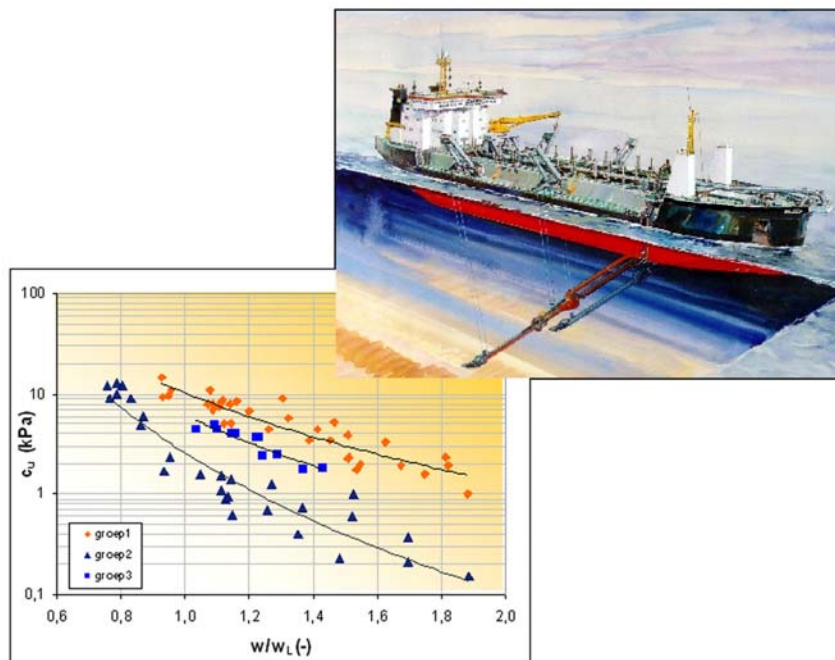


Correlaties tussen schuifsterkte en indexparameters van slib

Afstudeerrapport

E.D.P. Eijnthoven
Delft, februari 2004



Royal Boskalis Westminster nv
Dredging Development Department



Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek
en Geowetenschappen

Correlaties tussen schuifsterkte en indexparameters van slib

Afstudeerrapport

**E.D.P. Eijnthoven
Delft, februari 2004**

Afstudeercommissie:

prof.dr.ir. M.J.F. Stive
ir. G.L.M. van der Schrieck
dr.ir. L.M. Merckelbach
dr.ir. S.E.J. Spierenburg
drs. G.A.M. Kruse

TU Delft
TU Delft
TU Delft en NIOZ
Boskalis
GeoDelft



Royal Boskalis Westminster nv
Dredging Development Department
Rosmolenweg 20
Postbus 209
3350 Papendrecht
tel: 078 696 9099
www.boskalis.com



Technische Universiteit Delft
Faculteit der Civiele Techniek en Geowetenschappen
Interfaculteit Waterbouwkunde
Stevinweg 1
2828 CN Delft
tel. 015 278 4614
www.waterbouw.tudelft.nl



Voorwoord

Dit rapport vormt de afronding van mijn opleiding Civiele techniek en Geowetenschappen aan de Technische Universiteit van Delft. Het onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met Royal Boskalis Westminster nv te Papendrecht.

Het onderzoek is uitgevoerd onder de supervisie van prof.dr.ir. M.J.F. Stive. Ik wil hem bedanken voor zijn begeleiding en adviezen gedurende mijn afstudeeronderzoek. Dank gaat ook uit naar ir. G.L.M. van der Schrieck en dr.ir. L.M. Merckelbach voor de vele opmerkingen en adviezen die ik van hen gekregen heb bij het maken van dit verslag. Verder wil ik drs. G.A.M. Kruse van GeoDelft bedanken voor zijn geheel vrijwillige bijdrage aan dit onderzoek.

Ook gaat een woord van dank uit naar Boskalis voor de geboden mogelijkheid voor het verrichten van dit afstudeeronderzoek. Hierbij wil ik in het bijzonder mijn dagelijkse begeleider dr.ir. S.E.J. Spierenburg bedanken voor zijn inzet, uitleg en vele ideeën, welke een belangrijke bijdrage geleverd hebben aan de totstandkoming van dit onderzoek. Verder hebben mijn collega afstudeerders bij Boskalis gezorgd voor gezellige onderbrekingen gedurende de dagelijkse werkzaamheden in Papendrecht.

Verder wil ik mijn ouders bedanken voor de onvoorwaardelijke steun die ik de afgelopen jaren heb mogen ontvangen bij het voltooien van mijn studie. Tot slot, maar zeker niet in de laatste plaats, wil ik Amara bedanken voor het fijne afgelopen jaar.

Evert Eijnhoven
Delft, februari 2004

Samenvatting

Koninklijke Boskalis Westminster nv heeft een model ontwikkeld waarmee de te behalen producties bij het baggeren van slib berekend worden. Belangrijke grondspecifieke invoerparameters voor dit model zijn de dichtheid en de ongeroerde schuifsterkte van de te baggeren grond. De informatie over de schuifsterkte van slib is soms niet of slechts zeer gebrekkig aanwezig, wat tot gevolg heeft dat de uitkomsten van het productieberekeningsmodel een bepaalde onzekerheid bezitten. De invoer van de schuifsterkte van slib in het productieberekeningsmodel gebeurt in de huidige praktijk mede op basis van ervaring opgedaan bij eerdere baggerwerken.

De doelstelling van dit onderzoek is het opstellen van een gevalideerd classificatiemodel waarmee op basis van de beschikbare omgevingsfactoren en metingen voldoende nauwkeurige waarden toegekend kunnen worden aan de ongeroerde schuifsterkte van slib op een bepaalde baggerlocatie.

Literatuurstudie heeft inzicht gegeven in de bestaande correlaties voor de schuifsterkte van klei en heeft geleerd dat een verband voor de ongeroerde schuifsterkte gebaseerd op indexparameters ontbreekt. Onder indexparameters worden parameters verstaan die de mogelijkheid bieden onderscheid te maken tussen verschillende typen gronden. Verder heeft de literatuurstudie inzicht gegeven in de bepalende indexparameters en hun relaties met de schuifsterkte. Deze hebben ten grondslag gelegen aan de opzet van een dataverzameling van gronden welke als slib gekwalificeerd kunnen worden. Deze verzameling is gebruikt om te kijken in hoeverre de uit de literatuur bekende relaties voor klei toegepast kunnen worden op slib. De belangrijkste uitkomst hiervan is dat de relatie voor de geroerde schuifsterkte van Leroueil [1983] goed voldoet.

De hoofdconclusie van dit onderzoek is dat wanneer directe metingen van de ongeroerde schuifsterkte ontbreken het mogelijk is de ongeroerde schuifsterkte te berekenen met indexparameters. De basis van deze correlatie wordt gevormd door de verhouding tussen watergehalte (w) en vloeigrens (w_L), waarbij de indexparameters organisch gehalte en de fractie kleiner dan $2 \mu\text{m}$ bepalen welke berekening voor de ongeroerde schuifsterkte gebruikt dient te worden. Voor het opstellen van de relaties voor de ongeroerde schuifsterkte is gebruik gemaakt van regressiemethoden. Bij het opstellen van deze vergelijkingen is gebruik gemaakt van data verspreid over de gehele wereld en het gebruik van deze relaties wordt daarom niet beperkt tot regionale setting. De vergelijkingen voor de ongeroerde schuifsterkte zijn samengevat in onderstaande tabel.

$c_{u,\text{correlatie}}$ (kPa)		voorwaarden	
		organisch gehalte (%)	% < $2 \mu\text{m}$
1.	$10,24 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,00}$	< 4	> 40
2.	$6,10 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,45}$	< 4	< 40
3.	$2,58 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-4,65}$	> 7	niet van belang

De gevoeligheid van een afzetting is gedefinieerd als de verhouding tussen de ongeroerde en de geroerde schuifsterkte. De vergelijkingen voor de ongeroerde schuifsterkte uit bovenstaande tabel en die voor de geroerde schuifsterkte maken het mogelijk een schatting



van de gevoeligheid te maken indien metingen van de geroerde en/of ongeroerde schuifsterkte ontbreken.

De belangrijkste aanbeveling is dat uitbreiding van de dataverzameling wenselijk is. Ten eerste omdat het tweede verband uit de voorgaande tabel gebaseerd is op een beperkt aantal punten. Ten tweede is uitbreiding wenselijk zodat mogelijk meerdere uitzonderingsgevallen bekend worden en dit wellicht de mogelijkheid biedt ook voor deze uitzonderingen correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte op te stellen. In dit onderzoek wordt kwalitatief beschreven onder welke omstandigheden afwijkingen verwacht kunnen worden, maar kan er doordat het aantal uitzonderingen te gering is geen voorstel gedaan worden voor een benadering van de ongeroerde schuifsterkte voor deze uitzonderingen.

Inhoudsopgave

VOORWOORD.....	I
SAMENVATTING	II
1 INLEIDING	1
1.1 ACHTERGROND	1
1.2 PROBLEEMSTELLING	1
1.3 DOELSTELLING.....	1
1.4 WERKWIJZE.....	1
1.5 OPZET VAN HET RAPPORT	2
2 IDENTIFICATIE EN CLASSIFICATIE VAN SLIB	4
2.1 SAMENSTELLING BODEM	4
2.1.1 Niet cohesieve deeltjes.....	4
2.1.2 Gas.....	4
2.1.3 Cohesieve deeltjes.....	5
2.1.4 Water	6
2.1.5 Biologische activiteit	6
2.2 DEFINITIE VAN SLIB	7
2.2.1 Consistentiegrenzen.....	7
2.2.2 Definitie van slib.....	9
3 DICHTHEID VAN SLIB.....	10
3.1 BEPALENDE FACTOREN VOOR DE DICHTHEID	10
3.1.1 Samenstelling van het slib	10
3.1.2 Afzettingsmilieu.....	10
3.1.3 Mate van consolidatie.....	10
3.2 BEPALING VAN DE DICHTHEID	12
3.2.1 Directe bepaling van de dichtheid.....	12
3.2.2 Indirecte bepaling van de dichtheid.....	12
4 SCHUIFSTERKTE VAN KLEI	15
4.1 ONGEDRAINEERDE SCHUIFSTERKTE	15
4.2 BEPALENDE PARAMETERS EN HUN RELATIES MET DE SCHUIFSTERKTE.....	16
4.2.1 Watergehalte en consistentiegrenzen.....	17
4.2.2 Organisch gehalte.....	21
4.2.3 Korrelverdeling.....	24
4.2.4 Gas.....	26
4.2.5 Gevoeligheid.....	26
4.3 BEPALING VAN DE SCHUIFSTERKTE	29
4.3.1 Directe bepaling van de schuifsterkte.....	29
4.3.2 Indirecte bepaling van de schuifsterkte	29
5 ANALYSE VAN CORRELATIES VOOR DE GEROERDE SCHUIFSTERKTE	30
5.1 VERZAMELING VAN SLIBDATA.....	30
5.1.1 Data verzameling.....	30
5.1.2 Data karakterisering.....	31
5.2 ANALYSE VAN DE VOOR KLEI OPGESTELDE RELATIES TOEGEPAST OP SLIB	33
5.2.1 Analyse correlaties voor de geroerde schuifsterkte.....	33
5.2.2 Analyse correlaties voor de gevoeligheid.....	39
5.3 CONCLUSIES.....	41



6	BEPALING CORRELATIES VOOR DE ONGEROERDE SCHUIFSTERKTE	42
6.1	ANALYSE VAN DE PARAMETERS	42
6.1.1	<i>Watergehalte en dichtheid</i>	<i>42</i>
6.1.2	<i>Organisch gehalte.....</i>	<i>44</i>
6.1.3	<i>Korrelverdeling.....</i>	<i>45</i>
6.1.4	<i>Onafhankelijke parameters.....</i>	<i>45</i>
6.2	BEPALING CORRELATIE NIVEAU I	48
6.3	BEPALING CORRELATIE NIVEAU II	52
6.4	VERIFICATIE CORRELATIES VOOR DE ONGEROERDE SCHUIFSTERKTE	66
6.4.1	<i>Data karakterisering.....</i>	<i>66</i>
6.4.2	<i>Toetsing van correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte</i>	<i>71</i>
6.5	BEPALING CORRELATIE NIVEAU IB	73
6.6	CONCLUSIES	79
7	BEPALING CORRELATIES VOOR DE GEVOELIGHEID.....	80
7.1	ANALYSE VAN BESTAANDE CORRELATIES.....	80
7.2	BEPALING CORRELATIES VOOR DE GEVOELIGHEID.....	83
7.3	CONCLUSIES	90
8	OVERZICHT TOEPASSINGSMOGELIJKHEDEN CORRELATIES	91
8.1	CONTROLE INVOERPARAMETERS	91
8.1.1	<i>Watergehalte en volumegewicht</i>	<i>91</i>
8.1.2	<i>Consistentiegrenzen</i>	<i>92</i>
8.2	METHODE VAN TOEPASSING	93
9	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	96
9.1	CONCLUSIES	96
9.1.1	<i>Conclusies bij de literatuurstudie</i>	<i>96</i>
9.1.2	<i>Conclusies bij de correlaties</i>	<i>96</i>
9.2	AANBEVELINGEN	98
	LITERATUUR.....	99
	LIJST VAN SYMBOLEN.....	102
	LIJST VAN FIGUREN	103
	LIJST VAN TABELLEN.....	106
	BIJLAGEN.....	107
	BIJLAGE I: CONSOLIDATIE VAN EEN SLIBLAAG	108
	BIJLAGE II: DATAVERZAMELING.....	117
	BIJLAGE III: RELATIES TUSSEN WATERGEHALTE, SCHUIFSTERKTE EN DIEPTE....	118
	BIJLAGE IV: BENADERING KORRELVERDELINGSKROMME.....	132

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Koninklijke Boskalis Westminster NV is een internationale dienstverlener op het gebied van maritieme infrastructuur. De kernactiviteiten richten zich op aanleg en onderhoud van havens en waterwegen, creatie van land in water en bescherming van kusten en oevers. Deze activiteiten vinden wereldwijd plaats en worden uitgevoerd met een groot scala aan baggermaterieel. Het onderhoud van havens en vaarwegen bestaat in veel gevallen uit het weghalen van een sliblaag en dit werk wordt vaak uitgevoerd door zogenaamde sleeophopperzuigers.

Bij het baggeren van slib met een sleeophopperzuiger is de te behalen productie onder andere afhankelijk van eigenschappen die het slib bezit, zoals de schuifsterkte en de dichtheid van het slib. De informatie over de schuifsterkte van het slib is soms niet of zeer gebrekkig aanwezig, wat tot gevolg heeft dat er een bepaalde onzekerheid zit in een door Boskalis ontwikkeld productieberekeningsmodel voor het zuigen van slib. De invoer van de schuifsterkte van slib in het productieberekeningsmodel gebeurt in de huidige praktijk mede op basis van ervaring opgedaan bij eerdere baggerwerken.

1.2 Probleemstelling

De invloed van de grove nauwkeurigheid van de invoerparameter schuifsterkte van slib in het productieberekeningsmodel is dusdanig dat bij variërende invoer van schuifsterkte er een aanzienlijke spreiding in de te behalen productie optreedt. Verder geldt dat de aanwezige kennis van de afzettingsgebieden, de sedimentatie en de sterkte van het slib niet interactief gebruikt wordt: er wordt geen koppeling tussen deze deelgebieden gemaakt waardoor een meer nauwkeurige waarde voor de schuifsterkte van slib verkregen zou kunnen worden.

1.3 Doelstelling

Het opstellen van een gevalideerd classificatiemodel waarmee op basis van de beschikbare omgevingsfactoren en metingen voldoende nauwkeurige waarden toegekend kunnen worden aan de ongeroerde schuifsterkte van slib op een bepaalde baggerlocatie.

1.4 Werkwijze

Figuur 1.1 is een schematisering van de gevolgde werkwijze. Uit deze figuur blijkt dat de werkwijze grofweg verdeeld kan worden in twee delen: de literatuurstudie en de ontwikkeling van correlaties. Onderstaand worden de gevolgde werkwijze bij deze delen nader verklaard:

- *Literatuurstudie*

De literatuurstudie bestaat uit twee delen:

- interpretatie van de bestaande theorieën en correlaties van de schuifsterkte
- verzameling van slibdata

Er is onderzoek verricht naar bestaande theorieën over de schuifsterkte van slib. Omdat deze gering zijn, zijn correlaties voor de schuifsterkte van klei bekeken en geïnterpreteerd. Er is een opsomming gemaakt van bepalende parameters voor de schuifsterkte van klei en deze parameters hebben centraal gestaan bij het samenstellen van een dataverzameling van slib. Reeds in het begin van het onderzoek is duidelijk geworden dat deze informatie binnen Boskalis gering is en daarom bestaat een groot gedeelte van de dataverzameling uit data afkomstig uit vakbladen. In Figuur 1.1 is te zien dat nadat de dataverzameling opgesteld is, terugkoppeling naar de bestaande relaties voor klei heeft plaatsgevonden. Deze terugkoppeling bestaat uit toetsing van uit de literatuur bekende correlaties voor klei, zodat duidelijk wordt in hoeverre deze ook toepasbaar zijn voor slib.



- *Bepaling van correlaties voor ongeroerde schuifsterkte van slib*

De verzameling van data heeft gedurende een groot gedeelte van dit onderzoek plaatsgevonden. Het eerste deel van de voor slib karakteristieke indexparameters uit de dataverzameling is gebruikt voor de bepaling van correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte van slib. Deze correlaties zijn ontwikkeld met behulp van regressie methoden, waarbij dimensieloze empirische coëfficiënten bepaald zijn behorende bij de in deze studie afhankelijk gestelde indexparameters voor de schuifsterkte. In Figuur 1.1 is te zien dat ook hier terugkoppeling met de slibverzameling plaats heeft gevonden. In dit geval bestaat de terugkoppeling uit toetsing van de correlaties aan een tweede deel van de dataverzameling. Dit deel van de dataverzameling is pas in een later stadium van het onderzoek beschikbaar gekomen.

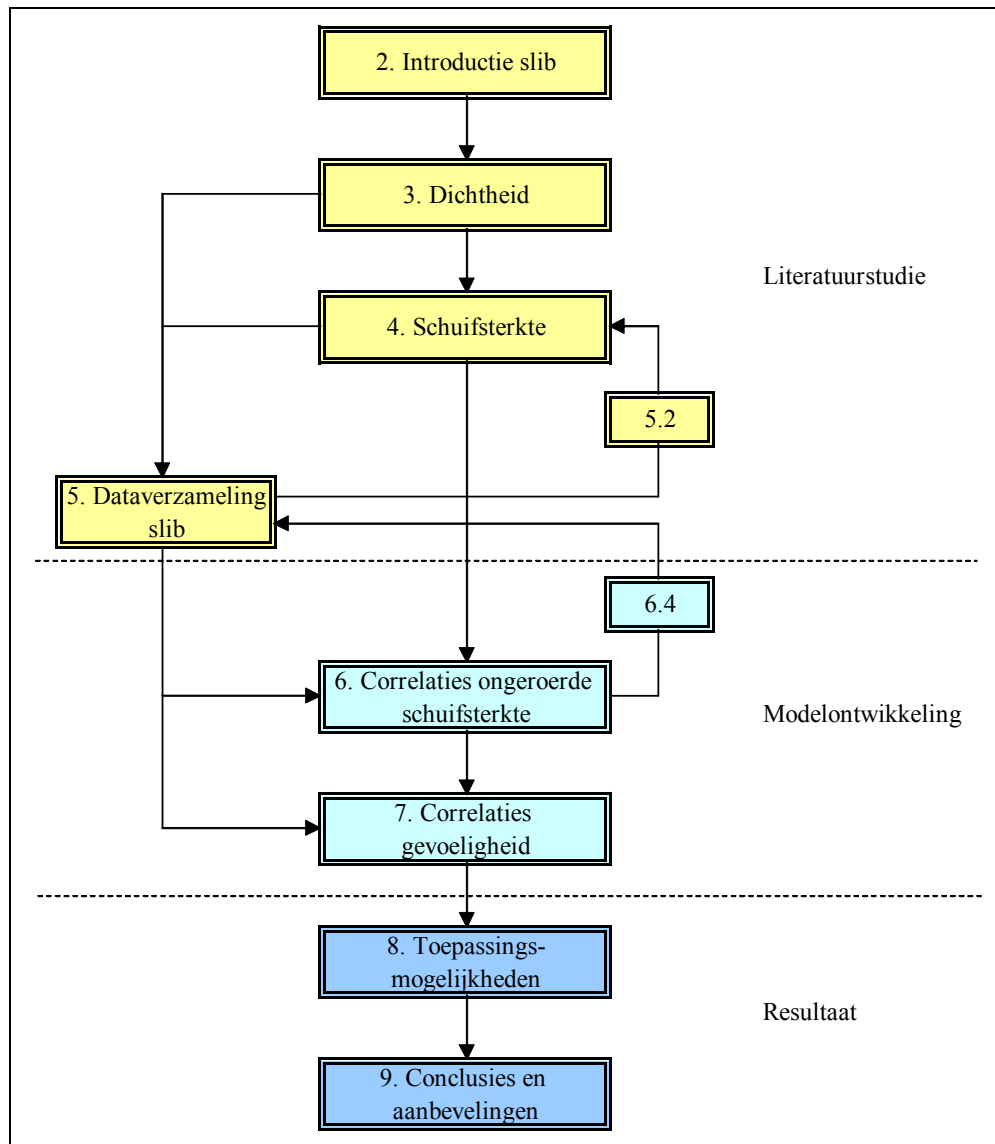
Na bepaling van correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte is gekeken of op overeenkomstige wijze een bepaling voor de gevoeligheid gemaakt kan worden. Bepaling van een dergelijke relatie is mogelijk, maar alleen gebruik gemaakt wordt van de eerder gemaakte correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte en de uit de literatuur bekende correlatie voor de geroerde schuifsterkte.

1.5 Opzet van het rapport

Hoofdstuk 2 is een inleidend hoofdstuk waarin de samenstelling van slib behandeld wordt. Tevens wordt een definitie gegeven wanneer aan een grond de toekenning slib gegeven kan worden. Hoofdstuk 3 is een weergave van het literatuuronderzoek verricht naar de dichtheid, waarbij bepalende factoren beschreven worden. In hoofdstuk 4 wordt de theoretische achtergrond van de schuifsterkte behandeld. Deze achtergrond is grotendeels gebaseerd op bekende correlaties voor klei, omdat er voor slib niet of nauwelijks informatie beschikbaar is. Dit is de reden om een verzameling van slibdata te vormen uit data gevonden in vakbladen en in projecten van Boskalis. In hoofdstuk 5 worden de locaties van de verzameling gepresenteerd en met de data behorende bij deze locaties wordt getoetst in hoeverre de voor klei geldende relaties voor de schuifsterkte geldig zijn voor slib. Omdat deze ontoereikend blijken te zijn voor de ongeroerde schuifsterkte worden in hoofdstuk 6 correlaties opgesteld voor de ongeroerde schuifsterkte van slib. Omdat niet alleen de schuifsterkte van belang is maar ook de bijbehorende gevoeligheid wordt in hoofdstuk 7 hiervoor een verband gegeven. Hoofdstuk 8 is een samenvatting van de uitkomsten van dit onderzoek en vormt een overzicht van de toepassingsmogelijkheden van de gemaakte correlaties. Hoofdstuk 9 tenslotte bevat conclusies en aanbevelingen.

Tot slot nog twee opmerkingen over de lay-out van het rapport. Wanneer er gerefereerd wordt aan een door mijzelf geraadpleegd artikel, worden er vierkant haken gebruikt []. Als er gerefereerd wordt aan een artikel tussen ronde haken () is deze referentie overgenomen uit een artikel zonder dit zelf te lezen.

Dit rapport is gemaakt in opdracht van Baggermaatschappij Boskalis bv. In dit verslag is daarom op een aantal plaatsen bedrijfsgevoelige informatie weggelaten.



Figuur 1.1 Werkwijze

2 Identificatie en classificatie van slib

Dit hoofdstuk is een introductie van het materiaal waar het onderzoek op gericht is: slib. In de eerste paragraaf worden de elementen waar slib uit bestaat besproken. In paragraaf 2.2 wordt een definitie voor slib gegeven, welke in het vervolg van het onderzoek gebruikt wordt bij de bepaling of een grond als slib gekarakteriseerd kan worden.

2.1 Samenstelling bodem

In de volgende paragrafen wordt een beschrijving gegeven van de (mogelijke) elementen waar een slibbodem uit bestaat: niet cohesieve deeltjes, gas, cohesieve deeltjes, water, organisch materiaal en skeletten. Voordat de elementen en hun invloeden op de vervormingseigenschappen en volumieke massa van slib beschreven worden volgt ter verduidelijking eerst een overzicht.

“De vervormingseigenschappen en de volumieke massa van slib worden bepaald door algemene karakteristieken van en variaties in respectievelijk:

- de vorm en grootte van de deeltjes;
- de onderlinge rangschikking van de deeltjes (pakking, stapeling en dergelijke);
- de samenstelling van de deeltjes (mineralen en organische materiaaldeeltjes);
- de aard van het oppervlak van de deeltjes, met inbegrip van de stoffen die min of meer permanent aan het oppervlak van de deeltjes gehecht zijn;
- de bindingskrachten tussen de deeltjes, zowel rechtstreeks als middels water en opgeloste stoffen;
- de combinatie van vorm, onderlinge rangschikking en bindingskrachten.

Deze factoren zijn deels aan elkaar gerelateerd en hangen samen met de oorsprong van de slibdeeltjes, de omgevingsomstandigheden waarin het slib is afgezet en waarin het slib is gelegen. De meeste van de genoemde factoren veranderen in de tijd na afzetting onder invloed van omgevingseigenschappen (chemische samenstelling porie- en omgevingswater, mechanische belasting en de veranderingen daarin). De resultaten van de meeste veranderingen van de factoren hebben relevante invloed op eigenschappen van het slib.”
[Kruse, persoonlijke mededeling]

De Boer [2002] beschrijft in zijn MSc thesis op een heldere wijze de elementen waar een slibbodem uit bestaat en de volgende paragrafen zijn een gedeeltelijke weergave van zijn verhaal met op enkele plaatsen een aanvulling. In deze paragrafen wordt een gedetailleerde uitwerking gegeven van de bovengenoemde punten uit de opsomming.

2.1.1 Niet cohesieve deeltjes

De niet cohesieve deeltjes zand en silt bestaan uit relatief grote deeltjes. De grootte van siltdeeltjes is gedefinieerd van 2 μm tot 63 μm en zand is gedefinieerd als de deeltjes tussen 63 μm en 2 mm (Lambe, 1979). De sedimentatie en erosie van deze deeltjes voor een bepaalde stromingsconditie is vooral afhankelijk van de diameter van deze deeltjes. Grote deeltjes worden slechts getransporteerd bij sterke stromingen, kleinere deeltjes worden bij minder sterke stromingscondities geërodeerd en zullen minder snel neerslaan. De kleinste deeltjes, klei en silt, slaan slechts neer bij zeer rustige stromingscondities. Dit betekent een ruimtelijke segregatie naar korreldiameter. Een getijde bekken is hier een goed voorbeeld van: zand zet zich af nabij de ingang van de zee, klei slaat aan de rand van het bekken neer (Van Ledden, 2001).

2.1.2 Gas

Gas in de bodem (methaan) is het resultaat van decompositie van organisch materiaal. Het gas kan aanwezig zijn als bellen of als individuele moleculen opgelost in het poriewater. Chemische afbraakprocessen zijn verantwoordelijk voor de productie van deze gassen. Het



mechanische gedrag van gasbellen is niet eenvoudig. De gasbellen kunnen gas dat opgelost is in het poriewater absorberen en kunnen samengaan met andere bellen. Gasbellen kunnen exploderen en zodoende kan het gas weer opgelost worden in het poriewater. De gasbellen zijn verantwoordelijk voor een vertraging van de consolidatie van een slibbodem. De bellen zorgen voor een extra weerstand voor de waterflux, omdat ze het doorstromend oppervlak verkleinen. Ten tweede hebben de gasbellen een lagere massa dichtheid tot gevolg, resulterend in een geringere consolidatie door het eigen gewicht. De dikte van de sliblaag kan zelfs door de productie van grote hoeveelheden gas in omvang toenemen [Van Kesteren, mondelinge mededeling]. Verder heeft de aanwezigheid van gasbellen een grote invloed op het spanning-rek gedrag van de sliblaag. De samendrukbaarheid van het poriewater neemt zeer veel toe wanneer het gasbellen bevat.

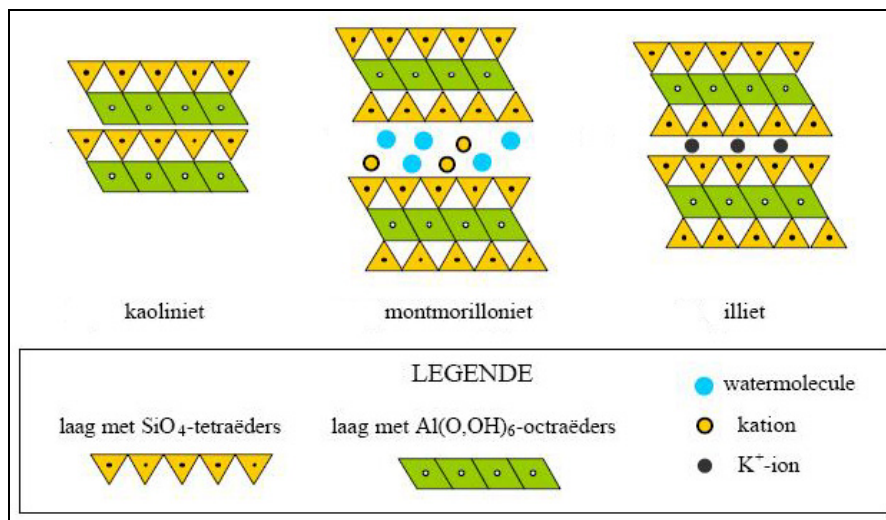
2.1.3 Cohesieve deeltjes

Cohesieve deeltjes bestaan uit kleideeltjes (veelal $< 2 \mu\text{m}$, deeltjes met een equivalente diameter t.o.v. valsnelheid in water van 20°C) en organisch materiaal. Het organisch materiaal kan in de loop van de tijd afgebroken worden. “De grens tussen cohesief en cohesieloos sediment is niet duidelijk gedefinieerd en varieert in het algemeen met het type materiaal. Echter dominantie van de cohesie tussen deeltjes t.o.v. de zwaartekracht neemt toe met een afnemende korrelgrootte. Dus het effect van cohesie op het gedrag van kleien is meer uitgesproken dan op silt, en cohesie in silt wordt voornamelijk toegeschreven aan de aanwezigheid van de kleideeltjes en organisch materiaal” (Metha, 1989). Een zand-slib mengsel is cohesief wanneer het percentage deeltjes van klei, silt en fijn zand groter is dan 5 – 10 %.

De gesuspendeerde kleideeltjes groeperen zich in vlokken: dit proces wordt flocculatie genoemd. De vlokken worden gevormd in de waterkolom wanneer cohesieve deeltjes herhaaldelijk botsen. Botsingsmechanismen omvatten Brownse beweging, differentieel neerslaan en schuifstroming. De vlokken kunnen een grootte hebben van enkele honderden micrometers. De sedimentatiesnelheid van de vlokken is enkele orden groter dan de sedimentatiesnelheid van de enkele deeltjes. Het resultaat van dit flocculerende gedrag is dat de sliblaag wordt opgebouwd uit vlokken in plaats van individuele deeltjes. Dit beïnvloedt het gedrag van de bodem. Zowel de eigenschappen van het cohesieve sediment als van het water beïnvloeden de snelheid en graad van flocculatie.

De kleideeltjes bevatten mineralen met een deels negatieve elektrostatische lading. Een kleideeltje trekt ionen aan om deze lading te neutraliseren. Omdat deze aangetrokken ionen (kationen) meestal een zwakke binding hebben met de deeltjesoppervlakte en ze vervangen worden door andere ionen worden ze verwisselbare ionen genoemd.

Zowel de klei mineralen als de positieve geladen hydraten nemen water op. De verwisselbare ionen met wateromhulsel zijn te groot en passen niet in een enkele laag op het oppervlak van de mineralen. Gevolg hiervan is dat de ionen met wateromhulsel gedwongen worden weg te bewegen van het mineraal oppervlak naar een verder gelegen evenwichtspositie. Deze evenwichtssituatie wordt bepaald door de aantrekking van de ionen op het mineraaloppervlak en de aanleg weg te bewegen van elkaar vanwege hun thermische energieën. Het op deze manier aan de deeltjes gehechte laagje wordt dubbellaag genoemd. Gevolg hiervan is dat de vlokken een hoog percentage water bevatten. Sommige type kleideeltjes hebben een groot waterbindend vermogen, een voorbeeld hiervan is montmorilloniet. Het waterbindend vermogen van bijvoorbeeld kaolinit is veel geringer. Dit betekent dat bij een bepaalde volume fractie van klei, bepaalde klei-water mengsels zich nog als een vloeistof gedragen, waar andere zich al als een gel gedragen. Het specifieke oppervlak van het sediment, het oppervlak van een deeltje per eenheidsmassa, en de ladingsverdeling bepalen de eigenschappen van het sediment.



Figuur 2.1 Schematische weergave van de structuur van drie voornamelijk kleimineralen

De deeltjes met hun dubbellaag oefenen twee tegenwerkende krachten uit op elkaar. Omdat de negatieve lading van een kleideeltje in evenwicht wordt gehouden door de positief geladen ionen in de dubbellaag beginnen twee naderende deeltjes elkaar af te stoten wanneer hun dubbele lagen met elkaar in contact komen. Deze afstotende kracht is sterk afhankelijk van de eigenschappen van de vloeistof. Voor kleine deeltjes en korte afstanden zijn deze elektromagnetische krachten van dezelfde orde grootte als de Van der Waals krachten. Door de Van der Waals kracht worden de deeltjes tot elkaar aangetrokken. De kracht is onafhankelijk van de eigenschappen van de vloeistof tussen de deeltjes. Als de aantrekkende kracht groter is dan de afstotende kracht zullen de deeltjes vlokken vormen, in het tegenovergestelde geval zullen ze uiteengaan. Het resultaat van deze neutraliserende krachten is dat de kleideeltjes elkaar aantrekken wanneer ze relatief zeer dicht bij elkaar zijn, maar dat ze elkaar afstoten wanneer ze verder van elkaar zijn, met als gevolg dat deeltjes gedwongen worden vlokken te vormen wanneer de suspensie een kritieke concentratie bereikt.

De kleideeltjes hebben de vorm van dunne plaatjes. Hoewel de totale lading van de mineralen negatief is, zijn de klei deeltjes positief geladen aan de uiteinden van de plaatjes. Daarom kunnen de eigenschappen van de vlokken, en derhalve de eigenschappen van de neergeslagen sliblaag veranderen door een herschikking van de deeltjes. De watermoleculen die dipolen zijn, kunnen ook herschikt worden. Wanneer een hoog geconcentreerd mengsel geroerd is en daarna een periode van rust volgt, herschikken de watermoleculen, de deeltjes en de vlokken zich en worden sterkere bindingen ontwikkeld door elektromagnetische krachten en tevens worden chemische bindingen gevormd. Het resultaat hiervan is dat de viscositeit van het mengsel toeneemt. Door schudden of roeren worden deze verbindingen verbroken en het mengsel wordt opnieuw minder viskeus. Dit verschijnsel wordt thixotropie genoemd.

2.1.4 Water

Het water in de poriën vult de ruimte tussen de sedimentdeeltjes. De stoffen opgelost in het water beïnvloeden onder andere de dubbellaag en chemische reacties. De eigenschappen van het water hebben daarom een grote invloed op het flocculatie gedrag. De aanleg voor flocculatie wordt in het algemeen veroorzaakt door een toename van de elektrolytische positief geladen ion concentraties, de ion valentie en de temperatuur, of door een afname van de dielektrische constante, grootte van het gehydrateerde ion, pH en adsorptie van negatief geladen ionen.

2.1.5 Biologische activiteit

Biologische activiteit heeft effect op de bodem door bioturbatie, holvorming, uitscheiding etc. Onderzoek heeft aangetoond dat algen en ander micro organismen een belangrijke rol spelen in de sedimenten balans in een rivier delta (Brouwer, 2002). Diatomeeën bij de top van een

sliblaag hebben grote invloed op de erodeerbaarheid van de bodem. Diatomeeën zijn algen met een silica coating en ze bedekken de sliblaag met als gevolg een moeilijk erodeerbare sliblaag. Skeletjes van de diatomeeën maken vaak meer dan 10 tot 15 procent uit van het volume van slib.

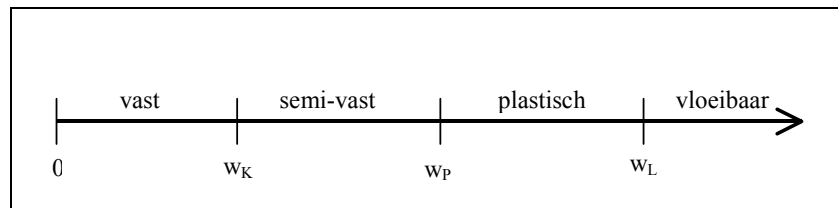
2.2 Definitie van slib

2.2.1 Consistentiegrenzen

Voor de identificatie en classificatie van grond wordt voornamelijk gebruik gemaakt van structuur onafhankelijke eigenschappen. Structuur onafhankelijke eigenschappen zijn o.a.: samenstelling vaste stof, samenstelling poriënwater, Atterbergse grenzen, watergehalte, gasgehalte en deeltjeseigenschappen als korrelverdeling, specifiek oppervlak, dichtheid van de vaste stof. Cohesieve grondsoorten kunnen geclassificeerd worden door de plasticiteitsgrenzen, ook wel de Atterbergse grenzen genoemd:

- vloeigrens, w_L : watergehalte, waarbij een V-groef in het materiaal begint te vloeien na 25 slagen (methode van Casagrande); het watergehalte behorende bij een indringdiepte van 10 / 20 mm van een valconus met conus van 60 g - 60° / 80 g - 30° [Head, 1992];
- plasticiteitsgrens (uitrolgrens), w_P : watergehalte, waarbij de klei nog net tot draden van 3 mm dikte uitgerold kan worden;
- krimpgrens, w_K : watergehalte waar bij verder verlagen van het watergehalte geen krimp meer optreedt.

De verschillende consistenties van een fijne grondsoort en de consistentiegrenzen worden ter verduidelijking weergegeven in Figuur 2.2. Typische waarden van de consistentiegrenzen voor verschillende kleimineralen worden gegeven in Tabel 2.1.



Figuur 2.2 Consistentie en consistentiegrenzen

Tabel 2.1 Typische waarden voor de consistentiegrenzen voor 3 voornamelijk kleimineralen

kleisoort	vloeigrens w_L (%)	plasticiteitsgrens w_P (%)	krimpgrens w_K (%)
montmorilloniet	100-900	50-100	9-15
illiet	60-120	35-60	15-17
kaolinit	30-110	25-40	25-29

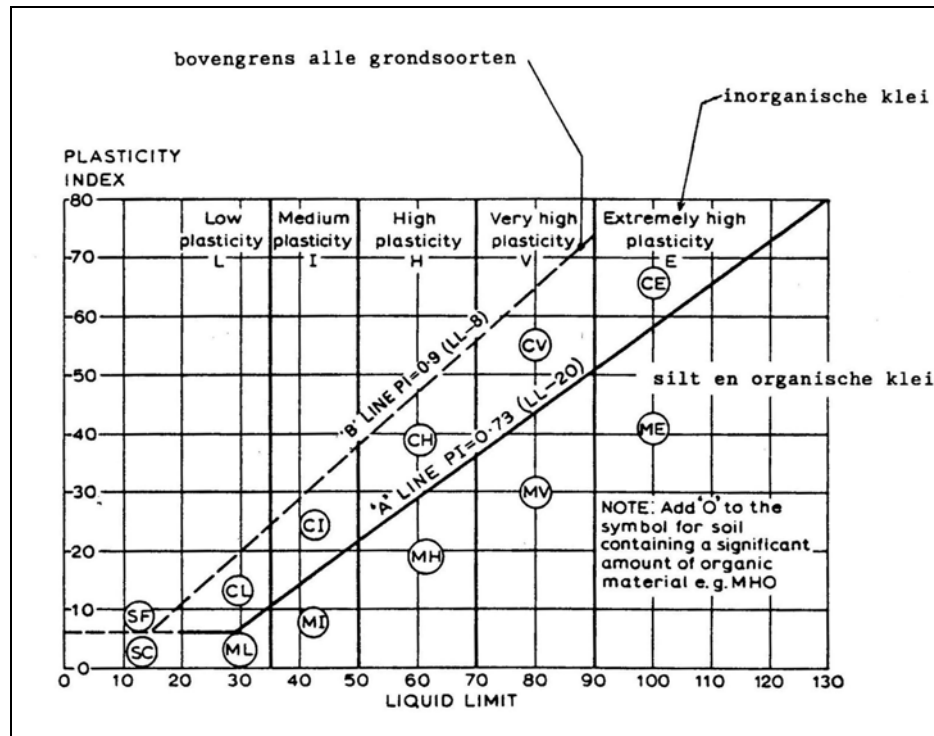
Om fijne grondsoorten onderling te vergelijken wordt gebruik gemaakt van de plasticiteitsindex I_P , gedefinieerd als het verschil tussen de vloeigrens en de plasticiteitsgrens:

$$I_P = w_L - w_P \quad [-] \quad (2.1)$$

De relatieve positie van het actuele watergehalte ten opzichte van de vloeigrens en plasticiteitsgrens wordt weergegeven met de liquiditeitsindex I_L of consistentie-index I_C :

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} \quad [-] \quad I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_P} \quad [-] \quad (2.2)$$

De Atterbergse grenzen (en met name de vloeigrens), zijn een weerspiegeling van de invloed van de samenstelling van de grond op de geroerde eigenschappen. In de zogenaamde plasticiteitsgrafiek, Figuur 2.3, wordt de plasticiteitsindex uitgezet tegen de vloeigrens. Met deze grafiek worden cohesieve gronden geïnclassificeerd op basis van hun plasticiteit, welke een complexe functie is van mineralogische samenstelling, oppervlakte van de deeltjes, vermogen om kationen te wisselen en organisch gehalte (Seed e.a. 1964). De zogenaamde A-lijn is een empirisch getrokken lijn, voorgesteld door Casagrande (1948) waarbij een verdeling van de plasticiteitsgrafiek gemaakt wordt. Organische kleien en silt liggen beneden deze lijn en anorganische kleien er boven. De B-lijn representeert een empirisch bepaalde bovengrens voor alle grondsoorten.

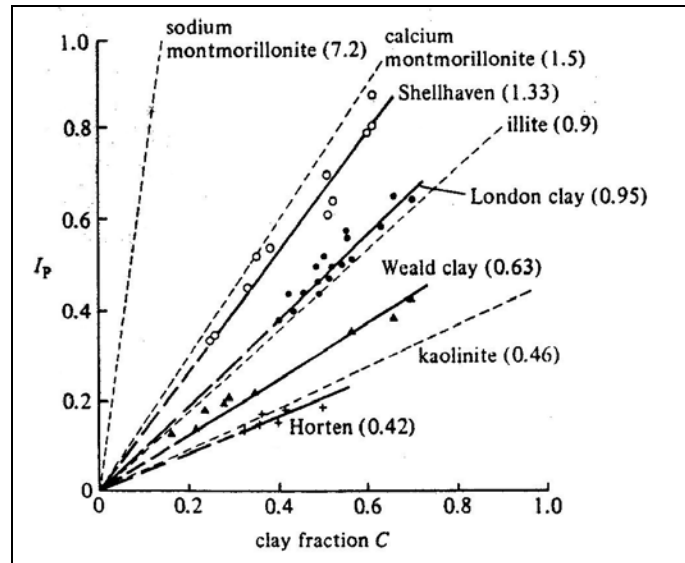


Figuur 2.3 Plasticiteitsgrafiek van Casagrande (1948)

De invloed van de kleifracie, gedefinieerd als het percentage deeltjes kleiner dan 2 μm , en de samenstelling van deze fracie op de consistentiegrenzen kan met de parameter activiteit weergegeven worden. De activiteit is door Seed (1964) gedefinieerd als:

$$A = \frac{I_P}{\% < 2\mu\text{m}} \quad [-] \quad (2.3)$$

Dat de activiteit sterk mineraal gebonden is blijkt uit de activiteitsgrafiek, zie Figuur 2.4.



Figuur 2.4 Relatie tussen plasticiteitsindex en klei fractie, Skempton (1953)

Algemeen geldt dat voor cohesieve grondsoorten dat de geroerde schuifsterkte eenduidig gekoppeld is aan het watergehalte. Uit een groot aantal metingen van de Atterbergse grenzen, bepaald volgens de Casagrande methode, is gebleken dat bij een watergehalte gelijk aan de vloeigrens de geroerde sterkte ca. 2 kPa bedraagt. Bij een watergehalte groter dan de vloeigrens gedraagt de grond zich als een Binghamse of pseudo-elastische vloeistof onder de belastingstoestand (traagheid en eigengewicht) die overeenkomt met die van de Casagrande test.

Voor slib geldt dat het watergehalte in veel gevallen groter is dan de vloeigrens en een cohesieve grondsoort kan dus slib genoemd worden als de geroerde schuifsterkte lager is dan ca. 2 kPa. De ongeroerde schuifsterkte kan aanzienlijk hoger liggen.

2.2.2 Definitie van slib

Bovenstaande in beschouwing nemende wordt slib als volgt gedefinieerd: slib is een fijnkorrelig, plastisch materiaal met een geroerde schuifsterkte kleiner dan circa 2 kPa en als bovengrens voor de ongeroerde schuifsterkte wordt circa 10 kPa aangenomen.

3 Dichtheid van slib

De "toestand" van slib wordt gekarakteriseerd door de dichtheid en de sterkte van slib. Dit hoofdstuk bestaat uit een korte opsomming van de bepalende factoren voor de dichtheid. Vervolgens wordt aangegeven op welke manier de dichtheid bepaald kan worden en hoe controle van de dichtheid kan plaatsvinden met behulp van grondkarakteristieke parameters als watergehalte, dichtheid van het water en soortelijke massa van de vaste stof.

3.1 Bepalende factoren voor de dichtheid

3.1.1 Samenstelling van het slib

De samenstelling van slib is op twee manieren van invloed op de dichtheid. In de eerste plaats is er de invloed van het gasgehalte. Daarnaast is het waterbindend vermogen van de in het slib aanwezige kleimineralen en de eventueel aanwezige organische stof van grote invloed op de dichtheid. Het waterbindend vermogen komt tot uitdrukking in de ligging van de Atterbergse grenzen.

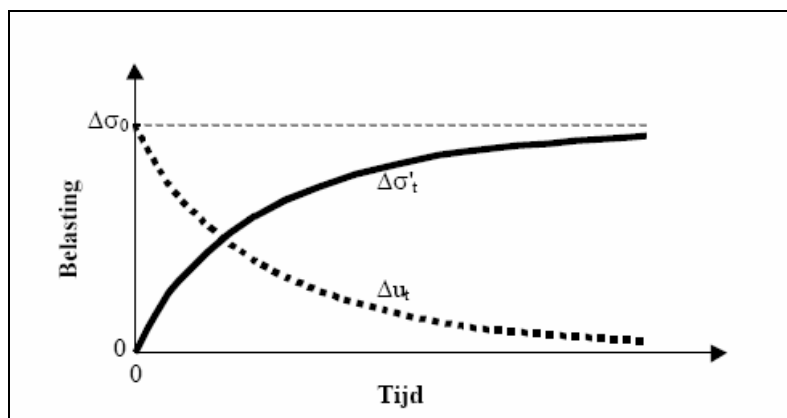
3.1.2 Afzettingsmilieu

De begintoestand van slib wordt voornamelijk bepaald door het milieu waarin het afgezet wordt en door de aangevoerde sedimenten. Bij de vorming van een sliblaag kunnen de slibdeeltjes afzonderlijk (gedispergeerd) sedimenteren of samengeklonterd (geflocculeerd). Het eerste treedt vooral op in zoetwatermilieu en het laatste in een zoutwatermilieu.

3.1.3 Mate van consolidatie

Onder consolidatie wordt verstaan het veranderen van het poriënvolume in het slib t.g.v. totaalspanningsveranderingen, waarbij het poriënwater toe- of afstroomt. De meer gebruikelijke betekenis betreft de verkleining van het poriënvolume t.g.v. het eigen gewicht of een bovenbelasting, waarbij het poriënwater afstroomt; het tegengestelde proces, toename van het poriënvolume, wordt zwel genoemd ofwel negatieve consolidatie. Tijdens het consolidatieproces wordt er wateroverspanning omgezet in korrelspanning, zie Figuur 3.1

Een al of niet snelle of geleidelijke afname van de druk gaat gepaard met een snelle of geleidelijke toename in de effectieve spanning, zodat de som van beide termen steeds gelijk is aan de oorspronkelijke toename in totale spanning. Uiteindelijk zal na volledige consolidatie de oorspronkelijke toename in totale spanning volledig opgenomen zijn door de toename in effectieve spanning.



Figuur 3.1 Verband tussen toename in totale spanning en toename in respectievelijk de effectieve spanning en waterspanning in de tijd.

