecten zouden de volgende eigenschappen van de samenstellende delen van belang kunnen zijn:

- afmetingen en chemische samenstellingen van de afzonderlijke deeltjes
- afmetingen van de poriën tussen de deeltjes
- rangschikking van en krachten tussen de deeltjes
- opgeloste ionen in het poriënwater
- verzadigingsgraad van de poriën.

De chemische, eigenlijk: mineralogische, samenstelling van de klei kan men bepalen met speciale proeven, zoals de differentiaal-thermische analyse of de röntgendiffractiemethode.

Voor het bepalen van de verdeling van de deeltjesafmetingen zijn de in het voorgaande beschreven classificatieproeven redelijk bruikbaar. Zo wordt een grondsoort klei genoemd als het lutumgehalte hoger is dan 25%. Grond met een lutumgehalte van 8 tot 25% wordt gecategoriseerd als zavel. Bij een hoog siltgehalte (meer dan 42 tot 70%) wordt de grond leem genoemd (zie fig. 1 en 2a, b).

Het zijn juist de fijne delen, die de typische klei-eigenschappen bepalen, zoals cohesie, plasticiteit en lage doorlatendheid. Het effect van die fijne delen wordt veroorzaakt door:

- hun afmetingen: een gewichtshoeveelheid fijne deeltjes heeft een groter oppervlak dan eenzelfde gewichtshoeveelheid grove delen. Ook gedragen de deeltjes kleiner dan 1 μm zich met water als een colloid.
- hun vorm: veel deeltjes in de lutumfractie hebben een plaatvorm in plaats van een korrelvorm, hetgeen ook een relatief groter oppervlak geeft.
- hun samenstelling: De mineralogische samenstelling van de lutumfractie is vaak een andere dan die van de zand- en siltfracties. De deeltjes zijn chemisch veel aktiever.
- het uit de drie eerdergenoemde punten resulterende vermogen tot vasthouden van water.
- hun onderlinge bindingen en de invloed daarop van de ionenconcentratie in het poriënwater.

Meer kennis van bovengenoemde eigenschappen, en met name van de laatste twee, zal leiden tot een beter inzicht in de ei-

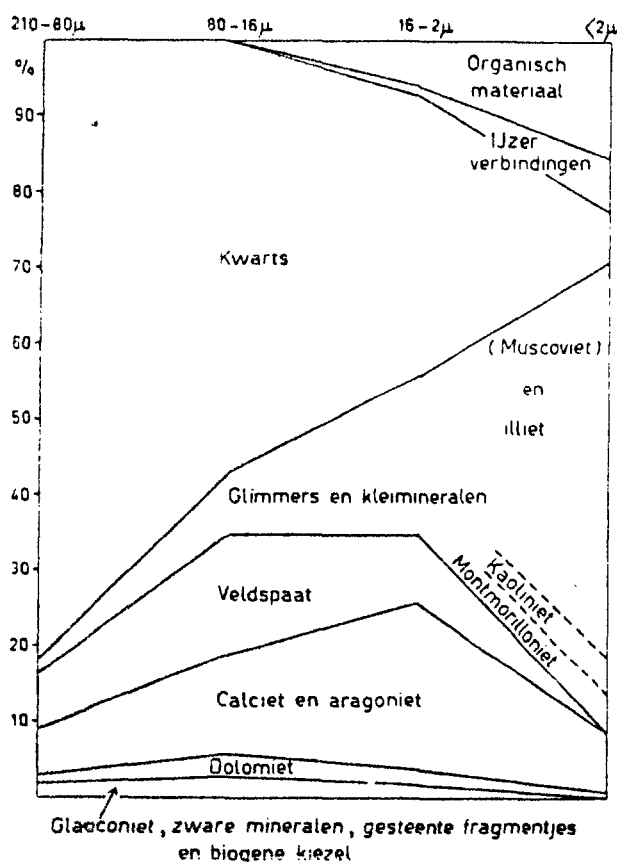
genschappen van kleigrond. In het verloop van dit hoofdstuk wordt een overzicht gegeven van de huidige kennis.

Mineralen in de klei en kleimineralen, ontstaanswijze

De deeltjes waaruit de klei is opgebouwd, bestaan uit de echte kleimineralen of uit andere mineralen. De deeltjes danken hun ontstaan aan verwerking van rotsgesteente. Mechanische verwerking verkleint slechts de oorspronkelijke mineralen uit de gesteenten. Zo vindt men in klei, en ook in de lutumfractie, kleine deeltjes van kwarts (SiO_2), veldspaat, mica, enz.

Chemische verwerking tast de oorspronkelijke mineralen aan, waarbij nieuwe mineralen worden gevormd uit de afbraakprodukten. De kleimineralen zijn zulke nieuw gevormde mineralen.

In figuur 4 is te zien hoe in een bepaald sediment de onderlinge verhouding tussen de mineralen verloopt met de korrelgrootte (21).



figuur 4

Gemiddelde mineralogische samenstelling der Waddenzeesedimenten. De samenstelling is gegeven voor 4 verschillende grootteklassen (horizontaal). Terwijl in het zand (2000 tot ± 60 micron) de kwarts (SiO_2) het belangrijkste bestanddeel vormt, bestaat het lutum (< 2(4) micron) voor het grootste deel uit kleimineralen (waterhoudende aluminiumsilicaten, voornamelijk illiet, kaolinit en montmorilloniet).

Welke kleimineralen bij het chemisch verweringsproces ontstaan, hangt af van het milieu waarin de verwerking plaatsvindt (of plaatsvond). Het klimaat en de daarmee samenhangende vegetatie spelen daarbij een belangrijke rol, evenals de "zuurte" van het oorspronkelijke gesteente). In regenrijke tropische en subtropische klimaten ontstaan vooral 2-laags kleimineralen, zoals kaolinit. In gematigde en droge streken loopt de verwerking langzamer en ontstaan vooral 3-laags kleimineralen, zoals illiet en montmorilloniet (20). Hoewel Nederland in de gematigde zone ligt, is het denkbaar

dat zich hier afzettingen bevinden met kleimineralen die ontstaan zijn onder andere klimaatomstandigheden (in vroegere geologische perioden). Wel wordt gesteld, dat de lutumfractie van de meeste Nederlandse kleigronden bestaat uit (19):

illiet	: 75-80%
kaoliniet	: 10-15%
montmorilloniet	: 3- 5%
kwarts	: 5-10%

In hoeverre de samenstelling van Nederlandse klei varieert, zal door inventarisatie moeten worden onderzocht.