Er kunnen drie vormen van consolidatie onderscheiden worden: normaal geconsolideerde gronden, gronden die overgeconsolideerd zijn en gronden die ondergeconsolideerd zijn:

normaal geconsolideerd

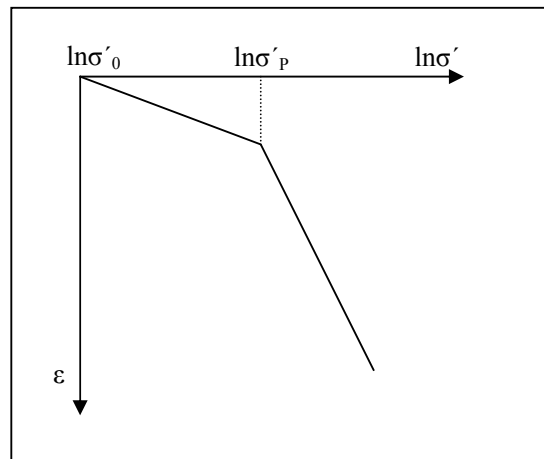
Een grond wordt als normaal geconsolideerd beschouwd indien de grond nooit een hogere belasting heeft gehad dan de huidige belasting.

ondergeconsolideerde gronden

Indien de toename in totale spanning door een bovenbelasting nog niet volledig is overgenomen door de toename in effectieve spanning, is er sprake van niet volledige consolidatie en wordt de spanningstoestand aangeduid als onderconsolidatie, zie Figuur 3.1. Deze vorm van consolidatie is het meest kenmerkend voor gebieden waar de sedimentatiesnelheid groot is.

overgeconsolideerde gronden

Het kan zijn dat een grond vroeger bedekt is geweest met andere grondlagen, waardoor er vervormingen zijn opgetreden. Als dan later de bovenlagen geërodeerd zijn (of er is gebaggerd), zal de grond zich gedragen zoals weergegeven in onderstaande figuur.



Figuur 3.2 Verband tussen vervorming en effectieve spanning bij overgeconsolideerde grond volgens logaritme van de effectieve spanning.

Dit wordt overconsolidatie genoemd. Het is bijzonder belangrijk om te weten of een grond al dan niet overgeconsolideerd is, om de vervormingen bij een nieuwe belasting exact te kunnen inschatten. Het is daarbij ook erg belangrijk om te weten tot welke maximale effectieve spanning de grond vroeger onderworpen is geweest, omdat vanaf deze waarde de vervormingen zich terug zullen gedragen zoals oorspronkelijk het geval was, d.w.z. de grond zal zich slapper gedragen dan in zijn huidige toestand. Deze kritische waarde noemt men de preconsolidatie druk of voorbelasting en is in de figuur aangeduid als σ'_p . De overconsolidatiegraad, OCR, wordt gedefinieerd als de verhouding tussen σ'_p en σ'_0 , d.w.z. de verhouding tussen de maximale effectieve spanning welke ooit in de grond aanwezig is geweest en de effectieve spanning in de huidige toestand:

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_0} \quad [-] \quad (3.1)$$

Of een grond volledig geconsolideerd is kan berekend worden met de formule van Gibson (1958). Hiermee kan berekend worden of de 95% consolidatiegraad bereikt is en deze 95% consolidatiegraad geldt in de praktijk als voldoende nauwkeurige benadering voor volledige consolidatie:



$$U = 95\% \text{ geldt als } \frac{c_v}{v_s d} > 10 \quad [-] \quad (3.2)$$

met:	c_v	consolidatiecoëfficiënt	$[m^2/\text{jaar}]$
	v_s	sedimentatiesnelheid	$[m/\text{jaar}]$
	d	laagdikte	$[m]$

De consolidatiecoëfficiënt is afhankelijk van de samendrukbaarheid en de waterdoorlatendheid van de grond en bij berekeningen wordt vaak gerekend met een c_v -waarde orde grootte $1 \text{ m}^2/\text{jaar}$.

In bijlage I is de theoretische achtergrond van een consoliderende sliblaag verder uitgewerkt. Hier wordt slechts de uitkomst gegeven: de snelheid waarmee er materiaal wordt afgezet, de laagdikte en de consolidatie eigenschappen van het slib bepalen de mate van consolidatie.

3.2 Bepaling van de dichtheid

3.2.1 Directe bepaling van de dichtheid

Voor een directe bepaling van de dichtheid van slib bestaan verscheidene methoden. Van deze methoden wordt slechts een opsomming gegeven, waarbij in de desbetreffende literatuur verwijzing nadere informatie gevonden kan worden over materieel en werking. Onderscheid wordt gemaakt tussen geofysische methoden en gewicht/volume-methoden.

geofysische methoden:

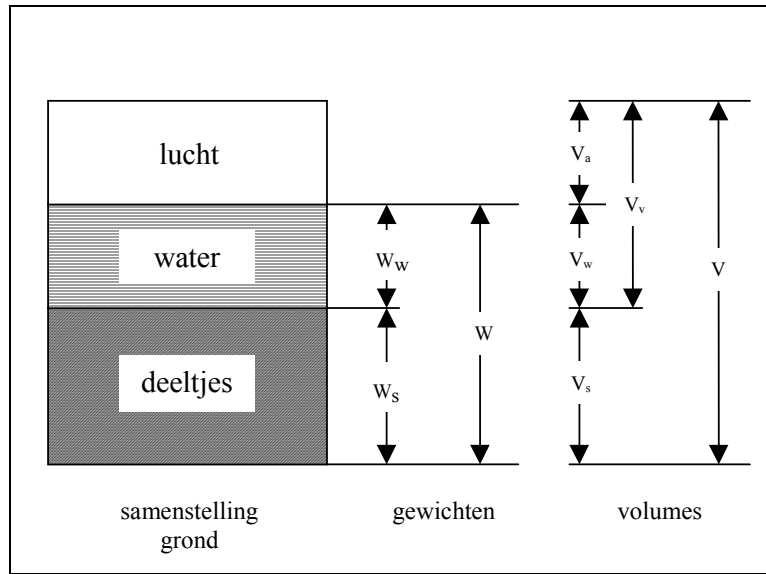
- navitracker (nucleaire straling) [Creanenbroek e.a. 1998]
- transmissiesonde (Hellema, 1979,1981)
- backscattersonde (metingen met radio activiteit) (Hellema, 1979,1981)
- nucleaire straling (x-ray, gamma-dichtheidsmeting)
- elektrische geleiding (via correlatie worden uitkomsten vertaald naar volumegewicht en/of watergehalte)

gewicht- en volumemethoden:

- Beeker-sampler
- Piston-samplers

3.2.2 Indirecte bepaling van de dichtheid

In hoofdstuk 2 worden de componenten beschreven waaruit slib is opgebouwd. Figuur 3.3 is hiervan een schematische weergave gegeven in fase van voorkomen: lucht, vloeistof (water) en deeltjes. Dit fase diagram is gedimensioneerd in termen van volume en massa. Vervolgens is een opsomming gegeven van veel gebruikte, aan volume of massa gerelateerde parameters gegeven. Deze parameters kunnen gebruikt worden bij het opstellen van bruikbare vergelijkingen voor bijvoorbeeld poriëngetal (void ratio) of natte dichtheid. Op deze manier kan de dichtheid bepaald worden en kan de relatie gebruikt worden ter controle van gronddata. In dit onderzoek heeft vergelijking 3.17 de meest praktische toepassing, waarbij met aannamen voor volumegewicht van het water en specifieke gewicht van vaste stof het in situ volumegewicht (dichtheid) met watergehalte gecontroleerd kan worden.



Figuur 3.3 Samenstelling fijnkorrelige grond

porositeit:
$$n = \frac{V_v}{V} \quad (3.3)$$

poriëngetal:
$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.4)$$

$$e = \frac{n}{(1-n)} \quad n = \frac{e}{(1+e)} \quad (3.5)$$

verzadigingsgraad:
$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (3.6)$$

watergehalte:
$$w = \frac{W_w}{W_s} \quad (3.7)$$

volumegewicht korrel:
$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (3.8)$$

volumegewicht water:
$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad (3.9)$$

volumegewicht grond:
$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (3.10)$$

volumegewicht grond droog:
$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (3.11)$$

specifieke gewicht vaste stof:
$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} \quad (3.12)$$

relaties tussen parameters:
$$w = S_r \frac{n}{1-n} \frac{\gamma_w}{\gamma_s} = S_r e \frac{\gamma_w}{\gamma_s} = S_r e \frac{1}{G} \rightarrow S_r e = wG \quad (3.13)$$

volumegewicht grond:
$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (3.14)$$

totaal gewicht:
$$W = [S_r n \rho_w g + (1-n) \rho_s g] V \quad (3.15)$$

volumegewicht:
$$\gamma = \frac{W}{V} = [S_r n \rho_w g + (1-n) \rho_s g]$$



$$\begin{aligned}
 &= \frac{S_r e}{1+e} \gamma_w + \frac{1}{1+e} \gamma_s = \frac{S_r e \gamma_w + \gamma_s}{1+e} \\
 \text{met } G &= \frac{\gamma_s}{\gamma_w}, &= \frac{S_r e \gamma_w + G \gamma_w}{1+e} &= \frac{\gamma_w (S_r e + G)}{1+e} \\
 &= \frac{S_r e + G}{1+e} \gamma_w = \frac{1+w}{1+e} G \gamma_w && (3.16)
 \end{aligned}$$

$$S_r = 1 \rightarrow \gamma_{situ} = \frac{G+e}{1+e} \gamma_w \quad (3.17)$$

$$S_r = 0 \rightarrow \gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G}{1+e} \gamma_w = \frac{G \gamma_w}{1+wG/S_r} = \frac{\gamma_{situ}}{1+w} \quad (3.18)$$

4 Schuifsterkte van klei

In dit hoofdstuk wordt een beschouwing gegeven van de schuifsterkte, welke naast de dichtheid een zogenaamde "toestandskarakterisering" voor slib vormt. Slib is qua fysisch en fysisch-chemische eigenschappen op één lijn te zetten met klei. Belangrijke extra parameters zijn de aard en hoeveelheid van het organische materiaal en de daarmee samenhangende gasvorming. Daarom wordt in dit hoofdstuk een overzicht gegeven van de voor klei bekende relaties voor de schuifsterkte. Hierbij worden bepalende indexparameters voor de schuifsterkte beschouwd.

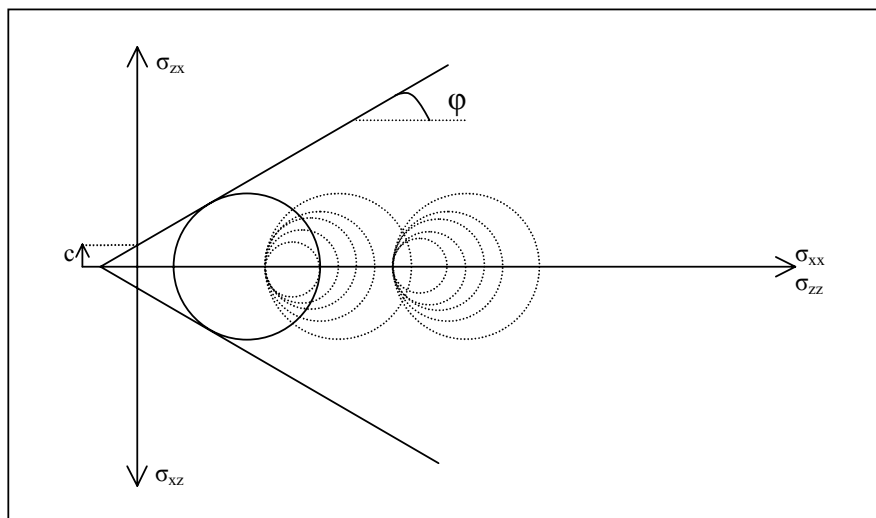
4.1 Ongedraineerde schuifsterkte

De ongedraineerde schuifsterkte van grond is geen fundamentele eigenschap maar is afhankelijk van de in situ condities, welke in de tijd kunnen variëren, de snelheid van belasting en veel meer factoren.

De schuifsterkte τ kan worden weergegeven door de vergelijking van Coulomb met de schuifsterkte parameters c en φ :

$$\tau = c + \sigma' \tan \varphi \quad [kPa] \quad (4.1)$$

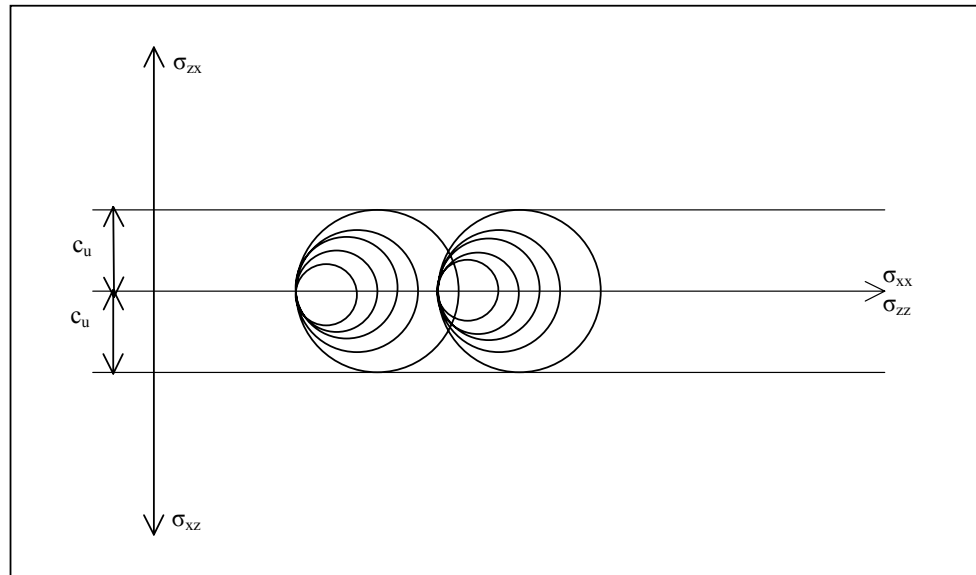
Hierin is σ' de normaalspanning (in geval van grond: effectieve spanning), c de cohesie en φ de hoek van inwendige wrijving. De cohesie is de schuifweerstand voor de situatie waarin de normaalspanning nul is (inwendige schuifsterkte). Een perfect cohesieve grond heeft dus een sterkte alleen afkomstig van cohesie, waarbij $\varphi=0$. De hoek van inwendige wrijving is de hoek tussen de as voor de normaalspanning en de raaklijn aan de cirkel van Mohr voor de spanningstoestand waarbij bezwijken optreedt. Een perfect cohesieloze grond heeft een sterkte alleen afkomstig van wrijving en waarbij $c = 0$. Figuur 4.1 toont de cirkel van Mohr, welke een weergave is van de spanningstoestand in een materiaal. Een punt op de cirkel van Mohr geeft de normaalspanning (σ_{xx} , σ_{zz}) en de schuifspanning (σ_{zx} , σ_{xz}) op een zeker vlak aan met een hoek t.o.v. het centrum.



Figuur 4.1 Cirkels van Mohr bij ongedraineerde proeven

Bij problemen met de ongedraineerde schuifsterkte van verzadigde fijnkorrelige gronden wordt vaak gebruik gemaakt van de " $\varphi=0$ -analyse". Hierbij geldt dat de waterspanningen worden veronachtzaamd en de proefresultaten alleen worden beschouwd in termen van totaalspanningen, zie Figuur 4.2. Zoals de figuur aangeeft zijn de kritische spanningscirkels

even groot zijn, dus voor ϕ kan gesteld worden dat deze nul is. Het materiaal heeft alleen cohesie, dit is c_u , de ongedraineerde schuifsterkte.



Figuur 4.2 Cirkels van Mohr voor totaalspanning, $\phi = 0$ concept

4.2 Bepalende parameters en hun relaties met de schuifsterkte

De veronderstelling dat de ongedraineerde schuifsterkte zuiver te danken is aan de (schijnbare) cohesie is een afleiding uit proefopstelling en procedures. Maar het is belangrijk te benadrukken dat deze relatie inhoudelijk niets weergeeft van het interne mechanisme van schuifweerstand. Het is dan ook onvermijdelijk wanneer er gewerkt wordt met verzadigde klei de mechanismen die de ongedraineerde schuifsterkte beheersen, te bestuderen.

De cohesie kan in het algemeen beschouwd worden als een gedeelte van de schuifsterkte opgewekt door ontstane krachten op het deeltjesniveau en welke onafhankelijk is van de effectieve spanning (Lambe, 1960). Cohesie wordt beschouwd als een fysisch chemische component van de schuifsterkte.

In de literatuur kunnen twee concepten betreffende de ontwikkeling van cohesie in klei worden gevonden worden. Volgens het eerste concept is cohesie het gevolg van de laag van geadsorbeerd water dat de gronddeeltjes omringt, die beschouwd kan worden als de binnenste laag van de diffuse dubbellaag. De cohesie wordt dus toegeschreven aan de viscositeit van het water in de dubbellaag. Bij het tweede concept wordt cohesie toegeschreven aan het voorkomen van netto aantrekkende krachten tussen de deeltjes in het klei-elektrolyte systeem. Dit concept vindt zeer veel bijval in de literatuur. Een bijdrage aan de schuifsterkte resulterend uit de viscositeit van water is verwaarloosbaar in vergelijking met de aantrekkende krachten tussen de deeltjes. Verschillende onderzoekers zijn van mening dat de cohesie is toe te schrijven aan de inwendige krachten (= aantrekking tussen de deeltjes = $A - R$; waarin A en R de aantrekkende en afstotende elektrische krachten zijn)

Sridharan en Prakash [1999] bevestigen bijvoorbeeld met hun serie experimenten de twee concepten betreffende cohesie in geroerde toestand: in montmorillonitische gronden kan de cohesie voornamelijk worden toegeschreven aan de viskeuze aard van het dubbellaag water en in kaolinitische gronden aan de netto aantrekking tussen de deeltjes.

De ongedraineerde schuifsterkte van kaolinitische gronden is voornamelijk afhankelijk van de netto aantrekkende kracht en van de manier van deeltjes rangschikking bepaald door krachten tussen de deeltjes. Een afname van de dielektrische constante, een toename van de elektrolyte

concentratie van de porievloeistof, en een toename van de lading van de verwisselbare kationen verhogen de aantrekkende krachten tussen de deeltjes en verminderen de afstotende krachten. Dit leidt tot een toename van de netto aantrekkende kracht in het systeem (A-R) en verhoogt de schuifsterkte op het deeltjes niveau wat gunstig is voor de ontwikkeling van een meer geflocculeerde structuur. Dit manifesteert zich in een toename van de ongedraineerde schuifsterkte.

De ongedraineerde schuifsterkte van montmorillonitische gronden ontstaat voornamelijk door de viskeuze weerstand gegenereerd door het viskeuze diffuse dubbellaag water. Een toename van de dielektrische constante, een afname van de elektrolyt concentratie van de porievloeistof, en een afname van de valentie van de verwisselbare kationen zorgen voor een toename van de dikte van de viskeuze diffuse dubbellaag. Relatief hogere viscositeit van het diffuse water in de dubbellaag heeft een duidelijke bijdrage aan de viskeuze schuifweerstand en heeft een toename van de ongedraineerde schuifsterkte tot gevolg.

Samenvattend kan daarom gesteld worden dat iedere factor verantwoordelijk voor een toename in aantrekkende krachten zal resulteren in een hogere ongedraineerde schuifsterkte. Iedere factor die zorgt voor een vergroting van de dikte diffuse dubbellaag is verantwoordelijk voor een grotere schuifsterkte voor montmorillonitische gronden. Maar natuurlijke kleien bestaan vaak uit verschillende klei mineralen, dus beide concepten zullen gelijktijdig voorkomen, waarbij één van de concepten overheerst afhankelijk van de mineralogische samenstelling en omgevingsfactoren (bijv. hoeveelheid en soort ionen in de porievloeistof).

“Voor suspensies van fijne deeltjes in een oplossing zijn verschillende fysisch mathematische benaderingen opgesteld. De bekendste is wel de diffuse dubbellaag benadering. Deze benadering is ontwikkeld voor deeltjes in zeer verdunde omstandigheden en is niet meer van toepassing voor deeltjes op geringe onderlinge afstand zoals in een stapeling in slib. De interacties van moleculen, ionen en deeltjes zijn zodanig complex dat er voorlopig slechts benaderingen geformuleerd zijn voor de krachtenwisselwerking voor sterkt vereenvoudigde omstandigheden (zoals twee elkaar naderende homogene platen met eenvoudige samenstelling van het medium ertussen). Voor de schaal waarop deeltjes in slib gepakt zijn, worden de benaderingen in kwalitatieve zin gebruikt.

De bindingen tussen deeltjes in slib veranderen na het flocculeren en afzetten. Het effect van deze veranderingen is eveneens slechts in kwalitatieve zin beschreven. Van belang hierbij is dat watermoleculen en ionen op en bij de deeltjes zich in de tijd heroriënteren en dat de atomen en ionen bij contacten tussen deeltjes zich in de tijd heroriënteren waarbij chemische reacties plaatsvinden, waarbij geadsorbeerde stoffen een rol kunnen spelen. Van belang is tevens dat chemisch niet stabiele mineralen (zoals opaal van diatomeeën die vaak een aanzienlijke fractie van het slib uitmaken) aanwezig zijn. De silica tetraëders van opaal hechten zich zeer sterk aan de silicaten van het slib en ook aan organische stofdeeltjes en vormen daarmee vaak hechte bindingen tussen slibdeeltjes. Ook de microbiële omzetting van organische stof veroorzaakt op microschaal vaak extreme omstandigheden waardoor chemische evenwichten worden beïnvloed en reacties worden bewerkstelligd.”

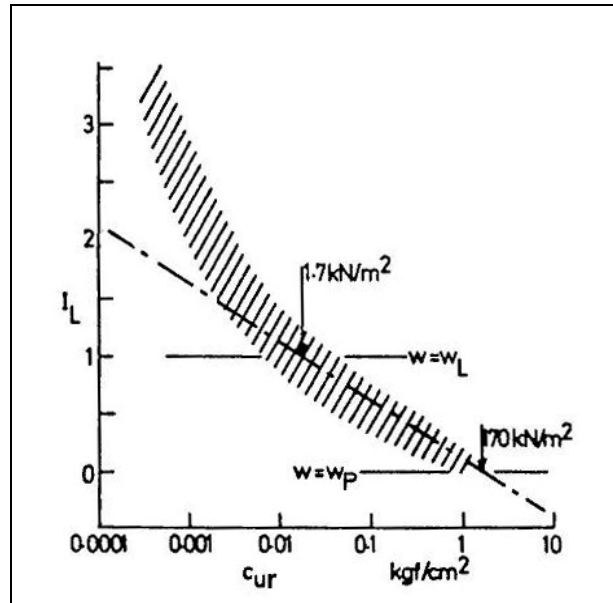
[Kruse, persoonlijke mededeling]

4.2.1 Watergehalte en consistentiegrenzen

Algemeen geldt voor cohesieve grondsoorten dat voor een bepaalde grondsoort de geroerde schuifsterkte eenduidig gekoppeld is aan het watergehalte. Als gebruik wordt gemaakt van de Atterbergse grenzen is een eenduidige relatie te geven voor een groot aantal grondsoorten.

Wroth & Wood [1978] hebben een relatie afgeleid voor de geroerde schuifsterkte (c_{ur}) en de liquiditeitsindex (I_L). Deze afleiding is deels gebaseerd op de theorie van Youssef [1965], waarin een gemiddelde voor de geroerde schuifsterkte bij een watergehalte gelijk aan de vloeigrens ($c_{ur, wl}$) gesteld wordt op 1,7 kPa. Dit is het gemiddelde van een dataset met spreiding van 1,3-2,4 kN/m². Een deel van de variatie van de sterkte met de vloeigrens wordt toegeschreven aan de dynamische manier van de methode van Casagrande. Wroth & Wood stellen verder dat de schuifsterkte bij een watergehalte gelijk aan de plasticiteitsgrens gelijk is aan honderd maal de sterkte bij de vloeigrens ($c_{ur, wp} = 100 * c_{ur, wl}$). De door Wroth en Wood afgeleide formule voor de geroerde schuifsterkte is:

$$c_{ur} = 170 * e^{-4,6 I_L} \text{ [kPa]} \quad \text{of} \quad 1 - I_L = \frac{\log(\frac{c_{ur}}{1,7})}{\log 100} \quad (4.2)$$

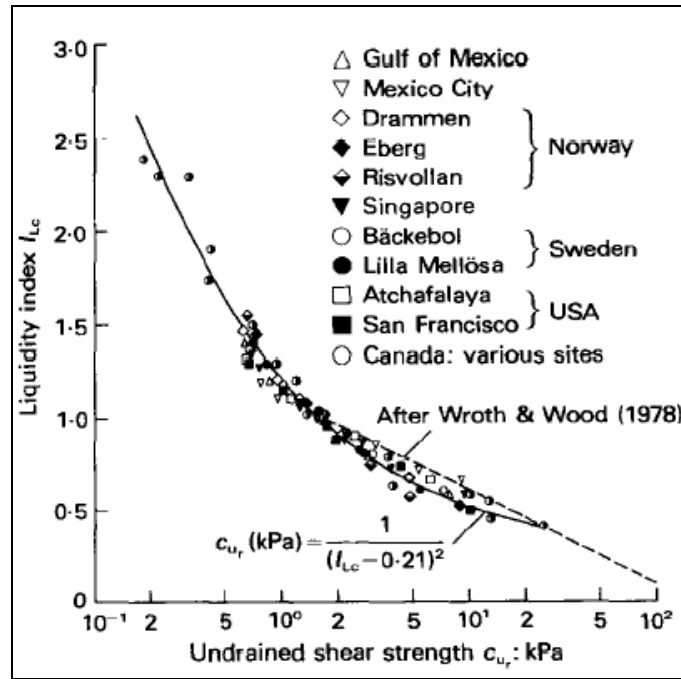


Figuur 4.3 Relatie tussen liquiditeitsindex en geroerde schuifsterkte [Wroth & Wood, 1978]

Het is belangrijk te beseffen dat de in Figuur 4.3 gepresenteerde data gerelateerd zijn aan een geroerde toestand. Natuurlijke gronden, met name diegene met hoge liquiditeitsindices, kunnen pieksterktes vertonen die aanzienlijk hoger zijn dan hun geroerde sterktes. In Figuur 4.3 geeft de arcering de spreiding van data gevonden door Mitchell [1976] weer. Duidelijk zichtbaar is een afwijking voor waarden van de liquiditeitsindex groter dan 1,5.

Leroueil [1983] heeft evenals Wroth en Wood aangetoond dat als alleen waarden voor de vloeigrens verkregen met de valconus in beschouwing worden genomen, er een goed gedefinieerd verband bestaat tussen de liquiditeitsindex en de geroerde schuifsterkte, zie Figuur 4.4. Voor waarden van de liquiditeitsindex tussen 0,4 tot 3,0 is door Leroueil het volgende verband opgesteld:

$$c_{ur} = \frac{1}{(I_L - 0,21)^2} \text{ [kPa]} \quad (4.3)$$



Figuur 4.4 Relatie tussen de liquiditeitsindex en de geroerde schuifsterkte van klei bepaald met de valconus [Leroueil, 1983]

Ook Carrier en Beckman [1984] hebben een relatie voorgesteld tussen de liquiditeitsindex en de geroerde schuifsterkte. Hierbij is een verschaalde liquiditeitsindex gebruikt; in deze verschaalde liquiditeitsindex wordt de invloed van de activiteit in rekening gebracht. De gepresenteerde vergelijking is:

$$c_{ur} = \gamma \sigma_{atm} (e - \lambda)^{\Psi} \quad [kPa] \quad \text{uitgedrukt in } I_L: c_{ur} = \gamma \sigma_{atm} (I_L (e_L - e_p) + e_p - \lambda)^{\Psi} \quad (4.4)$$

met:

γ, λ, Ψ	empirische parameters	[-]
σ_{atm}	atmosferische druk	[kPa]
e_L	poriëngetal bij vloeigrens	[-]
e_p	poriëngetal bij plasticiteitsgrens	[-]

$$\gamma = \left[0,0049 * I_p \left(4,14 + \frac{1}{A} \right) \right]^{6,33} \quad [-]$$

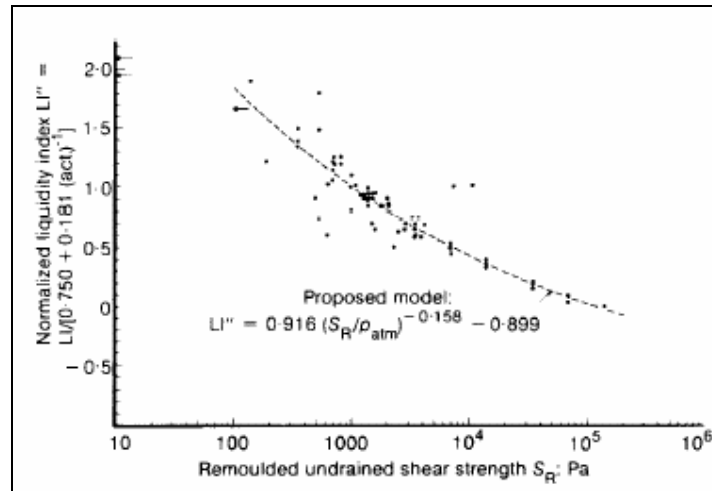
$$\lambda = 0,0049 \left[6,14 * w_L - I_p \left(4,14 + \frac{1}{A} \right) \right] \quad [-]$$

$$\Psi = -6,33 \quad [-]$$

De totaalvergelijking voor de geroerde schuifsterkte wordt:

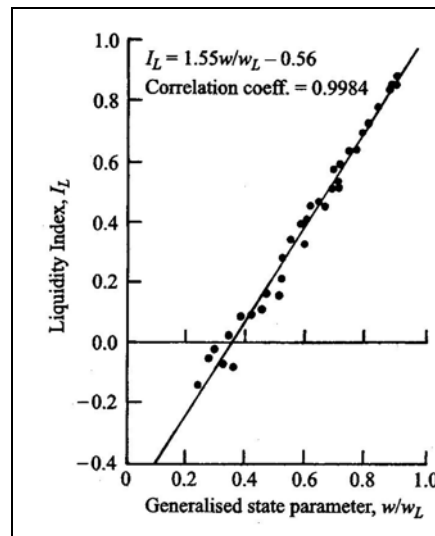
$$c_{ur} = \sigma_{atm} * \left[\frac{0,166}{0,163 + \frac{37,1 * e - w_p}{I_p \left(4,14 + \frac{1}{A} \right)}} \right]^{6,33} \quad [kPa] \quad (4.5)$$

De ongedraineerde geroerde schuifsterkte is dus direct gerelateerd aan de plasticiteitsindex en indirect gerelateerd aan het poriëngetal en de activiteit.



Figuur 4.5 Genormaliseerde ongedraineerde geroerde schuifsterkte voor klei [Carrier & Beckman, 1984]

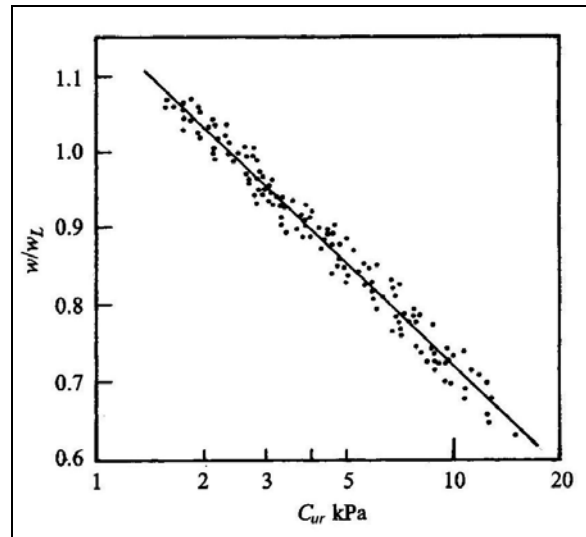
Federico [1983] heeft onderzoek verricht op een groot aantal gronden welke een grote spreiding in plasticiteit bezitten. Federico gebruikt niet de liquiditeitsindex om de positie van het watergehalte t.o.v. de consistentiegrenzen weer te geven, maar gebruikt de verhouding tussen watergehalte en vloeigrens. Dat er een goede relatie bestaat tussen deze verhouding en de liquiditeitsindex is aangetoond door Srinivase Murthy e.a. (1986), zie Figuur 4.6.



Figuur 4.6 Relatie tussen liquiditeitsindex en verhouding w/w_L (Srinivasa Murthy e.a., 1986)

Federico heeft het volgende exponentiële verband tussen de geroerde schuifsterkte en de verhouding w/w_L gevonden:

$$c_{ur} = e^{-5,18 \frac{w}{w_L} + 6,06} \quad [kPa] \quad (4.6)$$



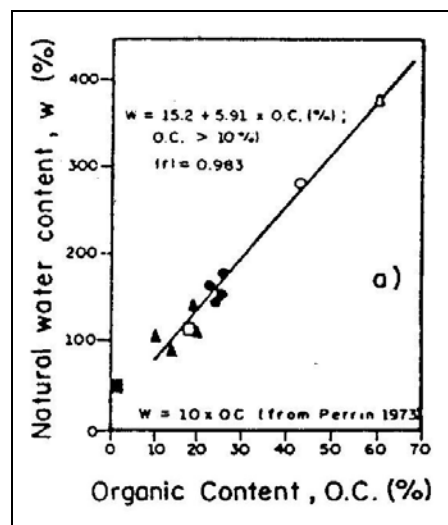
Figuur 4.7 Relatie tussen w/w_L en de ongedraineerde geroerde schuifsterkte (Federico, 1983)

4.2.2 Organisch gehalte

Invloed organisch gehalte op watergehalte

Er komen velerlei organische stoffen voor in slib. Er is een onderscheid mogelijk naar organische stoffen die als weefsel, of andere organische structuren aanwezig zijn en stoffen die als individuele moleculen, soms extreem groot, in slib zitten.

Het organisch gehalte beïnvloedt de microstructuur, de volumieke massa, de wijze van vervorming van het skelet en in belangrijke mate de totale hoeveelheid adsorptie van water. De organische stoffen die als weefsel, bijvoorbeeld meer of minder omgezette plantenresten, in slib aanwezig zijn beïnvloeden de opbouw van het skelet van de vaste stof en de volumieke massa ervan. Een voorbeeld hiervan wordt gegeven in Mitchell [1993] waar voor een Braziliaanse klei de invloed van het organische gehalte op het watergehalte getoond wordt, zie Figuur 4.8. Bij deze figuur moet worden opgemerkt dat de punten met de extreem hoge organische gehalten als veen geïdentificeerd worden.

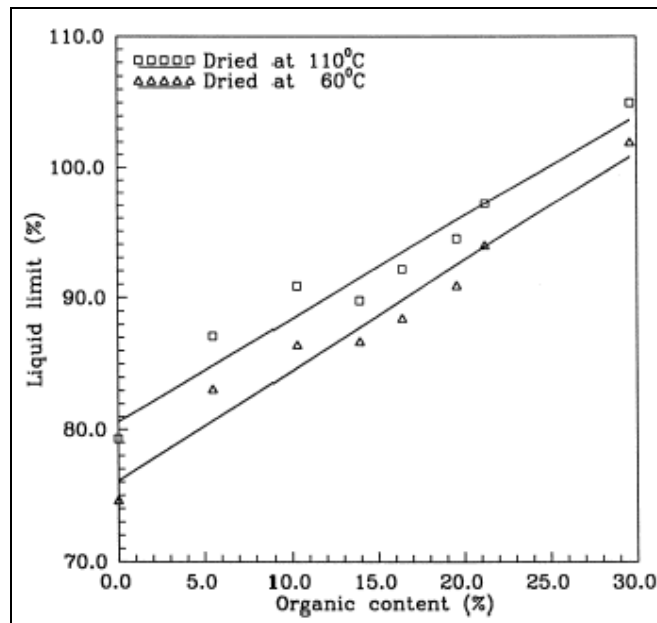


Figuur 4.8 Invloed van het organisch gehalte op het watergehalte voor een Braziliaanse klei/veen [Mitchell, 1993]

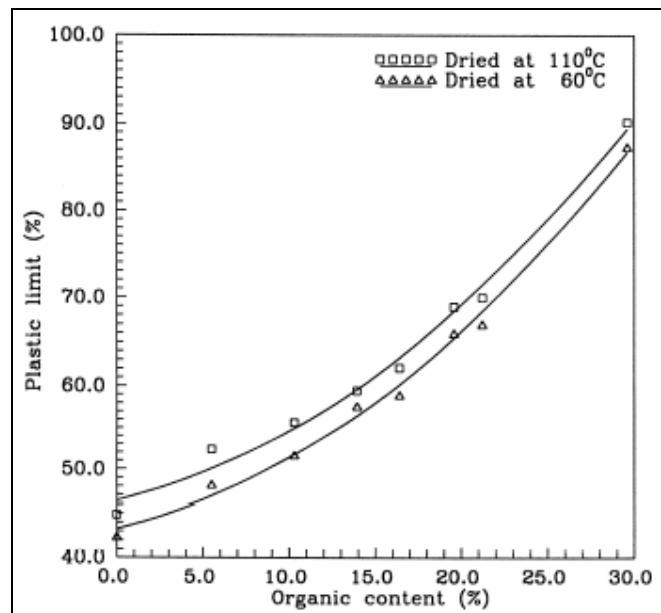
Invloed organisch gehalte op vloeigrens

Voor de invloed van de organische stof op de plasticiteit is geen eenduidige verklaring te geven. Odell e.a. (1960) concludeerden dat toename van organisch gehalte een toename van de plasticiteit tot gevolg heeft. Maar andere onderzoekers zoals Buckman en Brady (1969) geloven dat organisch gehalte de plasticiteit en cohesie reduceert omdat het organisch materiaal zelf een laag plastisch materiaal is.

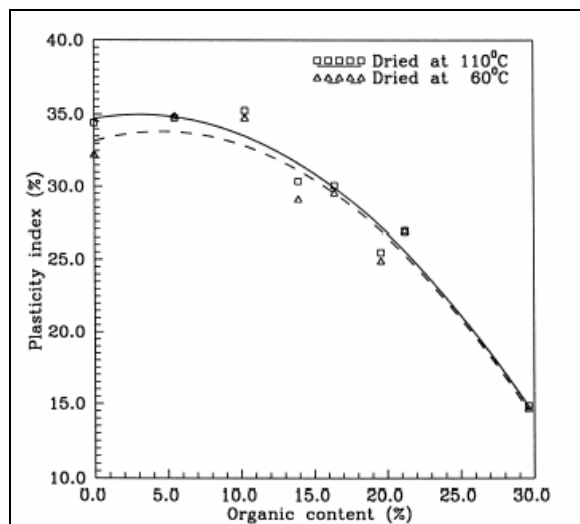
Voor een illitische klei hebben Malkawi e.a. [1999] onderzoek verricht naar het effect van een aantal organische stoffen op de fysische eigenschappen. Uitkomst van dit onderzoek is dat een toenemend organisch gehalte een toename van vloe- en plasticiteitsgrens tot gevolg heeft (Figuur 4.9 + Figuur 4.10). Voor de plasticiteitsindex daarentegen geldt dat na een initiële toename, een afname volgt met toenemend organisch gehalte, zie Figuur 4.11.



Figuur 4.9 Invloed van organisch gehalte op de vloeigrens van een illitische klei [Malkawi e.a.,1999]



Figuur 4.10 Invloed van organisch gehalte op de plasticiteitsgrens van een illitische klei [Malkawi e.a., 1999]



Figuur 4.11 Invloed van het organisch gehalte op de plasticiteitsindex van een illitische klei [Malkawi e.a., 1999]

Organische deeltjes zijn zeer colloïdaal en het oppervlak en de water adsorptie capaciteit is zeer veel groter dan deze eigenschappen van klei, met name voor kaolinite en illiet en in mindere mate voor montmorilloniet. Er zijn twee voornaamste factoren die de consistentiegrenzen van een organische grond kunnen beïnvloeden. De eerste factor is de toename van water adsorptie capaciteit veroorzaakt door de organische stof; ten tweede de aggregatie (=clustervorming deeltjes) veroorzaakt door de organische stof. De eerste factor zal tot een toename van de consistentiegrenzen leiden, terwijl de tweede factor zorgt voor een afname door afname van de totale oppervlakte van de deeltjes.

Invloed organisch gehalte op schuifsterkte

Het effect van organische stof op de sterkte en stijfheid van grond hangt grotendeels af van het organisch materiaal gedisintegreerd (gecomposteerd) of dat het bestaat uit vezels, die als een versterking kunnen werken. In het eerste geval zijn zowel de schuifsterkte als de stijfheid verminderd als resultaat van een hoger watergehalte en plasticiteit veroorzaakt door de organische stof. In het tweede geval kunnen de vezels als versterking werken en daarbij dus leiden tot een toenemende schuifsterkte.

Uitkomst van het onderzoek van Malkawi [1999] is dat de maximum sterkte afneemt met 20 % bij een toenemend organisch gehalte tot 20 %. Dit wordt toegeschreven aan de reductie van de maximale droge dichtheid door compactie door organische stof. Een andere uitkomst is dat de afname in sterkte bij hoge watergehaltes minder snel is bij grondmonsters met een hoog gehalte aan organische stof dan in monsters met een laag organisch gehalte. De verklaring hiervoor is dat het watergehalte, bij welke de grond een zeer lage sterkte heeft, toeneemt met toenemend organisch gehalte.

“Organische moleculen op minerale colloïdale deeltjes beperken schuifsterkte omdat ze direct contact tussen minerale deeltjes beperken. De organische moleculen dragen bij aan stevigheid bij zeer lage spanningen maar bij hogere spanningen glijden de deeltjes gewoon langs elkaar. Bij de omzetting van bijvoorbeeld organische stof (microbieel voornamelijk) in sediment worden zeer lokaal (nm schaal) extreme chemische condities geschapen waardoor onder andere het oppervlak van minerale deeltjes wordt gemobiliseerd. In sedimenten waar op microschaal carbonaten oplossen, treedt vaak neerslag van silica op.” [Kruse, persoonlijke mededeling]

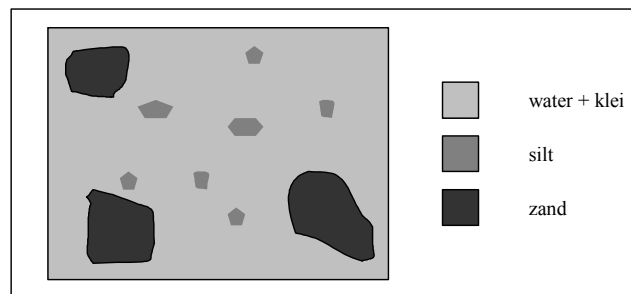
4.2.3 Korrelverdeling

Invloed korrelverdeling op watergehalte

Het is bekend dat de korrelverdeling een significante invloed heeft op het consolidatiegedrag van slib, en daar consolidatie en watergehalte gerelateerd zijn, volgt de invloed van de korrelverdeling op het watergehalte. Uit stromingsexperimenten en vele andere onderzoeken is bekend dat zanddeeltjes de netwerkstructuur vormen als de volumefractie groter is dan 0,5. Op overeenkomstige manier vormen siltdeeltjes de netwerkstructuur als de volumefractie van de siltdeeltjes gerelateerd aan het porievolume van de zanddeeltjes groter dan 0,5. In de overige gevallen wordt de netwerkstructuur gevormd door de kleifractie [Merckelbach, 2000].

Door de cohesieve eigenschappen van de klei deeltjes kunnen er zeer open netwerk structuren gevormd worden, waarbij slechts een kleine volumefractie klei vereist is met betrekking tot de porie fractie overgelaten door de silt- en zanddeeltjes.

Figuur 4.12 is een schematische weergave van een slib, waar de zand- en siltdeeltjes geïdentificeerd kunnen worden als losse eenheden en waar de kleifractie de netwerkstructuur vormt.



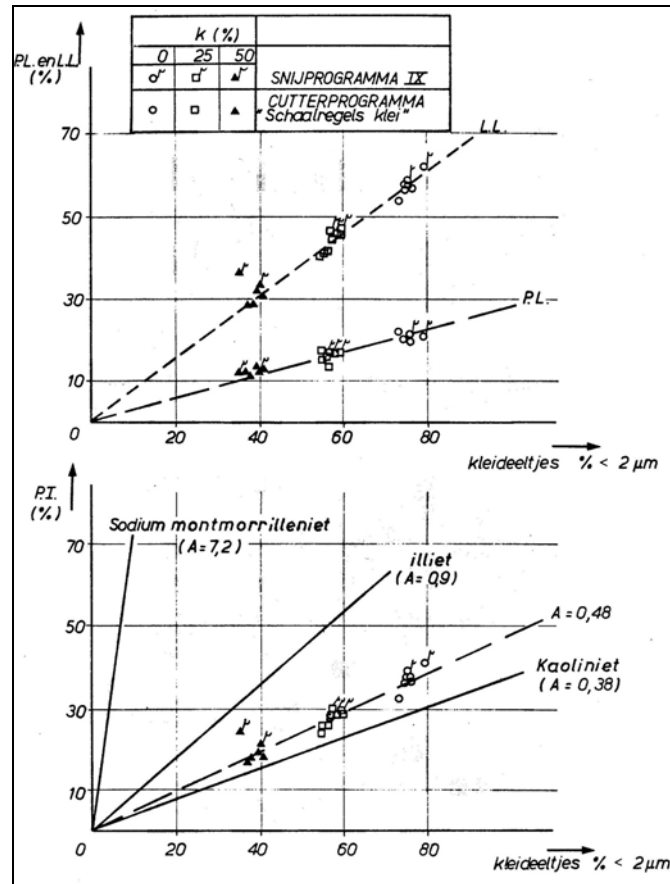
Figuur 4.12 Schematische weergave slib

De invloed van de korrelverdeling op het watergehalte komt ook tot uitdrukking in het waterbindend vermogen van de kleimineralen. Dit is afhankelijk van het type kleimineraal en is reeds beschreven in 2.1. Natuurlijk is naast het type ook de hoeveelheid van de kleimineralen belangrijk.

Invloed korrelverdeling op vloeigrens

Naar de invloed van zand op de vloeigrens van klei is onderzoek gedaan door Seed [1964]. Seed stelt dat de “linear mixture law” een redelijke weergave geeft van de relatie tussen de vloeigrens en het kleigehalte, met de voorwaarde dat de kleifractie groter is dan circa 10 % voor anorganische kleien en dat de kleifractie groter is dan 20 % voor organische kleien. De “linear mixture law” veronderstelt dat de vloeigrens uitsluitend bepaald wordt door de kleifractie, waarbij de kleifractie gedefinieerd is als de fractie kleiner dan 2 μm .

In Van der Schrieck [1980] wordt de invloed gepresenteerd die de zandfractie heeft op de vloeigrens en de plasticiteitsgrens, zie Figuur 4.13. Uit deze figuur blijkt de sterke afhankelijkheid van w_L en w_P van de zandfractie. Maar dit zou ook vertaald kunnen worden naar de door Seed opgestelde “linear mixture law”, daar een verhoging van het zandgehalte niet los gekoppeld kan worden van een verlaging van het kleigehalte. Verder blijkt uit deze figuur dat de zandfractie geen invloed heeft op de activiteit (verhouding $I_p / \% < 2 \mu\text{m}$). De activiteit lijkt derhalve alleen af te hangen van de mineralogische samenstelling van de kleimatrix tussen de kwartskorrels.



Figuur 4.13 Relatie consistentiegrenzen en fijne fractie [Van der Schrieck, 1980]

Invloed korrelverdeling op schuifsterkte

Als zand wordt toegevoegd aan een klei met een hoog watergehalte, is de veronderstelling dat het resulterende klei-zand mengsel de eigenschappen van klei bezit indien het zand schaars verdeeld is (geringe volume fractie zand). Tan e.a. [1994] hebben onderzocht in welke mate zand toegevoegd moet worden voor een zichtbare vergroting van de schuifsterkte. Conclusie uit dit onderzoek is dat de schuifsterkte van klei met hoge watergehaltes nagenoeg onveranderd blijft, tenzij door de toevoeging van zand het schijnbare poriëngetal, e^* , kleiner dan 5 wordt. Het schijnbare poriëngetal is hierbij gedefinieerd als:

$$e^* = \frac{V_c + V_w}{V_s} \quad [-] \quad (4.7)$$

met:

V_c	volume klei en silt	$[m^3]$
V_w	volume water	$[m^3]$
V_s	volume zand	$[m^3]$

Deze trend is zichtbaar voor de verschillende geteste kleien met hoge zeer uiteenlopende vloeigrenzen en dus zal de voornaamste bijdrage voor de toename van de schuifsterkte door toevoeging van zand toegeschreven kunnen worden aan de geometrische nabijheid van de zanddeeltjes en niet door interactie tussen de klei- en zanddeeltjes. Bij de bovenstaande afleiding dient te worden opgemerkt dat de waarde van 5 voor het schijnbare poriëngetal geldig is voor een serie tests met één bepaald soort zand. Het gebruik van verschillend zand zal naar alle waarschijnlijk een andere waarde voor het schijnbare poriëngetal opleveren waarbij de schuifsterkte significant zal toenemen, maar de verwachting is dat een gelijken trend op zal treden.

Een tweede constatering is dat wanneer het toegevoegde percentage zand groter is dan 40 % de gemeten waarden voor de schuifsterkte groter zijn dan de voorspelde waarden gebaseerd op de “linear mixture law” afhankelijk van het type klei.

“Grondmechanisch heeft grover slib (slib met aanzienlijke fractie 2-63 µm) bij geringe druk op het sediment een lagere sterkte. De korrels wrijven dan gemakkelijker langs elkaar dan bij hoge druk, als de belastingssnelheid drainage van poriewater niet beperkt, en aangezien de fysisch chemische interactie minder doet telt dat wrijven. De inwendige wrijving wordt dan niet gemobiliseerd. Bij grotere druk op het grovere sediment wordt die wrijving wel opgeroepen. In colloïdaal slib domineren de fysisch chemische interacties en is de wrijving minder relevant; er is ook samenhang en sterkte zonder de druk op het materiaal. In vergelijking tot grover slib heeft fijn slib (slib met aanzienlijke fractie < 2 µm) een veel groter deeltjesoppervlak en meer daaraan gerelateerde interacties en reacties. De minerale samenstelling is ook anders in de praktijk (meer actieve mineralen en organische stof).”
[Kruise, persoonlijke mededeling]

4.2.4 Gas

Door afbraak van organisch materiaal zal in veel natuurlijke slibsoorten gassen aanwezig zijn dan wel gevormd kunnen worden. De aanwezigheid van gas in slib is van invloed op het volumieke gewicht en op het deformatie gedrag van slib.

Uit experimenteel onderzoek [Wheeler, 1988] blijkt dat de ongedraineerde schuifsterkte zowel kan toenemen als afnemen door de aanwezigheid van grote gasbellen, afhankelijk van de waarde voor consolidatiespanning en initiële waterspanning.

Bij de afwezigheid van stroming van de gasbellen hebben grote gasbellen een verzwakkend effect op de grond. Maar als stroming optreedt, kan er een mogelijke toename in sterkte zijn. Deze toename wordt toegeschreven aan het versterkende effect dat stroming op de grond matrix heeft. Of de gasbellen zorgen voor toename of afname van sterkte van de grond is afhankelijk van de relatieve grootte van het verzwakkende effect van de holtes en van het versterkende effect van de stroming.

4.2.5 Gevoeligheid

De in deze paragraaf beschreven parameter gevoeligheid is geen parameter die van invloed is op de schuifsterkte, maar is wel een karakteristieke parameter voor cohesieve grond.

De gevoeligheid is gedefinieerd als de verhouding tussen de ongedraineerde sterkte van ongeroerde klei en de ongedraineerde sterkte van geroerde klei bij een gelijk watergehalte:

$$S_t = \frac{c_u}{c_{ur}} \quad [-] \quad (4.8)$$

Klei bezit de eigenschap dat roering bij een ongewijzigd watergehalte het materiaal leidt tot een sterkteverlies van het materiaal. Dit verzwakkende effect is (waarschijnlijk) toe te schrijven aan verschillende oorzaken [Terzaghi e.a., 1996]:

- verbreking van de geordende schikking van de watermoleculen en ionen in de geadsorbeerde lagen;
- heroriëntatie van kleiplaatjes: de ordening die zich kenmerkt als "edge-to-face" (vlokkige structuur) wordt omgevormd tot een ordening van "face-to-face" (parallelle structuur);
- aantasting van de structuur verworven door de klei gedurende sedimentatie en consolidatie;
- verbreking van chemische bindingen.

De term gevoeligheid toont het effect van vervorming op de consistentie van een klei, ongeacht de fysische achtergrond van de oorzaak tot verandering. De gevoeligheid is verschillend voor verschillende kleien en de gevoeligheid kan ook verschillend zijn voor dezelfde klei bij verschillend watergehalte. In Tabel 4.1 worden factoren gegeven die van invloed zijn op de gevoeligheid.

Tabel 4.1 Invloedsfactoren voor de gevoeligheid (Quigley, 1980)

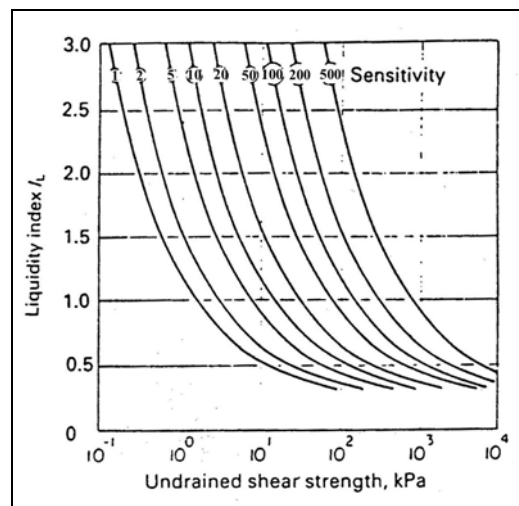
$S_t = \frac{c_u}{c_{ur}}$	<i>Factoren die zorgen voor hoge ongeroerde schuifsterkte en grote gevoeligheid</i> • flocculatie: zoutgehalte (lage zeta potentiaal), hoge sediment concentratie, divalente kation adsorptie (zeta potentiaal = spanning in de dubbellaag op een afstand van het deeltjesoppervlak, waar bij bewegen van het deeltje in de vloeistof de slip optreedt) • langzame toename in sediment belasting • gecementeerde bindingen: veel gronden bevatten carbonaten, silica en organisch materiaal die aanzetten tot contacten tussen deeltjes en zich gedragen als cementerende stof. • chemische bindingen
	<i>Factoren die zorgen voor lage geroerde schuifsterkte en grote gevoeligheid</i> • hoog watergehalte ($w \geq w_L$), onderconsolidatie, of afname $w_L \geq$ afname w • klein specifiek oppervlak van de korrels, hoog gehalte aan silt of rock flour in fractie $\leq 2 \mu m$ • hoge zeta potentiaal (uitgebreide dubbellagen = hoge afstoting tussen deeltjes = verspreide toestand), laag zoutgehalte, hoge monovalente kation adsorptie gerelateerd aan divalente kationen

Leroueil [1983] heeft aangetoond dat er een correlatie bestaat tussen de geroerde schuifsterkte en de liquiditeitsindex en combinatie van vgl. 4.3 en 4.8 geeft voor de gevoeligheid:

$$S_t = c_u (I_L - 0,21)^2 \quad [-] \quad (4.9)$$

met:

c_u	ongerode schuifsterkte	[kPa]
I_L	liquiditeitsindex	[-]



Figuur 4.14 Relatie tussen liquiditeitsindex, ongerode schuifsterkte van klei en gevoeligheid [Leroueil, 1983]

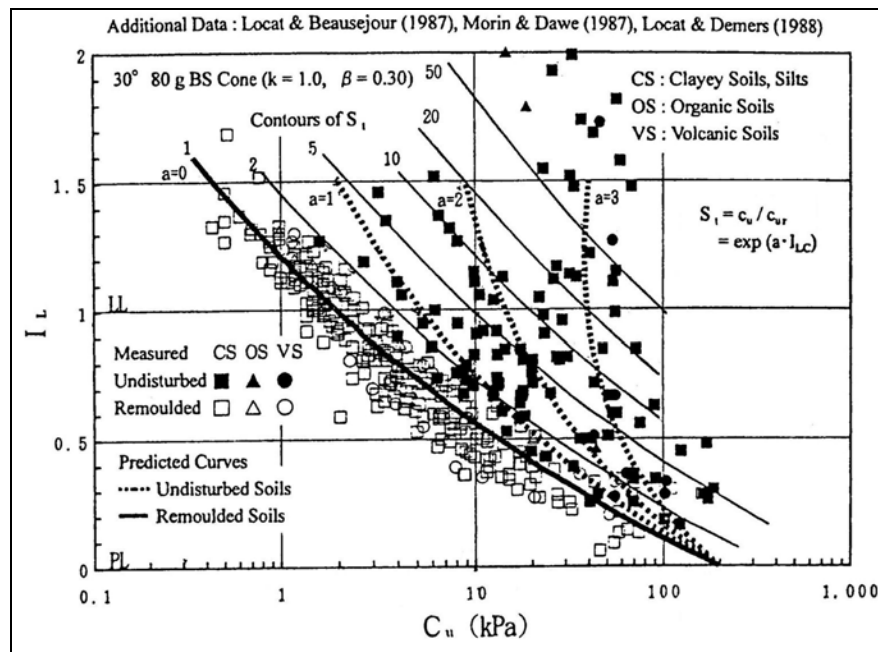
Door Shimobe [2000] wordt, op basis van een groot aantal metingen van ongeroerde schuifsterkte, geroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex, een correlatie voorgesteld voor de gevoeligheid:

$$S_t = \frac{c_u}{c_{ur}} = e^{aI_L} \quad [-] \quad (4.10)$$

met:

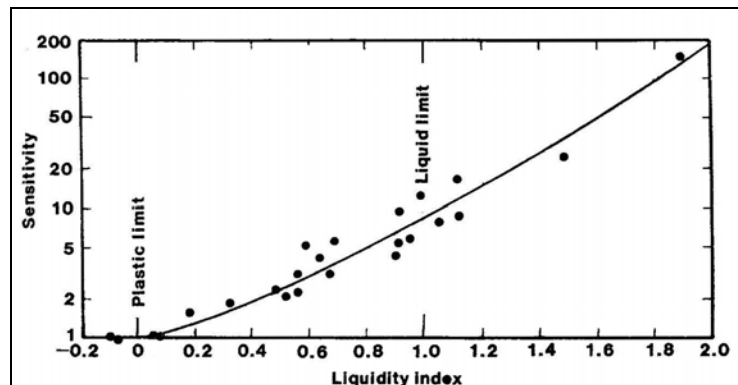
c_u	ongeroerde schuifsterkte	[kPa]
c_{ur}	geroerde schuifsterkte	[kPa]
I_L	liquiditeitsindex	[-]
a	constante tussen 0-3	[-]

Uit Figuur 4.15 wordt duidelijk dat de relatie tussen geroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex ongeacht het grond type door één enkele correlatie kan worden weergegeven. De geroerde sterktes van gronden geclassificeerd als klei, silt, organisch en vulkanische liggen allen rond de contourlijn met gevoeligheid 1 en $a=0$. Uit Shimobe [2000] wordt echter niet duidelijk op welke manier de constante a van vergelijking 4.10 afgeleid of verkregen is.



Figuur 4.15 Relatie tussen liquiditeitsindex en ongedraineerde schuifsterkte [Shimobe, 2000]

Figuur 4.16 toont de relatie tussen de gevoeligheid en de liquiditeitsindex zoals deze gevonden is door Skempton en Northey (1952). Deze relatie is gebaseerd op kleien met een relatief matige gevoeligheid en watergehaltes grotendeels lager dan de vloeigrens.



Figuur 4.16 Relatie tussen gevoeligheid en liquiditeitsindex (Skempton & Northey, 1952)

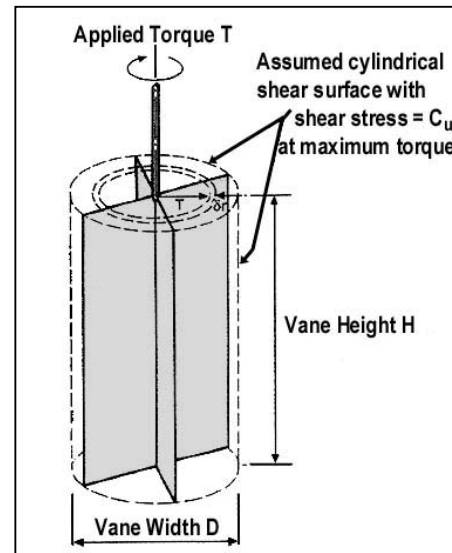
4.3 Bepaling van de schuifsterkte

4.3.1 Directe bepaling van de schuifsterkte

Voor de bepaling van de schuifsterkte van klei bestaan verschillende methoden. Van deze methoden wordt slechts een opsomming gegeven, waarbij in de desbetreffende literatuurverwijzing nadere informatie gevonden kan worden over materieel en werking. De ongedraineerde schuifsterkte van klei kan bepaald worden met de volgende methoden [Head, 1992]:

- fieldvane
- laboratorium vane
- torvane
- handvane
- pocket penetrometer
- triaxiaalproef
- uniforme schuifproef
- CPT (grote ϕ -conus)

Voor de meting van de schuifsterkte van slib wordt vaak een shear vane test (vintest) gebruikt. Een vane test bestaat uit het inbrengen van een as met vinnen in de grond, waarna de grond tot bezwijken wordt gebracht door het ronddraaien van de as. Gelijktijdig wordt het op de as uitgeoefende moment gemeten en uit het benodigde moment kan de ongedraineerde schuifsterkte berekend worden als de afmetingen van de vane bekend zijn. Dit is wel weer afhankelijk van de rotatiesnelheid van de vane.



Figuur 4.17 Voorbeeld van een vane

4.3.2 Indirecte bepaling van de schuifsterkte

Methoden voor de bepaling van de schuifsterkte op een indirecte manier zijn reeds besproken in paragraaf 4.2.1. Het betreft hier correlaties met de consistentie grenzen (Atterbergse grenzen) waarmee op een indirecte wijze de schuifsterkte berekend kan worden. Nogmaals wordt benadrukt dat dit relaties zijn voor de geroerde schuifsterkte opgesteld voor klei.



5 Analyse van correlaties voor de geroerde schuifsterkte

In dit hoofdstuk wordt in de eerste paragraaf een overzicht gegeven van de locaties waaruit de verzameling van slibdata bestaat. De indexparameters uit deze verzameling zijn in paragraaf 5.2 gebruikt om te kijken in hoeverre de in hoofdstuk 4 gepresenteerde formules voor de schuifsterkte en gevoeligheid van klei toepasbaar zijn voor slib.

5.1 Verzameling van slibdata

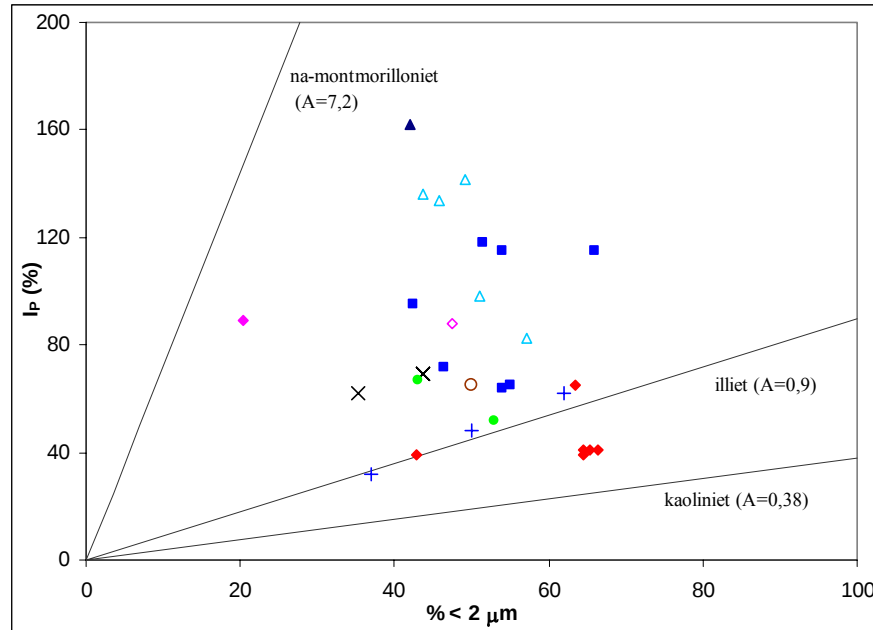
5.1.1 Data verzameling

In Figuur 5.1 is een overzicht gegeven van de locaties die zijn gebruikt voor de opzet van de verzameling van slibparameters. Bij de opzet van de verzameling is de definitie voor slib, zoals gegeven in paragraaf 2.2.2, als toetsingscriterium gebruikt. Bij bestudering van de tabellen in bijlage II zal blijken dat er ook ongeroerde schuifsterkten zijn opgenomen die groter zijn dan de gedefinieerde bovengrens van 10 kPa. De eenvoudige reden hiervoor is dat het moeilijk is data te vinden en door het niet te strikt hanteren van de bovengrens er een grotere dataverzameling verkregen wordt. Van locatie nr.7 is alleen bekend dat dit een locatie in de Golf van Mexico betreft, maar in het betreffende artikel wordt geen nadere specificatie van de exacte locatie gegeven. De bij de locaties behorende specifieke parameters zijn te vinden in bijlage II. In deze bijlage worden ook figuren gepresenteerd waarin de locaties meer in detail worden getoond.

Figuur 5.1 Overzicht locaties van de slibverzameling

Tabel 5.1 Legenda behorende bij Figuur 5.1

deze fractie. Voor enkele punten is deze verdeling wel bekend en vergelijking in de activiteitsgrafiek leert dat in de activiteitsgrafiek slechts een globale indicatie geeft van de mineralen.

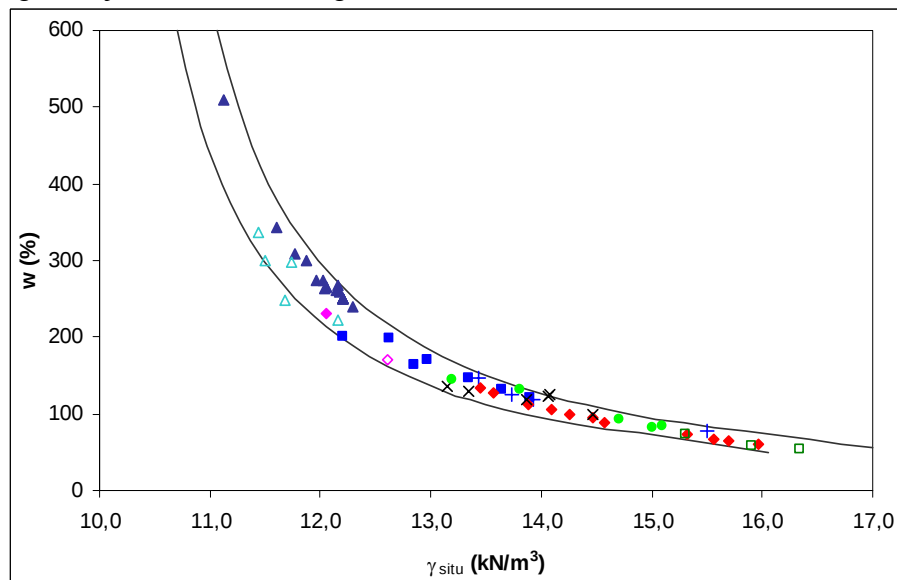


Figuur 5.3 Activiteitsgrafiek met weergave van de punten uit de database

In Figuur 5.4 wordt de relatie getoond tussen de in situ dichtheid en het watergehalte. De relatie tussen watergehalte en dichtheid is in paragraaf 3.2.2 afgeleid:

$$\gamma_{situ} = \frac{G+e}{1+e} \gamma_w = \frac{G+wG}{1+wG} \gamma_w \quad (5.1)$$

In de figuur is een band aangegeven met als bovengrens een waarde voor het specifieke korrelgewicht (G) van 2,8 en voor het volumegewicht van water 10,05 kN/m³; voor de ondergrens zijn de waarden 2,4 en 9,81 kN/m³ gebruikt. Het voordeel van deze relatie is dat het een snelle controlemogelijkheid is voor gevonden waarden in de literatuur: voor punten die ver buiten de band liggen zal nagegaan moeten worden of er fouten zijn gemaakt bij de bepaling van bijvoorbeeld het watergehalte.



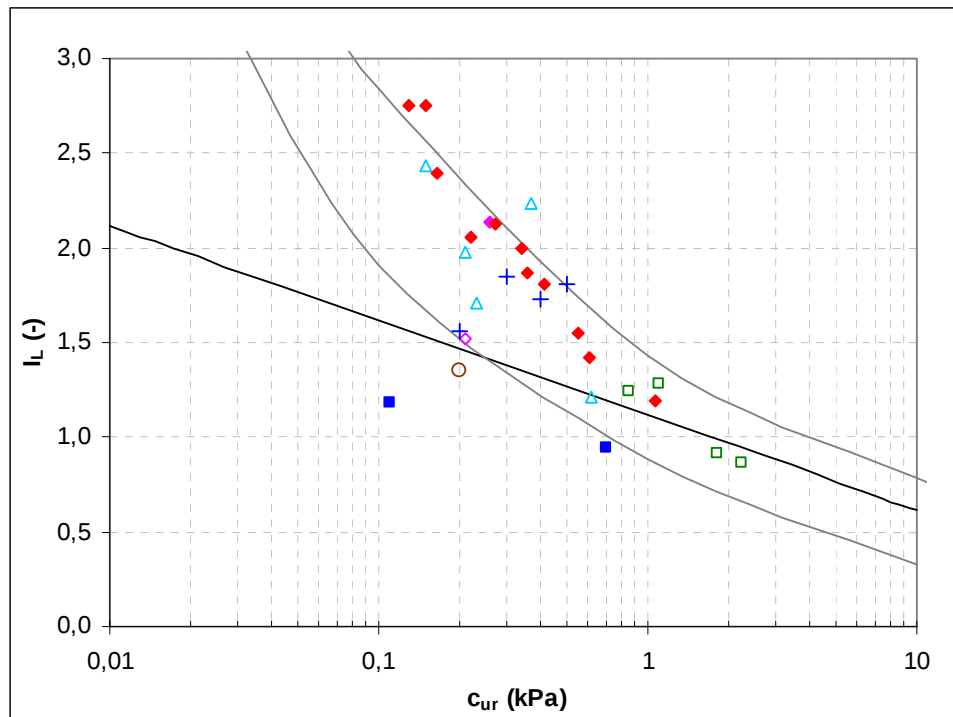
Figuur 5.4 Relatie tussen volumieke massa en watergehalte

5.2 Analyse van de voor klei opgestelde relaties toegepast op slib

In deze paragraaf worden de in paragraaf 4.2.1. besproken relaties voor de schuifsterkte en de gevoeligheid van klei in één figuur geplot met de waarden uit de database. Er wordt een analyse gemaakt van de toepasbaarheid voor slib van de reeds bestaande formules voor de geroerde schuifsterkte en gevoeligheid voor klei. Dit wordt gedaan door de datapunten te plotten in de oorspronkelijke figuren en hierbij is het opvallend dat de van de liquiditeitsindex afhankelijk beschouwde geroerde schuifsterkte op de x-as uitgezet wordt. Dit is afwijkend, want gebruikelijk is het om op de y-as de afhankelijke parameter uit te zetten en op de x-as de onafhankelijke parameter. Tevens wordt de ongeroerde schuifsterkte uitgezet tegen de liquiditeitsindex en in dezelfde figuur worden de uit de literatuur bekende correlaties voor de geroerde schuifsterkte geplot. Het is bekend dat dit niet correct is, maar wordt gedaan ter indicatie van de afwijking met het verloop van de geroerde schuifsterkte.

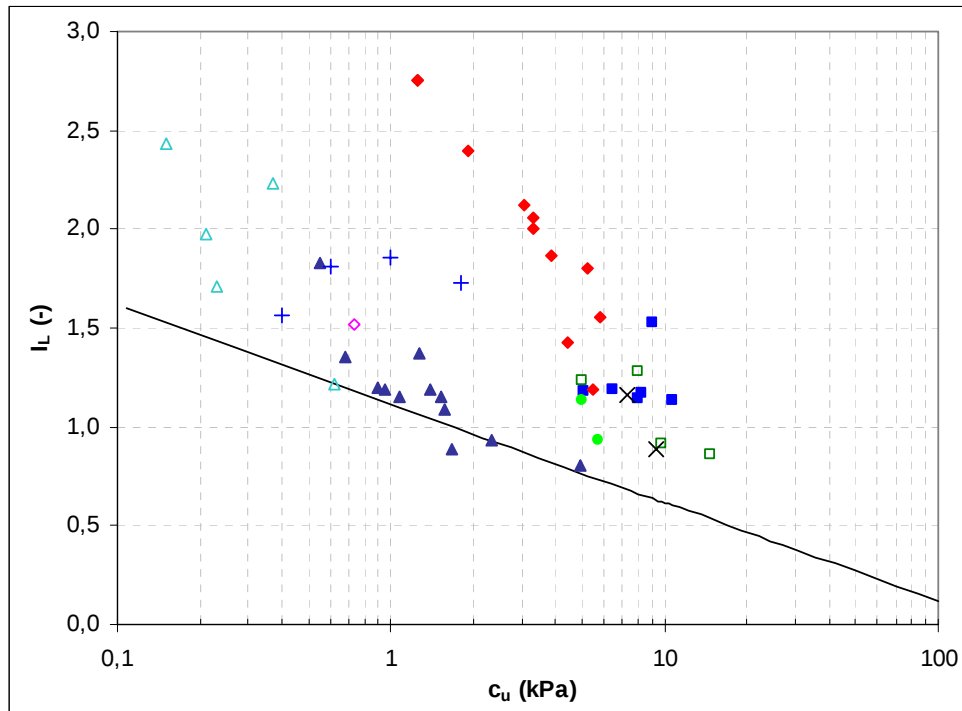
5.2.1 Analyse correlaties voor de geroerde schuifsterkte

Zoals reeds in paragraaf 4.2.1 besproken is, voldoet de relatie van Wroth en Wood niet goed bij hoge waarden van de liquiditeitsindex. Dit is in overeenstemming met de waarden uit de slibverzameling geplot in Figuur 5.5. De punten met de hoge liquiditeitsindex die niet voldoen aan de relatie van Wroth & Wood maar vallen wel binnen de band aangegeven door Mitchell.

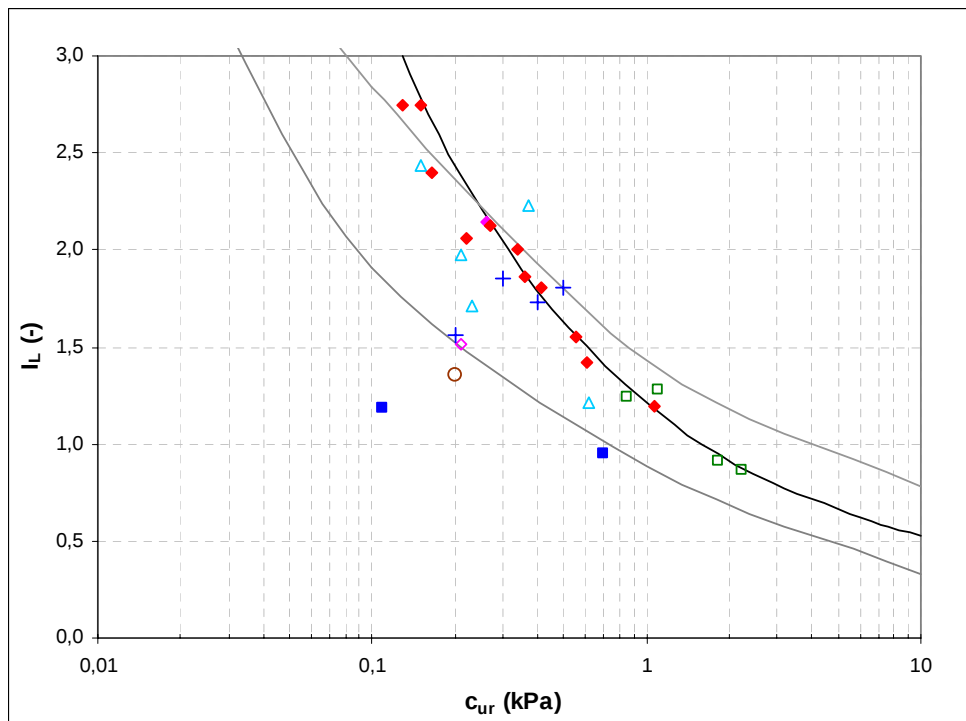


Figuur 5.5 Relatie tussen geroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex volgens Wroth & Wood [1978]

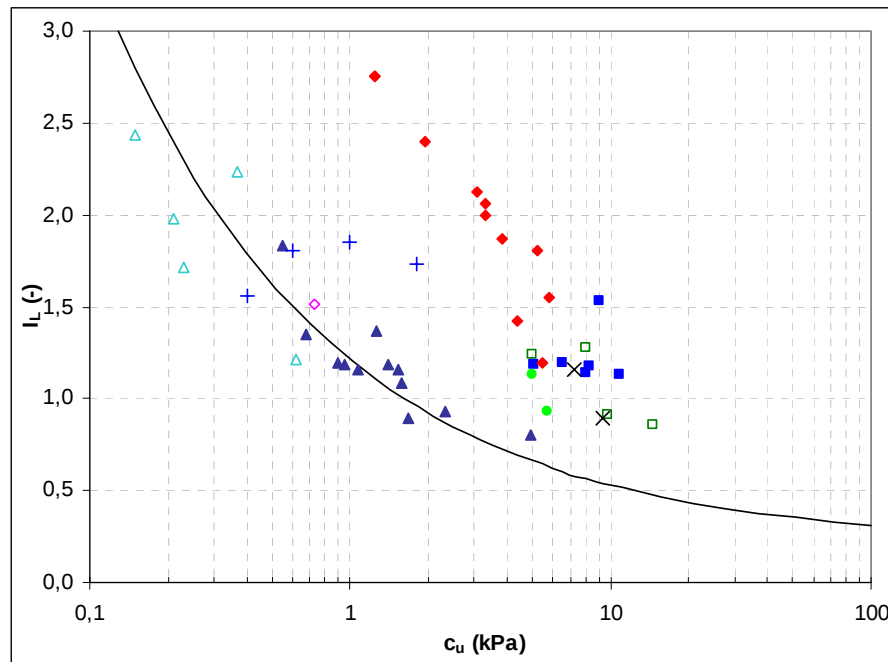
In Figuur 5.7 is te zien dat de waarden voor geroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex uit de database veel beter voldoen aan de getoonde vergelijking van Leroueil [1983]. Dat deze relatie opgesteld is aan de hand van metingen op datapunten van Canadese kleien blijkt uit de goede benadering van de punten uit de database. Bij Figuur 5.7 wordt nogmaals opgemerkt dat de door Leroueil geformuleerde vergelijking tussen geroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex, geldig is voor data waarbij de w_L bepaald is met de valconus. De grenzen van Houston en Mitchell (1969) gelden zowel voor w_L bepaald met de valconus als bepaald volgens de Casagrande methode. Dit zou een verklaring kunnen zijn waarom de punten van niet voldoen aan de relatie van Leroueil, aangezien van deze punten bekend is dat ze bepaald zijn volgens de Casagrande methode. Wel opmerkelijk is dat deze waarden ook niet binnen de grenzen van Houston en Mitchell vallen, evenals de waarde van



Figuur 5.6 Relatie tussen liquiditeitsindex en ongeroerde schuifsterkte

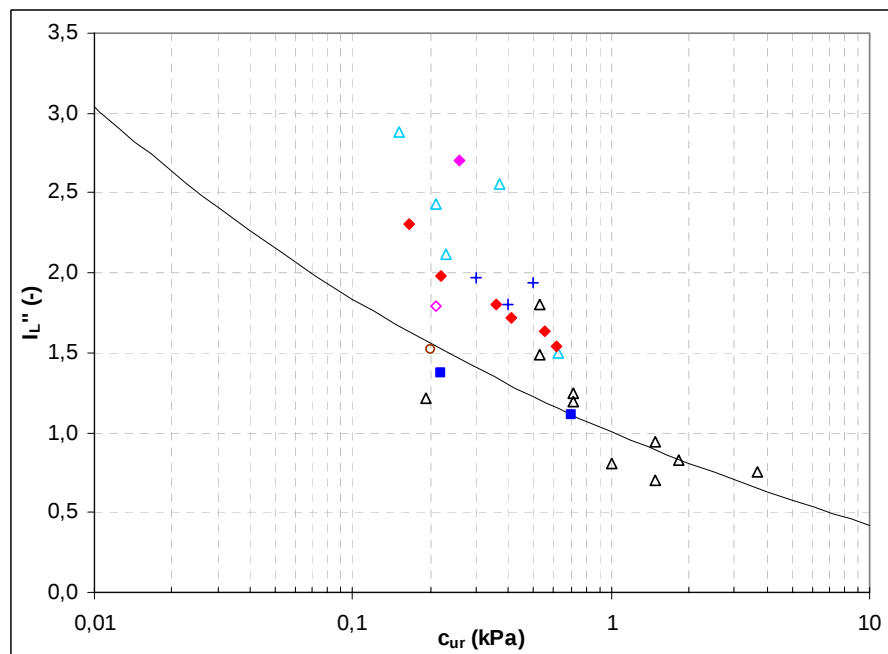


Figuur 5.7 Relatie tussen geroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex volgens Leroueil [1983]

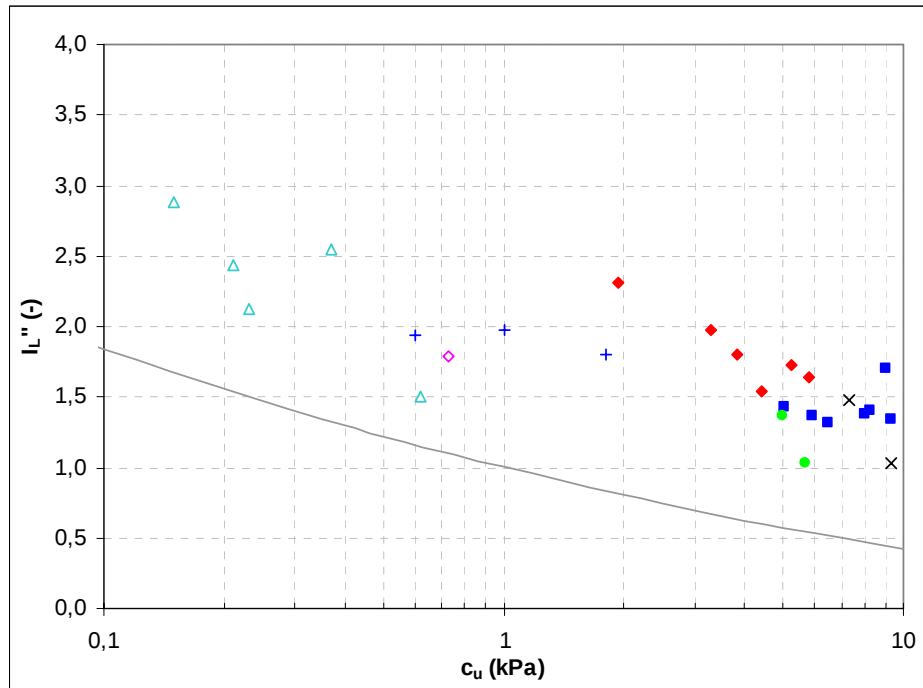


Figuur 5.8 Relatie tussen ongeroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex

Carrier & Beckman betrekken bij de bepaling van een relatie tussen de geroerde schuifsterkte en de liquiditeitsindex de activiteit. Deze bepaling is deels gebaseerd op fosfatische kleien, waarvan vermeld moet worden dat deze nauwelijks in de natuur voorkomen en deze zullen in het verdere onderzoek niet worden meegenomen. Alleen in Figuur 5.9 worden deze waarden gepresenteerd, omdat ze als basis gedienend hebben voor de gemaakte correlatie tussen geroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex.

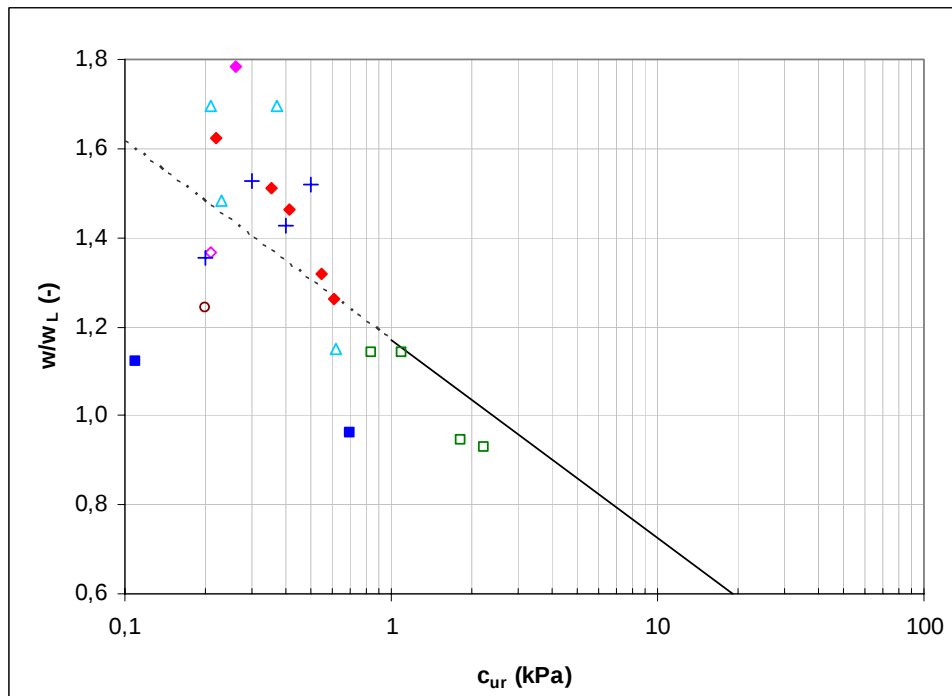


Figuur 5.9 Relatie tussen geroerde schuifsterkte en genormaliseerde liquiditeitsindex volgens Carrier en Beckman [1984]



Figuur 5.10 Relatie tussen genormaliseerde liquiditeitsindex en ongeroerde schuifsterkte

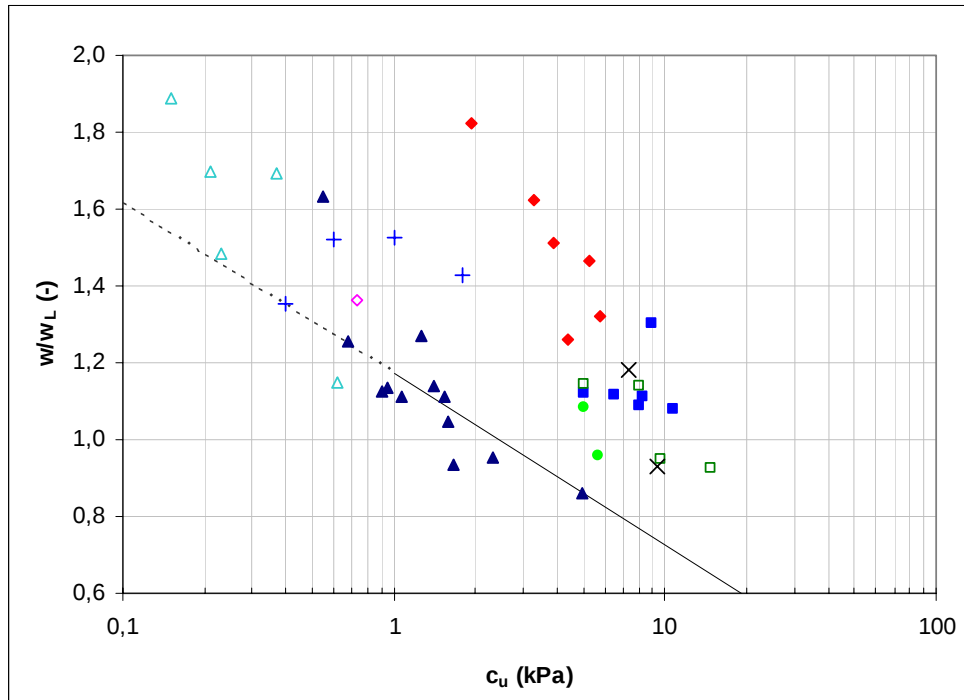
In Figuur 5.11 is de vergelijking tussen de geroerde schuifsterkte en de verhouding w/w_L van Federico [1983] weergegeven. De gestippelde lijn is een extrapolatie van de door Federico gevonden relatie.



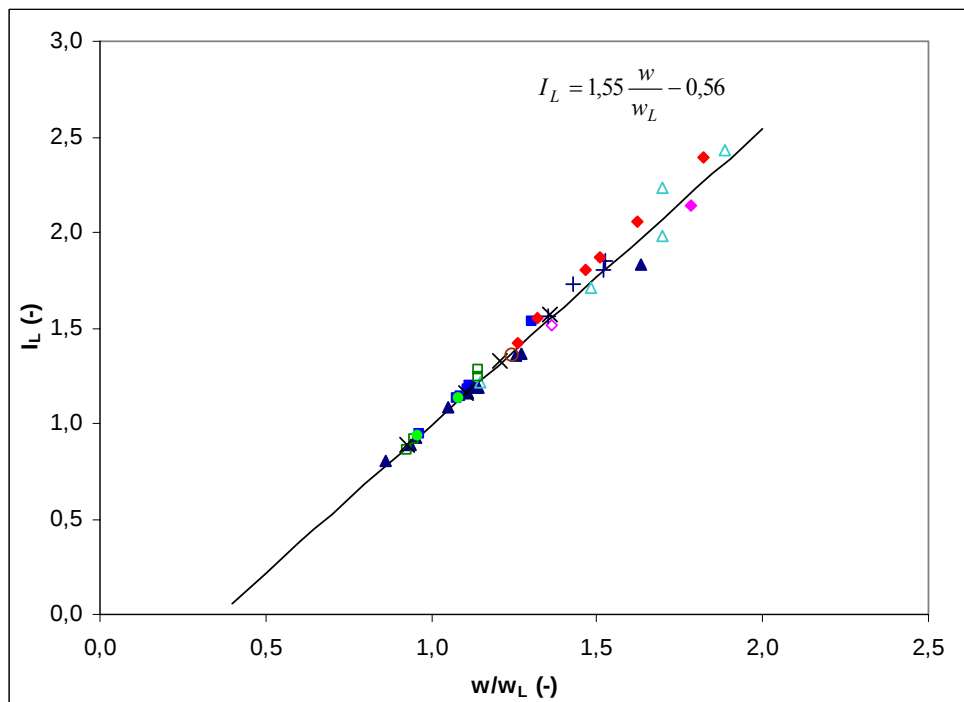
Figuur 5.11 Relatie tussen w/w_L en geroerde schuifsterkte volgens Federico [1983]

Federico maakt bij de correlatie voor de geroerde schuifsterkte niet gebruik van I_L maar gebruikt ter normalisering van het watergehalte de toestandsparameter w/w_L . In Figuur 5.13 is de relatie tussen I_L en w/w_L weergegeven met de punten uit de database. De in deze figuur weergegeven relatie opgesteld door Srinivase Murthy [1986] is afgeleid op basis van punten

met een liquiditeitsindex variërend van -0,2 tot 0,9. De datapunten uit de slibverzameling die bijna allemaal een liquiditeitsindex hebben groter dan 0,9 voldoen zeer goed aan de relatie van Murthy.



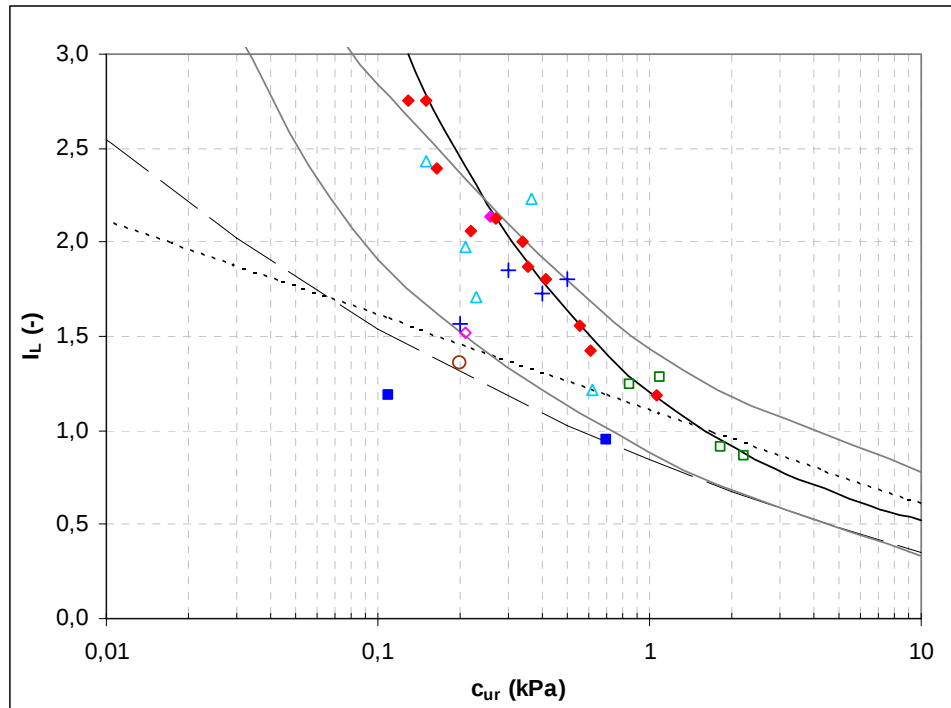
Figuur 5.12 Relatie tussen verhouding w/w_L en ongeroerde schuifsterkte



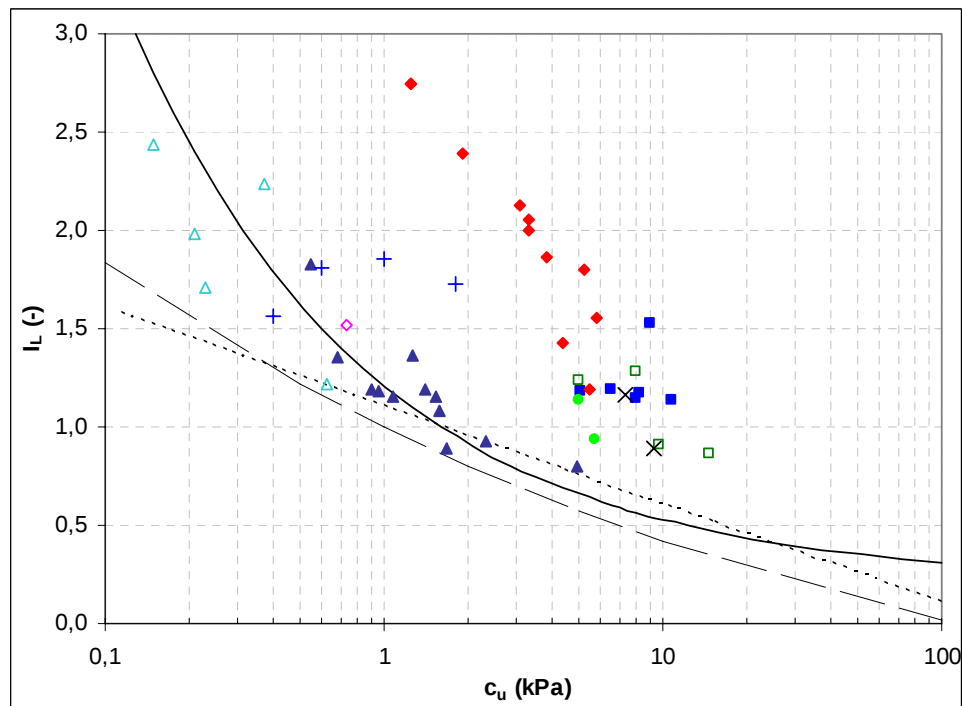
Figuur 5.13 Relatie tussen liquiditeitsindex en verhouding w/w_L

Omdat Carrier en Beckman voor de genormaliseerde liquiditeitsindex de activiteit gebruiken is vergelijking met het verband volgens Wroth & Wood en met Leroueil alleen mogelijk wanneer een constante waarde gekozen wordt voor de activiteit. Daarom is gekozen voor een gemiddelde waarde van de activiteit uit de database van 2.

In Figuur 5.14 zijn de drie relaties voor de geroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex in één figuur geplot. De conclusie is dat de relatie van Leroueil duidelijk het beste voldoet. Slechts voor een enkel punt is de benadering volgens de relatie van Wroth & Wood of de relatie van Carrier & Beckman beter. Met name bij waarden van de liquiditeitsindex groter dan 1,5 is het verschil tussen de relaties goed zichtbaar en voldoet alleen de vergelijking van Leroueil.