Bouw van de kleimineralen

Kleimineralen vormen plaatvormige kristalletjes. In beginsel zijn het aluminiumsilikaten met hydroxylgroepen; ze kunnen ook enige andere metalen bevatten. De kristallen moet men zich in principe uit twee typen lagen opgebouwd denken, namelijk de:

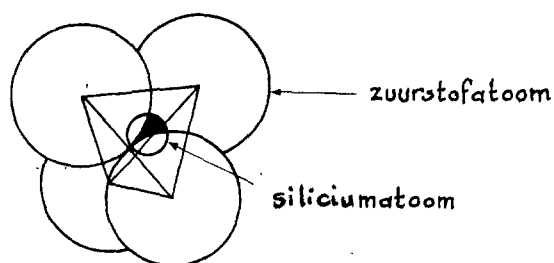
- tetraeder- of silicaatlaag, opgebouwd uit Si- en O-atomen die steeds regelmatige viervlakken vormen. Elk tetraeder deelt 3 O-atomen met naastgelegen tetraeders; aan één zijde steken de vrije vierde O-atomen uit de tetraederlaag.
- octaeder- of aluminaat-/magnesiumlaag- (ook wel gibbsiet-/bruciet-laag genoemd), opgebouwd uit 6 O-atomen of OH-groepen om 1 Al- of Mg-aatoom. O-atomen worden met naastgelegen octaeders gedeeld, de O-atomen en OH-groepen komen daardoor in 2 vlakken te liggen met de Al- of Mg-atomen ertussen.

Door symmetrie en (bijna) gelijke afstanden tussen de O-atomen in beide laagtypen kunnen deze door twee lagen tegelijk worden gebruikt. Het betreft de vierde O-atomen van de tetraederlaag (zie figuur 5).

Een plaatvormig kristal kan opgebouwd zijn uit 1 octaederlaag en 1 tetraederlaag (een tweelaags- of "1:1-klei") of uit 1 octaederlaag en 2 tetraederlagen (aan beide zijden 1, een drielaags- of "2:1-klei"). Bovendien kunnen de Al-atomen in de octaederlaag gedeeltelijk of geheel zijn vervangen (gesubstitueerd) door Mg-atomen of atomen van andere metalen en kunnen de Si-atomen in de tetraederlaag gedeeltelijk zijn vervangen door Al-atomen. Zo komt men tot een groot aantal kleimineralen, die in enkele hoofdgroepen vallen in te delen. Voor de Nederlandse kleigronden zijn de volgende hoofdgroepen van belang:

2:1-kleien, zwellend	: montmorillonietgroep
2:1-kleien, niet zwellend	: illietgroep
1:1-kleien, (niet zwellend)	: kaolinietgroep

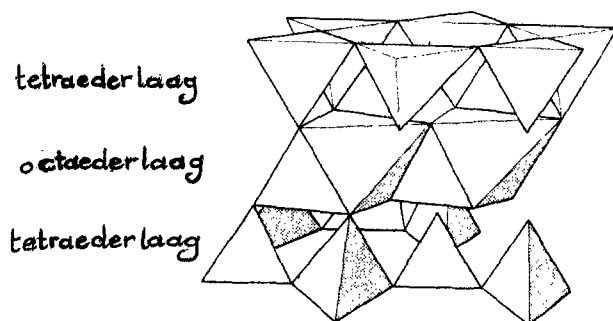
Kleideeltjes bestaan uit 1 kristalplaatje of een stapeling van meerdere kristalplaatjes.



(a)

a. structuureenheid van de tetraeder- of silicaatlaag

figuur 5, structuur van kleimineralen (22)



(b)

b. structuuropbouw van een 3-lagen of 2:1-klei

Onregelmatigheden en lading van de kleideeltjes

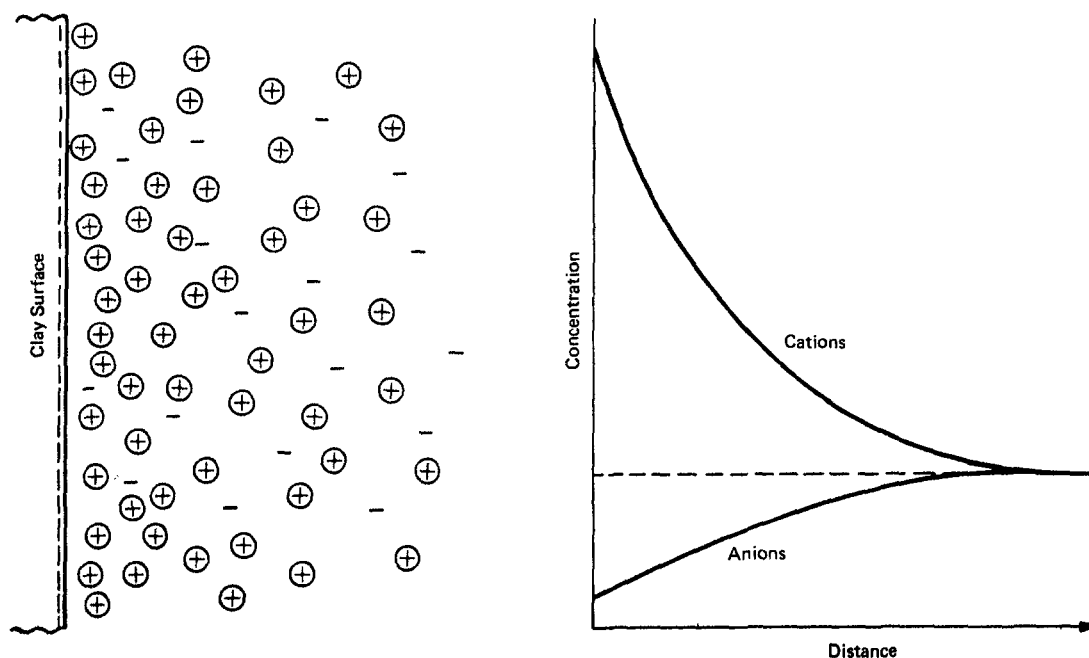
Vooral in de octaederlaag zijn vaak metaalatomen (bijvoorbeeld Al) vervangen door andere metaalatomen met een lagere waardigheid (bijvoorbeeld Mg), terwijl het aantal metaalatomen hetzelfde blijft. Het gevolg van deze substituties is, dat het kleikristal een overschot aan negatieve elektrostatische lading heeft. In veel mindere mate vindt vervanging van Si in de tetraederlaag plaats door Al met hetzelfde resultaat.