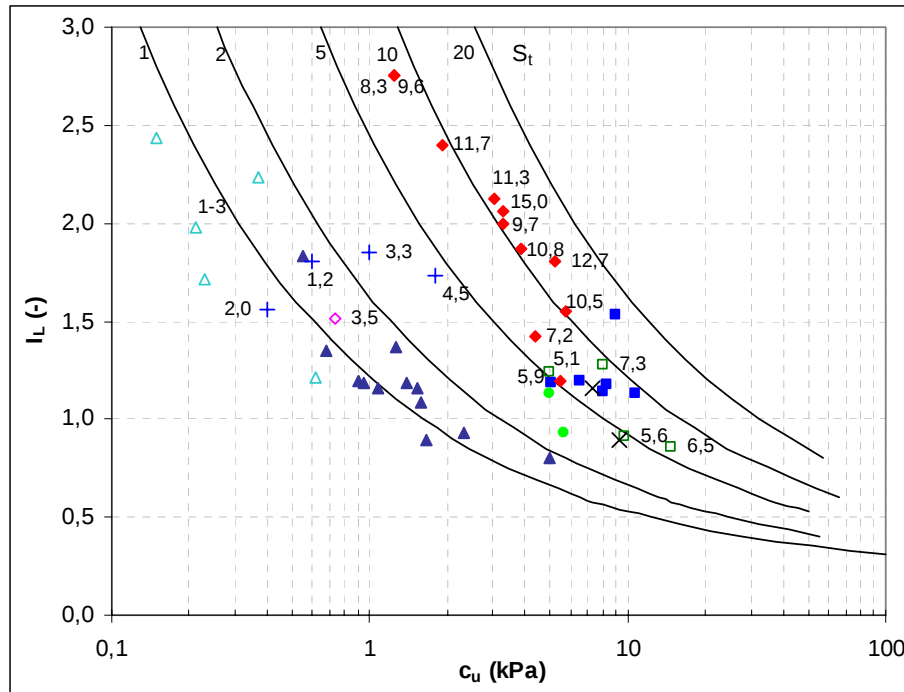
Figuur 5.14 Totaaloverzicht relaties tussen liquiditeitsindex en geroerde schuifsterkte



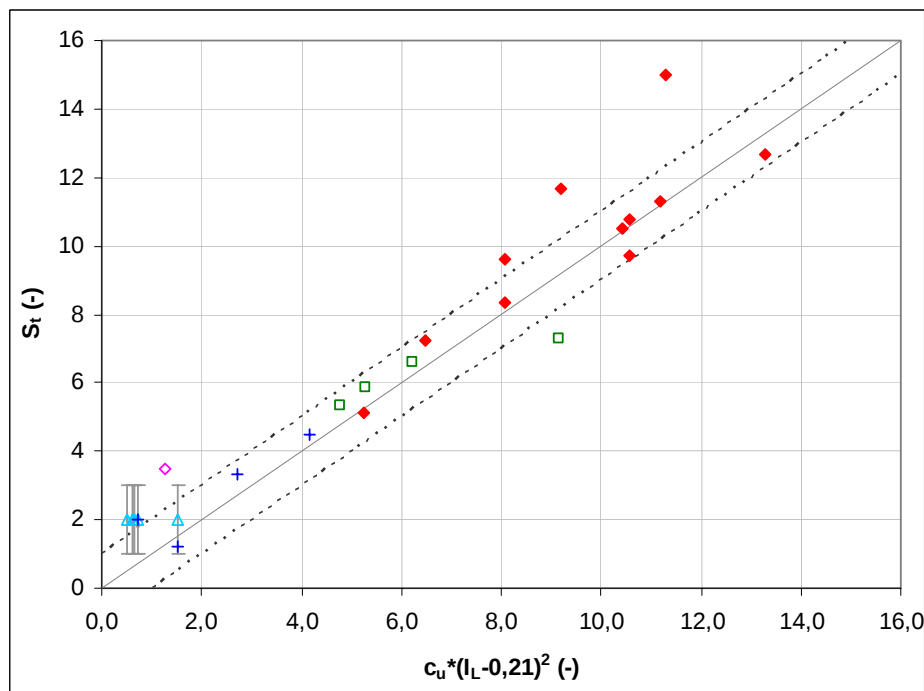
Figuur 5.15 Totaaloverzicht liquiditeitsindex versus ongeroerde schuifsterkte

5.2.2 Analyse correlaties voor de gevoeligheid

Figuur 5.16 is een weergave van de relatie tussen de ongeroerde schuifsterkte, liquiditeitsindex en gevoeligheid volgens Leroueil met daarin de waarden uit de database geplott. Daar waar deze bekend is staat bij de geplote punten de gevoeligheid. In Figuur 5.17 is de relatie van Leroueil op een andere manier weergegeven en uit deze figuur blijkt een redelijk tot goede overeenkomst tussen de waarden uit de dataverzameling en de voorgestelde relatie.

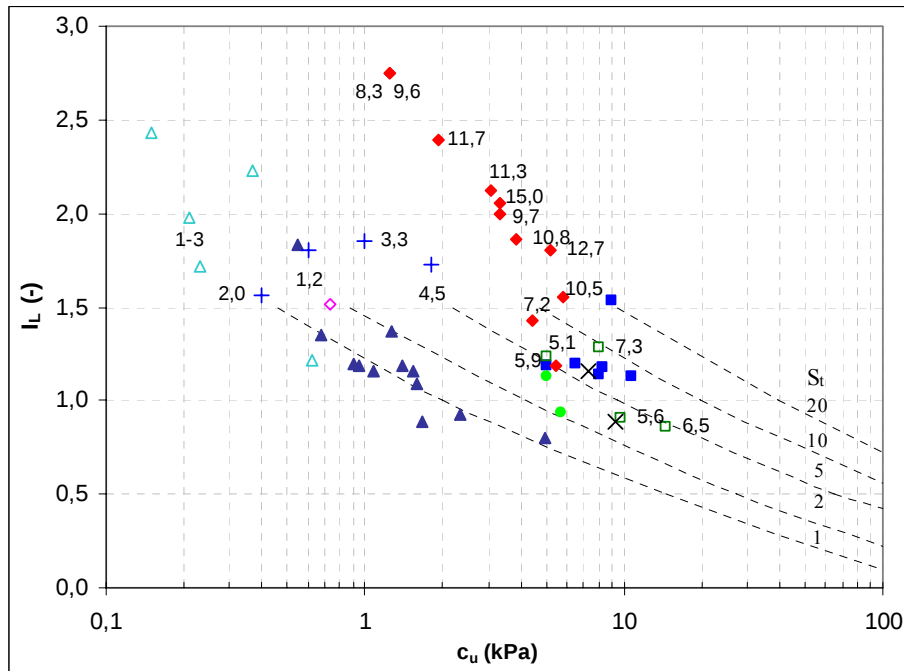


Figuur 5.16 Relatie tussen ongeroerde schuifsterkte, liquiditeitsindex en gevoeligheid volgens Leroueil [1983]

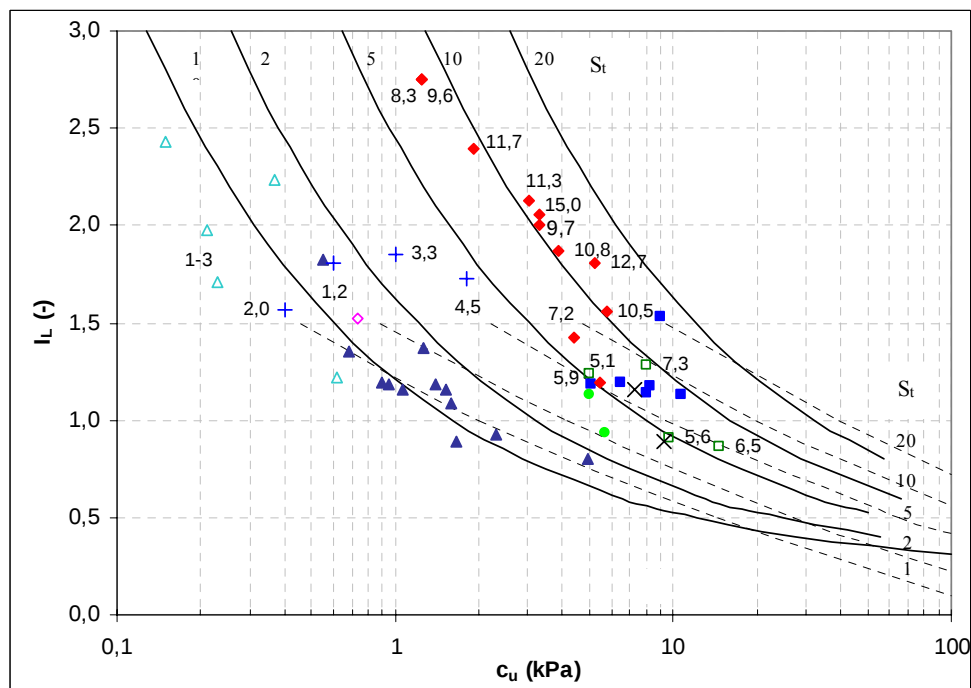


Figuur 5.17 Gevoeligheid data versus benadering Leroueil

Figuur 5.18 is een weergave van de relatie tussen de ongeroerde schuifsterkte, liquiditeitsindex en gevoeligheid volgens Shimobe met daarin de waarden uit de database geplott. Bij de geplote punten staat, daar waar deze bekend is, de gevoeligheid. Ook in deze figuur is een redelijke overeenkomst te zien voor de waarden uit de database en de voorgestelde relatie. In Figuur 5.19 zijn de correlaties van zowel Leroueil als Shimobe weergegeven. Duidelijk is te zien is dat de relatie van Leroueil beter voldoet en dat de correlatie van Shimobe alleen een betere benadering voor de ondergrens bij een liquiditeitsindex groter dan 1,25 vormt.

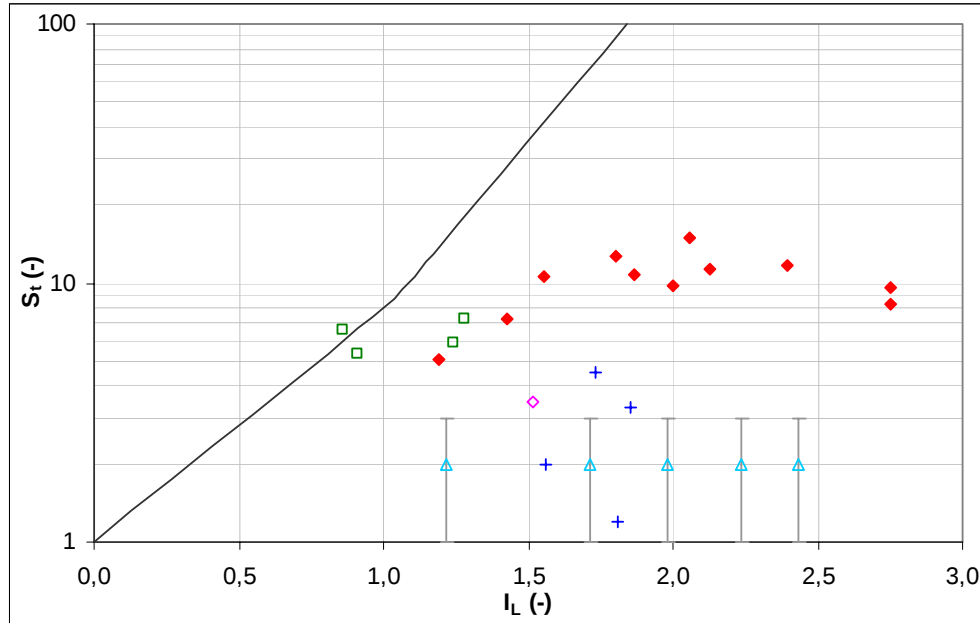


Figuur 5.18 Relatie tussen ongeroerde schuifsterkte, liquiditeitsindex en gevoeligheid volgens Shimobe [2000]



Figuur 5.19 Vergelijking relaties van Leroueil [1983] en Shimobe [2000]

In Figuur 5.20 wordt de correlatie tussen gevoeligheid en liquiditeitsindex zoals deze gevonden is door Skempton en Northey (1952) weergegeven, waarbij tevens de waarden uit de dataverzameling geplot zijn. Skempton baseerde de correlatie grotendeels op punten met een liquiditeitsindex tussen 0 en 1. Het merendeel van de punten uit de dataverzameling heeft een liquiditeitsindex groter dan 1 en voldoet niet aan de correlatie. Hieruit kan geconcludeerd worden dat toekenning van een S_r alleen op basis van I_L niet mogelijk is.



Figuur 5.20 Correlatie tussen gevoeligheid en liquiditeitsindex volgens Skempton & Northey (1952)

5.3 Conclusies

Uit paragraaf 5.2.1 en 5.2.2 kan het volgende geconcludeerd worden:

- als de geroerde schuifsterkte onbekend is dan kan deze het best benaderd worden met de vergelijking van Leroueil waarbij de geroerde schuifsterkte gecorreleerd is met de liquiditeitsindex (vgl. 4.3, Figuur 5.14).
- de gepresenteerde vergelijkingen hebben allen betrekking op de geroerde schuifsterkte en zeggen dus niets over de ongeroerde schuifsterkte.
- de relatie tussen de ongeroerde schuifsterkte, de liquiditeitsindex en de gevoeligheid zoals voorgesteld door Leroueil blijkt goed te voldoen voor de punten uit de slibverzameling (Figuur 5.17).
- het probleem blijft bestaan dat om een voorspelling te maken voor de ongeroerde sterkte, de gevoeligheid en de geroerde schuifsterkte bekend moeten zijn, of om een voorspelling voor de gevoeligheid te maken de ongeroerde schuifsterkte bekend moet zijn.



6 Bepaling correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte

De belangrijkste conclusie uit hoofdstuk 5 is dat er geen verband bestaat voor de ongeroerde schuifsterkte van klei op basis van consistentiegrenzen. In dit hoofdstuk worden de indexparameters uit de dataverzameling gebruikt voor de ontwikkeling van een verband voor de ongeroerde schuifsterkte van slib. Dit verband wordt gevormd met de parameters: watergehalte, consistentiegrenzen, organisch gehalte en korrelverdeling.

6.1 Analyse van de parameters

In hoofdstuk 4 is de theoretische achtergrond bij de schuifsterkte gegeven en worden enkele belangrijke parameters die van invloed zijn op de schuifsterkte beschouwd. In deze paragraaf wordt de ongeroerde schuifsterkte als afhankelijke parameter beschouwd en worden watergehalte, dichtheid (volumegewicht), organisch gehalte en korrelverdeling als onafhankelijke parameters beschouwd.

Zoals reeds in hoofdstuk 3 gesteld kan de dichtheid beschouwd worden als een toestandsparameter voor slib. In paragraaf 3.2 wordt het verband tussen in situ dichtheid en watergehalte afgeleid, waarbij de in situ dichtheid naast het watergehalte, afhankelijk is van de soortelijke massa van de vaste stof, van het organisch gehalte en de verzadigingsgraad. Dit is een strak verband en is voor de dataverzameling te zien in Figuur 5.4. De normalisering van het watergehalte met de consistentiegrenzen kan ook beschouwd worden als een karakterisering van de toestand van slib. De liquiditeitsindex is een vorm van deze normalisering, maar de verhouding tussen vloeigrens en watergehalte vorm ook een mogelijkheid tot normalisering. In paragraaf 4.2 wordt de invloed van de parameters organisch gehalte respectievelijk korrelverdeling ($\% < 2 \mu\text{m}$) op de schuifsterkte verklaard.

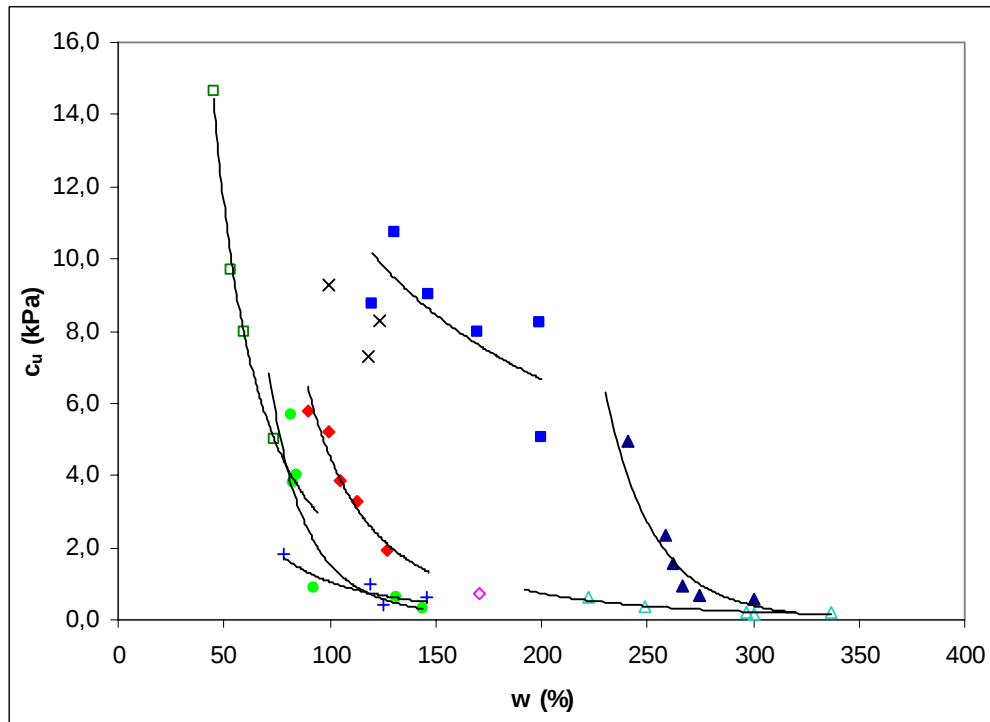
Omdat de bovengenoemde parameters bij veel grondonderzoeken standaard bepaald worden is gekozen deze te gebruiken bij de bepaling van correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte. In deze paragraaf worden twee dimensionale plots gegeven tussen de afhankelijke parameter schuifsterkte en onafhankelijke parameter.

6.1.1 Watergehalte en dichtheid

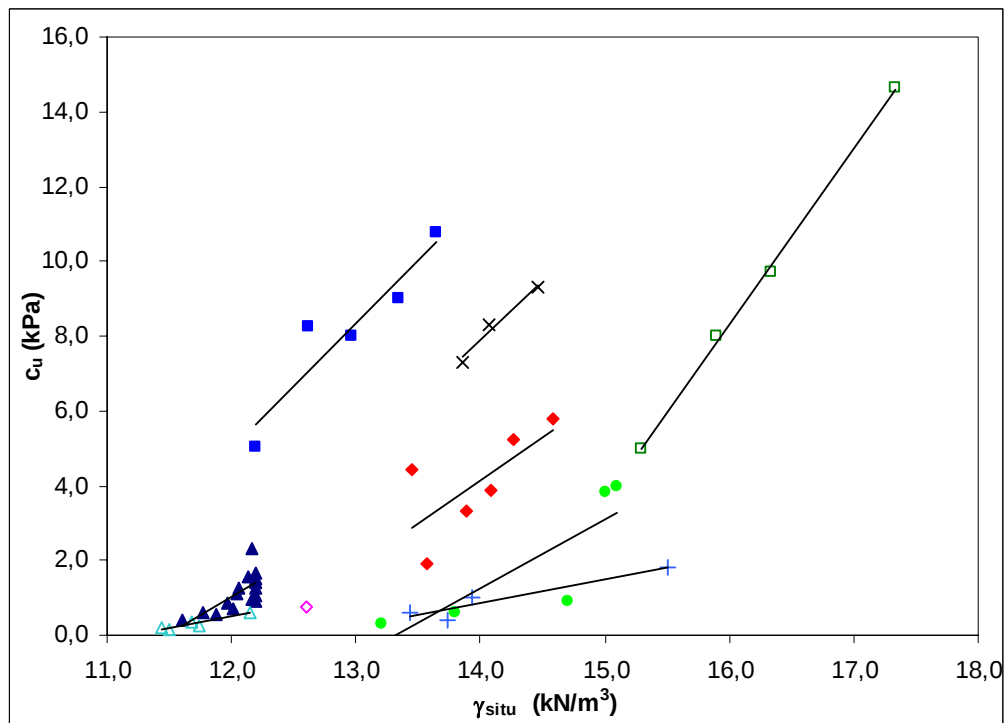
In Figuur 6.1 is de afhankelijkheid van de schuifsterkte van het watergehalte duidelijk zichtbaar. Des te hoger het watergehalte binnen een locatie des te lager is de schuifsterkte. Voor de locaties met hogere schuifsterkte is op het eerste gezicht een lineair verband zichtbaar, voor de lage schuifsterktes een polynoom of machtsfunctie.

Omdat er tussen het watergehalte en dichtheid een direct verband bestaat (zie paragraaf 3.2.2) is het niet verwonderlijk dat in Figuur 6.2 dezelfde verbanden zichtbaar zijn als in Figuur 6.1. Wel is het onderscheid van de verbanden tussen relatief hoge en relatief lage schuifsterktes minder duidelijk en lijkt het mogelijk alle locaties te benaderen met een lineair verband.

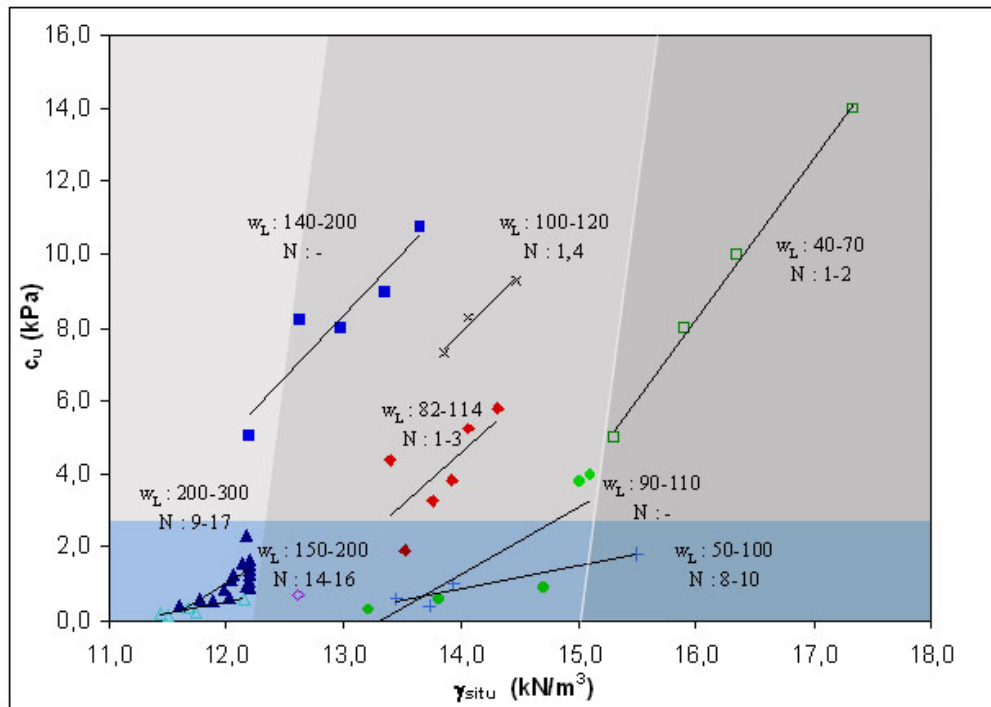
Wanneer Figuur 6.2 nader beschouwd wordt, blijkt het mogelijk de figuur een indeling te maken met behulp van een tweetal parameters. Onderscheid is zichtbaar tussen locaties met een hoog en laag organisch gehalte (gesymboliseerd door N), en bovendien is zichtbaar dat met toenemende situ dichtheid de vloeigrens afneemt. Dit onderscheid wordt schematisch weergegeven in Figuur 6.3.



Figuur 6.1 Ongeroerde schuifsterkte versus watergehalte



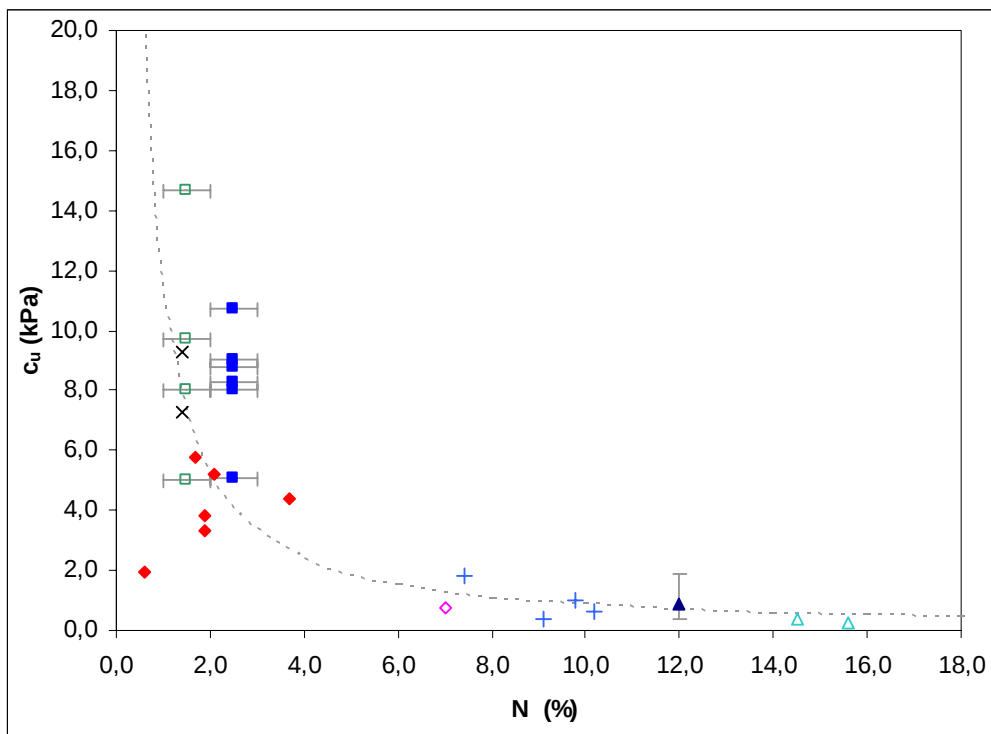
Figuur 6.2 Ongeroerde schuifsterkte versus situ dichtheid



Figuur 6.3 Ongeroerde schuifsterkte versus situ dichtheid

6.1.2 Organisch gehalte

In Figuur 6.4 is de ongeroerde schuifsterkte geplot tegen het gehalte aan organisch materiaal. De punten waarvan slechts een gemiddelde waarde bekend is, zijn aangegeven met fouten balken. De gestippelde lijn is de trendlijn voor de getoonde data, en deze toont een afhankelijkheid van de schuifsterkte van het organisch gehalte volgens een machtsfunctie.



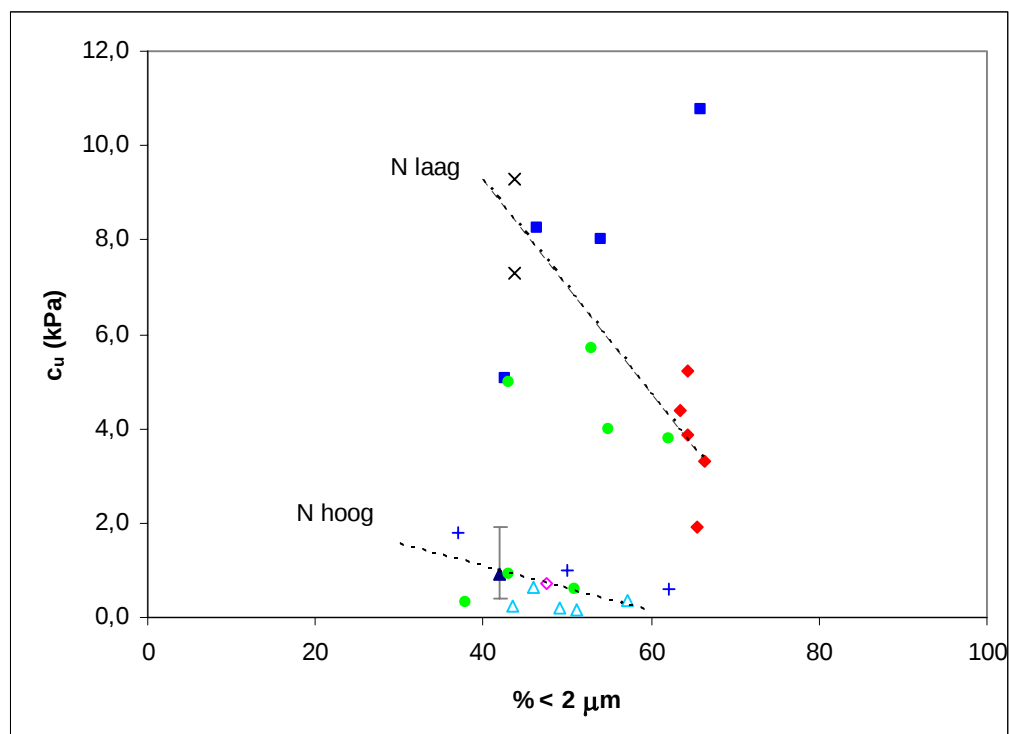
Figuur 6.4 Ongeroerde schuifsterkte versus organisch gehalte



6.1.3 Korrelverdeling

In paragraaf 4.2.3 is een inventarisatie gemaakt van de invloed van de korrelverdeling op het watergehalte, vloeigrens en de schuifsterkte. Hierbij is de invloed van de fijne fractie op deze eigenschappen beschouwd. De fijne fractie wordt gedefinieerd als de fractie waarbij de diameter van de deeltjes kleiner dan $2\ \mu\text{m}$ is. Deze fractie kan niet door zeven bepaald worden, maar wordt bepaald door de bezinksnelheid in water te meten, volgens methoden die gebaseerd zijn op de wet van Stokes. Deze methoden zijn gevoelig voor de kwaliteit van uitvoering. Een robuustere maat is de $16\ \mu\text{m}$ fractie waarbij de spreiding in uitkomst veel geringer is. Het probleem is dat niet voor alle locaties uit de data verzameling in bijlage II de korrelverdelingsdiagrammen bekend zijn en dus ook niet de $16\ \mu\text{m}$ fractie. In bijlage IV wordt een methode beschreven waarbij de korrelverdelingskromme benaderd wordt door een kansverdelingsfunctie. Deze methode is ontleend aan Uffink [1983].

Deze bepalingmethode voor de fractie kleiner dan $16\ \mu\text{m}$ blijkt voor een aantal kromme zeer goed toepasbaar, maar er zijn ook krommen waar deze benadering minder goed voldoet. Omdat de $2\ \mu\text{m}$ fractie van bijna elk punt uit de dataverzameling bekend is, wordt besloten niet gebruik te maken van de benadering van de $16\ \mu\text{m}$ fractie volgens de in bijlage IV gepresenteerde methode. De mogelijke fout bij het bepalen van de $2\ \mu\text{m}$ fractie wordt minder groot geacht dan de fout in de benadering van de $16\ \mu\text{m}$ fractie.



Figuur 6.5 Ongeroerde schuifsterkte versus percentage kleiner dan $2\ \mu\text{m}$

Wanneer gekeken wordt naar de afhankelijkheid van de schuifsterkte van de fractie kleiner dan $2\ \mu\text{m}$ zoals weergegeven in Figuur 6.5, dan is wederom het onderscheid zichtbaar tussen punten met een hoog organisch gehalte en een laag organisch gehalte. Dit onderscheid wordt gesuggereerd met de gestippelde lijnen. Echter binnen de groepen is de spreiding aanzienlijk en voldoen data niet aan de gestippelde lineaire trend, voorbeelden hiervan zijn en

6.1.4 Onafhankelijke parameters

In de inleiding van paragraaf 6.1 is de afhankelijkheid van de schuifsterkte van een aantal onafhankelijke parameters gesteld. Door deze onafhankelijke parameters tegen elkaar te

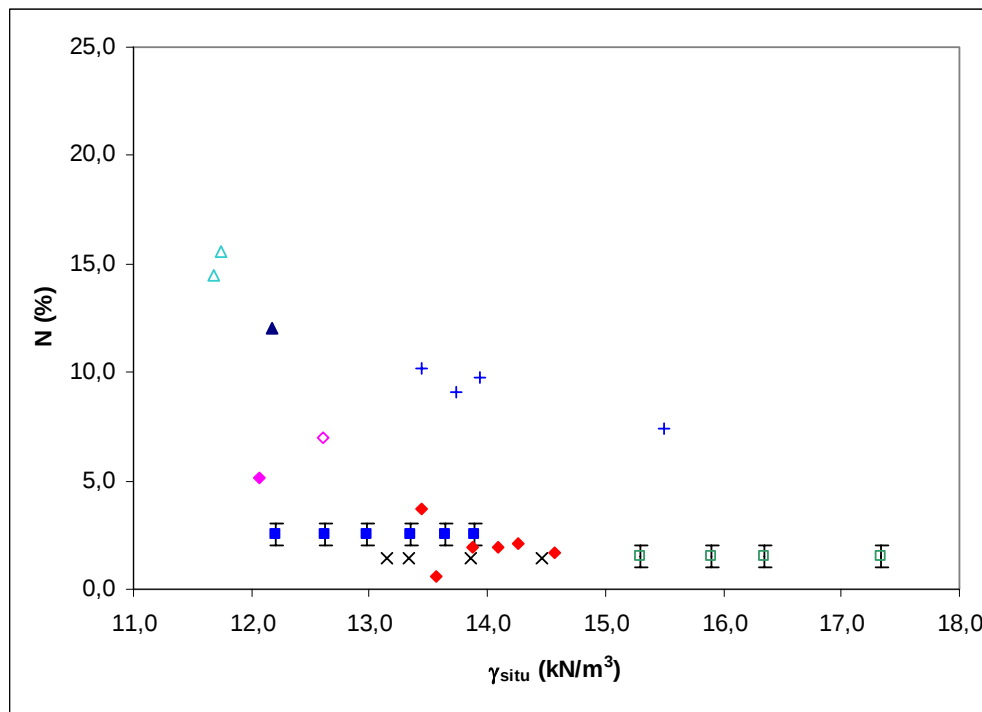


plotten kan gekeken worden in hoeverre deze onderling afhankelijk zijn en of deze aan de uit de literatuur bekende relaties, weergegeven in paragraaf 4.2, voldoen.

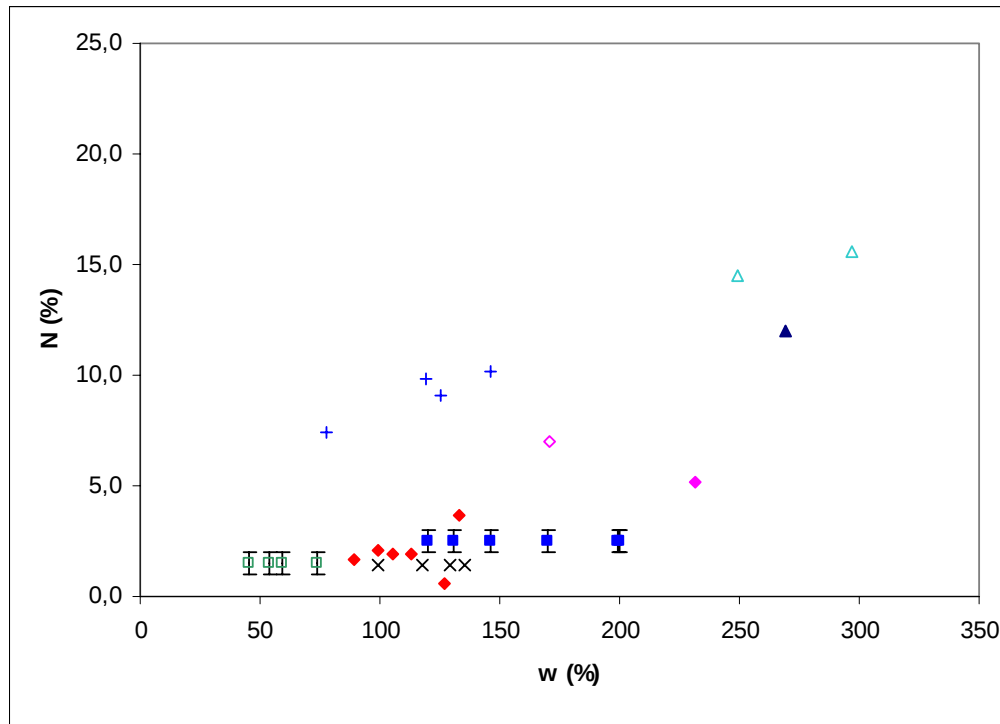
Vergelijking van het organisch gehalte met het watergehalte of dichtheid leert dat het moeilijk is directe afhankelijkheid te bewijzen. Wanneer de waarden van buiten beschouwing worden gelaten, dan zou in Figuur 6.6 een trendlijn in de vorm van een machtsfunctie getrokken kunnen worden. Het probleem bij het organisch gehalte is dat de dichtheden van de organisch stof niet bekend zijn, en deze zijn zeker van invloed op de totale dichtheid.

Vergelijking van organisch gehalte met het watergehalte levert een zelfde beeld. Wanneer in Figuur 6.7 de punten niet in beschouwing worden genomen, is er voor de data met hoge organische gehalten een lineair verband mogelijk met het watergehalte. Maar ook voor deze figuur geldt dat weglating van een trendlijn in de vorm van een machtsfunctie mogelijk is.

Samenvattend kan gesteld worden dat het niet mogelijk is een directe relatie op te stellen voor organisch gehalte en dichtheid of voor organisch gehalte en watergehalte.

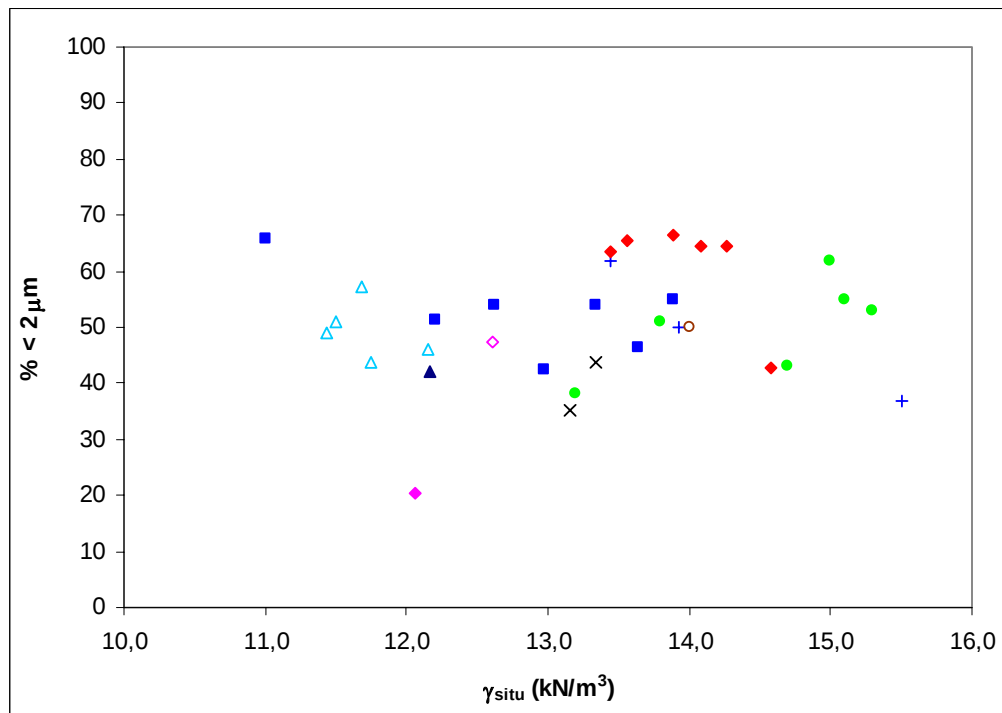


Figuur 6.6 Organisch gehalte versus situ dichtheid



Figuur 6.7 Organisch gehalte versus watergehalte

Uit Figuur 6.8 blijkt geen directe afhankelijkheid van de dichtheid van de fijne fractie. Alleen bij is de trend zichtbaar dat bij een afnemend percentage kleiner dan 2 μm en een toenemend percentage groter dan 63 μm de dichtheid toeneemt.

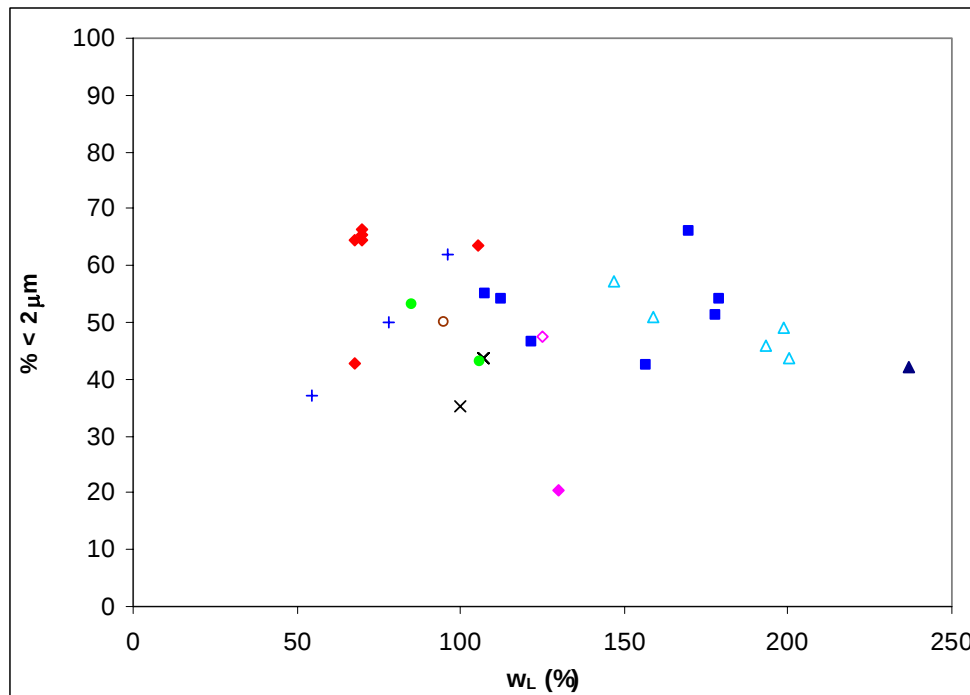


Figuur 6.8 Percentage kleiner dan 2 μm versus situ dichtheid

De in paragraaf 4.2.3 besproken “linear mixture law” waarin de waarde voor de vloeigrens volledig wordt toegeschreven aan het percentage kleiner dan 2 μm blijkt voor de waarden uit



de slibverzameling slechts deels te kloppen. Voor bijvoorbeeld en is de “linear mixture law” van toepassing, maar bij en zeer zeker niet. Hieruit kan geconcludeerd worden dat verandering van w_L zeker niet alleen toegeschreven kan worden aan het percentage kleiner dan $2\ \mu\text{m}$.



Figuur 6.9 Percentage kleiner dan $2\ \mu\text{m}$ versus vloeigrens

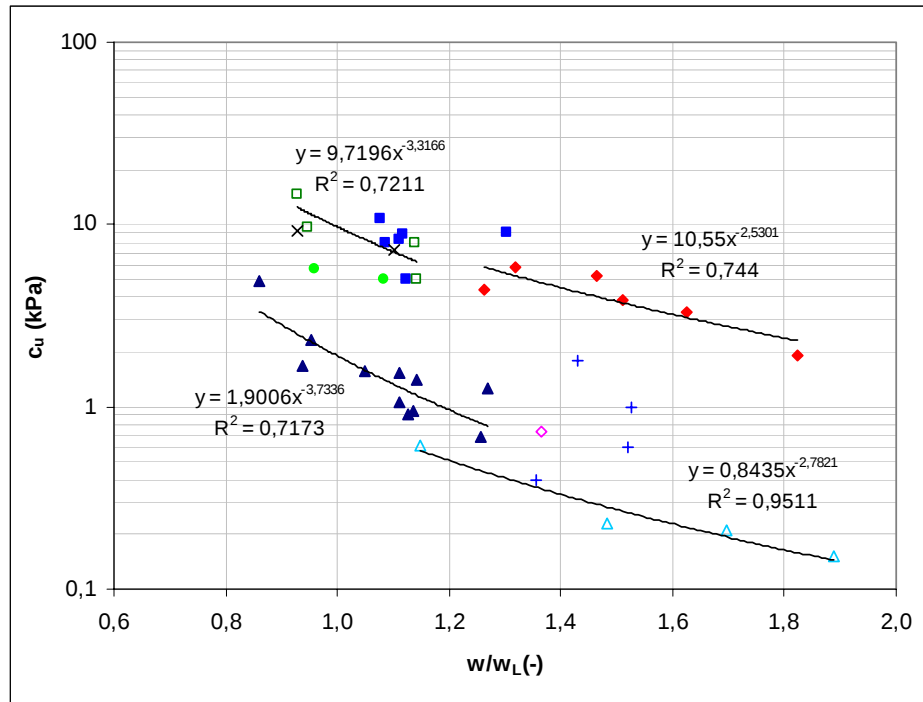
Uit deze paragraaf volgt dat:

- de schuifsterkte per locatie duidelijke afhankelijkheid vertoont van het watergehalte (en situ dichtheid);
- het organisch gehalte een duidelijke invloed heeft op de schuifsterkte;
- de invloed van de fijne fractie op de schuifsterkte minder goed zichtbaar is;
- er geen duidelijke afhankelijkheid zichtbaar is tussen de voor de schuifsterkte onafhankelijk beschouwde parameters watergehalte, organisch gehalte en $2\ \mu\text{m}$ fractie. Dit betekent dat deze parameters alle kunnen worden meegenomen bij het afleiden van een correlatie voor de ongeroerde schuifsterkte.

6.2 Bepaling correlatie niveau I

In de voorgaande paragraaf is een analyse gemaakt van de onafhankelijke parameters voor de schuifsterkte. In deze paragraaf wordt gekeken of een verband bepaald kan worden voor de ongeroerde schuifsterkte wanneer combinatie plaatsvindt van de onafhankelijke parameters.

In Figuur 6.3 is de schuifsterkte uitgezet tegen de dichtheid, waarbij onderscheid gemaakt kan worden in organisch gehalte en vloeigrens. Dat de vloeigrens bepalend is bij de bepaling van een relatie van de geroerde schuifsterkte is in paragraaf 4.2.1 uitvoerig behandeld. In Figuur 6.10 is de ongeroerde schuifsterkte geplot tegen de verhouding w/w_L .

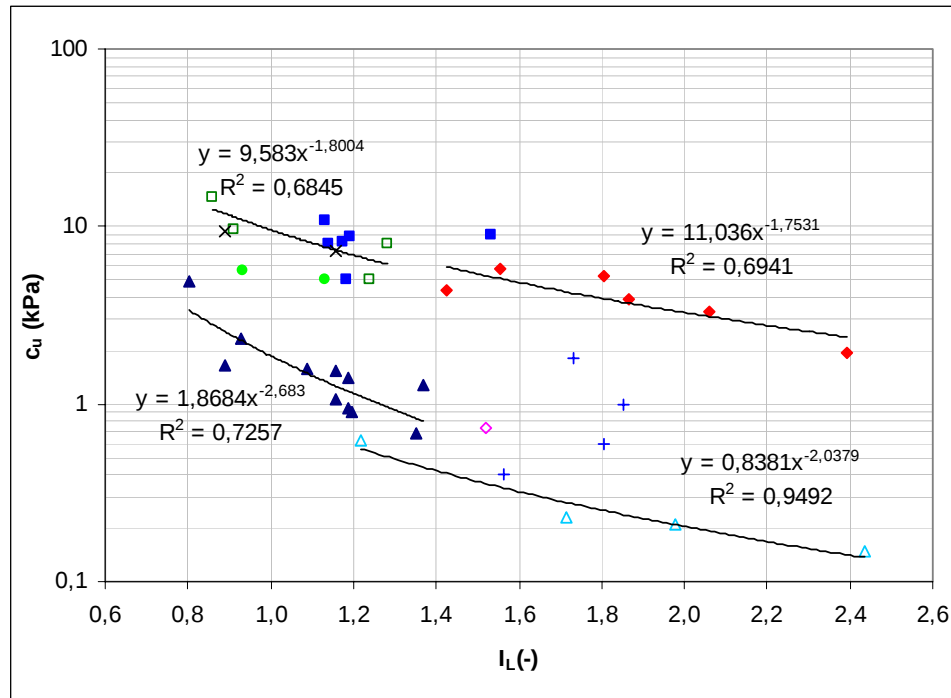


Figuur 6.10 Ongeroerde schuifsterkte versus verhouding w/w_L

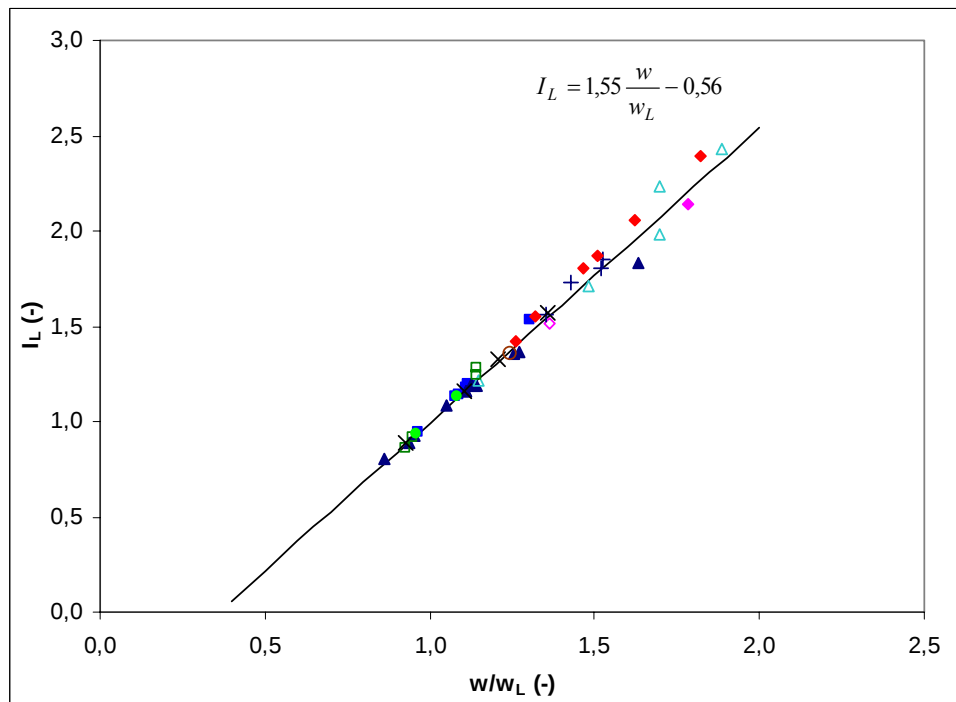
In Figuur 6.11 zijn de ongeroerde schuifsterktes geplot tegen de liquiditeitsindices. In deze figuur zijn de trendlijnen overeenkomstig met de lijnen in Figuur 6.10. De conclusie die hieruit volgt is dat het niet uitmaakt welke methode gebruikt wordt ter karakterisering van de actuele positie van het watergehalte ten opzichte van de consistentiegrenzen. Dit is ook niet verwonderlijk gezien de strakke relatie tussen I_L en w/w_L zoals reeds besproken in paragraaf 5.2.1, nogmaals gepresenteerd in Figuur 6.12:

$$I_L = 1,55 \frac{w}{w_L} - 0,56 \quad [-] \quad (6.1)$$

De relatie voldoet uitstekend voor de punten uit de dataverzameling, alleen de punten met een verhouding w/w_L groter dan 1,5 vertonen een geringe afwijking van de voorgestelde relatie tussen I_L en w/w_L . Maar deze punten liggen zowel onder als boven de voorgestelde correlatie en in de afwijkingen is geen trend zichtbaar. In het vervolg van dit onderzoek zal gebruik worden gemaakt van de verhouding w/w_L en niet van I_L . Een argument om niet te kiezen voor I_L is dat dit een parameter is die gebruik maakt van de plasticiteitsgrens en de bepaling van de plasticiteitsgrens is in veel grote mate afhankelijk van de kwaliteit van uitvoering dan de vloeigrens [Kruse 2003, persoonlijk commentaar].

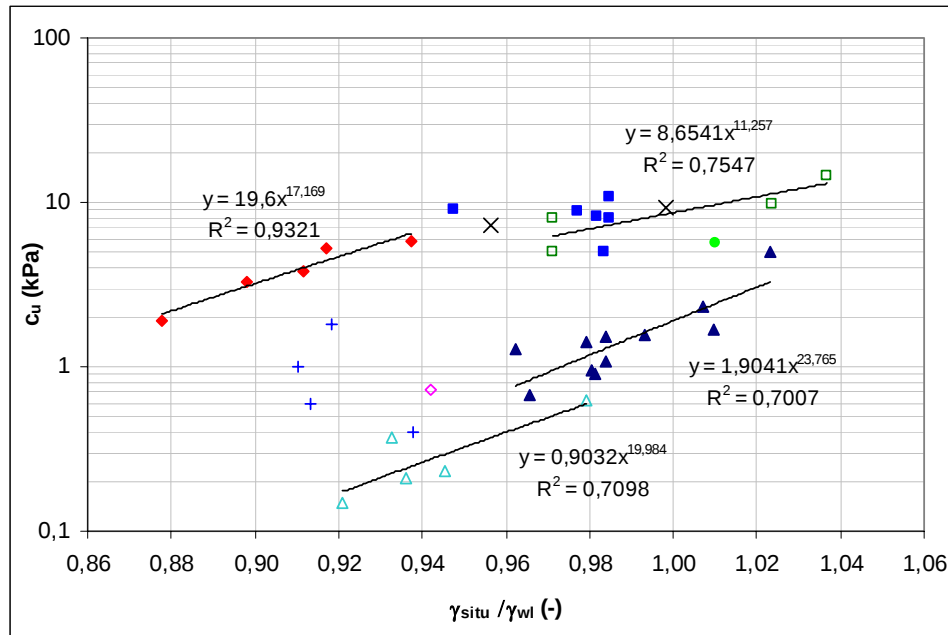


Figuur 6.11 Ongeroerde schuifsterkte versus liquiditeitsindex



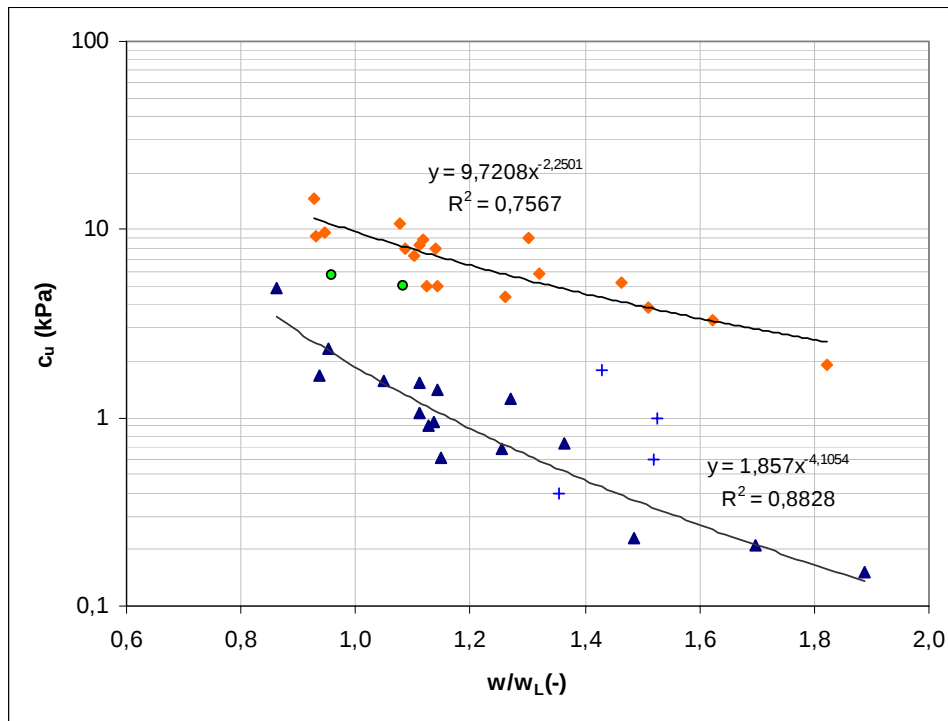
Figuur 6.12 Liquiditeitsindex versus w/w_L

In paragraaf 3.2.2 is de directe relatie tussen watergehalte en dichtheid weergegeven. Het is daarom ook niet verbaasd dat wanneer de ongeroerde schuifsterkte uitgezet wordt tegen de verhouding $\gamma_{site}/\gamma_{wt}$ i.p.v. de verhouding w/w_L dezelfde trends zichtbaar zijn, zie Figuur 6.13.



Figuur 6.13 Ongeroerde schuifsterkte versus $\gamma_{\text{situ}}/\gamma_{\text{wl}}$

De in Figuur 6.10 geplote trendlijnen hebben niet dezelfde helling, maar in het verloop van de trendlijnen is wel overeenkomst zichtbaar. Bovendien kunnen de locaties gegroepeerd worden wanneer onderscheid gemaakt wordt in locaties met een laag organisch gehalte (*groep1*) en een hoog organisch gehalte (*groep2*). In Figuur 6.14 is deze groepering gemaakt en zijn de vergelijkingen voor de trendlijnen voor de twee groepering weergegeven. Uit de waarde voor de determinatiecoëfficiënt, R^2 -waarde, blijkt een goede correlatie van de ongeroerde schuifsterkte met de verhouding w/w_L . De determinatiecoëfficiënt is gedefinieerd als de verhouding tussen de verklaarde variantie en de totale variantie.



Figuur 6.14 Groepering op basis van organisch gehalte



In Figuur 6.14 is er echter nog wel een duidelijk probleem zichtbaar. De waarden zijn niet opgenomen in groep2, terwijl deze punten wel degelijk een hoog organisch gehalte bezitten. Een mogelijke verklaring zou gevonden kunnen worden in de afwijkende korrelverdeling: een gering percentage kleiner dan $2\ \mu\text{m}$ en een relatief groot percentage groter dan $63\ \mu\text{m}$ (zie Bijlage II, tabel II.6). Uit deze paragraaf kan geconcludeerd worden dat de ongeroerde schuifsterkte benaderd kan worden op basis van de verhouding w/w_L , maar dat deze benadering geldig is onder bepaalde voorwaarden:

$$\text{groep 1: } c_u = 9,72 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-2,25} \quad [\text{kPa}] \quad (6.2)$$

voorwaarde groep1:

o het organisch gehalte is kleiner dan 4 %

$$\text{groep 2: } c_u = 1,86 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-4,11} \quad [\text{kPa}] \quad (6.3)$$

voorwaarde groep2:

o het organisch gehalte is groter dan 7%

6.3 Bepaling correlatie niveau II

Uit de conclusie van de voorgaande paragraaf blijkt de beperkte toepasbaarheid van de formulering van de schuifsterkte. Er dient gezocht te worden naar een verband voor de schuifsterkte dat algemeen toepasbaar is. Om dit probleem op te lossen worden de in paragraaf 6.1 gepresenteerde twee dimensionale plots nogmaals beschouwd. In deze figuren zijn trendlijnen aangegeven voor het verloop van de onafhankelijke parameters met de afhankelijke parameter schuifsterkte. Deze trendlijnen vormen de basis voor een nieuwe algemene vergelijking voor de schuifsterkte. Uit Figuur 6.14 volgt dat de verhouding w/w_L het best benaderd kan worden met een machtsfunctie. De gestippelde lijn in Figuur 6.4 geeft ook een machtsverband weer tussen de schuifsterkte en het organisch gehalte. Figuur 6.5 suggereert een lineaire benadering tussen schuifsterkte en de fijne fractie. Een combinatie van deze trends vormt de basis van een algemene afleiding voor de schuifsterkte:

$$c_u = A \left(\frac{w}{w_L} \right)^\beta N^\eta \theta^\lambda \quad (\text{afleiding I}) \quad (6.4)$$

met:

w	watergehalte	[%]
w_L	vloeigrens	[%]
N	organisch gehalte	[%]
θ	percentage $< 2\ \mu\text{m}$	[%]
A, β, η, λ	te bepalen coëfficiënten	[-]

In deze vergelijking zijn de waarden voor de schuifsterkte, de verhouding w/w_L , het organisch gehalte en de fijne fractie bekend en moeten de coëfficiënten A , β , η , en λ bepaald worden. Ondanks de constatering dat Figuur 6.5 een lineaire benadering tussen ongeroerde schuifsterkte en fijne fractie suggereert, wat betekent dat $\lambda = 1$, wordt deze waarde niet bij voorbaat toegekend, maar wordt gekeken of dit wel daadwerkelijk het geval is. Vergelijking 6.4 kan geschreven worden in de volgende vorm:

$$\ln(c_u) = \ln(A) + \beta \ln\left(\frac{w}{w_L}\right) + \eta \ln(N) + \lambda \ln(\theta) \quad (6.5)$$

Herformulering van deze vergelijking maakt het mogelijk de gezochte coëfficiënten te bepalen:

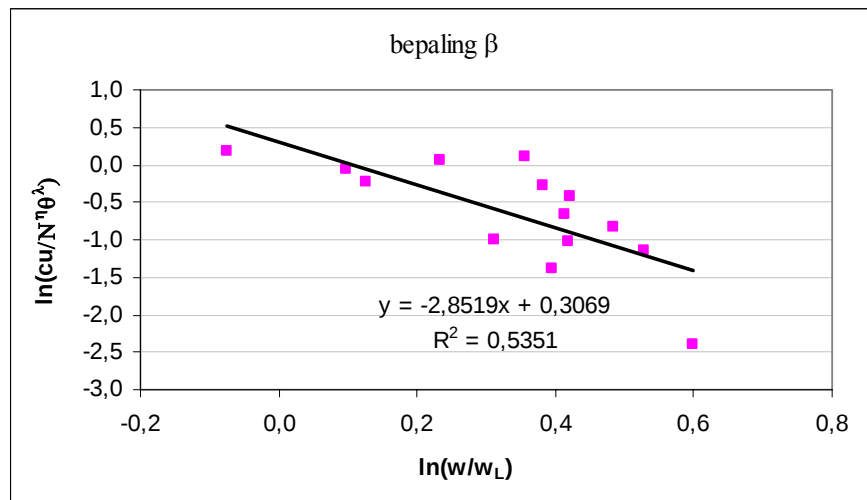


$$\ln\left(\frac{c_u}{N^\eta \theta^\lambda}\right) = \ln(A) + \beta \ln\left(\frac{w}{w_L}\right) \quad (\text{bepaling } \beta) \quad (6.6)$$

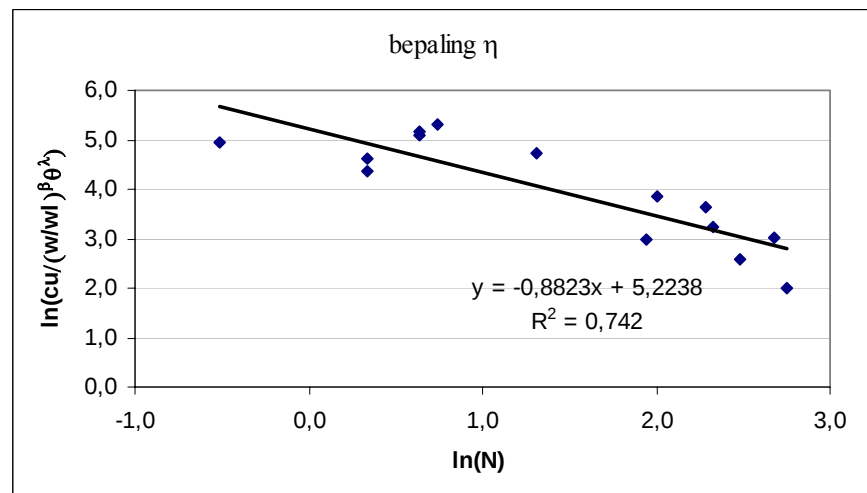
$$\ln\left(\frac{c_u}{N^\eta \left(\frac{w}{w_L}\right)^\beta}\right) = \ln(A) + \lambda \ln(\theta) \quad (\text{bepaling } \lambda) \quad (6.7)$$

$$\ln\left(\frac{c_u}{\theta^\lambda \left(\frac{w}{w_L}\right)^\beta}\right) = \ln(A) + \eta \ln(N) \quad (\text{bepaling } \eta) \quad (6.8)$$

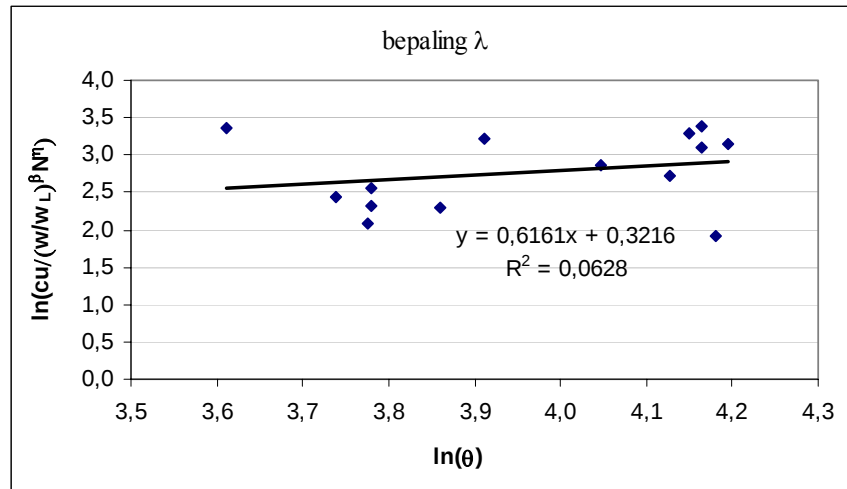
De bepaling van de coëfficiënten is een iteratief proces en wordt uitgevoerd in het programma Excel. De bovenstaande vergelijkingen worden daarbij uitgezet in figuren. Elke iteratieve stap bestaat uit aanpassing van één van de coëfficiënten, β , η , λ , en de aanpassing heeft verandering van de andere twee coëfficiënten tot gevolg. Dit proces herhaalt zich totdat voor alle drie de coëfficiënten een constante waarde verkregen is. Deze exercitie is uitgevoerd voor alle punten waarvan c_u , w/w_L , N en θ bekend zijn.



Figuur 6.15 Bepaling van β voor afleiding I

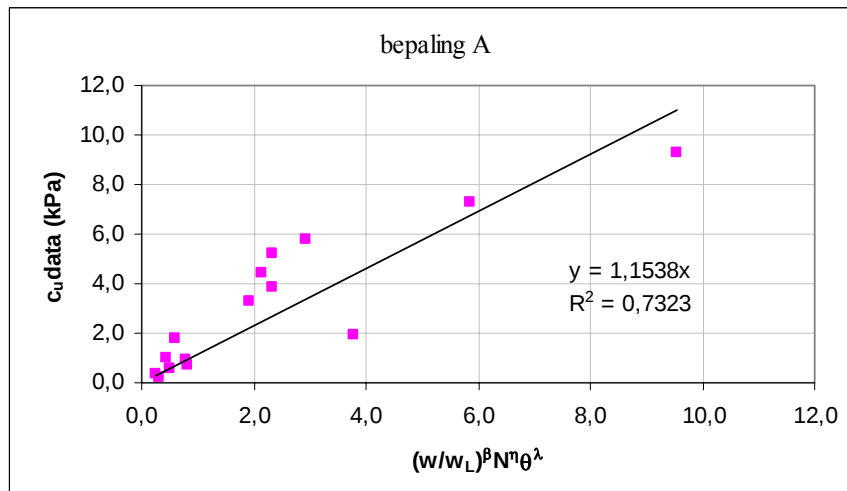


Figuur 6.16 Bepaling van η voor afleiding I



Figuur 6.17 Bepaling van λ voor afleiding I

De bekende waarden voor de coëfficiënten β , η en λ worden gebruikt ter bepaling van A . A is de helling van de trendlijn behorende bij een plot van de c_u en $(w/w_L)^\beta N^\eta \theta^\lambda$.



Figuur 6.18 Bepaling van A voor afleiding I

Resultaat:

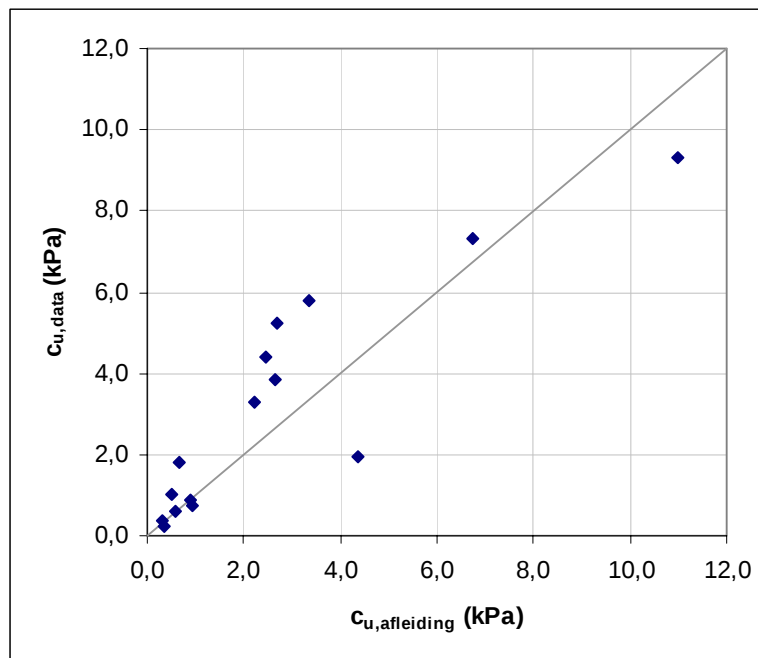
$$\begin{aligned} \beta &= -2,85 & R^2 &= 0,53 \\ \eta &= -0,88 & R^2 &= 0,74 \\ \lambda &= 0,62 & R^2 &= 0,06 \\ A &= 1,15 & R^2 &= 0,73 \end{aligned}$$

$$c_u = 1,15 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-2,85} N^{-0,88} \theta^{0,62} \quad (6.9)$$

In Tabel 6.1 en in Figuur 6.19 wordt de uitkomst voor de schuifsterkte verkregen met de bovenstaande afleiding vergeleken met werkelijke waarde voor de schuifsterkte.

Tabel 6.1 Uitkomst voor c_u voor afleiding I

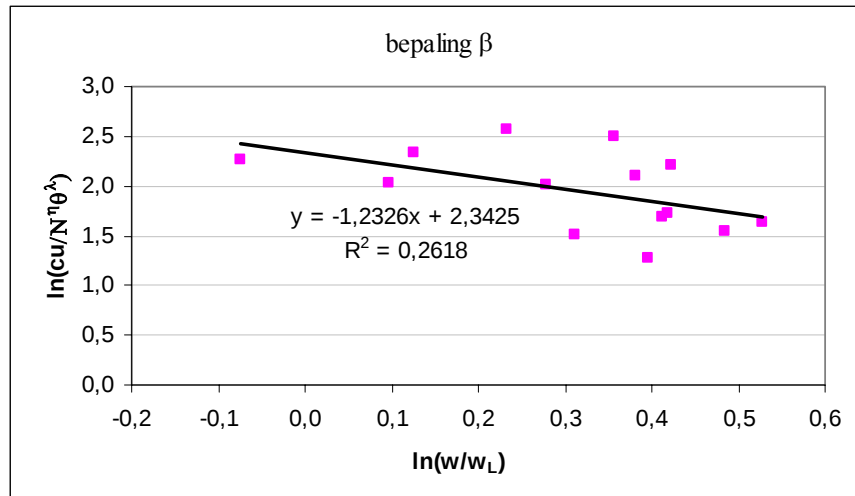
c_u		afwijking	
data	afleiding	absoluut	relatief (%)
0,73	0,94	0,21	28
0,90	0,91	0,01	1
0,37	0,30	0,07	19
0,23	0,35	0,12	50
4,40	2,45	1,95	44
1,93	4,35	2,43	126
3,30	2,21	1,09	33
3,85	2,67	1,19	31
5,23	2,67	2,56	49
5,78	3,36	2,42	42
9,30	10,99	1,69	18
7,30	6,74	0,56	8
1,80	0,67	1,13	63
1,00	0,52	0,48	48
0,60	0,58	0,02	3



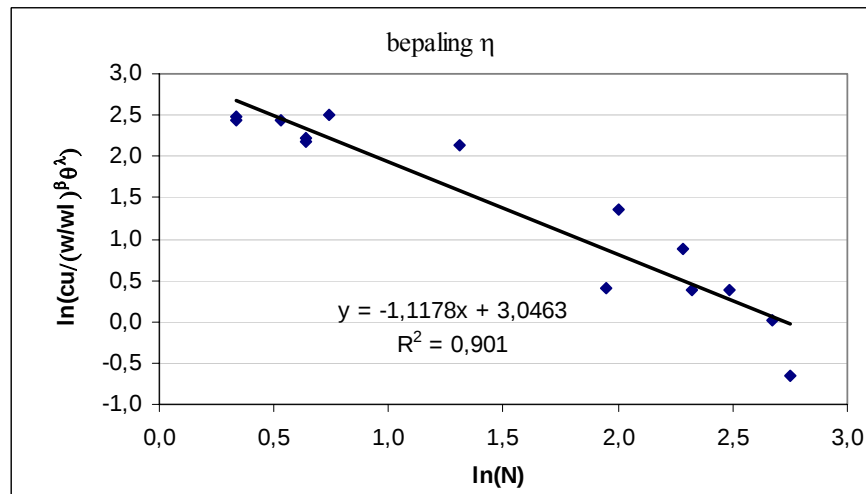
Figuur 6.19 Vergelijking werkelijke c_u met $c_{u,afleidingI}$

Voor de lage schuifsterktes geldt dat een relatief kleine absolute fout, toch een grote relatieve fout tot gevolg heeft. Opvallend in Figuur 6.19 is de het grote verschil tussen werkelijke c_u en $c_{u,afleiding}$ voor het punt met een c_u van 1,93 kPa. Uit nadere analyse blijkt dat dit punt het enige punt is met een organisch gehalte kleiner dan 1 % en dit betekent automatisch een negatieve waarde voor $\ln(N)$.

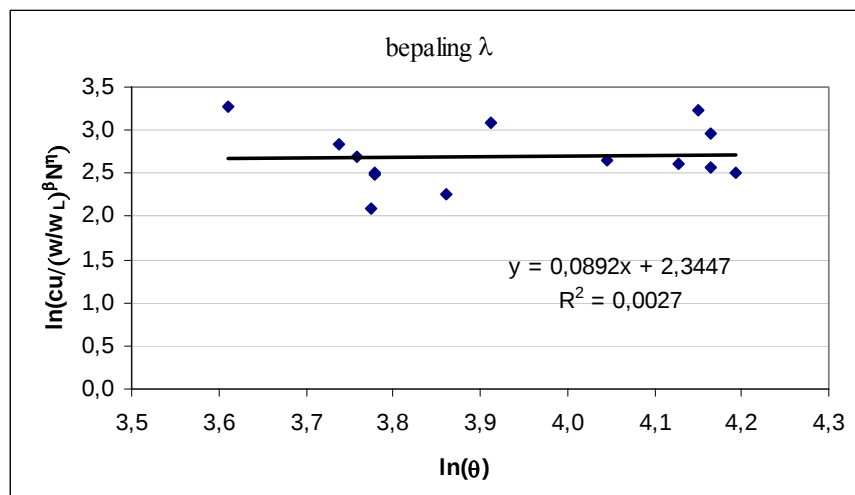
Om de invloed van dit punt op de totale afleiding te onderzoeken is de in de paragraaf beschreven berekeningsmethode nogmaals uitgevoerd, maar nu zonder het punt met een organisch gehalte kleiner dan 1 (=afleiding IB).



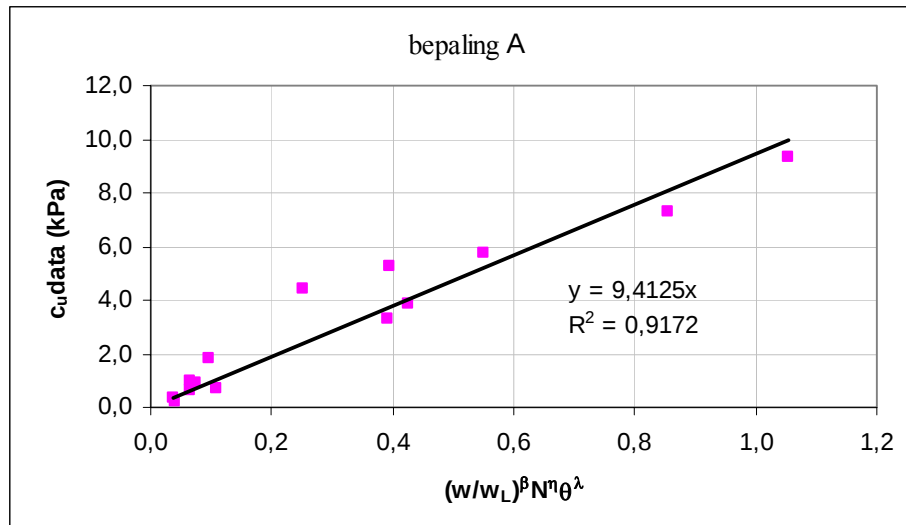
Figuur 6.20 Bepaling van β voor afleiding IB



Figuur 6.21 Bepaling van η voor afleiding IB



Figuur 6.22 Bepaling van λ voor afleiding IB



Figuur 6.23 Bepaling van A voor afleiding IB

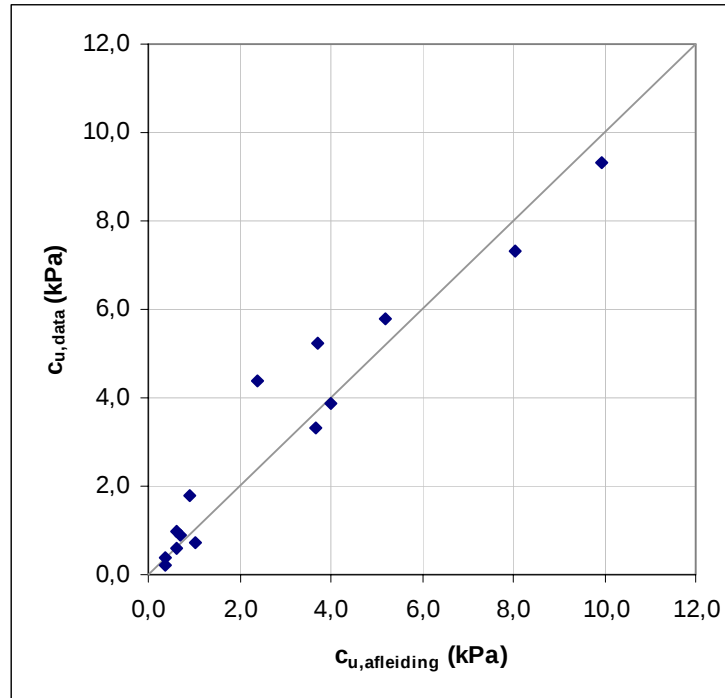
Resultaat:

$$\begin{aligned} \beta &= -1,23 & R^2 &= 0,26 \\ \eta &= -1,12 & R^2 &= 0,90 \\ \lambda &= 0,09 & R^2 &= 0,003 \\ A &= 9,41 & R^2 &= 0,92 \end{aligned}$$

$$c_u = 9,41 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-1,23} N^{-1,12} \theta^{0,09} \quad (6.10)$$

Tabel 6.2 Uitkomst voor c_u voor afleiding IB

c_u		afwijking	
data	afleiding	absoluut	relatief (%)
0,73	1,03	0,30	41
0,90	0,70	0,20	23
0,37	0,35	0,02	4
0,23	0,37	0,14	63
4,40	2,37	2,03	46
3,30	3,68	0,38	12
3,85	4,02	0,16	4
5,23	3,73	1,50	29
5,78	5,18	0,60	10
9,30	9,93	0,63	7
7,30	8,04	0,74	10
1,80	0,89	0,91	50
1,00	0,62	0,38	38
0,60	0,60	0,00	1



Figuur 6.24 Vergelijking van werkelijke c_u met $c_{u,afleidingIB}$

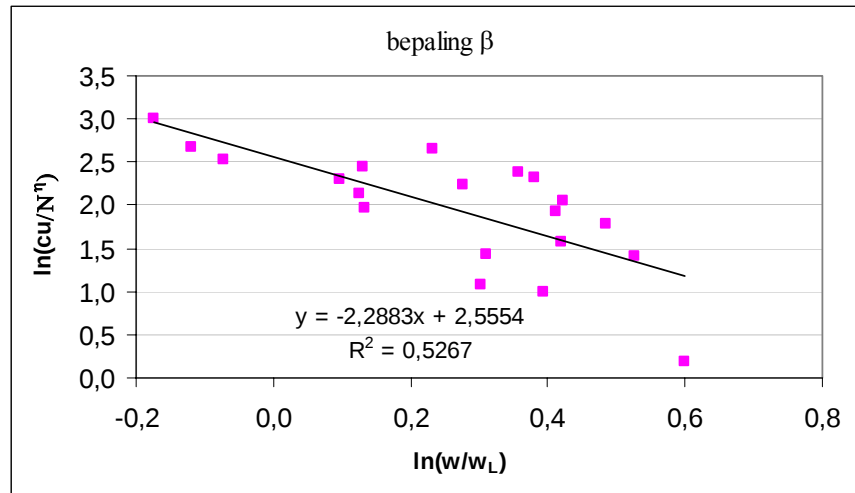
Sommatie van de absolute fouten in Tabel 6.1 geeft als uitkomst 12,34 en voor Tabel 6.2 de uitkomst 7,25. Uiteraard is bij de sommatie van de fouten in Tabel 6.1 de waarde die in Tabel 6.2 ontbreekt ook weggelaten. De conclusie is dat door weglating van één punt de nauwkeurigheid aanzienlijk toeneemt. Bovendien is in Figuur 6.24 waarneembaar dat de afwijking voor de punten met werkelijke waarden van c_u tussen 3-6 kPa enigszins verbeterd is ten opzichte van Figuur 6.19, maar dat $c_{u,afleiding}$ behorende bij c_u 3-6 kPa nog steeds een ruime afwijking vertoont met de werkelijke c_u .

Wanneer de algemene afleiding voor de schuifsterkte nader geanalyseerd wordt, is in Figuur 6.17 als in Figuur 6.22 te zien dat de determinatiecoëfficiënt, R^2 -waarde, behorende bij λ bijna nul is. De determinatiecoëfficiënt is gedefinieerd als de verhouding tussen de verklaarde variantie en de totale variantie. Wanneer deze 0,03 is houdt dit in dat slechts 0,03% van de variantie verklaard wordt door de lineaire relatie tussen $\ln(c_u/((w/w_L)^\beta N^\eta))$ en $\ln(\theta)$. Dit betekent er geen correlatie is tussen c_u en θ en dat er een aanpassing gemaakt moet worden voor de algemene afleiding van de schuifsterkte. Deze aanpassing houdt in dat θ niet wordt meegenomen in de afleiding voor de ongeroerde schuifsterkte:

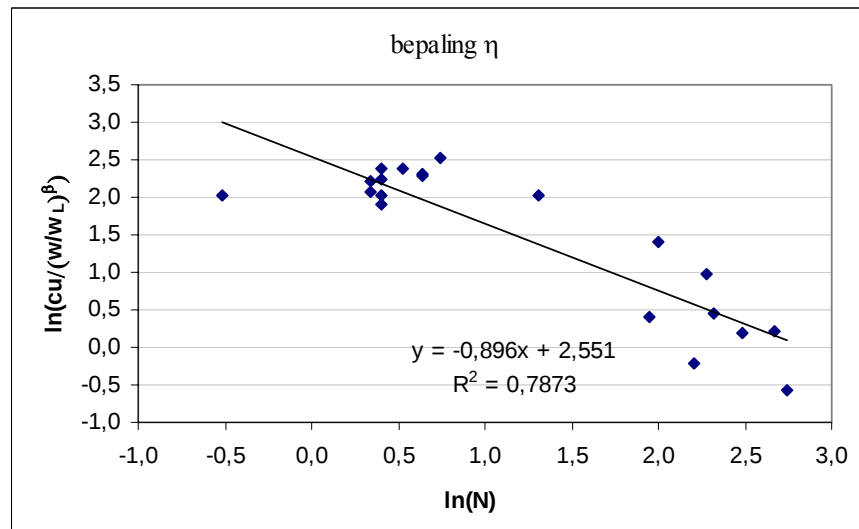
$$c_u = A \left(\frac{w}{w_L} \right)^\beta N^\eta \quad (\text{afleiding II}) \quad (6.11)$$

$$\ln \left(\frac{c_u}{N^\eta} \right) = \ln(A) + \beta \ln \left(\frac{w}{w_L} \right) \quad (6.12)$$

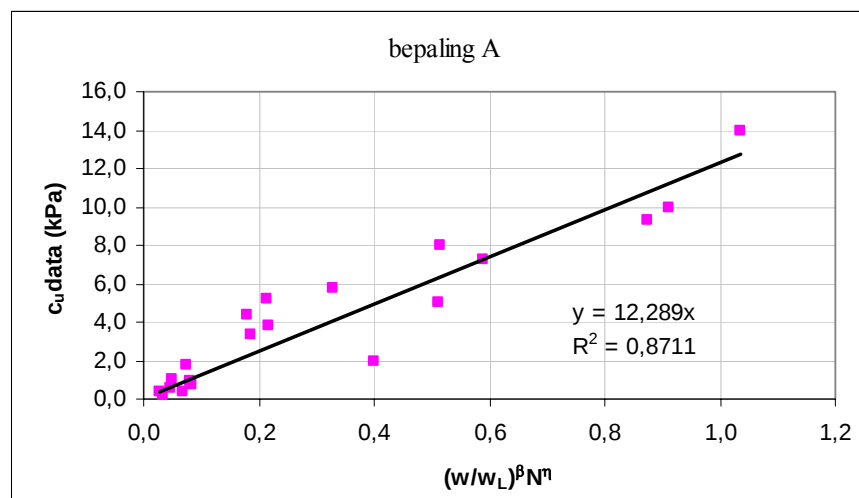
$$\ln \left(\frac{c_u}{\left(\frac{w}{w_L} \right)^\beta} \right) = \ln(A) + \eta \ln(N) \quad (6.13)$$



Figuur 6.25 Bepaling van β voor afleiding II



Figuur 6.26 Bepaling van η voor afleiding II



Figuur 6.27 Bepaling van A voor afleiding II

Resultaat:

$$\beta = -2,29 \quad R^2 = 0,53$$

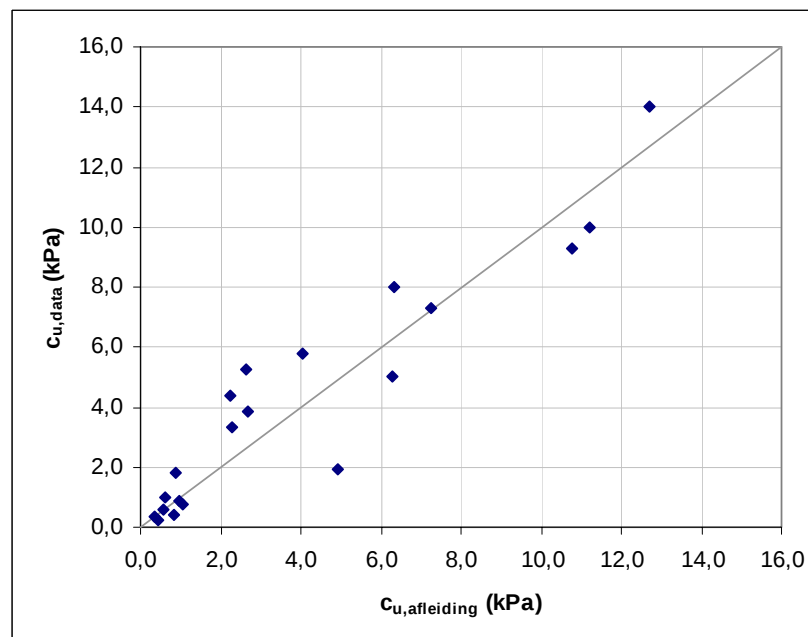
$$\eta = -0,90 \quad R^2 = 0,79$$

$$A = 12,29 \quad R^2 = 0,87$$

$$c_u = 12,29 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-2,29} N^{-0,90} \quad (6.14)$$

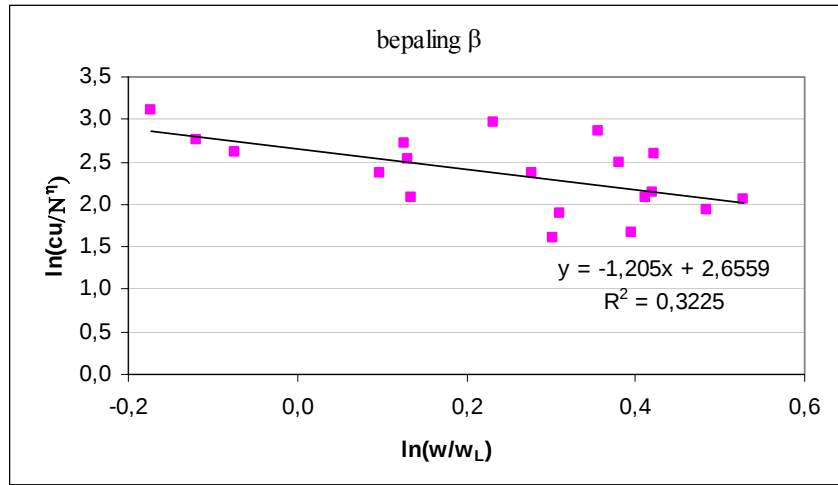
Tabel 6.3 Uitkomst voor c_u voor afleiding IIB

c_u		afwijking	
data	afleiding	absoluut	relatief (%)
0,73	1,05	0,32	43
0,90	0,98	0,08	9
0,37	0,33	0,04	11
0,23	0,42	0,19	82
4,40	2,22	2,18	50
1,93	4,93	3,00	156
3,30	2,27	1,03	31
3,85	2,68	1,17	30
5,23	2,63	2,60	50
5,78	4,04	1,74	30
5,00	6,28	1,28	26
8,00	6,32	1,68	21
10,00	11,20	1,20	12
14,00	12,71	1,29	9
9,30	10,75	1,45	16
7,30	7,26	0,04	1
1,80	0,90	0,90	50
1,00	0,60	0,40	40
0,60	0,58	0,02	3
0,40	0,84	0,44	110

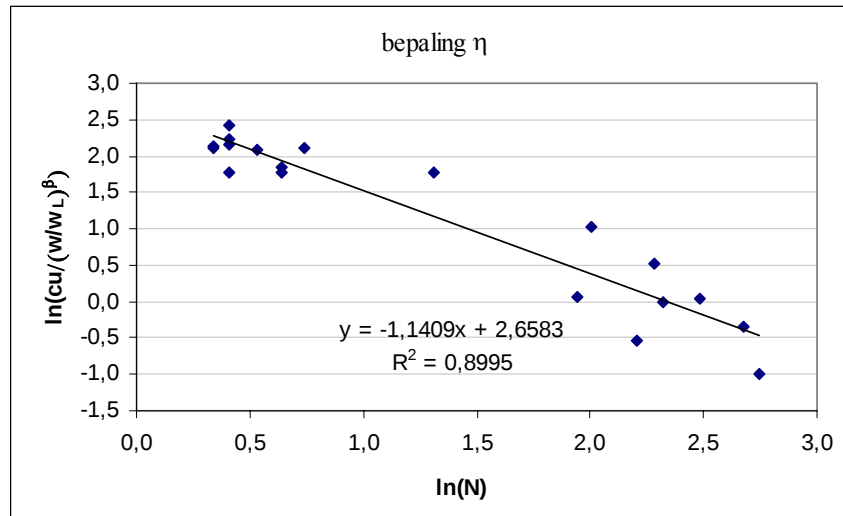


Figuur 6.28 Vergelijking van werkelijke c_u met $c_{u,afleidingII}$

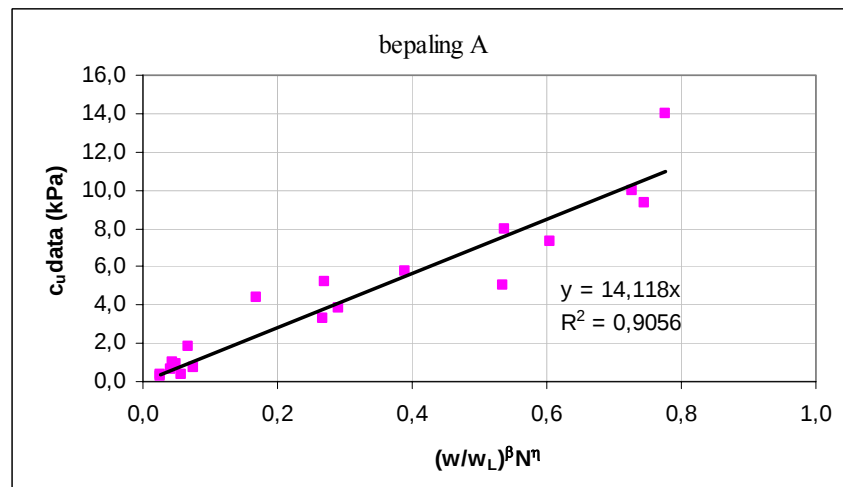
Ook voor afleiding II kan een B versie bepaald worden, waarbij net als bij afleiding IB het punt met $N=0,6\%$ wordt weggelaten.



Figuur 6.29 Bepaling van β voor afleiding IIB



Figuur 6.30 Bepaling van η voor afleiding IIB



Figuur 6.31 Bepaling van A voor afleiding IIB

Resultaat:

$$\beta = -1,21 \quad R^2 = 0,32$$

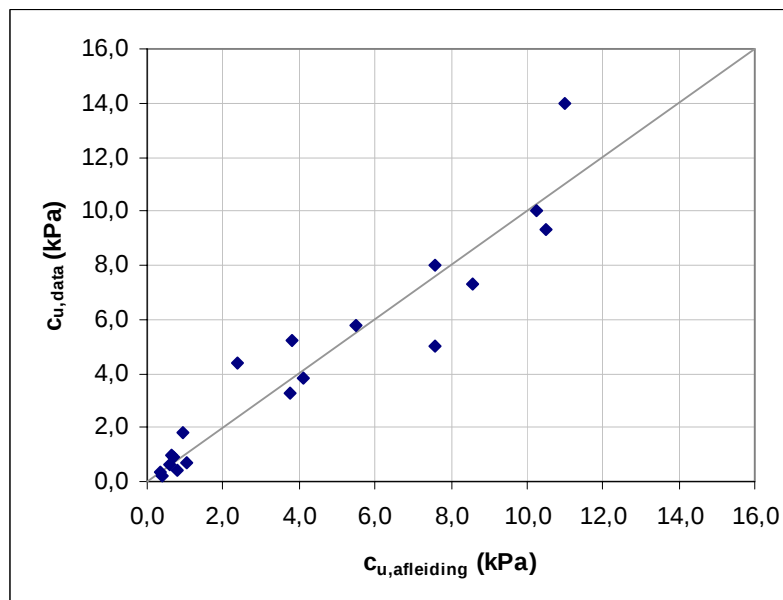
$$\eta = -1,14 \quad R^2 = 0,90$$

$$A = 14,12 \quad R^2 = 0,91$$

$$c_u = 14,12 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-1,21} N^{-1,14} \quad (6.15)$$

Tabel 6.4 Uitkomst voor c_u voor afleiding IIB

c_u		afwijking	
data	afleiding	absoluut	relatief (%)
0,73	1,05	0,32	44
0,90	0,71	0,19	21
0,37	0,35	0,02	4
0,23	0,38	0,15	66
4,40	2,40	2,01	46
3,30	3,78	0,47	14
3,85	4,12	0,27	7
5,23	3,82	1,41	27
5,78	5,51	0,27	5
5,00	7,56	2,56	51
8,00	7,59	0,41	5
10,00	10,27	0,27	3
14,00	10,98	3,02	22
9,30	10,52	1,22	13
7,30	8,55	1,25	17
1,80	0,94	0,86	48
1,00	0,63	0,37	37
0,60	0,60	0,00	0
0,40	0,79	0,39	97



Figuur 6.32 Vergelijking van werkelijke c_u met $c_{u, \text{afleiding IIB}}$

Tabel 6.5 Vergelijking uitkomst afleiding IB met IIB

afleiding IB				afleiding IIB			
cu		afwijking		cu		afwijking	
data	afleiding	absoluut	relatief (%)	data	afleiding	absoluut	relatief (%)
0,73	1,03	0,30	41	0,73	1,05	0,32	44
0,90	0,70	0,20	23	0,90	0,71	0,19	21
0,37	0,35	0,02	4	0,37	0,35	0,02	4
0,23	0,37	0,14	63	0,23	0,38	0,15	66
4,40	2,37	2,03	46	4,40	2,40	2,01	46
3,30	3,68	0,38	12	3,30	3,78	0,47	14
3,85	4,02	0,16	4	3,85	4,12	0,27	7
5,23	3,73	1,50	29	5,23	3,82	1,41	27
5,78	5,18	0,60	10	5,78	5,51	0,27	5
9,30	9,93	0,63	7	9,30	10,52	1,22	13
7,30	8,04	0,74	10	7,30	8,55	1,25	17
1,80	0,89	0,91	50	1,80	0,94	0,86	48
1,00	0,62	0,38	38	1,00	0,63	0,37	37
0,60	0,60	0,00	1	0,60	0,60	0,00	0
Σ		8,01		Σ		8,81	

In Tabel 6.5 wordt de vergelijking van de uitkomsten van afleiding IB en IIB gegeven. De gesommeerde absolute fout is voor afleiding IIB groter dan IB, terwijl de verwachting was dat door het uitsluiten van θ er een betere afleiding voor c_u verkregen zou worden.

Omdat afleiding II niet het gewenste resultaat oplevert, wordt er nog een afleiding voor de schuifsterkte bekeken, waarbij niet de verhouding w/w_L gebruikt wordt, maar de verhouding $\gamma_{situ}/\gamma_{wL}$.