Aan de rand van het plaatvormige kleikristal resten open (chemische) bindingen. De elektrische potentiaal van de rand wordt bepaald door ionen die vanuit een oplossing aan de rand gebonden raken. Zo geeft Al de plaatrand een positieve potentiaal bij lage pH en een negatieve potentiaal bij hoge pH.

Dubbellagen

De negatieve lading die door de (onregelmatigheden in de) kristalstructuur wordt veroorzaakt en de door de aanwezigheid van ionen bepaalde potentiaal van de rand (die qua ladingsgrootte kleiner is dan de negatieve kristallading) moeten worden gecompenseerd. Deze compensatie geschiedt door ionen die zich om het kleideeltje, of ook wel tussen de afzonderlijke kristalplaatjes van de deeltjes, bevinden. Van de hierboven genoemde elektrostatische ladingen van het deeltje is de negatieve kristallading de belangrijkste. Compensatie vindt vooral plaats door H^+ , Na^+ , K^+ , Ca^{++} of Mg^{++} .

Bij kleideeltjes in water bevinden de compensatie-ionen zich in het water, met een concentratie die met de afstand tot het kleideeltje afneemt. De negatieve lading aan de buitenkant van het deeltje en de mantel van positieve compensatie- of tegenionen in het water vormen een zogenaamde (elektrische) dubbellaag; zo ook de positieve randlading en de erbij horende tegenionen. De dikte van de dubbellaag wordt bepaald door de grootte van de lading, het soort ionen en de concentratie ervan in het water. De dubbellaag is van groot belang voor het gedrag van de klei (zie fig. 6).



figuur 6, ionenverdeling in het water nabij het oppervlak van een kleideeltje volgens de diffuse dubbellaagtheorie

De tegenionen maken geen deel uit van de kleikristallen. De mate waarin ze uitwisselbaar zijn voor andere (als in een chemisch evenwicht) hangt echter af van het soort kleimineraal. De tegenionen van montmorilloniet zijn alle uitwisselbaar. Tussen de kristalplaatjes in een deeltje kan makkelijk water komen. Bij illiet liggen de kristalplaatjes in een deeltje zo hecht opeen, dat de compenserende K-ionen ertussen niet uitwisselbaar zijn. Slechts de ionen aan de buitenzijde voor het deeltje zijn uitwisselbaar. Bij kaolinite bevinden alle kationen zich aan de buitenzijde van het deeltje en zijn uitwisselbaar. Het uitwisselingsvermogen wordt de kationenuitwisselcapaciteit genoemd (C.E.C.). In de landbouw wordt veel gekeken naar de kationenbezetting; dit is het aandeel van verschillende soorten ionen in de C.E.C.

II.2. Eigenschappen van enkele belangrijke kleimineralen

De belangrijkste kleimineralen in Nederlandse kleigronden zijn illiet, open illiet, kaoliniet, montmorilloniet en soil montmorilloniet.

Ter verduidelijking van de gegevens dient het volgende:

- substitutie = vervanging van atomen in het kristalrooster door andere (van lagere waardigheid)
- tegenionen = compensatie-ionen
- C.E.C. = kationenuitwisselingscapaciteit
- 001 = basisafstand, de dikte van 1 kristalplaatje plus de afstand tot het volgende plaatje; is van belang voor de dikte van de stapeling en is variabel bij zwellende mineralen ($1 = 10^{-10}$ m)
- 1 meq = zoveel mg als het ionengewicht aangeeft; komt overeen met milligrammolecuul.

Hierna volgen de eigenschappen gegroepeerd per kleimineraal:

Montmorilloniet

- 2:1-klei
- substitutie : in octaederlaag: 1 op 6 Al^{3+} door Mg^{2+} ,
in tetraederlaag: soms Si^{4+} door Al^{3+}
- tegenionen : hoofdzakelijk Ca^{2+} , Na^{+}
- C.E.C. : 100-120 meq/100 g
- oppervlak : 500-800 m^2/g
- 001 : 9,13-9,6 (afhankelijk van tegenionen), bij bevochtiging tot 15
- gem. deeltjesafm.: $d = 0,1$ à $1 \mu\text{m}$, $t = \text{ca. } 1/100$ d
- swelling door water tussen de kristalplaatjes (tot 100%); sterke waterbinding; hoge vloeigrens
- erg lage doorlatendheid ($K = 10^{-10} - 10^{-11} \text{ cm/s}$)
- ontstaat uit basisch gesteente bij aanwezigheid van Mg en Ca en tekort aan K.

"Soil"-montmorilloniet

- als montmorilloniet, komt in grond echter veel vaker voor
- substitutie : in tetraederlaag: meer Si door Al^{3+} en Fe^{3+}
- C.E.C. : 70 meq/100 g
- oppervlak : 250 m^2/g
- zwelvermogen maar 20-30 vol%

Montmorilloniet en soil-montmorilloniet hebben op zich een lage mechanische sterkte, maar zijn wel geschikt voor waterdichting.

Illiet

- 2:1-klei
- substitutie : in octaederlaag: soms 2 Al^{3+} door

- 3 Mg^{2+} , in tetraederlaag: 1 op 4 Si^{4+}
door Al^{3+}
- tegenionen : (hoofdzakelijk) K^+
 - C.E.C. : 10-40 meq/100 g (op 150 meq/100 g tegenionen)
 - oppervlak : 120-200 m^2/g
 - 001 : 10
 - gem. deeltjesafm.: $d = 0,1 \text{ à } 2 \mu m$, $t = ca. 1/10 d$
 - zwelt niet door sterke binding door de K-ionen tussen de kristalplaatjes
 - ontstaat uit mica's, veldspaten, enz. in basisch milieu, liefst bij hoge concentraties Al en K; maar ook bij afbraak van organisch materiaal.

Open illiet

- als illiet, maar ontstaat door verwerking van illiet en uitspoeling van de K-tegenionen
- oppervlak : tot 350 m^2/g
- zwelvermogen 15-20 vol% (zwelt dus wel!)
- komt voor in diverse zware komkleien in het Maasgebied en in potklei.

Kaoliniet

- 1:1-klei
- substitutie : zeer gering
- tegenionen : alle tegenionen aan buitenzijde van het deeltje, dus niet tussen kristalplaatjes in
- C.E.C. : 1-10 meq/100 g
- oppervlak : 10-20 m^2/g
- 001 : 7,1
- gem. deeltjesafm.: $d = 0,3 \text{ à } 3 \mu m$, $t = ca. 1/3 \text{ à } 1/10 d$
- zwelt niet
- doorlatendheid : $10^{-8} - 10^{-9} cm/s$

II.3. Klei beschouwd als colloïd

Een mengsel van kleideeltjes en water gedraagt zich als een colloïd, omdat krachten tussen de deeltjes onderling een grotere invloed hebben dan de zwaartekracht op de deeltjes. Sedimentatie in zo'n kleisuspensie vindt slechts langzaam plaats. Wel kunnen de deeltjes samenklonteren of coaguleren, waardoor de sedimentatiesnelheid toeneemt.