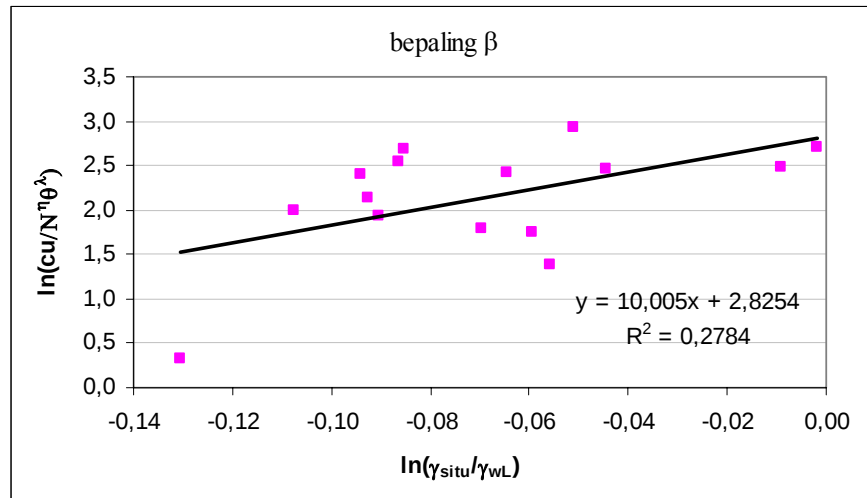
$$c_u = A \left(\frac{\gamma_{situ}}{\gamma_{wL}} \right)^\beta N^\eta \theta^\lambda \quad (\text{afleiding III}) \quad (6.16)$$

$$\ln(c_u) = \ln(A) + \beta \ln \left(\frac{\gamma_{situ}}{\gamma_{wL}} \right) + \eta \ln(N) + \lambda \ln(\theta) \quad (6.17)$$

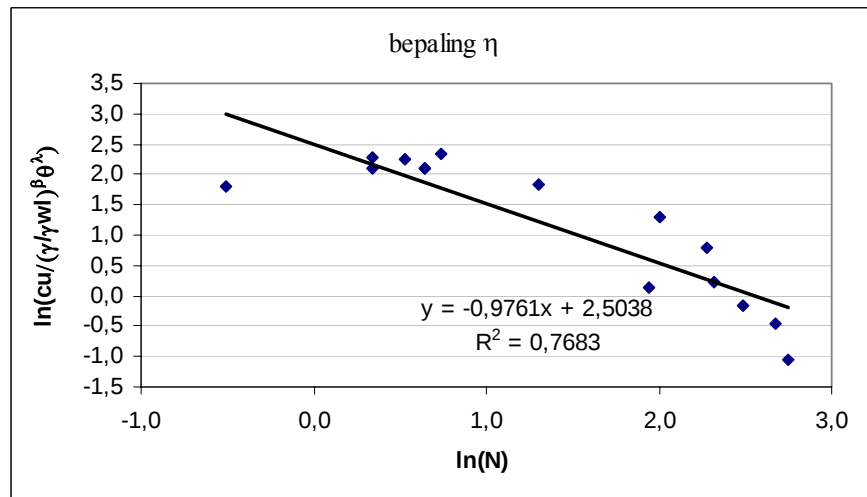
$$\ln \left(\frac{c_u}{N^\eta \theta^\lambda} \right) = \ln(A) + \beta \ln \left(\frac{\gamma_{situ}}{\gamma_{wL}} \right) \quad (6.18)$$

$$\ln \left(\frac{c_u}{N^\eta \left(\frac{\gamma_{situ}}{\gamma_{wL}} \right)^\beta} \right) = \ln(A) + \lambda \ln(\theta) \quad (6.19)$$

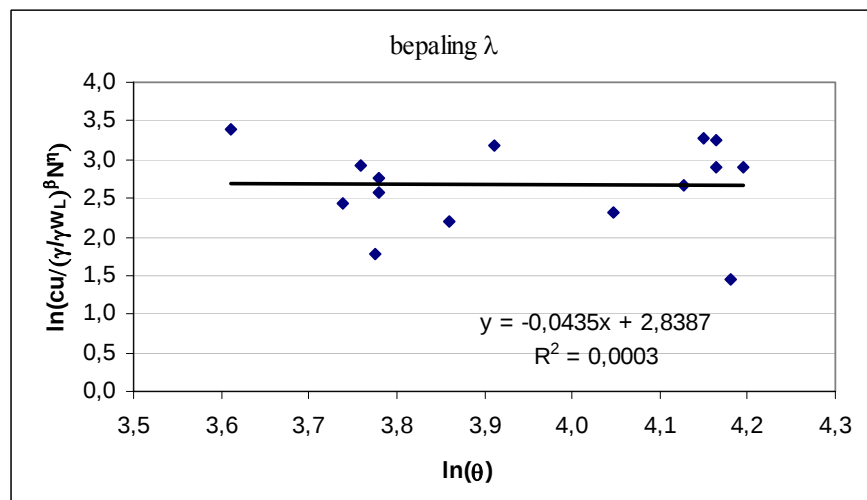
$$\ln \left(\frac{c_u}{\theta^\lambda \left(\frac{\gamma_{situ}}{\gamma_{wL}} \right)^\beta} \right) = \ln(A) + \eta \ln(N) \quad (6.20)$$



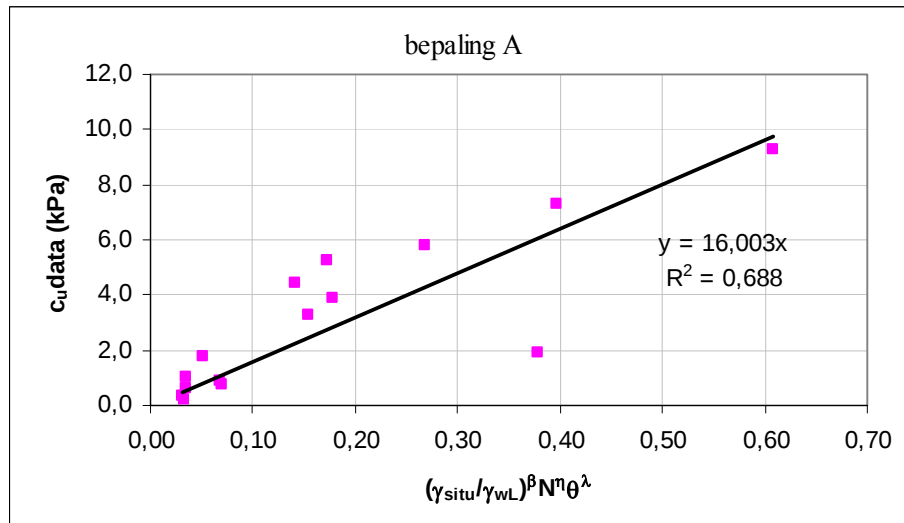
Figuur 6.33 Bepaling van β voor afleiding III



Figuur 6.34 Bepaling van η voor afleiding III



Figuur 6.35 Bepaling van λ voor afleiding III



Figuur 6.36 Bepaling van A voor afleiding III

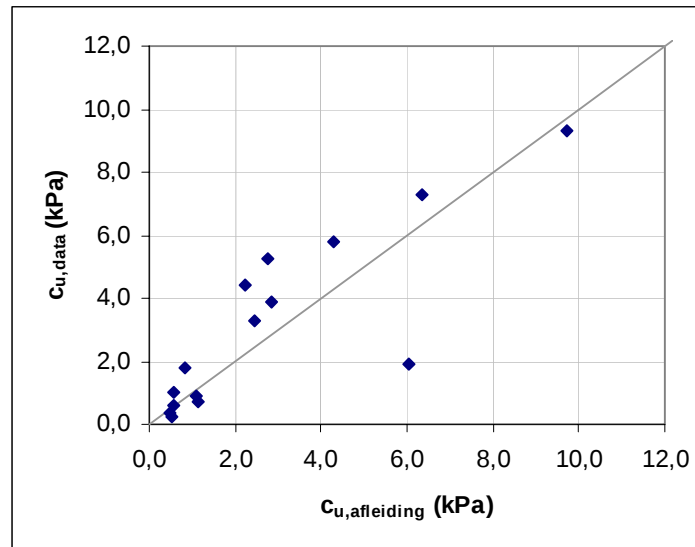
Resultaat:

$$\begin{aligned} \beta &= 10,00 & R^2 &= 0,28 \\ \eta &= -0,98 & R^2 &= 0,77 \\ \lambda &= -0,04 & R^2 &= 0,0003 \\ A &= 16,00 & R^2 &= 0,69 \end{aligned}$$

$$c_u = 16,0 \left(\frac{\gamma_{situ}}{\gamma_{wL}} \right)^{10,0} N^{-0,98} \theta^{-0,04} \quad (6.21)$$

Tabel 6.6 Uitkomst voor c_u voor afleiding III

c _u		afwijking	
data	afleiding	absoluut	relatief (%)
0,73	1,12	0,39	54
0,90	1,10	0,20	22
0,37	0,49	0,12	33
0,23	0,53	0,30	132
4,40	2,25	2,15	49
1,93	6,06	4,14	215
3,30	2,46	0,84	25
3,85	2,86	0,99	26
5,23	2,76	2,47	47
5,78	4,29	1,49	26
9,30	9,73	0,43	5
7,30	6,34	0,96	13
1,80	0,83	0,97	54
1,00	0,57	0,43	43
0,60	0,56	0,04	6



Figuur 6.37 Vergelijking van werkelijke c_u met $c_{u,afleiding III}$

Zoals te verwachten valt verschilt de uitkomst van *afleiding III* nauwelijks van de uitkomst van *afleiding I* en vertonen dezelfde punten een afwijking met de werkelijke c_u .

Uit deze paragraaf kan het volgende geconcludeerd worden:

- een afleiding voor de ongeroerde schuifsterkte is mogelijk met als basis de verhouding w/w_L , zie Figuur 6.14. Toepassing van de relatie geschiedt echter wel onder 2 voorwaarden. Ten eerste vindt er scheiding plaats op basis van het organisch gehalte, waarbij de bovengrens voor de groep met een laag organisch gehalte ligt op 4 % en de ondergrens voor de organisch hoge groep op 7%. Ten tweede is de relatie voor de organisch hoge groep niet geldig voor een locatie waarbij het percentage $< 2 \mu m$ kleiner dan 37 % is en/of het percentage $> 63 \mu m$ groter dan 37%.
- de laatstgenoemde beperking is slechts gebaseerd op 1 datapunt. Uitbreiding van de data is noodzakelijk, zodat een scherpere definitie van de voorwaarden gegeven kan worden in welke gevallen de relatie voor de schuifsterkte toegepast moet worden.
- de relatie voor de ongeroerde schuifsterkte gebaseerd op w/w_L , N en θ is ontwikkeld op basis van een achttal locaties. De afgeleide c_u benadert het best de werkelijke c_u als er geen waarden worden meegenomen met een organisch gehalte kleiner dan 1, zie Figuur 6.32.
- de correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte zullen getoetst moeten worden met gegevens van andere locaties.

6.4 Verificatie correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte

In deze paragraaf wordt met behulp van het tweede deel van de slibverzameling, Bijlage II Tabel II.11-Tabel II.20, de correlaties opgesteld voor de ongeroerde schuifsterkte getoetst.

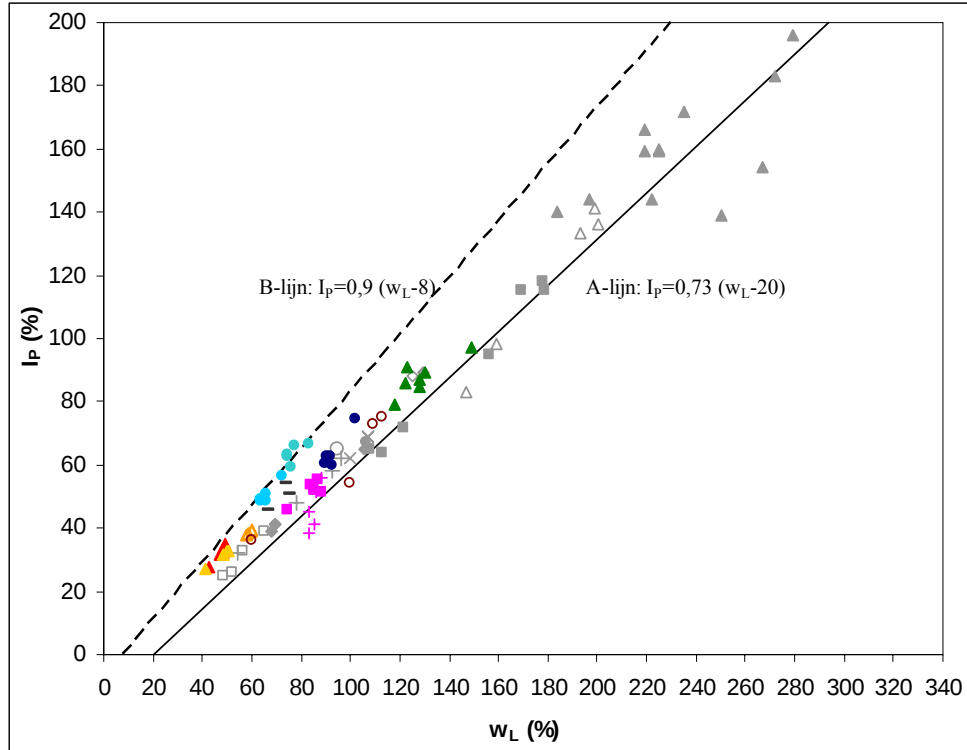
6.4.1 Data karakterisering

In Figuur 6.38 worden de locaties weergegeven waarvan de karakteristieke grondparameters gebruikt worden ter verificatie van de formulering voor de schuifsterkte uit de voorgaande paragraaf. Deze parameters worden weergegeven in Bijlage II, tabel II.11-tabel II.20. Een gedetailleerder overzicht van de locaties wordt gegeven in Bijlage II.

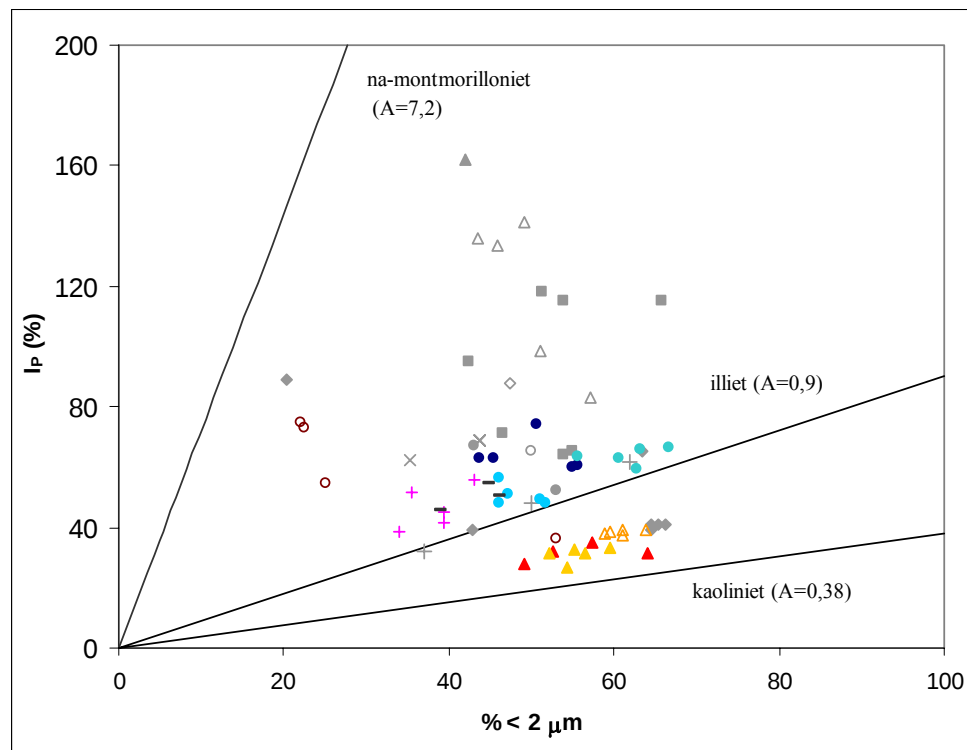
Figuur 6.38 Overzicht locaties gebruikt ter verificatie

Tabel 6.7 Legenda behorende bij Figuur 6.38

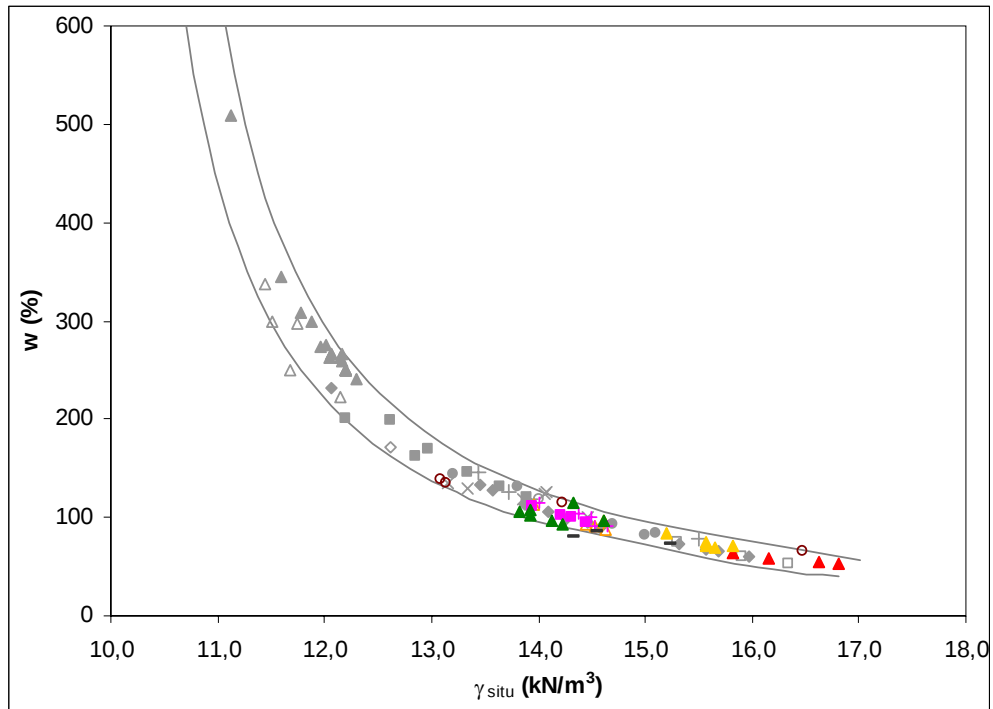
In de volgende figuren worden de belangrijkste parameters van de data weergegeven. Om vergelijking met de waarden die gebruikt zijn in de voorgaande paragrafen mogelijk te maken zijn ook deze in de figuren weergegeven. De datapunten zijn in de legenda's zo gerangschikt dat eerst de oorspronkelijke waarden gegeven worden (in grijsschaal) en daarna de waarden behorende bij de locaties die gebruikt worden ter verificatie (in kleur).



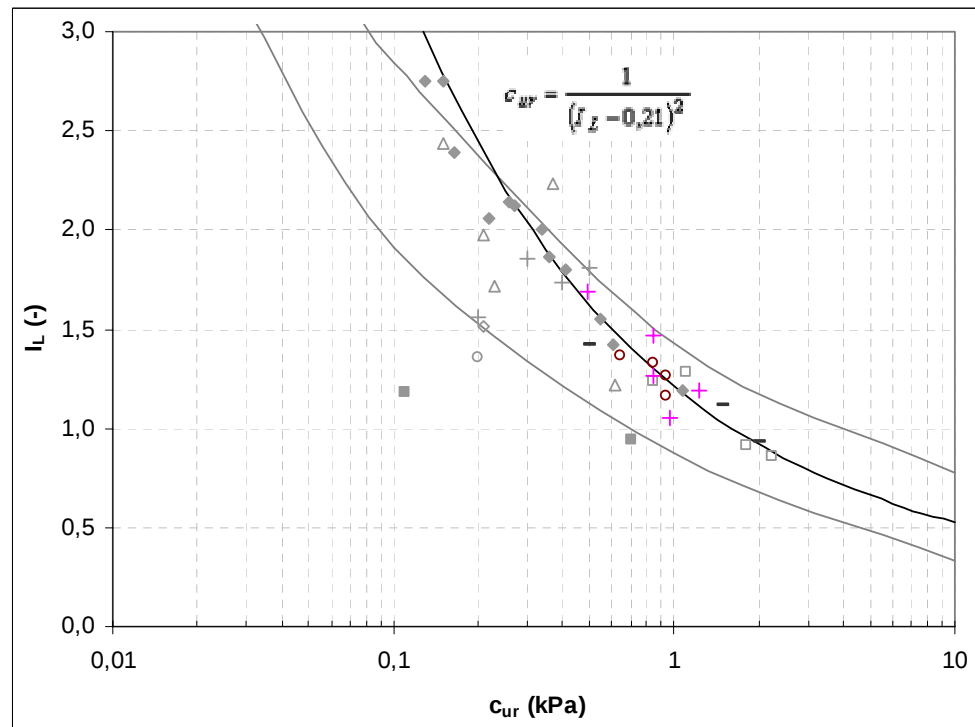
Figuur 6.39 Plasticiteitsgrafiek



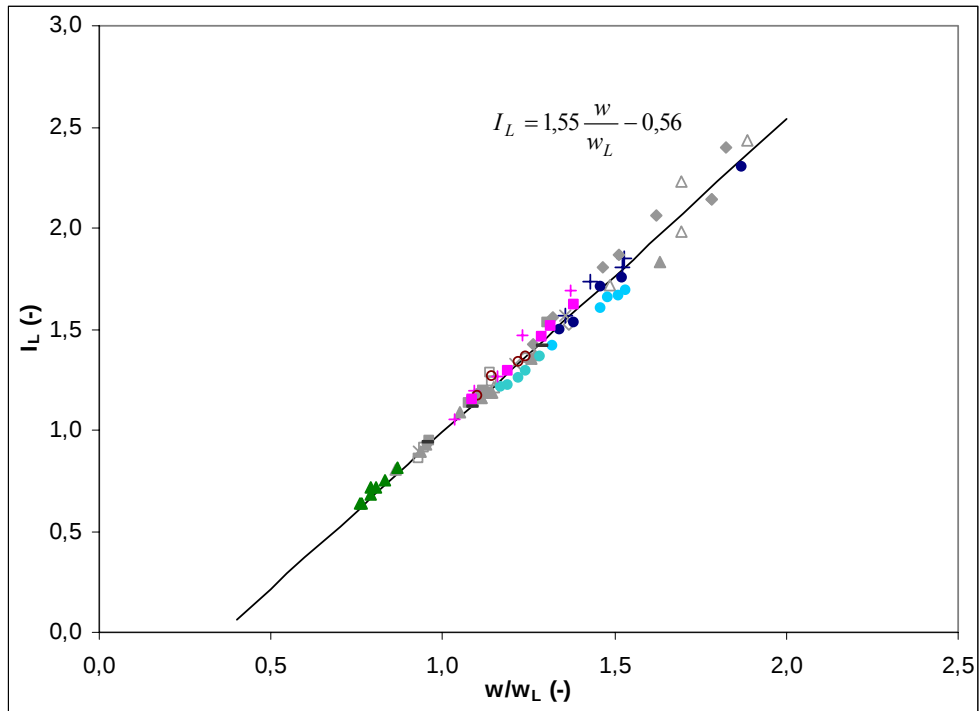
Figuur 6.40 Activiteitsgrafiek



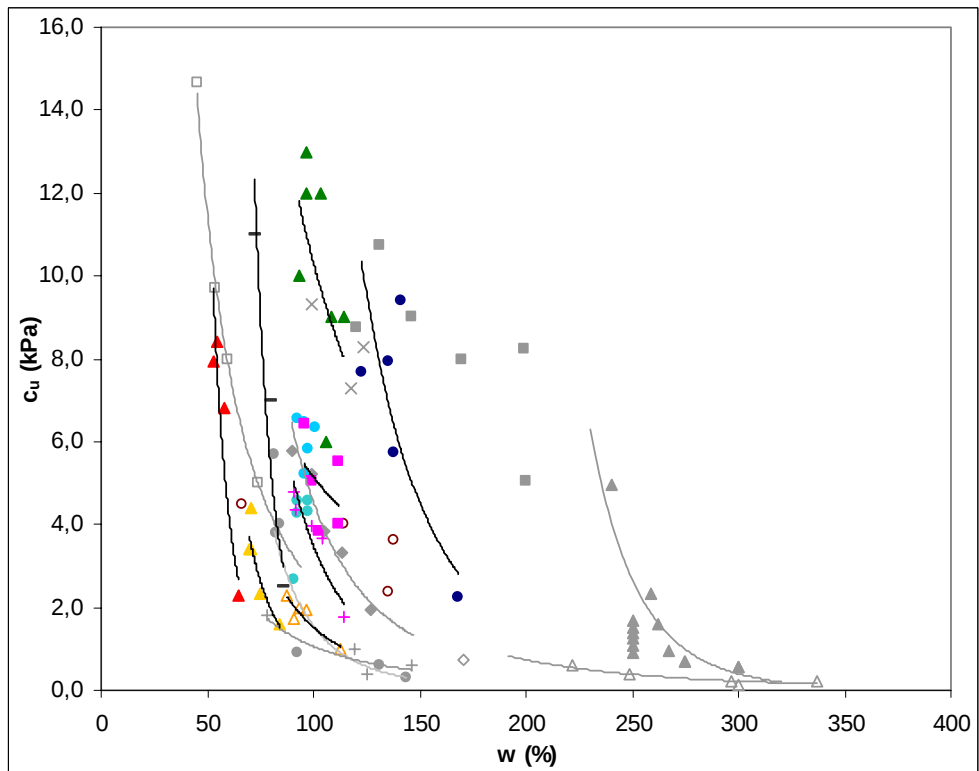
Figuur 6.41 Watergehalte versus volumieke massa



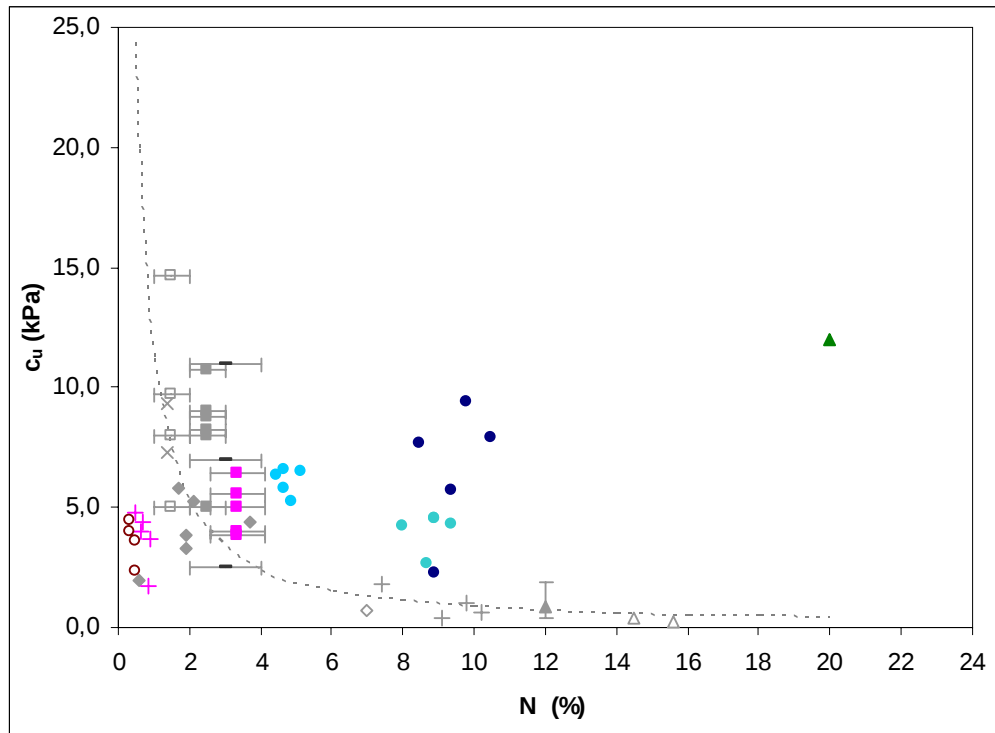
Figuur 6.42 Geroerde schuifsterkte versus liquiditeitsindex



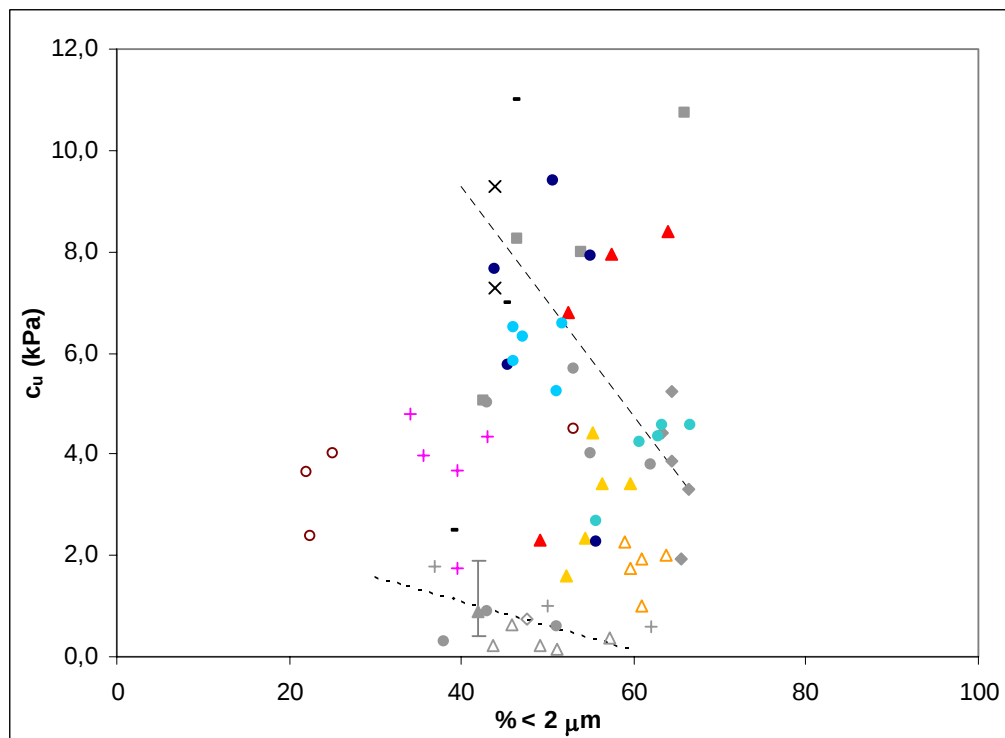
Figuur 6.43 Relatie tussen liquiditeitsindex en verhouding w/w_L



Figuur 6.44 Schuifsterkte versus watergehalte



Figuur 6.45 Schuifsterkte versus organisch gehalte



Figuur 6.46 Schuifsterkte versus $\% < 2 \mu m$

6.4.2 Toetsing van correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte

De geldigheid van de correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte, vgl. 6.9, 6.10, 6.14 en 6.15, wordt getoetst door de extra data in te vullen in deze vergelijkingen. Het resultaat

hiervan wordt gepresenteerd in Tabel 6.8 en Tabel 6.9, waarbij Δ het absolute verschil is tussen de werkelijke c_u en c_u uit de desbetreffende afleiding.

Tabel 6.8 Toetsing afleiding voor de ongeroerde schuifsterkte

Land	w/w_L	$< 2 \mu m$	N	c_u	c_u	Δ	c_u	Δ	c_u	Δ	c_u	Δ
	(-)	(%)	(%)	(kPa)	6.9	(kPa)	6.10	(kPa)	6.14	(kPa)	6.15	(kPa)
XXX												
				2,3	1,5	0,8	2,3	0,0	1,8	0,5	2,4	0,1
				6,8	3,0	3,8	3,1	3,7	3,0	3,8	3,2	3,6
				7,9	4,5	3,5	3,6	4,3	3,9	4,0	3,7	4,2
				8,4	3,8	4,6	3,3	5,1	3,3	5,1	3,4	5,0
				1,0	0,8	0,2	1,6	0,6	0,8	0,2	1,6	0,6
				1,9	1,1	0,8	1,9	0,1	1,1	0,8	1,9	0,0
				1,7	1,4	0,3	2,1	0,4	1,4	0,3	2,2	0,4
				2,3	1,5	0,8	2,2	0,1	1,5	0,8	2,2	0,1
				2,0	1,4	0,6	2,1	0,1	1,4	0,6	2,1	0,1
				1,6	0,8	0,8	1,4	0,2	1,0	0,6	1,5	0,1
				2,3	1,4	1,0	3,0	0,7	1,7	0,6	3,1	0,8
				3,4	2,6	0,8	3,9	0,5	2,8	0,6	4,1	0,7
				3,4	3,1	0,3	4,2	0,8	3,1	0,3	4,3	0,9
				4,4	2,8	1,6	4,1	0,4	3,0	1,4	4,2	0,2
XXX												
				2,3	0,3	1,9	0,5	1,7	0,4	1,8	0,5	1,7
				5,8	0,5	5,2	0,6	5,1	0,6	5,1	0,7	5,1
				7,7	0,8	6,9	0,8	6,8	0,9	6,7	0,9	6,8
				7,9	0,6	7,3	0,6	7,3	0,6	7,3	0,6	7,3
				9,4	0,7	8,7	0,7	8,7	0,8	8,7	0,7	8,7
				2,7	1,2	1,5	0,9	1,7	1,1	1,6	0,9	1,7
				4,3	1,3	3,0	1,0	3,2	1,1	3,1	1,0	3,2
				4,3	1,0	3,3	0,8	3,5	0,9	3,4	0,8	3,5
				4,6	1,5	3,1	1,0	3,6	1,2	3,4	1,0	3,6
				4,6	1,3	3,2	1,0	3,6	1,2	3,4	0,9	3,6
				5,2	1,0	4,2	1,4	3,9	1,1	4,1	1,4	3,8
				6,3	1,0	5,3	1,5	4,8	1,2	5,1	1,5	4,8
				5,8	1,0	4,8	1,5	4,4	1,2	4,6	1,5	4,3
				6,6	1,2	5,4	1,5	5,1	1,3	5,3	1,5	5,0
				6,5	1,3	5,2	1,5	5,0	1,5	5,0	1,6	4,9
XXX												
				1,8	2,5	0,7	4,1	2,3	3,2	1,4	4,4	2,6
				3,7	3,4	0,3	4,7	1,0	4,1	0,4	5,0	1,3
				4,4	5,9	1,5	5,8	1,5	6,1	1,7	6,2	1,8
				4,8	4,3	0,5	5,3	0,5	5,4	0,6	5,8	1,0
				4,0	3,8	0,2	5,0	1,0	4,7	0,7	5,4	1,4
				2,4	7,8	5,5	20,7	18,3	13,9	11,6	23,9	21,5
				3,6	8,9	5,3	23,8	20,1	16,0	12,3	27,6	23,9
				4,0	16,6	12,6	41,0	37,0	26,6	22,6	47,3	43,3
				4,5	29,6	25,1	46,1	41,6	29,2	24,7	49,6	45,1

Tabel 6.9 Toetsing afleiding voor de ongeroerde schuifsterkte

Land				c_u	c_u	Δ	c_u	Δ	c_u	Δ	c_u	Δ
				(kPa)	6.9	(kPa)	6.10	(kPa)	6.14	(kPa)	6.15	(kPa)
XXX												
				2,5	2,1	0,4	2,8	0,3	3,0	0,5	2,8	0,3
				7,0	3,7	3,3	3,5	3,5	3,7	3,3	3,7	3,3
				11,0	5,3	5,7	4,1	6,9	4,3	6,7	4,4	6,6
XXX												
				3,8	-	-	-	-	2,0	1,9	2,4	1,4
				4,0	-	-	-	-	2,2	1,8	2,6	1,5
				5,0	-	-	-	-	2,8	2,2	2,9	2,1
				5,5	-	-	-	-	2,3	3,2	2,6	2,9
				6,4	-	-	-	-	3,4	3,0	3,2	3,2
XXX												
				9,0	-	-	-	-	-	-	-	-
				6,0	-	-	-	-	-	-	-	-
				12,0	-	-	-	-	1,4	10,6	0,6	11,4
				9,0	-	-	-	-	-	-	-	-
				12,0	-	-	-	-	-	-	-	-
				10,0	-	-	-	-	-	-	-	-
				13,0	-	-	-	-	-	-	-	-

Beschouwing van de absolute verschillen leert dat geen enkele vergelijking voor alle locaties voldoet. Voor de locaties,en is het verschil tussen c_u en $c_{u,afleiding}$ aanvaardbaar klein en voldoen de vergelijkingen. Er zijn meerdere verklaringen te geven waarom de vergelijkingen voor de overige locaties niet of in mindere mate voldoen:

- Ten eerste is er bij de afleiding van de formules voor de ongeroerde schuifsterkte een machtsverband verondersteld tussen de schuifsterkte en organisch gehalte, zie Figuur 6.4. Uit Figuur 6.45 blijkt echter dat deze aanname niet correct is en dat dit verband niet bestaat. Dit is mede een verklaring waarom de locaties en grote verschillen laten zien tussen c_u en $c_{u,afleiding}$.
- In paragraaf 6.3 wordt geconcludeerd dat de beste nauwkeurigheid verkregen wordt wanneer punten met een organisch gehalte kleiner dan 1 niet worden meegenomen bij de afleiding van c_u . Bij de afleiding van de formules voor de schuifsterkte is er slechts één punt gebruikt met een organisch gehalte kleiner dan 1. Uit Tabel 6.9 blijkt dat voor de locatie N2 met zeer lage waarden voor het organisch gehalte het verschil tussen c_u en $c_{u,afleiding}$ zeer groot is.
- Ten derde bevestigt Figuur 6.46 nogmaals dat het incorrect is een relatie te veronderstellen tussen c_u en de fractie kleiner dan $2 \mu\text{m}$.

De algemene conclusie is dat geen enkele van de in paragraaf 6.3 opgestelde relaties een goede benadering is voor de ongeroerde schuifsterkte. Dit is het gevolg van veronderstelde verbanden tussen schuifsterkte en organisch gehalte en tussen schuifsterkte en fractie kleiner dan $2 \mu\text{m}$ welke niet blijken te kloppen wanneer nieuwe data beschouwd worden.

6.5 Bepaling correlatie niveau IB

Omdat de vergelijking van correlatie niveau II niet voldoen wordt teruggegaan naar de figuur die de basis heeft gevormd voor het vinden van een verband voor c_u : Figuur 6.10, waarin de ongeroerde schuifsterkte uitgezet is tegen de verhouding w/w_L . In Figuur 6.47 zijn ook de nieuwe datapunten weergegeven.

De groepering zoals deze gemaakt is in Figuur 6.14 is in Figuur 6.48 opnieuw weergegeven met de nieuwe datapunten weergegeven. In deze figuur is het volgende af te lezen:

- de datapunten van, en welke allen een laag organisch gehalte bezitten, sluiten goed aan bij de trendlijn van groep1.



- als de trendlijn van groep2 geëxtrapoleerd wordt naar lagere waarden van w/w_L blijkt dat de datapunten van, die een hoog organisch gehalte hebben, aansluiten bij groep2.
- tussen de twee groepen in Figuur 6.48 vormt zich een nieuwe groepering. Deze groepering (groep3) wordt gekenmerkt door datapunten waarbij het percentage $< 2 \mu\text{m}$ kleiner dan 40 % is.
- de datapunten van zijn gepositioneerd rond de trendlijn voor groep1. Het opvallende hieraan is dat de datapunten van en een organisch gehalte hebben variërend van 8 tot 10 %, maar qua ligging duidelijk afwijken van groep2. Deze groep wordt gekarakteriseerd als groep met een hoog organisch gehalte.
- Qua ligging van de punten van wordt verwacht dat deze behoren tot groep3, maar uit de korrelverdeling blijkt dat dit niet het geval is. Verder is het organische gehalte van deze punten niet bekend en het gevolg hiervan is dat er ook geen uitspraak gedaan kan worden of tot groep1 of groep2 zou moeten behoren.

In Figuur 6.49 wordt de driedeling van groepen getoond. Deze figuur maakt het mogelijk om op basis van de verhouding w/w_L onder bepaalde voorwaarden een benadering te maken voor de ongeroerde schuifsterkte:

$$\text{groep1: } c_u = 10,24 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,00} [kPa] \quad R^2 = 0,84 \quad (6.22)$$

voorwaarden groep1:

- o het organisch gehalte is kleiner dan 4 %
- o het percentage kleiner dan $2 \mu\text{m}$ is groter dan 40 %

$$\text{groep2: } c_u = 2,58 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-4,65} [kPa] \quad R^2 = 0,89 \quad (6.23)$$

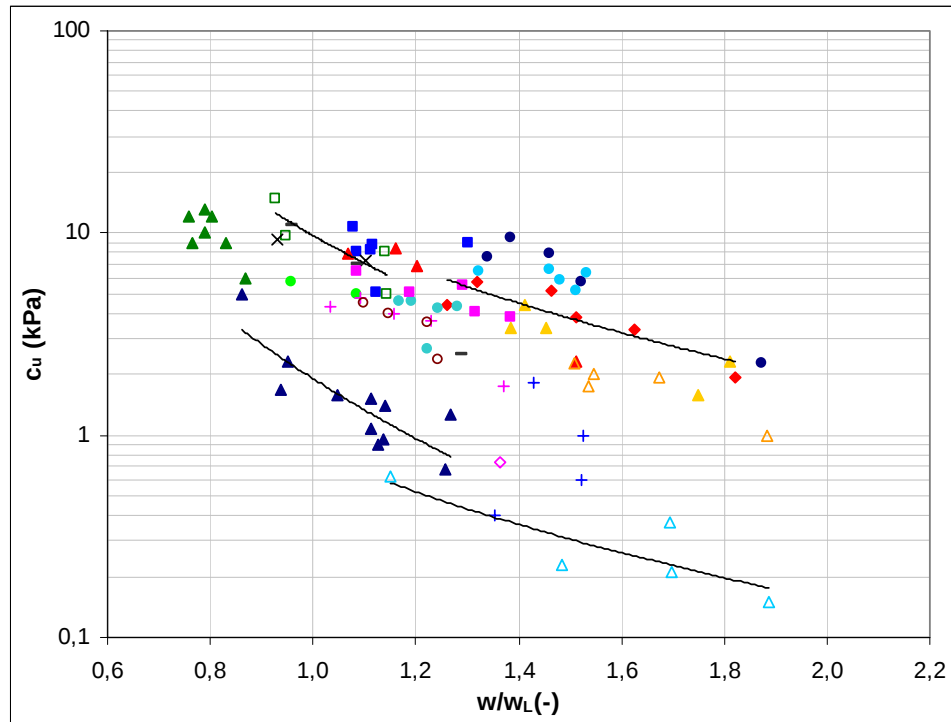
voorwaarde groep2:

- o het organisch gehalte is groter dan 7 %

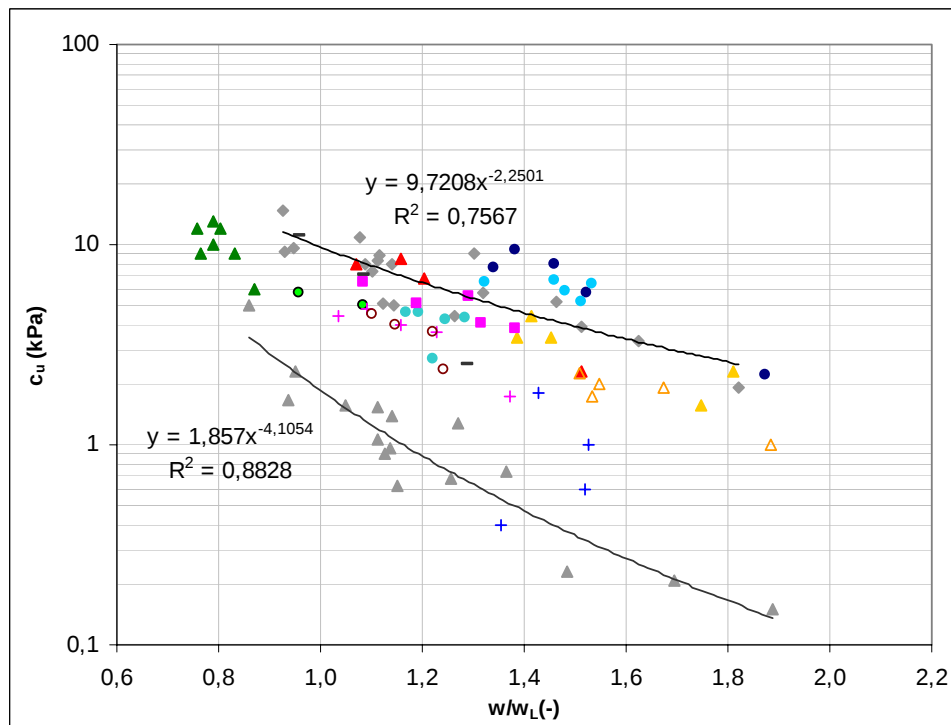
$$\text{groep3: } c_u = 6,10 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,45} [kPa] \quad R^2 = 0,86 \quad (6.24)$$

voorwaarden groep3:

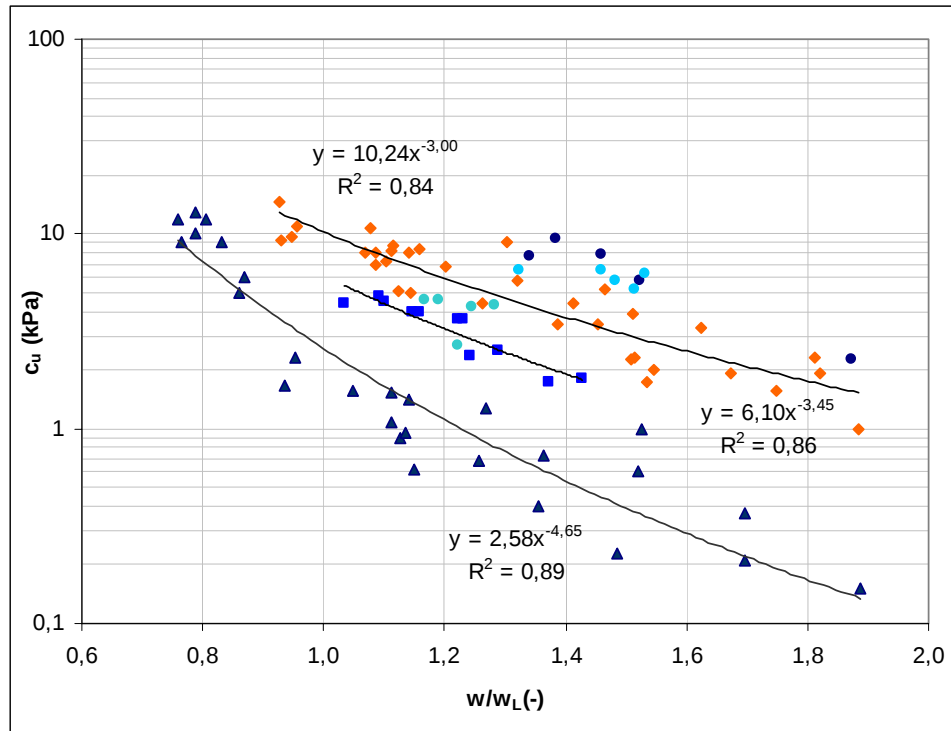
- o het organisch gehalte is kleiner dan 4%
- o het percentage kleiner dan $2 \mu\text{m}$ is kleiner dan 40 %



Figuur 6.47 Ongeroerde schuifsterkte versus verhouding w/w_L



Figuur 6.48 Groepering op basis van organisch gehalte

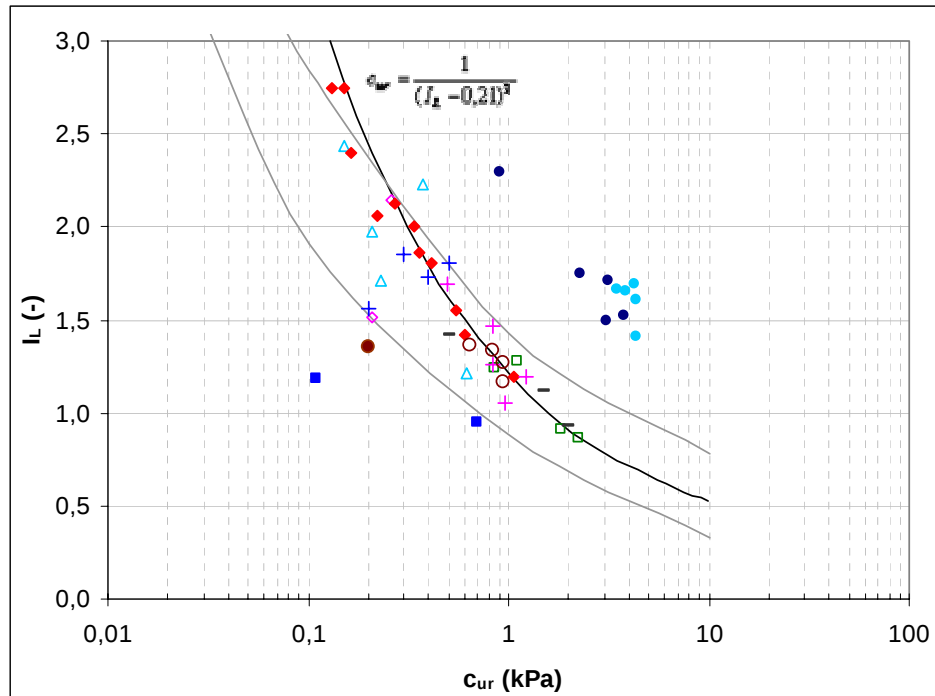


Figuur 6.49 Groepering op basis van organisch gehalte en korrelfractie

In de conclusies behorende bij Figuur 6.48 wordt gesteld dat de punten van wanneer gekeken wordt naar de ligging deze punten tot groep1 gerekend moeten worden, maar wanneer het organische gehalte beschouwd wordt deze waarden tot groep2 zouden moeten behoren.

Bij de datapunten van kunnen vraagtekens gezet worden omdat nadere beschouwing van deze punten leert dat:

- een aantal punten van en zich boven de B-lijn in de plasticiteitsgrafiek bevindt, zie Figuur 6.39. De B-lijn wordt beschouwd als de bovengrens voor alle grondsoorten en wanneer punten zich boven deze lijn bevinden, is het advies om de consistentiegrenzen nogmaals te bepalen. Hieruit volgt dat de nauwkeurigheid van de vloe- en plasticiteitsgrens te betwijfelen valt. Maar het volgende voorbeeld leert dat deze onnauwkeurigheid niet dermate groot kan zijn, waardoor dit de reden zou zijn waarom de punten niet in de nabijheid van de trendlijn van groep2 gepositioneerd zijn. In Figuur 6.49 is te zien dat de verhouding w/w_L ongeveer 1,5 is. Voor deze punten geldt dat als ze tot groep2 zouden behoren de verhouding w/w_L ongeveer 0,8 zou moeten zijn. Uitgaande van een watergehalte van 100% betekent dit een verdubbeling van w_L en zo groot zal de fout bij de bepaling van de vloeigrens zeker niet zijn.
- de waarden voor de geroerde schuifsterkte van deze punten zeer veel afwijken van de door Leroueil voorgestelde relatie tussen geroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex, zie Figuur 6.50. De geroerde schuifsterkte die niet bekend is, wordt verkregen door de bekende ongeroerde schuifsterkte te delen door de gevoeligheid (Tabel II.13). Dat de vergelijking van Leroueil een goede benadering is voor de geroerde schuifsterkte is reeds in paragraaf 5.3 geconstateerd en de grote afwijking van de punten is daarom dubieus.