Krachten tussen de deeltjes

Tussen de deeltjes werken de volgende aantrekkingskrachten:

- de Van-der-Waalskrachten (omgekeerd evenredig met de zesde tot de derde macht van de onderlinge afstand)
- elektrostatische aantrekking tussen ladingen van verschillend teken (zoals tussen de dubbellagen van plaatvlak en plaatrand van kleikristallen; de grootte is ruwweg exponentieel afnemend met de afstand).

De deeltjes stoten elkaar af door:

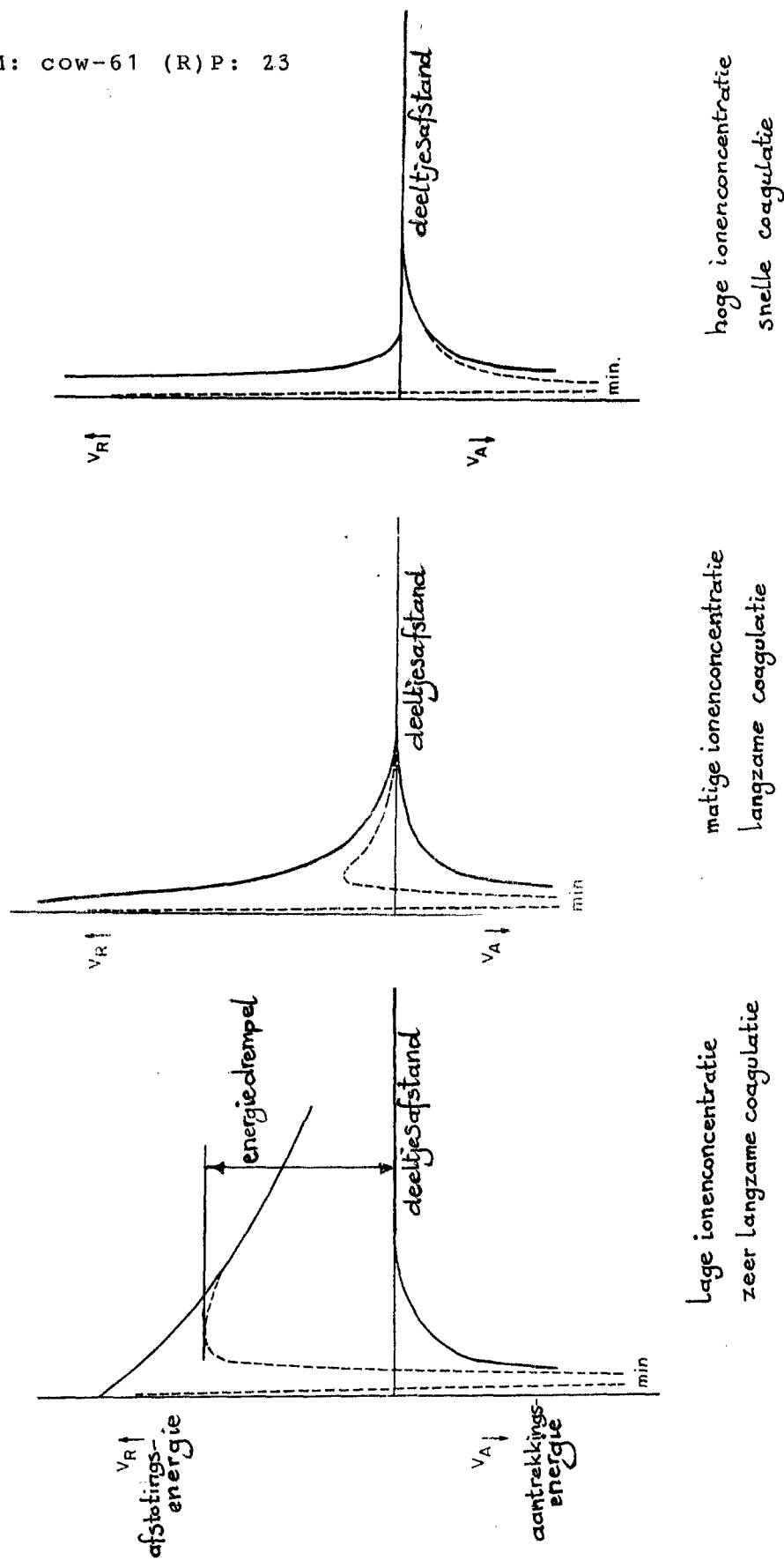
- elektrostatische afstoting tussen ladingen van gelijk teken (zoals tussen de dubbellagen van twee plaatvlakken van kleikristallen; de grootte neemt ruwweg exponentieel af met de afstand)
- afstoting op zeer kleine afstand door geadsorbeerde monomoleculaire waterlagen en door oneffen oppervlakken van de deeltjes.

Sommatie van deze krachten leidt, afhankelijk van de omstandigheden, tot onderlinge afstoting of tot aantrekking van de deeltjes. Ook kunnen de deeltjes elkaar op verschillende wijzen aantrekken:

- aantrekking tussen plaatrand en plaatvlak (flocculatie)
- aantrekking tussen twee plaatvlakken (associatie). Bij flocculatie vormen de kleideeltjes een volumineus sediment met een kaartenhuisstructuur met T-vormige bindingen. Bij associatie liggen de deeltjes parallel en vormen een dicht, slecht doorlatend sediment.

Het effect van ionen

Wat gebeurt, hangt af van de concentratie en de soort ionen in het water tussen de deeltjes. Verhoging van de kationenconcentratie heeft tot gevolg, dat de tegenionen in de dubbellaag met de negatieve kristallading als het ware dichter tegen het kleideeltje worden gedrukt. De dubbellaag wordt minder dik. Hetzelfde gebeurt als eenwaardige ionen in de oplossing worden vervangen door ionen met een hogere waar- digheid. Welke invloed dit heeft op de coagulatesnelheid van kleideeltjes in suspensie wordt duidelijk gemaakt in figuur 7. Door verhoging van de ionenconcentratie neemt de afstotingsenergie op wat grotere afstand af. De energiedrempel wordt daardoor lager en kan makkelijker worden overwonnen door de snelheidsenergie die de deeltjes bezitten t.g.v. de Brownse beweging. Coagulatie (samenklontering) begint. Bij



hoge ionenconcentratie
snelle coagulatie

matige ionenconcentratie
langzame coagulatie

lage ionenconcentratie
zeer langzame coagulatie

figuur 7, afstotings- en aantrekkingsenergie als functie van de deeltjesafstand, bij drie verschillende ionenconcentraties (totale interactie-energie is gestippeld) (15)

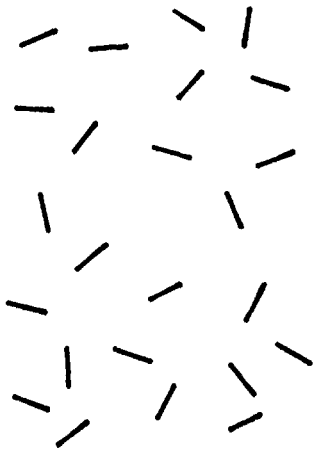
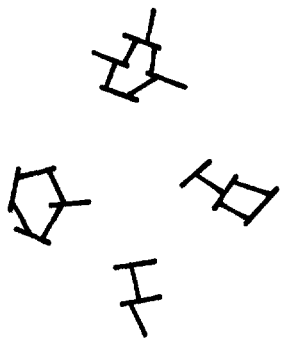
verdere concentratie-verhoging verdwijnt de energiedrempel geheel en volgt snelle coagulatie. De concentratie waarbij snelle coagulatie plaatsvindt, is afhankelijk van het soort ion. Ruwweg kan worden gesteld, dat deze kritische coagulatie-concentratie (c.c.c.) of vlokwaarde omgekeerd evenredig is met de zesde macht van de waardigheid van het ion. Dit betekent, dat de c.c.c. van tweewaardige ionen zo'n 64 maal lager is dan die van eenwaardige (26). Ionen van hogere waardigheid verdringen ook compensatie-ionen van lagere waardigheid uit de dubbellaag. Tussen de c.c.c.'s van kationen van één waardigheid is ook wat verschil, zij het veel minder. De c.c.c. neemt toe (en het coagulerend vermogen af) in de volgorde Cs, Rb, NH₄, K, Na, Li (15).

Flocculatie en peptisatie

Het hiervoor beschreven systeem is echter iets ingewikkelder: behalve de dubbellaag van het negatief geladen plaatvlak plus de compenserende kationen is er aan de plaatranden een dubbellaag van de positief geladen rand met (eventueel geadsorbeerde) compenserende ionen. Ervan uitgaand, dat het water slechts 1 soort kation bevat, gebeurt het volgende bij stijging van de ionenconcentratie:

- bij zeer lage concentratie stoten de kleideeltjes elkaar af door de overheersende invloed van de plaatvlakdubbellaagen. Er zijn geen bindingen tussen de kleideeltjes. De deeltjes bevinden zich in een gepeptiseerde toestand. Bij de zeer langzame sedimentatie, die toch plaatsvindt in de suspensie, komen de kleideeltjes parallel gerangschikt te liggen (met een door de dubbellaagafstoting bepaalde onderlinge afstand). Er wordt een dicht, slecht doorlatend sediment gevormd (zie fig. 8a).
- matige concentratieverhoging (tot de c.c.c.) drukt de dubbellaagen samen, waardoor de deeltjes elkaar dichter kunnen naderen. De plaatvlakdubbellaagen blijven elkaar afstoten, maar contact tussen vlakken en randen wordt mogelijk (de randen hebben een positieve lading). Er vormt zich een kaartenhuisstructuur met T-vormige bindingen; de suspensie flocculeert en sedimenteert tot een relatief doorlatende massa (zie fig. 8b).
- verdere concentratieverhoging vermindert de dubbellaagafstoting van de plaatvlakken zodanig dat de deeltjes met de vlakken tegen elkaar zouden kunnen komen als de T-bindingen nog niet waren gevormd. Na verstoring van de geflocculeerde structuur kan zoiets gebeuren. De binding tussen de deeltjes wordt nog sterker (zie fig. 8c).

Bij een afnemende ionenconcentratie verloopt het proces in omgekeerde richting: de bindingen tussen de deeltjes worden verbroken door een zeer geringe verstoring. De klei raakt in een toestand waarin hij gemakkelijk kan worden gepeptiseerd. Afname van de ionenconcentratie kan bij klei worden veroorzaakt door regenwater. Verdringing van tegenionen door een overmaat aan ionen met een hogere c.c.c. (bijvoorbeeld

		a. lage concentra- tie
		b. hogere concentra- tie
n.v.t.		c. hoge concentra- tie, na verkne- ding
suspensie	sediment	
figuur 8, flocculatie bij toename van de ionenconcentratie		

Ca^{++} door Na^+) kan hetzelfde effect hebben. Een geflocculeerde klei kan ook worden gepeptiseerd door stoffen die de positieve plaatrandlading "omkeren" doordat ze zelf negatief geladen zijn en geadsorbeerd worden door de rand. De T-bindingen worden door deze stoffen verbroken. Bepaalde organische zuren uit plantenresten werken op deze wijze. Ook kan verandering van pH peptiserend werken door Al aan de plaatranden.

Kleideeltjes en water, zwellings

Zwellen van klei door water wordt veroorzaakt door interactie tussen de deeltjes. Bij een kleine onderlinge afstand, tot een dikte van 4 geadsorbeerde monomoleculaire waterlagen, is de hydratatie-energie het belangrijkste. De binding van de eerste lagen is zeer sterk: om de eerste gehydrateerde monomoleculaire laag weg te persen is een druk van 4×10^8 Pa nodig. Zo'n druk zal onder normale civieltechnische en sedimentatie-omstandigheden niet voorkomen. Bij grotere onderlinge afstand werkt de afstoting van de dubbellagen of de osmotische zwellings (t.g.v. de hogere ionenconcentratie in de dubbellaag wordt er water tussen de plaatjes getrokken). Bij toename van de zwellings neemt de zweldruk af, van enkele tientallen atm. tot onder 0,1 atm.

Zwellings of samendrukking zijn niet geheel reversibel, omdat zelfs in netjes parallel gesedimenteerde klei altijd wel enkele deeltjes haaks op de rest staan. Die nemen bij samendrukking kracht op of veroorzaken bij zwellings wrijving door T-bindingen.