Figuur 6.50 Liquiditeitsindex versus geroerde schuifsterkte

De voornaamste reden voor de afwijking van de punten van de overige locaties is dat:

- het verloop van watergehalte en schuifsterkte in de diepte niet het standaard patroon volgen. In het artikel waarin onderzoek gedaan is naar de datapunten wordt de schuifsterkte geanalyseerd. De aanzienlijke waarden voor de schuifsterkte worden toegeschreven aan de ontwikkeling van fysisch-chemische binding tussen deeltjes, voornamelijk voortkomende uit oplossing van carbonaten en afbraak van organisch materiaal. Dit verschijnsel is door meerdere onderzoekers waargenomen en staat bekend als "schijnbare" overconsolidatie [Richards & Hamilton, 1967; Almogor 1982]. Deze "schijnbare" overconsolidatie wordt toegeschreven aan verschillende factoren zoals de reeds genoemde vorm van binding of cementatie en zeer geringe sedimentatiesnelheden. De term "schijnbaar" wordt gebruikt omdat deze vorm van consolidatie wezenlijk verschilt van dat wat als normale overconsolidatie beschouwd wordt. Als de huidige effectieve spanning kleiner is dan de maximale effectieve spanning waaraan een grond in het verleden onderworpen is, wordt de spanningstoestand aangeduid als overconsolidatie. Deze vorm van consolidatie kan daar waar door erosie een bovenliggende laag verwijderd is worden waargenomen.

Bovendien blijkt uit de analyse dat het watergehalte uniform is in de diepte. Dit uniforme watergehalte wordt toegeschreven aan een combinatie van slechte doorlatendheid, grote bioturbatie en geringe bovenbelasting. Bioturbatie is gedefinieerd als het vermogen van gravende en sediment etende organismen om het sediment te mengen en voorwaarde voor een grote bioturbatie is dus een grote aanwezigheid van deze organismen. Een geringe bovenbelasting kan slechts voorkomen wanneer de sedimentatiesnelheid gering is.

Om te kijken of deze trend op meerdere locaties zichtbaar is, zijn in bijlage III voor de locaties waarvan het watergehalte en de schuifsterkte in de diepte bekend zijn de volgende figuren weergegeven:

- het verloop van watergehalte in de diepte
- het verloop van de schuifsterkte in de diepte
- het verloop van schuifsterkte met watergehalte

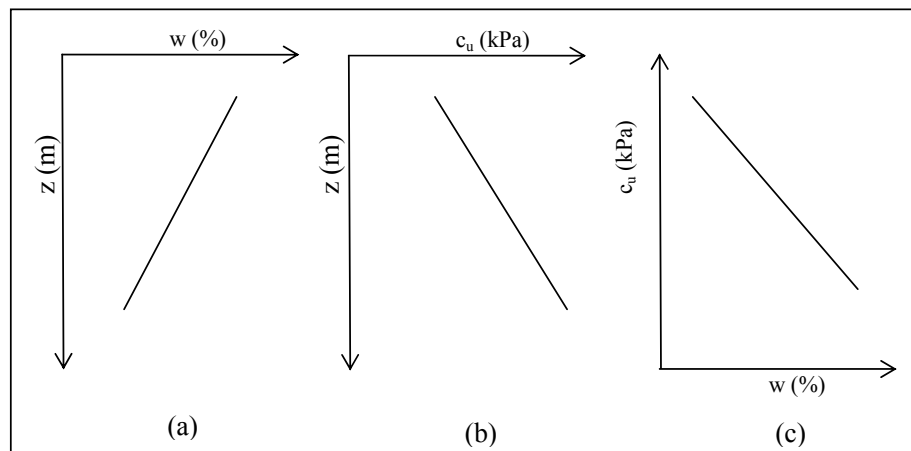
Uit deze figuren zijn de afgeleiden te bepalen voor het watergehalte en de schuifsterkte met de diepte, $\Delta w/\Delta z$ respectievelijk $\Delta c_u/\Delta z$. Deze zijn samengevat in tabel III.1 samen met de voor de locaties karakteristieke factoren als waterdiepte, afstand tot kust, sedimentatiesnelheid en overconsolidatieratio. Uit de tabel blijkt dat de helling van het watergehalte met de diepte ($\Delta w/\Delta z$) en de schuifsterkte met de diepte ($\Delta c_u/\Delta z$) uiteraard niet uniform zijn voor de verschillende locaties. Echter het merendeel van de figuren in bijlage III kan geschematiseerd worden zoals weergegeven in Figuur 6.51:

- (a) een met de diepte afnemend watergehalte
- (b) een met de diepte toenemende schuifsterkte
- (c) een afnemende schuifsterkte bij een toenemend watergehalte.

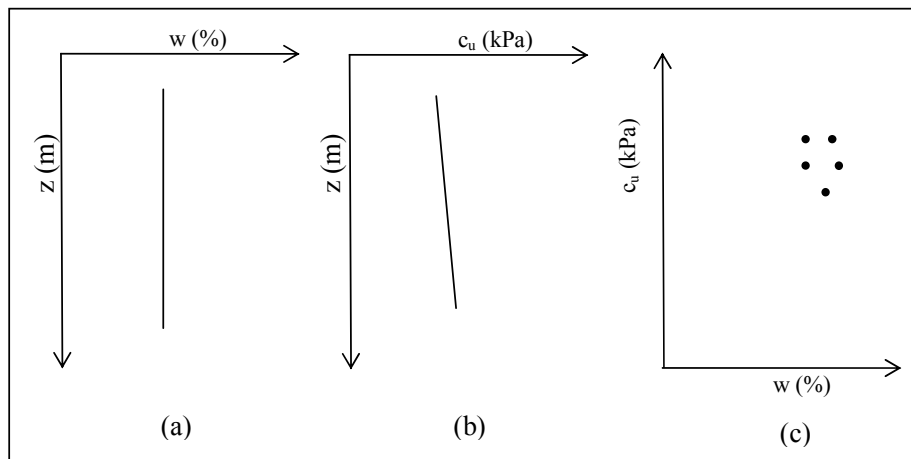
Een uitzondering hierop zijn de locaties en Deze kunnen geschematiseerd worden zoals in Figuur 6.52:

- (a) een in de diepte nagenoeg constant watergehalte;
- (b) een in de diepte nagenoeg constante schuifsterkte;
- (c) uit het voorgaande volgt dat bij een nagenoeg constant watergehalte de schuifsterkte nauwelijks varieert.

Een locatie waarbij het watergehalte ook nauwelijks varieert met de diepte is Het verschil met is echter dat de schuifsterkte wel de algemene trend volgt zoals deze schematisch is weergegeven in Figuur 6.51 (b).



Figuur 6.51 Schematisering verloop watergehalte en schuifsterkte



Figuur 6.52 Schematisering verloop watergehalte en schuifsterkte

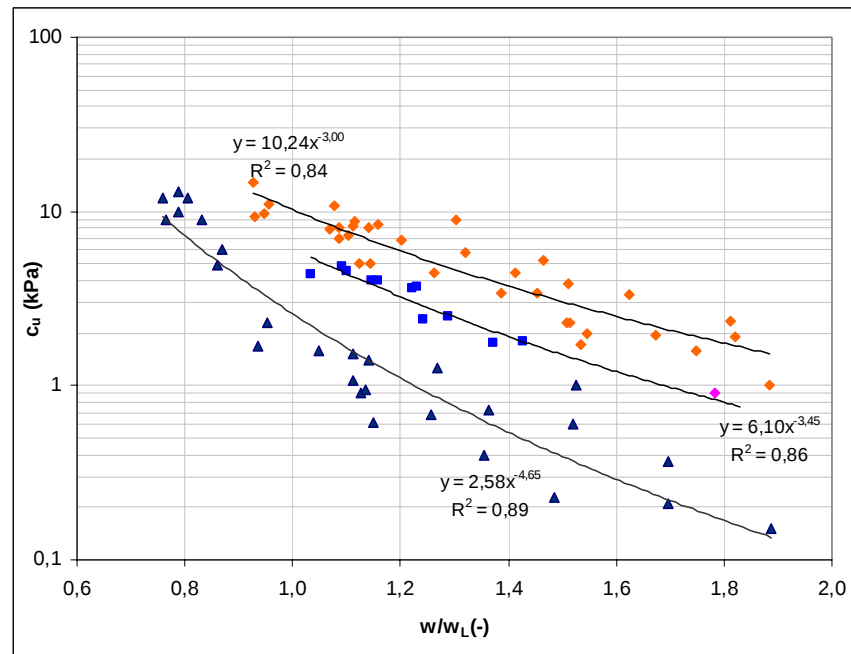
Analyse van het verloop van watergehalte en schuifsterkte in de diepte leert dat het verloop van de punten sterk verschilt van het verloop van alle andere locaties. Hieruit moet

geconcludeerd worden dat voorzichtigheid geboden is bij het toepassen van de vergelijking voor de ongeroerde schuifsterkte indien van een locatie bekend is dat:

- de sedimentatiesnelheid laag is
- er voldoende organisch gehalte en/of carbonaten en/of silica aanwezig zijn.

Het profiel geschetst in Figuur 6.52 vormt in deze studie een uitzondering. Dit profiel komt echter vaker voor bij slib [Kruse, persoonlijke mededeling] en daarom is dit een extra reden de voorgestelde voorzichtigheid bij toepassing van de correlaties onder genoemde voorwaarden in acht te nemen.

Een ander aandachtspunt is het geringe aantal punten waaruit groep3 bestaat. Groep3 wordt gevormd door punten met een fractie kleiner dan 2 μm kleiner dan 40%. Wanneer de fractie kleiner dan 2 μm in de dataverzameling in Bijlage II bekeken wordt, is er nog een tweetal datapunten met een fractie kleiner dan 40%:(Tabel II.5,) en (Tabel II.10, 4A). Voor het punt ontbreekt c_u , maar als de aanname gemaakt wordt dat dit punt een overeenkomstige gevoeligheid heeft met het andere punt, volgt bij een aangenomen S_t van 3,5, $c_u = 0,91$ kPa. Wanneer deze waarde geplot wordt in Figuur 6.49 blijkt dat de waarde uitstekend aansluit bij groep3, zie Figuur 6.53. Voor het punt 4B ontbreekt w_L en het is niet mogelijk een waarde te bepalen waardoor ook dit punt geplot zou kunnen worden in Figuur 6.53.



Figuur 6.53 Toetsing groep3

6.6 Conclusies

De conclusies volgend uit dit hoofdstuk zijn:

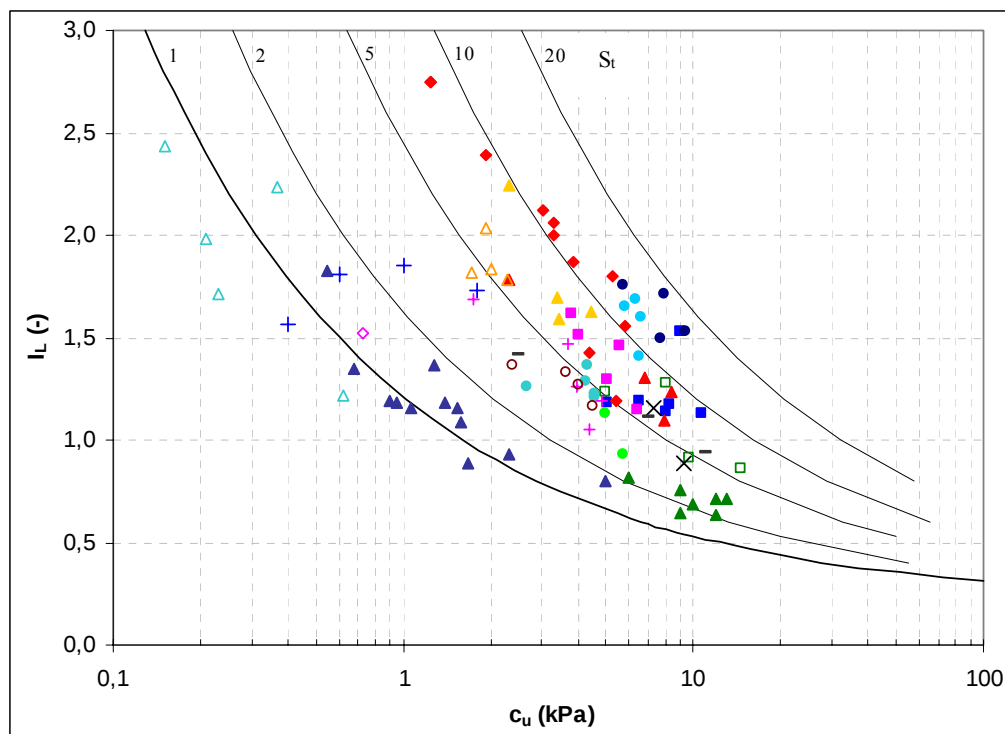
- het is niet mogelijk om op basis van watergehalte, consistentiegrenzen, organisch gehalte en korrelfractie één vergelijking af te leiden voor de ongeroerde schuifsterkte.
- het is wel mogelijk de ongeroerde schuifsterkte te berekenen met als basis de verhouding w/w_L , waarbij de index parameters organisch gehalte en de fractie kleiner dan 2 μm bepalen welke formulering voor c_u gebruikt dient te worden.
- als van een locatie bekend is dat organisch materiaal en/of carbonaten en/of silica in ruime mate aanwezig zijn en bovendien de sedimentatiesnelheid gering is, is toepassing van vgl. 6.23 niet direct mogelijk.
- uitbreiding van het aantal datapunten is wenselijk, voornamelijk ter validatie van de correlatie voor de "silt-groep" (groep3).

7 Bepaling correlaties voor de gevoeligheid

Omdat naast de ongeroerde schuifsterkte het ook vaak belangrijk is de gevoeligheid van een afzetting te weten wordt in dit hoofdstuk een correlatie voor de gevoeligheid bepaald. Wanneer de gevoeligheid en de geroerde schuifsterkte bekend zijn biedt dit de mogelijkheid de ongeroerde schuifsterkte te berekenen. Bij de bepaling van de correlatie voor de gevoeligheid worden dezelfde parameters beschouwd als bij de bepaling van correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte.

7.1 Analyse van bestaande correlaties

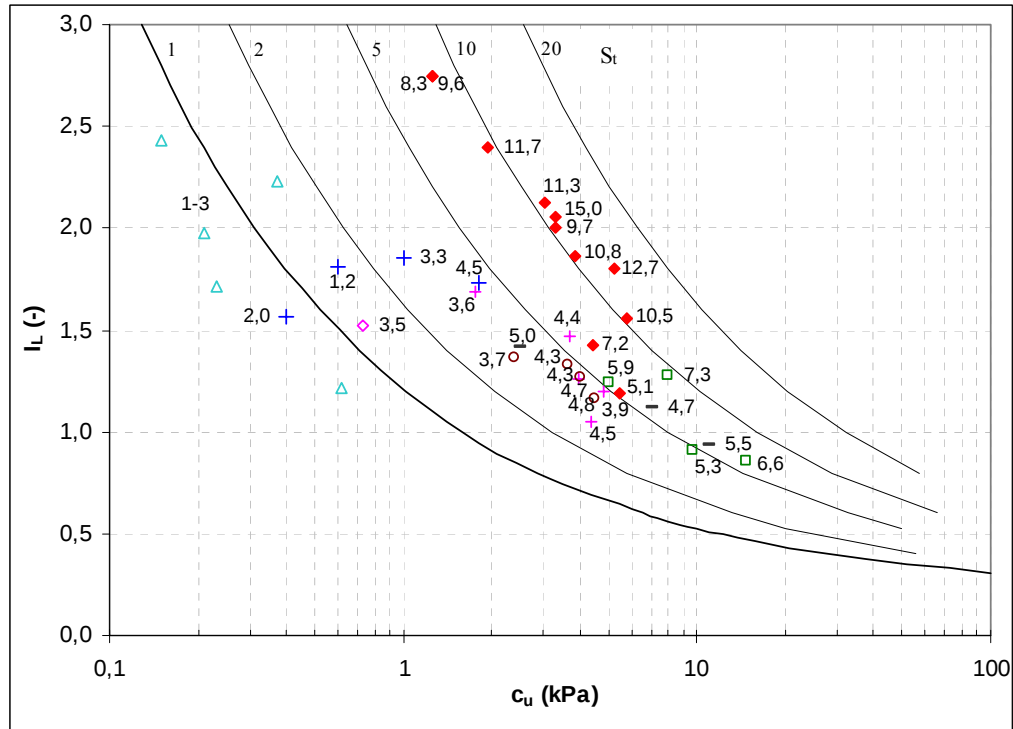
In Figuur 7.1 is de door Leroueil voorgestelde relatie tussen liquiditeitsindex, ongeroerde schuifsterkte en gevoeligheid weergegeven. In deze figuur zijn alle datapunten geplot. In Figuur 7.2 zijn alle punten geplot waarvan de gevoeligheid bekend is en zijn ter verduidelijking de punten waarvan deze niet bekend is weggelaten.



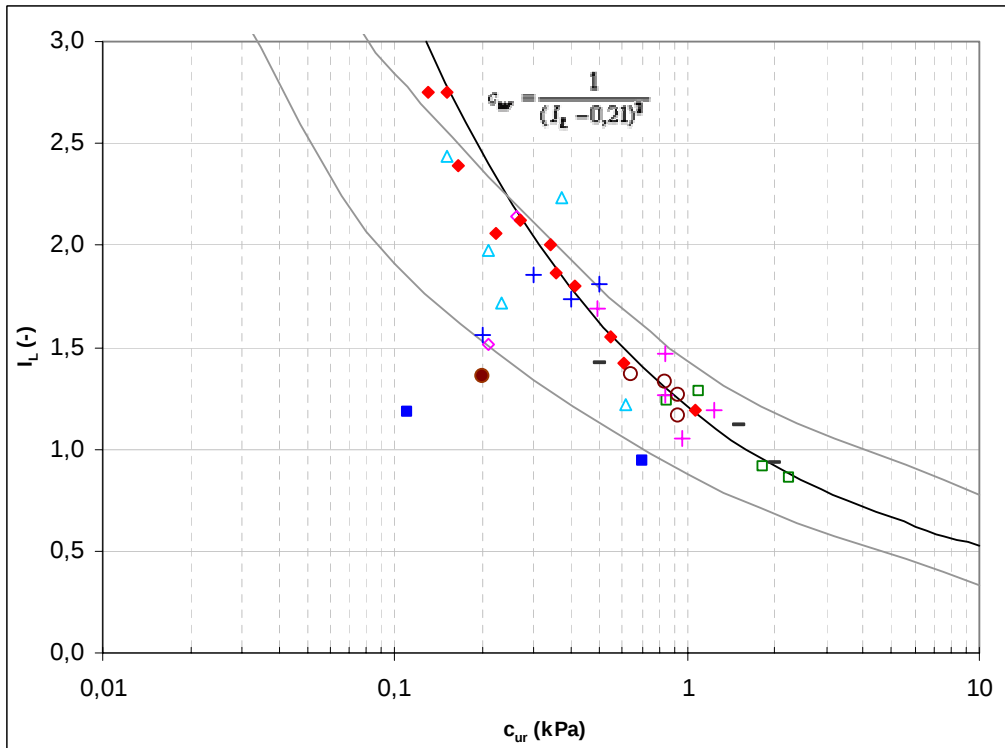
Figuur 7.1 Liquiditeitsindex versus ongeroerde schuifsterkte

In Figuur 7.2 is te zien dat de voorgestelde relatie goed voldoet voor de punten uit de dataverzameling. De oorsprong van deze goede benadering is te vinden in de relatie tussen de geroerde schuifsterkte en de liquiditeitsindex, zie Figuur 7.3. Deze correlatie vormt de basis voor Figuur 7.1 en omdat de correlatie voor de geroerde schuifsterkte en de liquiditeitsindex goed voldoet, is de relatie tussen ongeroerde schuifsterkte, gevoeligheid en liquiditeitsindex automatisch ook correct. Afwijkingen tussen de geroerde schuifsterkte en de benadering van de geroerde schuifsterkte met de liquiditeitsindex in Figuur 7.3 zullen met een factor gelijk aan de gevoeligheid verschaald worden. Dit heeft een afwijking tot gevolg in de figuur waarin de ongeroerde schuifsterkte is uitgezet tegen de liquiditeitsindex, zie Figuur 7.2.

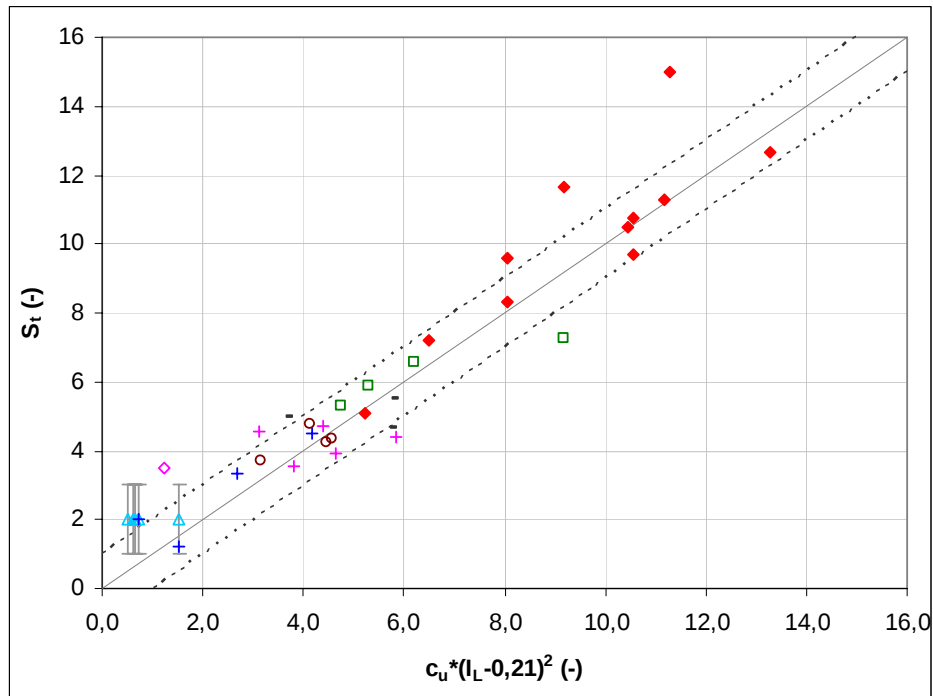
Door de werkelijke S_t uit te zetten tegen de door Leroueil voorgestelde benadering kan een inschatting gemaakt worden in hoe verre deze benadering voldoet. Dit is gedaan in Figuur 7.4 en in deze figuur vormen de gestippelde lijnen de $S_t \pm 1$. Uit deze figuur blijkt dat de voorgestelde relatie een goede benadering is voor de gevoeligheid.



Figuur 7.2 Liquiditeitsindex versus ongeroerde schuifsterkte met bekende waarden voor de gevoeligheid

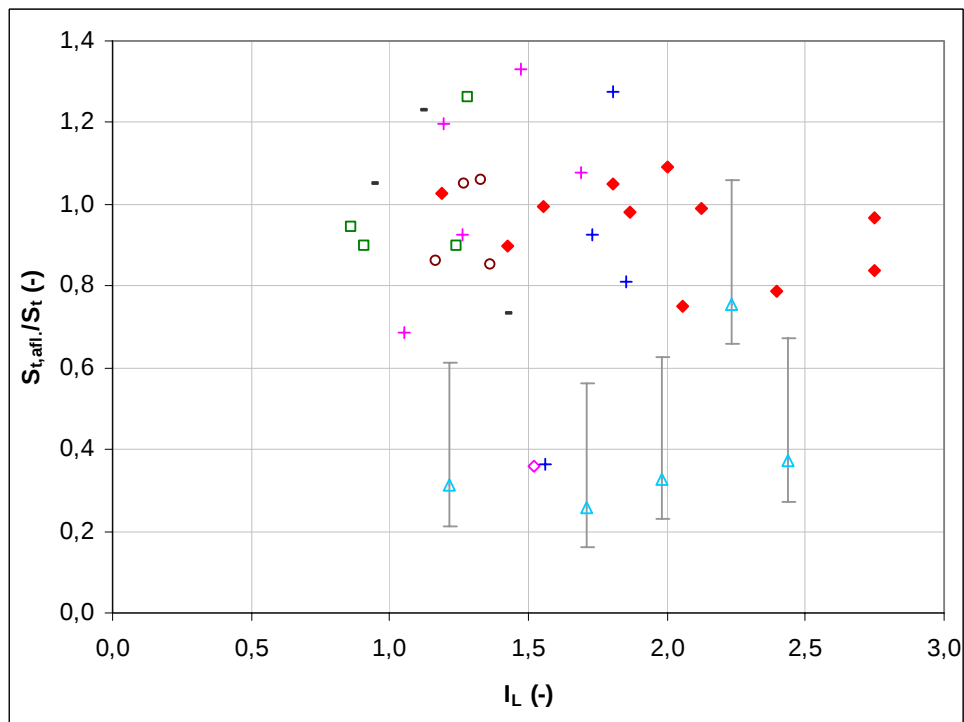


Figuur 7.3 Liquiditeitsindex versus geroerde schuifsterkte

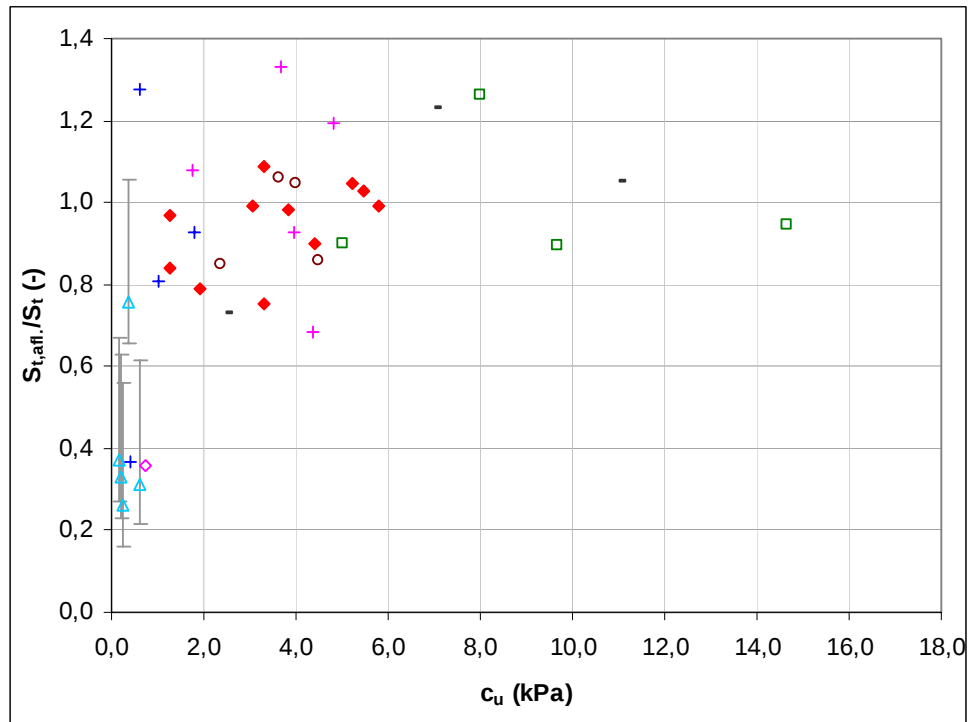


Figuur 7.4 Gevoeligheid data versus benadering gevoeligheid Leroueil

Een andere wijze van vergelijking wordt getoond in Figuur 7.5 en Figuur 7.6. Door deze wijze van presentatie kan gekeken worden of er een trend zichtbaar is in de afwijking van de benadering van S_t met I_L of c_u . Uit Figuur 7.5 blijkt dat er geen trend waarneembaar is voor de afwijking met I_L . Echter in Figuur 7.6 is te zien dat de grootste relatieve afwijking voorkomt bij de datapunten waarvan c_u kleiner dan 1 kPa is.

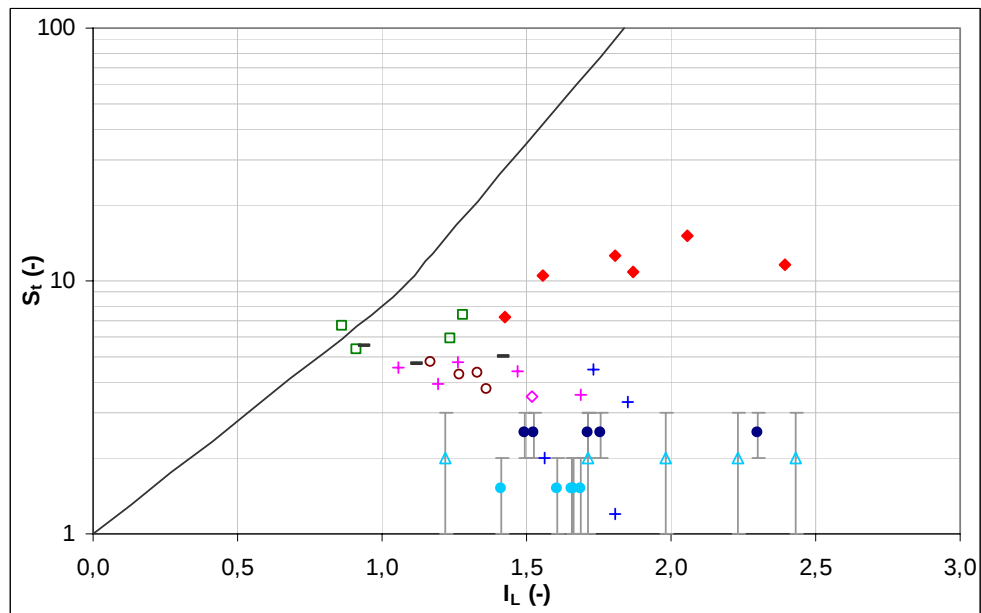


Figuur 7.5 Verhouding $S_{t,afleiding}$ met S_t versus I_L



Figuur 7.6 Verhouding $S_{t,afleiding}$ met S_t versus c_u

In Figuur 7.7 wordt nogmaals de correlatie tussen gevoeligheid en liquiditeitsindex gegeven zoals deze gevonden is door Skempton en Northey (1952), waarbij tevens de extra waarden uit de dataverzameling geplot zijn.. Deze extra data bevestigen de conclusie uit paragraaf 5.2.2 dat toekenning van S_t alleen op basis van I_L niet mogelijk is.

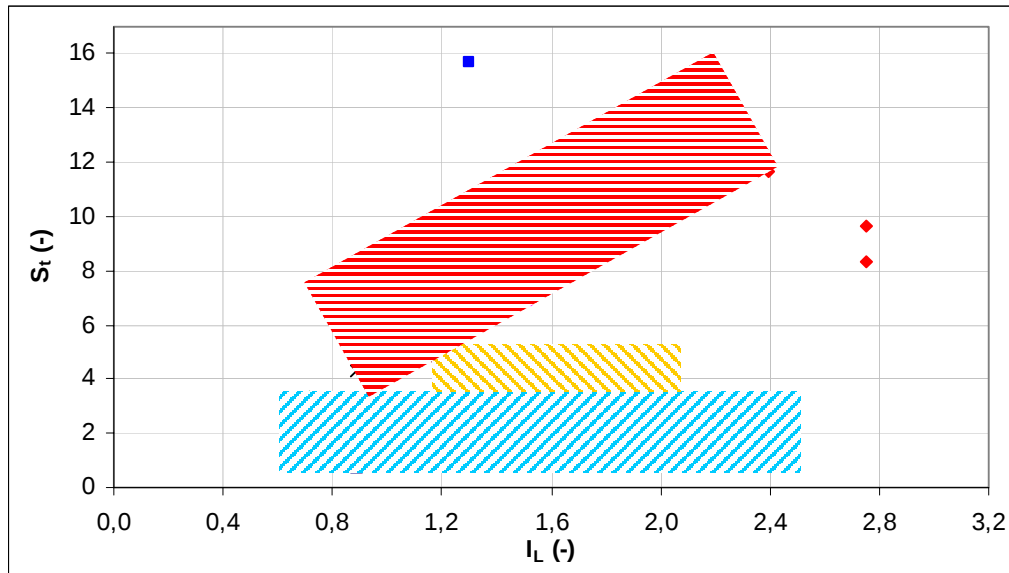


Figuur 7.7 Correlatie tussen gevoeligheid en liquiditeitsindex, Skempton & Northey (1952)

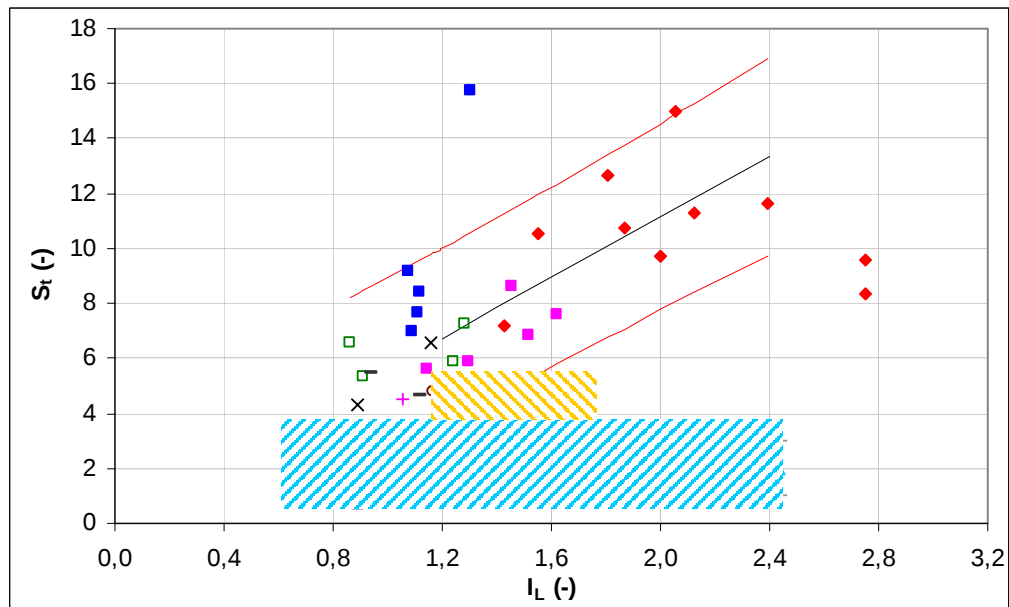
7.2 Bepaling correlaties voor de gevoeligheid

In Figuur 7.8 is de gevoeligheid nogmaals uitgezet tegen de liquiditeitsindex, maar in deze figuur zijn bovendien groeperingen aangebracht. De in deze figuur aangebrachte arceringen komen overeen met de in paragraaf 6.5 gemaakte groeperingen bij de bepaling van correlaties

voor c_u . Onderzocht wordt of door het aanbrengen van de groepering een voldoende nauwkeurige benadering voor de gevoeligheid per groep gemaakt kan worden.



Figuur 7.8 Gevoeligheid versus liquiditeitsindex



Figuur 7.9 Betrouwbaarheidsinterval 95% voor groep1

In Figuur 7.9 zijn de 95% betrouwbaarheidsgrenzen van groep1 weergegeven en deze kunnen met de volgende vergelijkingen worden benaderd:

$$S_t = 5,6372I_L + 3,2629 \quad [-] \quad (7.1)$$

$$S_t = 5,3978I_L - 3,0231 \quad [-] \quad (7.2)$$

In Figuur 7.9 wordt als minimum van I_L voor groep1 0,9 afgelezen en is te zien dat het maximum van I_L 2,4 bedraagt. Met een eenvoudige berekening is nu aan te tonen wat de bijbehorende ongeroerde schuifsterktes zijn voor deze uitersten:



minimum: $I_L = 0,9$

bovengrens: $I_L = 0,9 \rightarrow S_t = 8,3, c_{ur} = 2,1 \text{ kPa} \rightarrow c_u = 8,3 * 2,1 = 17,4 \text{ kPa}$

ondergrens: $I_L = 0,9 \rightarrow S_t = 4,9, c_{ur} = 2,1 \text{ kPa} \rightarrow c_u = 4,9 * 2,1 = 10,3 \text{ kPa}$

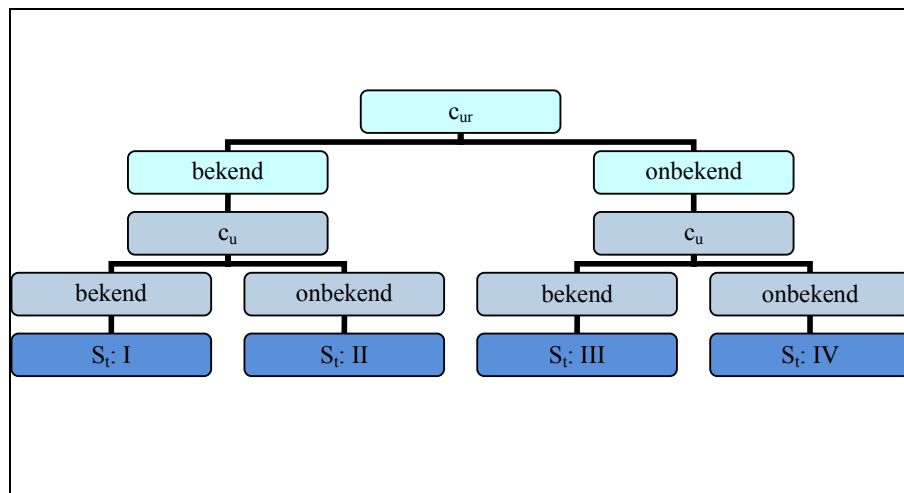
maximaal: $I_L = 2,4$

bovengrens: $I_L = 2,4 \rightarrow S_t = 16,8, c_{ur} = 0,21 \text{ kPa} \rightarrow c_u = 16,8 * 0,21 = 3,5 \text{ kPa}$

ondergrens: $I_L = 2,4 \rightarrow S_t = 9,9, c_{ur} = 0,21 \text{ kPa} \rightarrow c_u = 9,9 * 0,21 = 2,1 \text{ kPa}$

De bovenstaande berekening is uitgevoerd met een benadering van de geroerde schuifsterkte gebruik makend van de vergelijking van Leroueil. De uitkomsten van de voorbeelden laten zien dat voor maximale I_L het absolute verschil tussen de schuifsterktes behorende bij onder- en bovengrens gering is, maar dat dit verschil aanzienlijk is voor de minimale I_L . Deze manier is dus niet direct geschikt voor het verkrijgen van een correcte benadering van de ongeroerde schuifsterkte.

Om toch een voorspelling voor S_t te kunnen maken, wordt gebruik gemaakt van de reeds in paragraaf 6.5 gemaakte correlaties voor c_u . Dit betekent dat afgezien wordt van het principe om met een correlatie voor de gevoeligheid en een correlatie voor de geroerde schuifsterkte een berekening te maken van de ongeroerde schuifsterkte. Ter verduidelijking worden in Figuur 7.10 de verschillende combinatiemogelijkheden voor de berekening van de gevoeligheid gegeven.



Figuur 7.10 Combinatiemogelijkheden voor berekening van de gevoeligheid

Bij de combinaties III en IV in Figuur 7.10 wordt de geroerde schuifsterkte berekend met de vergelijking van Leroueil. Bij de combinaties II en IV wordt de ongeroerde schuifsterkte berekend met de vergelijkingen 6.22–6.24. De uitkomst hiervan is dat in situatie II en IV er per groep een vergelijking verkregen wordt voor de gevoeligheid, waarbij dezelfde voorwaarden gelden als voor de ongeroerde schuifsterkte. Voor combinatie IV waarbij zowel geroerde als ongeroerde schuifsterkte onbekend zijn, is onderstaand de berekeningmethode uitgeschreven.

Combinatie IV:

groep1:

- o het organisch gehalte is kleiner dan 4 %
- o het percentage kleiner dan 2 μm is groter dan 40%

$$c_u = 10,24 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,00} \quad [kPa] \quad (7.3)$$

$$c_{ur} = \frac{1}{(I_L - 0,21)^2} \quad [kPa] \quad (7.4)$$

$$S_{t,I} = \frac{c_u}{c_{ur}} = 10,24 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,00} (I_L - 0,21)^2 \quad [-] \quad (7.5)$$

groep2:

- o het organisch gehalte is groter dan 7 %

$$c_u = 2,58 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-4,65} \quad [kPa] \quad (7.6)$$

$$c_{ur} = \frac{1}{(I_L - 0,21)^2} \quad [kPa] \quad (7.7)$$

$$S_{t,II} = \frac{c_u}{c_{ur}} = 2,58 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-4,65} (I_L - 0,21)^2 \quad [-] \quad (7.8)$$

groep3:

- o het organisch gehalte is kleiner dan 4%
- o het percentage kleiner dan 2 μm is kleiner dan 40 %

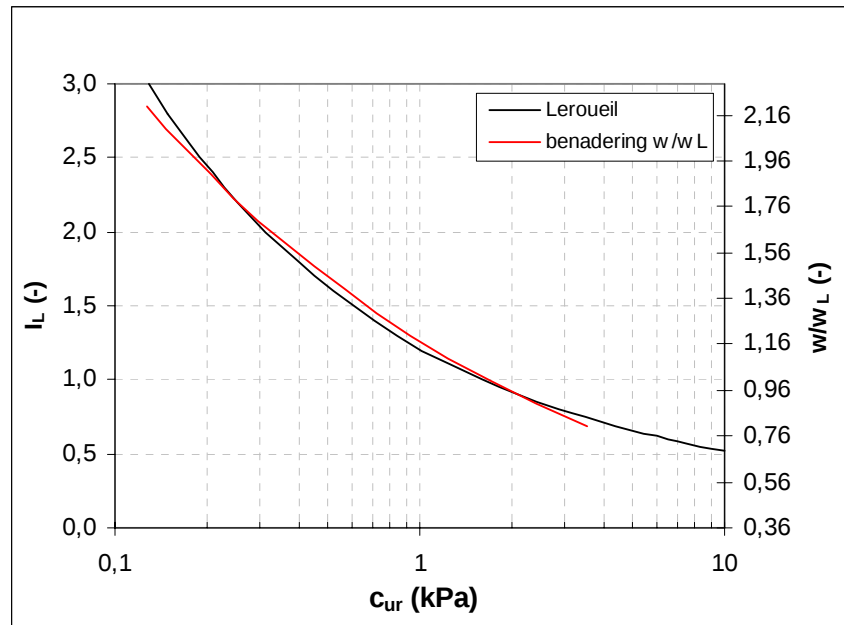
$$c_u = 6,10 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,45} \quad [kPa] \quad (7.9)$$

$$c_{ur} = \frac{1}{(I_L - 0,21)^2} \quad [kPa] \quad (7.10)$$

$$S_{t,III} = \frac{c_u}{c_{ur}} = 6,10 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,45} (I_L - 0,21)^2 \quad [-] \quad (7.11)$$

In de bovenstaande vergelijkingen wordt gewerkt met twee verschillende parameters om het watergehalte te normaliseren, namelijk I_L en w/w_L . Door de strakke relatie die bestaat tussen deze twee parameters (Figuur 5.13) is het mogelijk de vergelijking voor de geroerde schuifsterkte te converteren van I_L naar w/w_L . In Figuur 7.11 is te zien dat de volgende vergelijking een goede benadering is van de vergelijking van Leroueil:

$$c_{ur} = 1,71 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,30} \quad [kPa] \quad (7.12)$$



Figuur 7.11 Conversie vergelijking Leroueil van I_L naar w/w_L

Deze vergelijking voor de geroerde schuifsterkte maakt het mogelijk de gevoeligheid voor de drie groepen voor combinatie IV uit te drukken als afhankelijke parameter van de verhouding w/w_L .

Combinatie IVB:

groep1:

$$S_{t,I} = \frac{c_u}{c_{ur}} = 6,00 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{0,30} \quad [-] \quad (7.13)$$

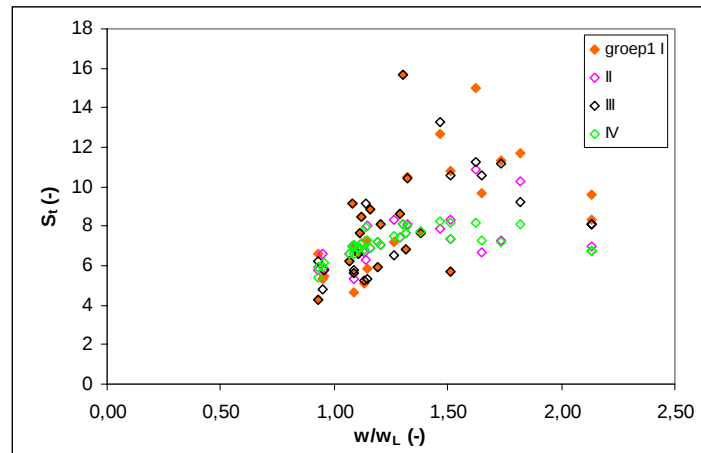
groep2:

$$S_{t,II} = \frac{c_u}{c_{ur}} = 1,51 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-1,35} \quad [-] \quad (7.14)$$

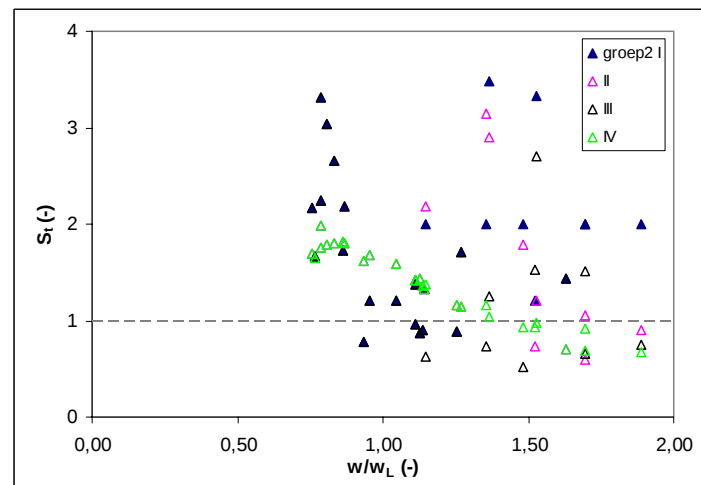
groep3:

$$S_{t,III} = \frac{c_u}{c_{ur}} = 3,57 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-0,15} \quad [-] \quad (7.15)$$

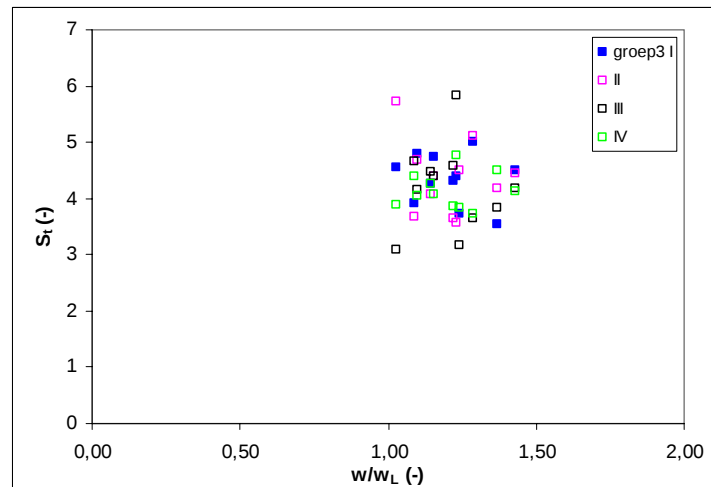
In Figuur 7.12-Figuur 7.14 zijn de verschillen zichtbaar tussen werkelijke S_t (combinatie I) en de berekende gevoeligheden II, III en IV.