De grootte van de zwellings hangt af van het soort (klei-)mineralen. Montmorilloniet vormt de kleinste deeltjes. Bovendien kunnen de deeltjes zwellen, doordat water tussen de kristalplaatjes dringt. Van de 3 genoemde hoofdgroepen zwelt montmorilloniet daardoor het sterkst. De deeltjes van illiet zijn groter en kunnen niet zwellen. De deeltjes van open illiet kunnen wel zwellen. Wel zijn er veel tegenionen aanwezig, zodat het effect van de dubbellagen belangrijk is. Illiet zwelt minder dan montmorilloniet. Kaoliniet heeft grotere deeltjes dan illiet en montmorilloniet. De deeltjes op zich zwellen niet. Er zijn weinig tegenionen, dus is het effect van de dubbellagen klein. Kaoliniet zwelt nauwelijks. Het hier beschrevene geldt voor klei van één soort kleimineraal. Mengsels van kleimineralen zullen waarschijnlijk een gedrag vertonen in overeenstemming met de grootte van de componenten. Aanwezigheid in het grondmengsel van andere mineralen die niet zwellen of dubbellagen vormen, zal het zwelvermogen verminderen.

Ook is de pakingsdichtheid van invloed. Klei die in gepeptiseerde toestand is afgezet is dichter gepakt dan een klei met dezelfde minerale samenstelling in geflocculeerde toestand. De werking van de dubbellagen tussen de parallel gesedimenteerde kleideeltjes zal meer zwellings en krimp veroorzaken, dan bij geflocculeerde klei optreedt.

Op een ander schaalniveau worden krachten op het korrelskelet uitgeoefend ten gevolge van waterspanningen in de poriën

tussen de korrels of deeltjes. In nauwe poriën kunnen bij lage verzadigingsgraad capillaire (zuig-)spanningen optreden. Deze spanningen kunnen krimp veroorzaken. Water speelt nog een zeer belangrijke rol bij aan- en vooral afvoer van tegenionen. De effecten van concentratieverschillen zijn al eerder beschreven.

II.4. Enkele praktijkvoorbeelden

Flocculatie en peptisatie

Als klei sedimenteert uit zeewater gebeurt dat in geflocculeerde toestand door een overmaat aan tegenionen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+}). Verzoet zo'n mariene afzetting door regenwater, dan kan de tegenionenconcentratie dalen tot onder de c.c.c. voor de betreffende klei, en peptisatie vindt dan gemakkelijk plaats. Gelukkig bevatten zee- (en ook rivier-)klei-afzettingen in het algemeen veel CaCO_3 . De Ca-ionen houden de klei in geflocculeerde toestand, waarbij de aanwezigheid van vrije Ca-ionen wordt bevorderd door sulfaationen in de mariene afzettingen. Op den duur spoelt echter Ca^{2+} ook uit t.g.v. koolzuur in het regenwater en kan ooit peptisatie optreden. Kleien die kalkarm zijn afgezet, bijvoorbeeld bij een hoog gehalte aan organische zuren of koolzuur, zullen wel kunnen peptiseren.

De toestand waarin de grond zich bevindt, is van groot belang voor de landbouw omdat die de bruikbaarheid voor bepaalde teelten beïnvloedt. Geflocculeerde klei krijgt bij ploegen e.d. een gunstige landbouwkundige structuur (vormt niet te grote, niet snel uiteenvallende kluiten). Klei die makkelijk peptiseert geeft echter een slechte structuur aan de bodem. Bij een hoog lutumgehalte is de grond zeer slecht doorlatend (in tegenstelling tot geflocculeerde klei) en ontstaan bij ploegen grote kluiten. Makkelijk peptiserende klei in zavelige grond leidt tot verslemping: onder invloed van de regen vallen de kluiten uiteen, waarbij de fijnere delen in de poriën van het onderliggende materiaal spelen. Zo wordt de bovenlaag van de bodem water-ondoorlatend. Men kan de klei in geflocculeerde toestand houden door de grond te begipsen of te bekalken.

Voor de erosiegevoeligheid van een klei is de toestand ook van belang. Met name in het buitenland heeft men (slechte) ervaring met dispersieve (dit is makkelijk te peptiseren) klei in taluds, irrigatiewerken en stuwdammen van klei of met een kleikern.

Een bijzonder verschijnsel dat is terug te voeren op flocculatie en dispersie is "quick clay". Dit is een in koude streken afgezete mariene klei met een laag kleimineraalgehalte in de lutumfractie, een hoog watergehalte en een ten gevolge van uitspoeling zeer laag geworden gehalte aan tegenionen. De (nog steeds) geflocculeerde structuur van de klei-(mineraal-)deeltjes valt bij geringe verstoring ineen, zodat een soort zettingsvloeiing optreedt. Hierbij peptiseren de kleideeltjes. Door toevoegen van zout (dus tegenionen) kan men de kleideeltjes weer doen flocculeren; de klei stijft op.

Om een indruk te krijgen in welke toestand de grond zich bevindt en in hoeverre daarin verandering (door bijvoorbeeld uitspoeling) is te verwachten, onderzoekt men de "kationenbezetting", d.w.z. de aan klei (en ook aan humus, tesamen het "adsorbtiecomplex") gebonden tegenionen. Omdat vooral Na^+ makkelijk aanleiding kan geven tot erosie, ligt de nadruk op het aandeel van Na^+ in de kationenbezetting of in

het water. Zo bepaalt men de SAR (Sodium Adsorption Ratio = natriumadsorbtieverhouding) en het ESP (Exchangeable Sodium Percentage = uitwisselbaar natriumpercentage) (28).

Zwellen en krimpen

Schade aan op klei gefundeerde bouwwerken is opgetreden door bevochtiging van sterk zwellende klei (met bijv. een hoog montmorillonietgehalte) en door krimp ten gevolge van wateronttrekking door bomen in droge perioden. Een uit grond gebouwde dijk is op zich veel minder gevoelig voor volumeveranderingen van de erin verwerkte klei.

Scheurvorming door krimp van een afsluitende kleilaag vergroot de doorlatendheid daarvan zeer sterk en kan daardoor belangrijke schade van de waterkering inleiden. Het grondwaterregime in dijken is nog niet zodanig onderzocht dat o.a. bekend is wat de invloed is van grasgroei. Wel kan worden gesteld, dat krimpscheuren bij bevochtiging nooit geheel zullen dichtzwellen.

Bij knipkleigronden (dit zijn mariene afzettingen waarin CaCO_3 en pyriet ontbreken en die daardoor makkelijk peptiseren na uitspoelen van Na^+) vindt sterke krimp en zwelling plaats. Materiaal dat in de (diepe) krimpscheuren valt, wordt bij zwelling weggeperst en veroorzaakt een hobbelig maaiveld.

Uit deze voorbeelden van verschijnselen die in de praktijk bij klei zijn geconstateerd blijken de bijzondere eigenschappen van het materiaal klei.

III Nieuw onderzoek richting, en wenselijkheid

Huidige kennis

Bij het opstellen van het voorgaande is gebleken dat onze kennis op vele punten onvolledig is. Uit hoofdstuk I kunnen we twee dingen concluderen.

Ten eerste weten we niet voldoende welke keuringsproeven en -criteria momenteel door de met dijkbouw belaste instanties worden gehanteerd en welke relatie zij veronderstellen tussen het mechanisme van de proef en een bepaalde constructieve eigenschap van de klei. Dit punt kunnen we aanpakken met een enquête onder die instanties.

Ten tweede weten we niet goed welke materiaaleigenschappen van de klei aan die klei bepaalde constructieve eigenschappen geeft. We zullen daarom meer inzicht moeten krijgen in de fundamentele mechanismen in de klei. Hoofdstuk II geeft een overzicht van de in klei werkzame mechanismen, al kon nog geen kwantificering worden gegeven.

Met literatuurstudie kunnen we bepalen welke mechanismen van belang zijn voor klei die in de dijkbouw moet worden gebruikt. Het fundamenteel onderzoek naar de fysische processen zelf, dus naar de kleideeltjes en hun interactie, ligt niet zozeer op het terrein van de techniek, vandaar dat wij ons tot literatuurstudie op dit gebied moeten beperken.

Aard van het verdere onderzoek

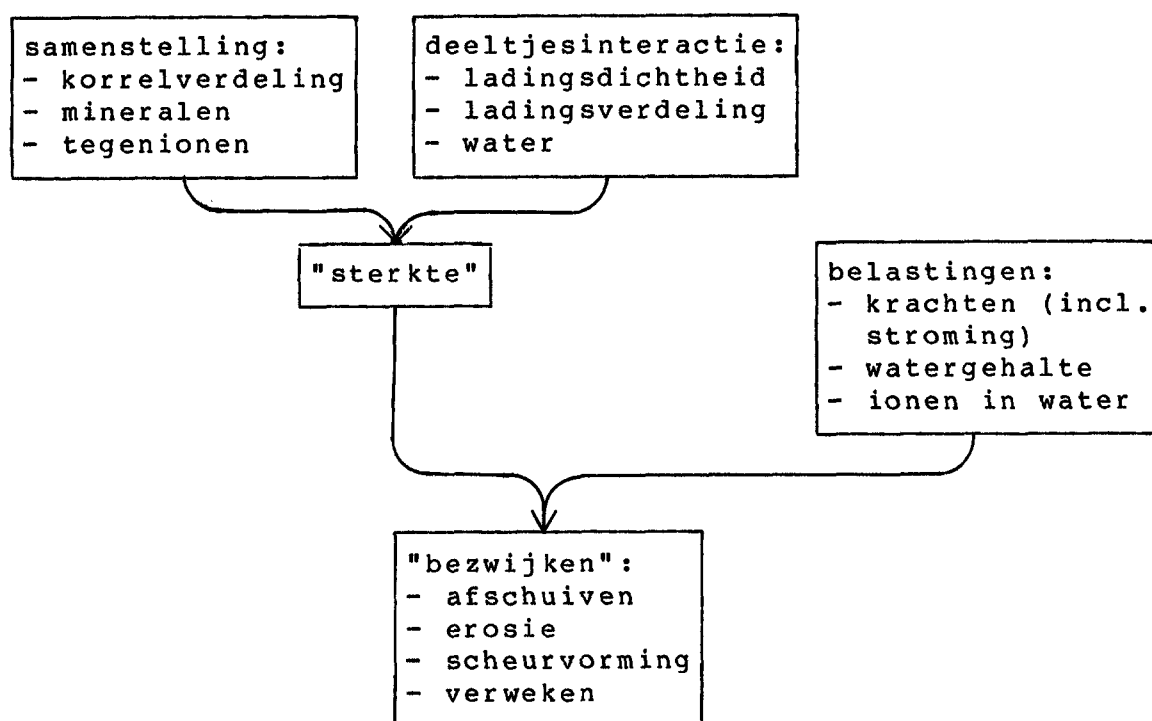
Doel van door ons te verrichten onderzoek is niet het verwerven van fundamentele kennis van klei op zich, maar het verkrijgen van bruikbare keuringscriteria en -proeven voor de dijkbouwpraktijk. In die praktijk wil men voorkomen dat de klei bezwijkt, d.w.z. niet voldoet aan een constructief criterium (zie I.1.). Bezwijken kan men zien als een sommatie van de factoren van sterkte en belasting (zie figuur 7). De sterkte, d.w.z. de weerstand die de klei biedt aan een bepaalde belasting, is weer gebaseerd op de samenstelling en de krachten tussen de samenstellende delen.

Er zijn drie benaderingen mogelijk van de kleikeuring:

- de zwarte-doos-benadering. Deze gaat voorbij aan de factoren waaruit de sterkte is samengesteld en generaliseert soms ook de belastingsfactoren.

Men doet bezwijkproeven op modellen of monsters (zoals de triaxiaalproef en diverse erosieproeven) en kan daarmee in een aantal gevallen de geschiktheid van een klei voor één concrete toepassing bepalen. Deze benadering geeft echter geen verklaring (mechanisme) voor het bezwijken.

- de fundamentele benadering. Men betreft hierbij alle factoren van sterkte en belasting in de keuring van de klei (zie figuur 7). Dit vereist zowel kwalitatieve als kwantitatieve kennis van deze factoren tot in de kleinste onderdelen; "bezwijken" is dan de som van alle samenstellende krachten. Keuring zal bij deze benadering plaatsvinden door het bepalen van de samenstelling van de klei; de theorie van de deeltjesinteractie is (dan) bekend en de be-



figuur 7, Schema analyse van het bezwijken van klei

lastingsfactoren zijn òf gemeten òf aangenomen. Voordat deze benadering kan worden toegepast moet meer (alle) fundamentele kennis worden verworven.

- de empirisch-praktische benadering. Hiermee wordt bedoeld een benadering die wel is gebaseerd op zo diepgaand mogelijke fundamentele kennis, maar die bij keuring kennis van alle sterkte- en belastingsfactoren niet nodig acht, omdat door empirie is gebleken dat bepaalde factoren niet zo belangrijk zijn. Wellicht leidt deze benadering op korte termijn tot praktisch bruikbare keuringsmethoden, omdat die al kunnen worden toegepast als nog geen totaal fundamenteel inzicht in klei bestaat. Men moet echter wel zijn voorbereid op verrassingen: de klei kan onder extreme omstandigheden onvoorspelbaar reageren; nieuw theoretisch inzicht kan leiden tot de conclusie dat een bepaalde proefmethode onbruikbaar blijkt te zijn.

De in hoofdstuk I beschreven proeven zou men kunnen zien als behorende tot de derde benadering. De "verrassingen" hebben zich al voorgedaan bij keuring t.a.v. erosiebestendigheid en krimp: de korrelverdeling geeft geen goede indicatie voor het gedrag onder de belasting. Dit probleem is dan ook de aanleiding van het onderhavige onderzoeksvoorstel. Eerst zal men meer fundamentele kennis m.b.t. de constructie-eigenschap moeten krijgen, waarna men een andere proef kan opzetten. Men zij echter gewaarschuwd tegen het te snel opzetten van nieuwe proefmethoden zonder veel vergroting van fundamenteel inzicht.

Een keuze voor één van deze benaderingen zal bepaald wor-

den door de praktische bruikbaarheid van die benadering. De keuringsproef moet een goede maatstaf geven voor de beschouwde constructie-eigenschap en bovendien nog praktisch (lees: niet duur) zijn.

De zwarte-doos-benadering vraagt veel proeven; de fundamentele benadering eist een (bijna) volledig fundamenteel inzicht alvorens men een proefmethode kan uitwerken. De empirisch-praktische benadering lijkt bruikbaar, maar vraagt toch eerst een fundamenteel inzicht dat dieper gaat dan het huidige. Studie naar de relatie tussen constructieve eigenschappen en fundamentele mechanismen in de klei is zeker gewenst. Zoals gezegd zullen wij ons op dit gebied voorlopig tot literatuurstudie moeten beperken.

Onderwerpen voor onderzoek

Op dit moment is duidelijk, dat in het kader van vergroting van de fundamentele kennis de volgende onderwerpen zeker onderzocht moeten worden:

- de mineralogische samenstelling van de Nederlandse kleien: voorkomen, "korrel"-afmetingen, mineralen.

De RGD doet onderzoek naar kleivoorkomens en hun samenstelling. Onderzoek door ons kan gebruik maken van en aansluiten op dat RGD-onderzoek.

- het gedrag van klei als colloïd: eventueel verschil tussen suspensie en sediment, verband tussen dispersie en erosie, uitvlokconcentraties voor mineraalmengsels en/of ionenmengsels, kationenbezetting en -uitwisselingssnelheid, deeltjesinteractie.

Op dit gebied is onderzoek gedaan door bodemkundigen (en ook door bepaalde geotechnici (29)). Wij kunnen ons waarschijnlijk beperken tot literatuurstudie (door een bodemkundige), ondersteund met (empirische) proeven.

- de rol van het water in de klei: hydratatie, osmose, capillaire spanningen, vochthuishouding, krimp en swelling. Dit onderzoek is van belang i.v.m. scheurvorming. Op dit gebied kan worden begonnen met literatuurstudie, later mogelijk aangevuld met (empirische) proeven. Ook op dit gebied is al veel onderzoek gedaan door landbouwkundigen/bodemkundigen en bepaalde geotechnici.

Later zullen zich wellicht andere onderwerpen dan de hierboven genoemde aandienen.

Conclusie t.a.v. een eerste onderzoek

Om tot vergroting van het fundamentele inzicht te komen, zal moeten worden begonnen met een literatuurstudie. Deze verkennende studie kan aangeven in welke richting verder theoretisch onderzoek nodig is en op welk gebied proeven gedaan kunnen/moeten worden. Onderwerpen voor deze studie moeten zijn: de deeltjesinteractie in de klei, invloed van diverse kleimineralen, idem van verschillende compensatie-ionen en ionenconcentraties, invloed van sedimentatiewijze en -milieu.

<u>Literatuurverwijzingen</u>	<u>datum</u>
(1) concept Leidraad Rivierdijken	840416
(2) syllabus cursus Rivierdijken en Boezemkaden, J. Dekker: Dijkbouwmaterialen en eigenschappen	830000
(3) PW-ZH, Rapport inzake onderzoek t.b.v. het formuleren van bestekseisen voor klei voor de dijkbouw	810100
(4) concept Leidraad Betonbekledingen	840416
(5) Empfehlungen für die Ausführung von Küsten- schutzwerken, deel B	810000
(6) Seedeichbau, Broßkamp e.a.	760000
(7) Handboek Oeverbeschermingsconstructies K + O	830000
(8) Kwaliteitseisen voor klei, conceptnotitie van Dekker	830407
(9) Kwaliteitseisen voor klei, notitie Dekker, onderzoeksvoorstel	830418
(10) Eisen 1978 voor bouwstoffen wegenbouw, RWS	780000
(11) S.C.W.-Classificatie van zand	750600
(12) Classificatie van onverharde sedimenten, RGD	750000
(13) Cultuurtechnisch vademecum	(71+)
(14) Van der Hey en Peerlkamp, Kennis van grond en bodem	750000
(15) Van Olphen, An introduction to Clay Colloid Chemistry	770000
(16) Lambe + Whitman, Soil Mechanics, part II	690000
(17) Zuur, Bodemkunde der Nederlandse bedijkingen en droogmakerijen, deel B	540800
(18) Stiboka, Verklaring bij de bodemkaart	
(19) Verband tussen het uiterlijk van de kleideeltjes en de grondmechanica, LGM mededelingen IV3, 1960, H.W. van der Marel	600100
(20) Algemene geologie, Doeglas e.a., redactie Panne- koek	730000
(21) De bodem der Waddenzee (diktaat) L.M.J.U. van Straaten, Z.J.	
(22) Soil Processes, Brian Knapp	790000
(23) Deer, Howie, Zussman, An introduction to the Rock-forming Minerals	740000
(24) Van der Marel, Kleimineralen en Grondmechanica, LGM meded. I.3	570100
(25) Beutelspacher, Van der Marel, Toepassing van elektronenmicroscopie in de grondmechanica, LGM meded. XI.2	661000
(26) Weststrate/LGM, Klei-erosie, kolomexperimen- ten...niet gepubl.	840500
(27) Kézdi, Handbuch der Bodenmechanik, Bd I Bodenphysik	690000
(28) Klei onder steenzettingen voor Oesterdam en Philipsdam	840300
(29) J.K. Mitchell, Fundamentals of soil behavior	760000