Figuur 7.12 Benadering S_t voor groep1

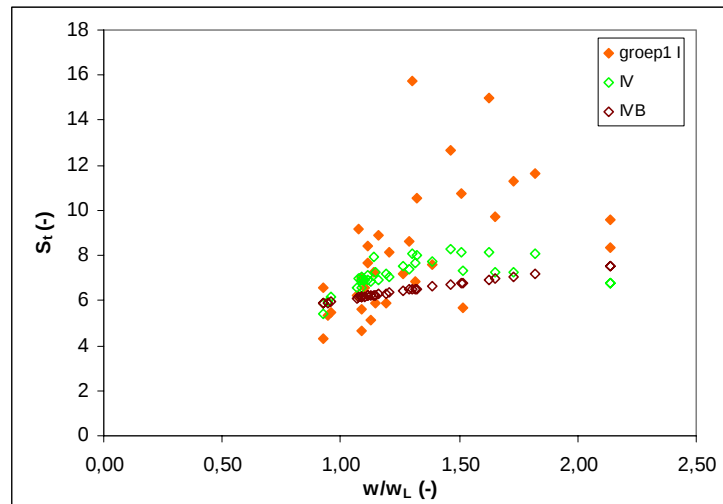


Figuur 7.13 Benadering S_t voor groep2

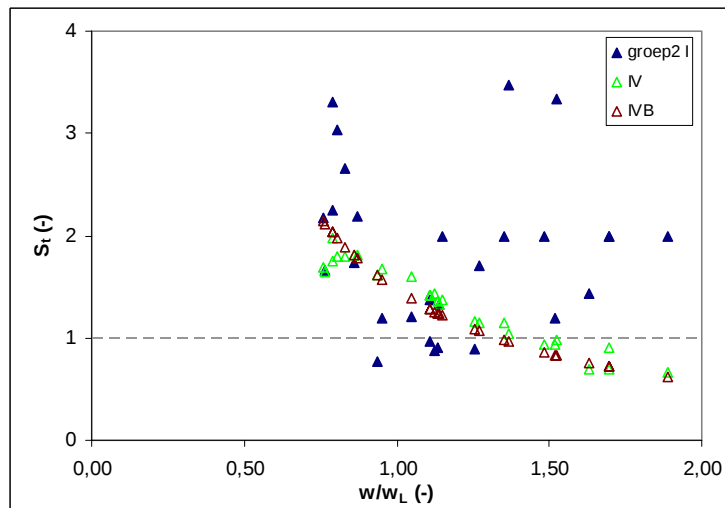


Figuur 7.14 Benadering van S_t voor groep3

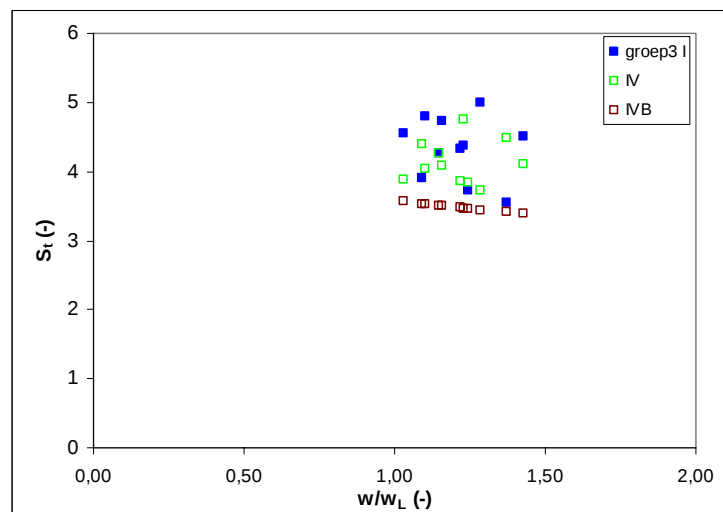
In Figuur 7.15-Figuur 7.17 is het verschil te zien tussen benadering van de geroerde schuifsterkte met I_L en met de verhouding w/w_L voor mogelijkheid IV. Hieruit blijkt dat het verschil voor de groepen 1 en 2 gering is. Voor groep3 voldoet de benadering met I_L beter.



Figuur 7.15 Vergelijking benadering IV met IVB voor groep1



Figuur 7.16 Vergelijking combinatie IV met IVB voor groep2

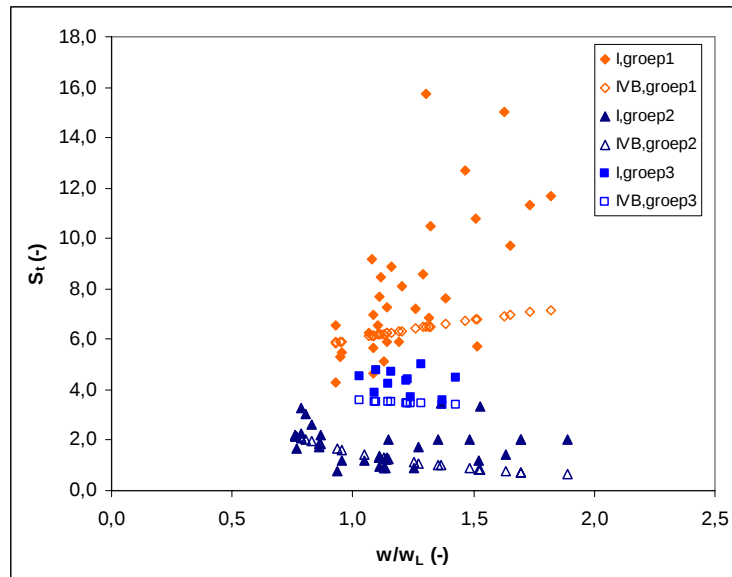


Figuur 7.17 Vergelijking combinatie IV met IVB voor groep3

In Figuur 7.18 zijn de werkelijke gevoelheden (*combinatie I*) en de met vergelijking 7.16-7.18 berekende gevoelheden nogmaals weergegeven (*combinatie IVB*) voor alle groepen.

Combinatie IV is namelijk de benadering met de grootste onzekerheid. Uit deze figuur kan geconcludeerd worden dat de vergelijkingen 7.17 en 7.18 redelijke benaderingen vormen voor de gevoeligheid van groep2 respectievelijk groep3, maar dat vergelijking 7.16 met name bij grote waarden voor w/w_L grote afwijkingen vertoont met de werkelijke S_t .

Uit de wijze waarop de gevoeligheid berekend wordt volgt dat er twee oorzaken zijn voor het ontstaan van afwijkingen tussen de werkelijke S_t en $S_{t,correlatie}$. De eerste oorzaak is een afwijking van $c_{u,correlatie}$ met de werkelijke c_u . De tweede oorzaak is een afwijking van de berekende geroerde schuifsterkte met de werkelijke c_{ur} . De datapunten van zijn een voorbeeld van de eerste oorzaak. Voor het merendeel van deze punten geeft de benadering van c_u een te lage uitkomst. Tussen de werkelijke waarde en de benadering zit een factor 1,5 en deze factor is terug te vinden in de benadering voor de gevoeligheid. Een voorbeeld van de tweede oorzaak zijn de twee punten en met een $S_{t,correlatie}$ van 1. In Figuur 7.3 is te zien dat deze punten met een factor 3 afwijken van de benadering voor de geroerde schuifsterkte. Dit is exact de factor waarmee $S_{t,correlatie}$ afwijkt van de werkelijke gevoeligheid.



Figuur 7.18 Vergelijking van $S_{t,cor.IV}$ en werkelijke S_t

7.3 Conclusies

Uit dit hoofdstuk kunnen de volgende conclusies getrokken worden:

- toetsing van de waarden uit de dataverzameling aan de bestaande correlatie tussen gevoeligheid en liquiditeitsindex leert dat deze correlatie niet geldig is voor de waarden uit de dataverzameling.
- het is niet mogelijk één correlatie voor de gevoeligheid te vervaardigen op basis van de index parameters watergehalte, vloeigrens, plasticiteitsgrens, organisch gehalte en korrelfractie.
- de consequentie volgend uit de bovenstaande conclusie is dat het niet mogelijk is om de ongeroerde schuifsterkte te bepalen met behulp van één benadering van de gevoeligheid en de geroerde schuifsterkte.
- de gevoeligheid kan berekend worden wanneer gebruik wordt gemaakt van de in paragraaf 6.5 bepaalde correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte en van benaderingen voor de geroerde schuifsterkte. Het resultaat hiervan is dat er een drietal vergelijkingen voor de gevoeligheid verkregen wordt, waarbij indexparameters bepalen welke correlatie voor de gevoeligheid gebruikt moet worden.

8 Overzicht toepassingsmogelijkheden correlaties

In dit hoofdstuk worden de uitkomsten van de voorgaande hoofdstukken samengevat en dit hoofdstuk kan daarom beschouwd worden als een gebruikershandleiding. De eerste paragraaf bestaat uit een aantal controlemogelijkheden voor de bij de correlaties gebruikte indexparameters. In de daaropvolgende paragraaf is de wijze samengevat waarop de geroerde schuifsterkte, de ongeroerde schuifsterkte en de gevoeligheid bepaald kunnen worden.

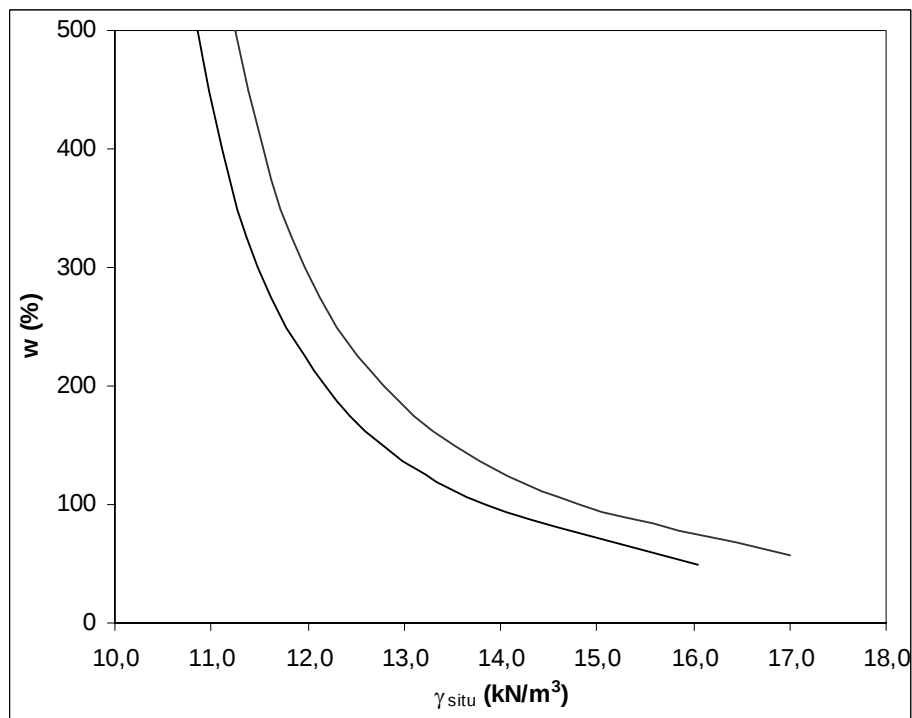
8.1 Controle invoerparameters

In deze paragraaf wordt een drietal methoden gepresenteerd welke kunnen dienen als controle voor de gegeven parameters verkregen uit grondonderzoek. Indien de metingen niet voldoen aan deze methoden moet de juistheid van de meting in twijfel worden getrokken of is de meting wel correct uitgevoerd maar is gemeten op een monster dat bijvoorbeeld blootgesteld is aan lucht en al gedeeltelijk gedroogd is.

8.1.1 Watergehalte en volumegewicht

Voor verzadigde gronden geldt:

$$\gamma_{situ} = \frac{G+e}{1+e} \gamma_w = \frac{G+wG}{1+wG} \gamma_w \quad [kN/m^3] \quad (8.1)$$



Figuur 8.1 Controlemogelijkheid watergehalte en volumegewicht

Voor de grenzen in Figuur 8.1 geldt:

bovengrens:

$$\gamma_{situ} = \frac{G+wG}{1+wG} \gamma_w = \frac{2,8+2,8w}{1+2,8w} 10,05 \quad [kN/m^3] \quad (8.2)$$

met de aannamen:



G	soortelijke massa vaste stof	2,8	[-]
γ_w	volumegewicht water	10,05	[kN/m ³]

ondergrens:

$$\gamma_{\text{situ}} = \frac{G + wG}{1 + wG} \gamma_w = \frac{2,4 + 2,4w}{1 + 2,4w} 9,81 \quad [\text{kN/m}^3] \quad (8.3)$$

met als aannamen:

G	soortelijke massa vaste stof	2,4	[-]
γ_w	volumegewicht water	9,81	kN/m ³

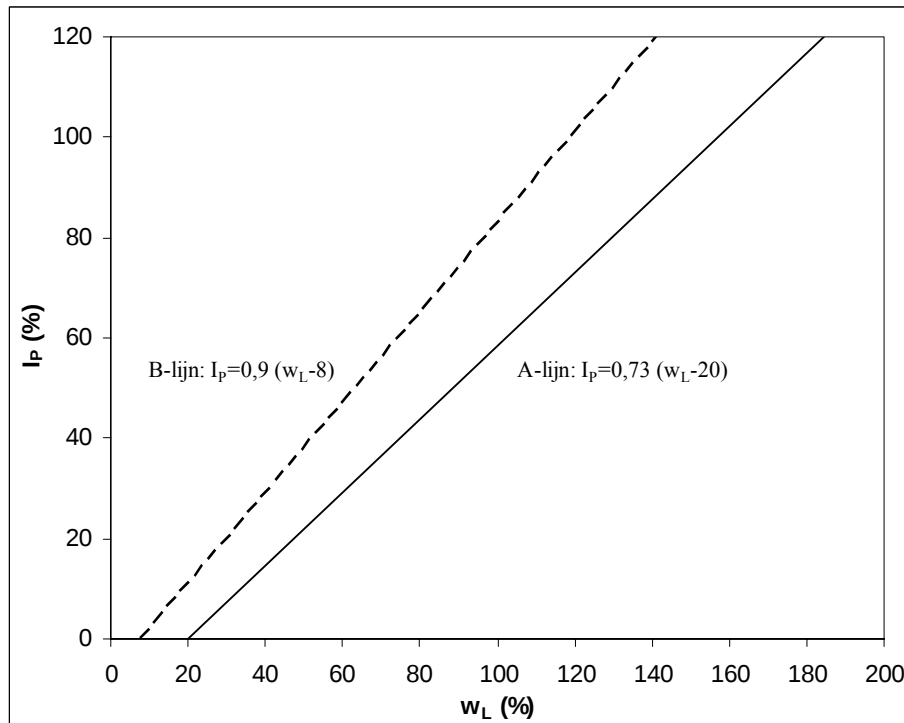
Bij de berekening van het in situ volumegewicht met de vergelijkingen 8.2 en 8.3 moet het watergehalte niet als percentage ingevoerd worden maar als verhouding.

Controlemogelijkheid:

Voor punten die in Figuur 8.1 boven de bovengrens liggen correspondeert het watergehalte niet met het volumegewicht. De oorzaak hiervan moet gezocht worden in fouten gemaakt tijdens de meting van een van de parameters ofwel dat bepaling van de parameters plaats heeft gevonden op monsters waarvan de eigenschappen veranderd zijn. Verandering kan plaatsvinden doordat er tussen de metingen bijvoorbeeld een tijdspanne heeft gezeten waardoor uitdroging van een monster kan plaatsvinden.

8.1.2 Consistentiegrenzen

In de plasticiteitsgrafiek weergegeven in Figuur 8.2 is de plasticiteitsindex uitgezet tegen de vloeigrens.



Figuur 8.2 Controlemogelijkheid consistentiegrenzen

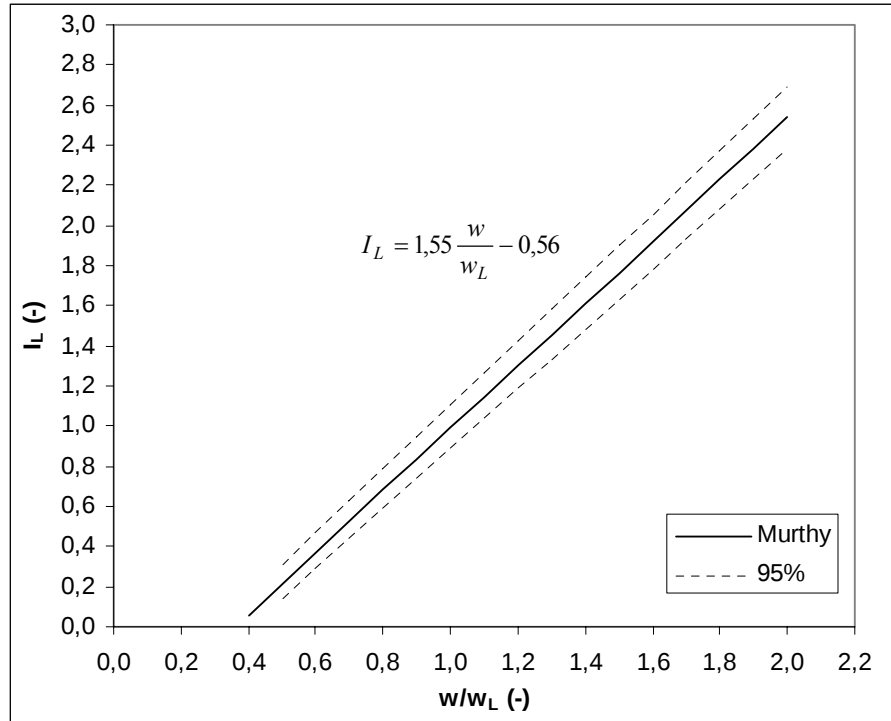
Controlemogelijkheid:

De B-lijn wordt beschouwd als de bovengrens voor alle grondsoorten. Wanneer punten zich boven deze lijn bevinden, is het advies om de consistentiegrenzen nogmaals te bepalen. Dus indien geldt:

$$(0,9w_L - I_p) < 7,2 \quad (8.4)$$

moeten de consistentiegrenzen bij voorkeur nogmaals bepaald worden.

Een tweede mogelijkheid ter controle van de consistentiegrenzen wordt geboden door de vergelijking van Srinavasa Murthy weergegeven in Figuur 8.3, waarbij de liquiditeitsindex uitgezet is tegen de verhouding van watergehalte met vloeigrens.



Figuur 8.3 Controlemogelijkheid consistentiegrenzen

De grenzen in Figuur 8.3 zijn de 95% betrouwbaarheids grenzen van de vergelijking van Srinavasa Murthy (1986) op basis van de punten uit de slibverzameling en worden gegeven door de volgende vergelijkingen:

bovengrens:

$$I_L = 1,59 \frac{w}{w_L} - 0,48 \quad [-] \quad (8.5)$$

ondergrens:

$$I_L = 1,49 \frac{w}{w_L} - 0,60 \quad [-] \quad (8.6)$$

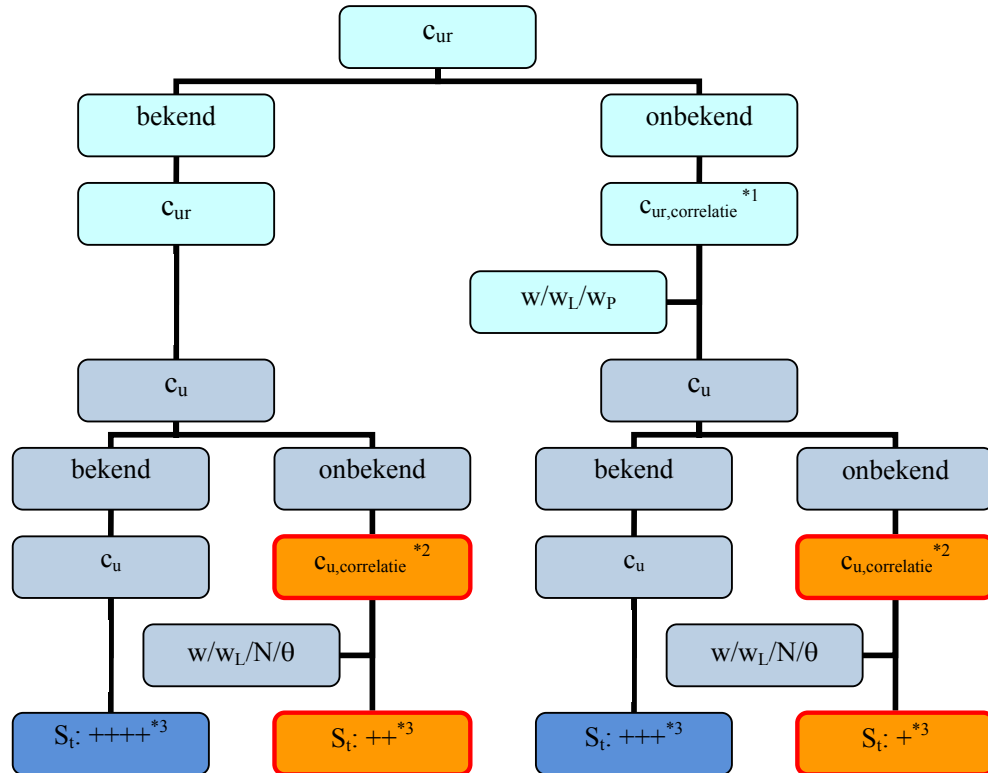
Controlemogelijkheid:

Indien punten buiten de voorgestelde grenzen in Figuur 8.3 vallen, zijn er mogelijk fouten gemaakt bij de bepaling van watergehalte, vloeigrens of plasticiteitsgrens en dienen deze nogmaals bepaald te worden.

8.2 Methode van toepassing

Figuur 8.4 is een stappenplan waarin de verschillende combinaties van beschikbare data uitgezet zijn. Bekend betekent dat de gevraagde parameter gemeten is en onbekend betekent dat deze niet gemeten is. Daar waar informatie over de geroerde en/of ongeroerde schuifsterkte ontbreekt, zijn de benodigde parameters gepresenteerd welke nodig zijn voor de berekening van de geroerde en/of ongeroerde schuifsterkte. In de laatste regel van Figuur 8.4

is een waardering te zien voor de gevoeligheid. Hierbij is het vanzelfsprekend dat wanneer zowel c_u als c_{ur} bekend zijn dit de hoogste waardering oplevert voor de gevoeligheid. De in Figuur 8.4 oranje gearceerde blokken zijn het resultaat van deze studie.



Figuur 8.4 Bepaling van de ongeroerde schuifsterkte en gevoeligheid

*1: $c_{ur,correlatie}$

benodigd:

w	watergehalte	[%]
w_L	vloeigrens	[%]
w_P	plasticiteitsgrens	[%]

$$c_{ur} = \frac{1}{(I_L - 0,21)^2} \quad [kPa] \quad (8.7)$$

met:

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} \quad [-] \quad (8.8)$$

Wanneer de plasticiteitsgrens ontbreekt, kan gebruik worden gemaakt van de volgende correlatie voor de geroerde schuifsterkte:

$$c_{ur} = 1,71 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,30} \quad [kPa] \quad (8.9)$$



*2: $c_{u, \text{correlatie}}$

benodigd:

w	<i>watergehalte</i>	$[\%]$
w_L	<i>vloeigrens</i>	$[\%]$
N	<i>organisch gehalte</i>	$[\%]$
θ	<i>percentage < 2μm</i>	$[\%]$

$$c_u = 10,24 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,00} \quad [kPa] \quad (8.10)$$

voorwaarden:

- o het organisch gehalte is kleiner dan 4 %
- o het percentage kleiner dan 2 μm is groter dan 40 %

$$c_u = 6,10 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,45} \quad [kPa] \quad (8.11)$$

voorwaarden:

- o het organisch gehalte is kleiner dan 4%
- o het percentage kleiner dan 2 μm is kleiner dan 40 %

$$c_u = 2,58 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-4,65} \quad [kPa] \quad (8.12)$$

voorwaarde:

- o het organisch gehalte is groter dan 7 %

uitzondering:

- o indien van de sedimentatiesnelheid op de locatie bekend is dat deze gering is, kan vergelijking 8.12 *niet* direct toegepast worden. Nader grondonderzoek is noodzakelijk.

*3: S_t

benodigd:

c_u	<i>ongeroerde schuifsterkte</i>	$[kPa]$
c_{ur}	<i>geroerde schuifsterkte</i>	$[kPa]$

$$S_t = \frac{c_u}{c_{ur}} \quad [-] \quad (8.13)$$

Wanneer zowel de ongeroerde als de geroerde schuifsterkte ontbreken, kan de gevoeligheid berekend worden volgens:

$$S_t = \frac{c_{u, \text{correlatie}}}{c_{ur, \text{correlatie}}} \quad [-] \quad (8.14)$$

9 Conclusies en aanbevelingen

In dit afsluitende hoofdstuk volgen de conclusies behorende bij het onderzoek. Dit is een samenvatting van de conclusies zoals deze reeds eerder gemaakt zijn in de afsluitende paragrafen van de voorgaande hoofdstukken. Bovendien worden er aanbevelingen gegeven voor hiaten in het huidige onderzoek.

9.1 Conclusies

Het doel van dit onderzoek was het opstellen van een gevalideerd classificatiemodel waarmee op basis van de beschikbare omgevingsfactoren en metingen voldoende nauwkeurige waarden toegekend kunnen worden aan de in situ schuifsterkte van slib op een bepaalde baggerlocatie.

Het resultaat van dit onderzoek is een aantal correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte en gevoeligheid gebaseerd op de indexparameters welke gebruikt kunnen worden in het geval de ongeroerde schuifsterkte en de gevoeligheid niet direct beschikbaar zijn. Het onderzoek kan gesplitst worden in twee delen: een deel literatuur studie en dataverzameling en een tweede deel bestaande uit de bepaling van correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte en de gevoeligheid. De conclusies zijn daarom ook in deze volgorde gerangschikt.

9.1.1 Conclusies bij de literatuurstudie

- De verzameling van data behorende bij locaties waarvan de grond als slib gekwalificeerd kan worden is een nuttige uitbreiding op de data die beschikbaar gesteld zijn door Boskalis. De grondspecifieke data uit projecten van Boskalis zijn te gering gebleken voor het ontwikkelen van een classificatiemodel voor slib.
- De correlatie van Leroueil [1983] voor de geroerde schuifsterkte met de liquiditeitsindex voldoet goed en deze kan gebruikt worden indien de geroerde schuifsterkte niet bekend is:

$$c_{ur} = \frac{1}{(I_L - 0,21)^2} \quad [kPa] \quad (9.1)$$

Toetsing van de geroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex uit de dataverzameling aan de vergelijking voor de geroerde schuifsterkte van Leroueil heeft aangetoond dat ook voor zeer hoge waarden van de liquiditeitsindex de vergelijking uitstekend voldoet.

- De relatie van Leroueil [1983] voor de gevoeligheid met de ongeroerde schuifsterkte en de liquiditeitsindex voldoet goed en deze kan gebruikt worden indien de ongeroerde schuifsterkte en de liquiditeitsindex bekend zijn:

$$S_t = c_u (I_L - 0,21)^2 \quad [-] \quad (9.2)$$

Dat deze relatie goed voldoet is een gevolg van de goede benadering van de geroerde schuifsterkte met de liquiditeitsindex.

- De correlatie van Skempton & Northey (1952) voor de gevoeligheid met de liquiditeitsindex voldoet niet. Toetsing van de gevoeligheid en de liquiditeitsindex uit de dataverzameling aan de vergelijking toont aan dat deze niet geldig is voor de datapunten, welke bijna allen een liquiditeitsindex groter dan 1 hebben.

9.1.2 Conclusies bij de correlaties

- Het is niet mogelijk om op basis van watergehalte, consistentiegrenzen, organisch gehalte en korrelfractie één verband te bepalen voor de ongeroerde schuifsterkte.



- Het is wel mogelijk de ongeroerde schuifsterkte te berekenen met als basis de verhouding w/w_L , waarbij de indexparameters organisch gehalte en de fractie kleiner dan $2 \mu m$ bepalen welke berekening voor c_u gebruikt dient te worden. Bij het opstellen van deze vergelijkingen is gebruik gemaakt van data verspreid over de gehele wereld en het gebruik van deze correlaties wordt daarom niet beperkt tot regio's. De vergelijkingen voor de ongeroerde schuifsterkte zijn:

$$c_u = 10,24 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,00} \quad [kPa] \quad (9.3)$$

voorwaarden :

- het organisch gehalte is kleiner dan 4 %
- het percentage kleiner dan $2 \mu m$ is groter dan 40 %

$$c_u = 6,10 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-3,45} \quad [kPa] \quad (9.4)$$

voorwaarden:

- het organisch gehalte is kleiner dan 4%
- het percentage kleiner dan $2 \mu m$ is kleiner dan 40 %

$$c_u = 2,58 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-4,65} \quad [kPa] \quad (9.5)$$

voorwaarde:

- het organisch gehalte is groter dan 7 %

- Als van een locatie bekend is dat organisch materiaal en/of carbonaten en/of silica in ruime mate aanwezig zijn en bovendien de sedimentatiesnelheid gering is, dan is toepassing van de correlatie voor de ongeroerde schuifsterkte bij een hoog organisch gehalte (vgl. 9.5) niet direct mogelijk. De ongeroerde schuifsterkten kunnen onder deze omstandigheden hoger uitvallen dan wanneer ze berekend worden met vgl. 9.5.
- Het is niet mogelijk één vergelijking voor de gevoeligheid te bepalen op basis van de indexparameters watergehalte, vloeigrens, plasticiteitsgrens, organisch gehalte en korrelfractie.
- De consequentie volgend uit de voorgaande conclusie is dat het niet mogelijk is om de ongeroerde schuifsterkte te bepalen met behulp van één benadering van de gevoeligheid en de geroerde schuifsterkte.
- De gevoeligheid kan berekend worden wanneer gebruik wordt gemaakt van de correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte en van de benadering voor de geroerde schuifsterkte. Het resultaat hiervan is dat er een drietal vergelijkingen voor de gevoeligheid verkregen wordt, waarbij het onderscheid in indexparameters bepaalt welke vergelijking voor de gevoeligheid gebruikt moet worden. Als zowel de ongeroerde als de geroerde schuifsterkte onbekend zijn kan de gevoeligheid berekend worden met:

$$S_t = \frac{c_u}{c_{ur}} = 6,00 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{0,30} \quad [-] \quad (9.6)$$

voorwaarden :

- het organisch gehalte is kleiner dan 4 %
- het percentage kleiner dan $2 \mu m$ is groter dan 40 %

$$S_t = \frac{c_u}{c_{ur}} = 3,57 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-0,15} \quad [-] \quad (9.7)$$

voorwaarden:

- o het organisch gehalte is kleiner dan 4%
- o het percentage kleiner dan 2 µm is kleiner dan 40 %

$$S_t = \frac{c_u}{c_{ur}} = 1,51 \left(\frac{w}{w_L} \right)^{-1,35} \quad [-] \quad (9.8)$$

voorwaarde:

- o het organisch gehalte is groter dan 7 %

9.2 Aanbevelingen

- Uitbreiding van de dataverzameling is wenselijk. De correlatie voor de ongeroerde schuifsterkte van de groep die geclassificeerd is als "silt groep" (groep3, vgl. 9.4), is gebaseerd op een beperkt aantal punten. Extra datapunten zouden de mogelijkheid bieden tot validatie.
- Uitbreiding van de dataverzameling is wenselijk zodat mogelijk meerdere uitzonderingsgevallen, zoals in deze studie de datapunten van, bekend worden. Bovendien zouden meerdere uitzonderingen wellicht de mogelijkheid bieden ook voor deze uitzonderingen correlaties voor de ongeroerde schuifsterkte op te stellen. In dit onderzoek wordt kwalitatief beschreven waarom locaties afwijken, maar er wordt geen voorstel gemaakt voor een benadering van de ongeroerde schuifsterkte.
- In dit onderzoek zijn ook onderwerpen genoemd die dermate complex zijn dat ze voor de eenvoud van de bepaling van de correlaties niet zijn meegenomen. Hierbij moet gedacht worden aan de invloed van gas op de schuifsterkte. Ook van de aard van het organische materiaal is bekend dat dit van invloed is op de schuifsterkte. Bij het verzamelen van data is gebleken dat het in de meeste gevallen wel te achterhalen is hoe groot het organische gehalte is, maar dat het zeer moeilijk is de bestandsdelen van het organische materiaal te achterhalen. Onderzoek naar bovengenoemde is wenselijk, zodat ook deze invloeden mogelijk geïmplementeerd kunnen worden in de correlaties.
- Er dient altijd een geoloog geraadpleegd te worden (wat eigenlijk al standaard gebeurt in de praktijk). De afgeleide correlaties kunnen gebruikt worden in die situaties waar slechts enkele indexparameters beschikbaar zijn, maar omdat er met grond gewerkt wordt zal er altijd een zekere onzekerheid zijn. Deze onzekerheid zal bijvoorbeeld bestaan uit de natuurlijke heterogeniteit van een grondlaag en de statistische onzekerheid met betrekking tot de grondeigenschappen doordat slechts een beperkt aantal metingen beschikbaar is. Fouten veroorzaakt door verkeerde menselijke handelingen, zoals onzorgvuldige wijze van uitvoering van methoden ter bepaling van de indexparameters, vormen ook een bron van onzekerheid.
- Aansluitend op de voorgaande aanbeveling volgt de aanbeveling om nader onderzoek te laten verrichten door iemand met een geologie achtergrond zodat de in de doelstelling gestelde omgevingsfactoren beter geïmplementeerd kunnen worden. Deze zitten natuurlijk gedeeltelijk al in de correlaties, als voorbeeld gelden het organisch gehalte en de vloeigrens, maar blijven lichtelijk onderbelicht en dit onderdeel is nog voor verbetering vatbaar.

Literatuur

- Almagor, G., 1982. *Marine geotechnical studies at continental margins: a review – Part II*. Applied Ocean Research, 4, 130-150.
- Been, K. & Sills, G.C., 1981. *Self-weight consolidation of soft soils: an experimental theoretical study*. Géotechnique, 31 (4), 519-535.
- Boer, G.J. de., 2002. *On the consolidation and erosion of cohesive sediments*. MSc Thesis, Technische Universiteit Delft.
- Brouwer, J., 2002. *Dynamics in extracellular carbohydrate production by marine benthic diatoms*. Netherlands Institute of Ecology. ISDN 90-9015546-5.
- Buckman, H.O., Brady, N.C., 1969. *The Nature and Properties of Soils*. The Macmillan, London.
- Burland, J.B., 1990. *On the compressibility and shear strength of natural clays*. Géotechnique, 40, 3, 329-378.
- Carrier, W.D., & Beckmann, J.F., 1984. *Correlations between index tests and the properties of remoulded clays*. Géotechnique, 34 (2), 211-228.
- Casagrande, A., 1948. *Classification and identification of soils*. Transactions of the ASCE, 113, 901-930.
- Creanenbroek, J. van, Duthoo, J., Vandecasteele, M., Eygenraam, J.A. & Oostveen, J. van, 1998. *Application of Modern Survey Techniques in Today's Dredging Practice*. Terra et Aqua, 72.
- Federico, A., 1983. *Relationships (c_u-w) en ($c_u-\delta$) for remoulded clayey soils at high water content*. Riv Ital. Geotech. J. XVII 1, 38-41.
- Gibson, R.E., 1958. *The progress of consolidation in a clay layer increasing in thickness with time*. Géotechnique, 8, 171-182.
- Gibson, R.E., England, G.L. & Hussey, M.J.L., 1967. *The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays*. Géotechnique, 17, 261-273.
- Head, K.H., 1992. *Manual of soil laboratory testing vol. 1, second edition*. John Wiley and Sons.
- Hellema, J.A., 1979. *Dichtheidsmetingen in situ*. Rijkswaterstaat rapport, directie beneden rivieren.
- Hellema, J.A., 1981. *De praktijk van slibdichtheidsmetingen in Europoort*. Rijkswaterstaat rapport, directie Benenden Rivieren.
- Houston, W.N., & Mitchell, J.K., 1969. *Property interrelationship in sensitive clays*. ASCE, J. of SMFD, 95, 1037-1062.
- Lambe, T.W., 1960. *A mechanistic picture of shear strength of shear strength in clay*. Proceedings of the research conference on shear strength of cohesive soils, Boulder, Colorado, 555-580.
- Lambe, T.W., & Whitman, R., 1979. *Soil Mechanics, SI Version*. John Wiley and Sons.

Ledden, M., Z.B. Wang, 2001. *Sand-mud morpho-dynamics in an estuary*. River, Coastal and Estuarine Morphodynamics Conference RCEM2001, Japan.

Leroueil, S., Tavenas, F., & Le Bihan, J.P., 1983. *Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada*. Canadian Geotechnical Journal, 20 (4), 681-705

Malkawi, A.I.H., Alawneh, A.S. & Safaqa O.S., 1999. *Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil*. Applied Clay Science, 14, 257-278.

Merckelbach, L., 2000. *Consolidation and strength evolution of soft mud layers*. (PhD Thesis) Communications on hydraulic and geotechnical engineering, report no. 00-2, Delft University of Technology.

Metha, A.J., Hayter, E.J., Krone, R.B. & Teeter, A.M., 1989. *Cohesive sediment transport*. Journal of Hydraulic Engineering, 115 (8), 1076-1093.

Mitchell, J.K., 1976. *Fundamentals of soil behaviour*. John Wiley and Sons.

Mitchell, J.K., 1993. *Fundamentals of soil behaviour, second edition*. John Wiley and Sons.

Odell, R.T., Thornburn, T.H., McKenzie, L.J., 1960. *Relationship of Atterberg limits to some other properties of Illinois soils*. Proceedings of the Soil Science Society of America 24 4, 297-300.

Pandian, N.S. & Nagaraj, T.S., 1990. *Critical reappraisal of colloidal activity of clays*. J. Geotechnical Engineering, ASCE, 116 (2), 285-296.

Richards, A. & Hamilton, E., 1967. *Investigations in deep-sea sediment cores. III. Consolidation*. Marine Geotechnique, 93-117.

Quigley, R.M., 1980. *Geology, mineralogy, geochemistry of Canadian soft soils: geotechnical perspective*. Canadian Geotechnical Journal, 17, 261-285.

Seed, H.B., 1964. *Fundamental aspects of the Atterberg limits*. Journal of Soil Mech. and Found. Div. ASCE, vol. 90, 75-105.

Seed, H.B., Woodward, R.J. & Lundgren, R., 1964. *Clay mineralogical aspects of Atterberg limits*. Journal of Soil Mechanics and Foundations, American Society of Civil Engineers, 90, 107-131.

Schiffman, R.L., Pane, V. & Sunara, V., 1985. *Sedimentation and consolidation*. Flocculation, sedimentation and consolidation (edited by Moudgil & Somasundaran), 57-121.

Shimobe, S., 2000. *Correlations among liquidity index, undrained shear strength and fall cone penetration of fine-grained soils*. Coastal Geotechnical Engineering in Practice, 141-146.

Skempton, A.W., 1970. *The consolidation of clays by gravitational compaction*. Quart. J. Geol. Soc. London, 125, 373-412.

Skempton, A.W. & Northey, R.D., 1952. *The sensitivity of clays*. Géotechnique, 3, 30-53.

Sridharan, A. & Praksh, K., 1999. *Mechanisms controlling the undrained shear strength behaviour of clays*. Canadian Geotechnical Journal, 36, 1030-1038.



Srinivasa Murthy, B.R., Nagaraj, T.S. & Vatsala, A., 1986. *Critical reappraisal of empirical shear strength equations*. Proc. Asian Regional Sym. on Geotech. Problems and Practices in Found. Eng. Colombo, Sri Lanka, 1, 248-292.

Tan, T.S., Goh, T.C., Karunaratne, G.P. & Lee, S.P., 1994. *Shear strength of very soft clay-sand mixtures*. Geotechnical Testing Journal, 17 (1), 27-34.

Terzaghi, K., Peck, R.B., Mesri, G., 1996. *Soil mechanics in engineering practice, third edition*. John Wiley and Sons.

Toorman, E.A., 1996. *Sedimentation and self-weight consolidation: general unifying theory*. Géotechnique, 46 (1), 103-113.

Uffink, G.J.M., 1983. *De bepaling van de doorlatendheid aan de hand van de granulaire samenstelling van grondmonsters*. Rijksinstituut voor drinkwatervoorziening, RID mededeling no. 83-8.

Wheeler, S.J., 1988. *The undrained shear strength of soils containing large gas bubbles*. Géotechnique, 38 (3), 399-413.

Wiseman, G. & Zeilten, J.G., 1961. *A comparison between the CBR and the shear strength methods in the design of flexible pavements*. 5th Int. Conf. SMFE, Paris.

Wroth, C.P., 1979. *Correlations of some engineering properties of soils*. Proc. 2nd conf. on behaviour of off-shore structures. London, 1, 121-132.

Wroth, C.P., & Wood, D.M., 1978. *The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils*. Canadian Geotechnical Journal, 15 (2), 137-145.

Youssef, M.S., 1965. *Relationships between shear strength, consolidation, liquid limit, and plastic limit for remoulded clays*. Proc. 6th Int. Conf. Soil Mech., Montreal. 1, 126-129.

Lijst van symbolen

Latijnse symbolen

<u>Symbool</u>	<u>Eenheid</u>	<u>Verklaring</u>
a	-	constante
A	-	activiteit
c	kN/m^2	cohesie
c_u	kN/m^2	ongeroderde schuifsterkte
$c_{u, afl.}$	kN/m^2	afleiding ongeroderde schuifsterkte
$c_{u, correlatie}$	kN/m^2	correlatie ongeroderde schuifsterkte
c_{ur}	kN/m^2	geroderde schuifsterkte
$c_{ur, correlatie}$	kN/m^2	correlatie geroderde schuifsterkte
e	-	poriënetal (void ratio)
e_L	-	poriënetal bij vloeigrens
e_P	-	poriënetal bij plasticiteitsgrens
e^*	-	schijnbaar poriënetal
g	N/kg	versnelling van de zwaartekracht
G	-	soortelijke massa vaste stof
I_C	-	consistentie-index
I_L	-	liquiditeitsindex
I_P	-	plasticiteitsindex
n	-	porositeit
S_r	-	verzadigingsgraad
S_t	-	gevoeligheid (sensitivity)
$S_{t, correlatie}$	-	correlatie gevoeligheid
V	m^3	volume totaal
V_s	m^3	volume deeltjes
V_v	m^3	volume poriëruimte
V_w	m^3	volume water
w	-	watergehalte
w_L	-	vloeigrens
w_P	-	plasticiteitsgrens
W	kg	gewicht totaal
W_s	kg	gewicht deeltjes
W_w	kg	gewicht water

Griekse symbolen

<u>Symbool</u>	<u>Eenheid</u>	<u>Verklaring</u>
β	-	empirische coëfficiënt
γ_d	kN/m^3	volumegegewicht droog
γ_s	kN/m^3	volumegegewicht deeltjes
γ_{situ}	kN/m^3	in situ volumegegewicht grond
γ_w	kN/m^3	volumegegewicht water
η	-	empirische coëfficiënt
θ	-	$\% < 2 \mu m$
λ	-	empirische coëfficiënt
σ'	kN/m^2	effectieve spanning
σ_0	kN/m^2	totaal spanning
σ_{atm}	kN/m^2	atmosferische druk
ϕ	°	wrijvingshoek

Lijst van figuren

Figuur 1.1 Werkwijze.....	3
Figuur 2.1 Schematische weergave van de structuur van drie voornamelijk kleimineralen.....	6
Figuur 2.2 Consistentie en consistentiegrenzen	7
Figuur 2.3 Plasticiteitsgrafiek van Casagrande (1948).....	8
Figuur 2.4 Relatie tussen plasticiteitsindex en klei fractie, Skempton (1953)	9
Figuur 3.1 Verband tussen toename in totale spanning en toename in respectievelijk de effectieve spanning en waterspanning in de tijd.	10
Figuur 3.2 Verband tussen vervorming en effectieve spanning bij overgeconsolideerde grond volgens logaritme van de effectieve spanning.	11
Figuur 3.3 Samenstelling fijnkorrelige grond.....	13
Figuur 4.1 Cirkels van Mohr bij ongedraineerde proeven.....	15
Figuur 4.2 Cirkels van Mohr voor totaalspanning, $\phi = 0$ concept.....	16
Figuur 4.3 Relatie tussen liquiditeitsindex en geroerde schuifsterkte [Wroth & Wood, 1978].....	18
Figuur 4.4 Relatie tussen de liquiditeitsindex en de geroerde schuifsterkte van klei bepaald met de valconus [Leroueil, 1983].....	19
Figuur 4.5 Genormaliseerde ongedraineerde geroerde schuifsterkte voor klei [Carrier & Beckman, 1984]	20
Figuur 4.6 Relatie tussen liquiditeitsindex en verhouding w/w_L (Srinivasa Murthy e.a., 1986)	20
Figuur 4.7 Relatie tussen w/w_L en de ongedraineerde geroerde schuifsterkte (Federico, 1983)	21
Figuur 4.8 Invloed van het organisch gehalte op het watergehalte voor een Braziliaanse klei/veen [Mitchell, 1993].....	21
Figuur 4.9 Invloed van organisch gehalte op de vloeigrens van een illitische klei [Malkawi e.a., 1999].....	22
Figuur 4.10 Invloed van organisch gehalte op de plasticiteitsgrens van een illitische klei [Malkawi e.a., 1999]	22
Figuur 4.11 Invloed van het organisch gehalte op de plasticiteitsindex van een illitische klei [Malkawi e.a., 1999]	23
Figuur 4.12 Schematische weergave slib	24
Figuur 4.13 Relatie consistentiegrenzen en fijne fractie [Van der Schrieck, 1980]	25
Figuur 4.14 Relatie tussen liquiditeitsindex, ongeroerde schuifsterkte van klei en gevoeligheid [Leroueil, 1983].....	27
Figuur 4.15 Relatie tussen liquiditeitsindex en ongedraineerde schuifsterkte [Shimobe, 2000]	28
Figuur 4.16 Relatie tussen gevoeligheid en liquiditeitsindex (Skempton & Northey, 1952).....	28
Figuur 5.1 Overzicht locaties van de slibverzameling.....	30
Figuur 5.2 Plasticiteitsgrafiek van Casagrande [1932] met weergave van de punten uit de database.....	31
Figuur 5.3 Activiteitsgrafiek met weergave van de punten uit de database	32
Figuur 5.4 Relatie tussen volumieke massa en watergehalte	32
Figuur 5.5 Relatie tussen geroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex volgens Wroth & Wood [1978].....	33
Figuur 5.6 Relatie tussen liquiditeitsindex en ongeroerde schuifsterkte	34
Figuur 5.7 Relatie tussen geroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex volgens Leroueil [1983]	34
Figuur 5.8 Relatie tussen ongeroerde schuifsterkte en liquiditeitsindex	35
Figuur 5.9 Relatie tussen geroerde schuifsterkte en genormaliseerde liquiditeitsindex volgens Carrier & Beckman [1984].....	35
Figuur 5.10 Relatie tussen genormaliseerde liquiditeitsindex en ongeroerde schuifsterkte.....	36
Figuur 5.11 Relatie tussen w/w_L en geroerde schuifsterkte volgens Federico [1983].....	36
Figuur 5.12 Relatie tussen verhouding w/w_L en ongeroerde schuifsterkte.....	37
Figuur 5.13 Relatie tussen liquiditeitsindex en verhouding w/w_L	37
Figuur 5.14 Totaaloverzicht relaties tussen liquiditeitsindex en geroerde schuifsterkte.....	38

Figuur 5.15 Totaaloverzicht liquiditeitsindex versus ongeroerde schuifsterkte	38
Figuur 5.16 Relatie tussen ongeroerde schuifsterkte, liquiditeitsindex en gevoeligheid volgens Leroueil [1983].....	39
Figuur 5.17 Gevoeligheid data versus benadering Leroueil.....	39
Figuur 5.18 Relatie tussen ongeroerde schuifsterkte, liquiditeitsindex en gevoeligheid volgens Shimobe [2000].....	40
Figuur 5.19 Vergelijking relaties van Leroueil [1983] en Shimobe [2000]	40
Figuur 5.20 Correlatie tussen gevoeligheid en liquiditeitsindex volgens Skempton & Northey (1952)	41
Figuur 6.1 Ongeroerde schuifsterkte versus watergehalte.....	43
Figuur 6.2 Ongeroerde schuifsterkte versus situ dichtheid	43
Figuur 6.3 Ongeroerde schuifsterkte versus situ dichtheid	44
Figuur 6.4 Ongeroerde schuifsterkte versus organisch gehalte	44
Figuur 6.5 Ongeroerde schuifsterkte versus percentage kleiner dan 2 μm	45
Figuur 6.6 Organisch gehalte versus situ dichtheid.....	46
Figuur 6.7 Organisch gehalte versus watergehalte.....	47
Figuur 6.8 Percentage kleiner dan 2 μm versus situ dichtheid	47
Figuur 6.9 Percentage kleiner dan 2 μm versus vloeigrens	48
Figuur 6.10 Ongeroerde schuifsterkte versus verhouding w/w_L	49
Figuur 6.11 Ongeroerde schuifsterkte versus liquiditeitsindex	50
Figuur 6.12 Liquiditeitsindex versus w/w_L	50
Figuur 6.13 Ongeroerde schuifsterkte versus $\gamma_{\text{situ}}/\gamma_{\text{wl}}$	51
Figuur 6.14 Groepering op basis van organisch gehalte.....	51
Figuur 6.15 Bepaling van β voor afleiding I	53
Figuur 6.16 Bepaling van η voor afleiding I	53
Figuur 6.17 Bepaling van λ voor afleiding I.....	54
Figuur 6.18 Bepaling van A voor afleiding I.....	54
Figuur 6.19 Vergelijking werkelijke c_u met $c_{u,\text{afleidingI}}$	55
Figuur 6.20 Bepaling van β voor afleiding IB.....	56
Figuur 6.21 Bepaling van η voor afleiding IB.....	56
Figuur 6.22 Bepaling van λ voor afleiding IB.....	56
Figuur 6.23 Bepaling van A voor afleiding IB.....	57
Figuur 6.24 Vergelijking van werkelijke c_u met $c_{u,\text{afleidingIB}}$	58
Figuur 6.25 Bepaling van β voor afleiding II	59
Figuur 6.26 Bepaling van η voor afleiding II	59
Figuur 6.27 Bepaling van A voor afleiding II	59
Figuur 6.28 Vergelijking van werkelijke c_u met $c_{u,\text{afleidingII}}$	60
Figuur 6.29 Bepaling van β voor afleiding IIB	61
Figuur 6.30 Bepaling van η voor afleiding IIB	61
Figuur 6.31 Bepaling van A voor afleiding IIB.....	61
Figuur 6.32 Vergelijking van werkelijke c_u met $c_{u,\text{afleidingIIB}}$	62
Figuur 6.33 Bepaling van β voor afleiding III.....	64
Figuur 6.34 Bepaling van η voor afleiding III.....	64
Figuur 6.35 Bepaling van λ voor afleiding III.....	64
Figuur 6.36 Bepaling van A voor afleiding III	65
Figuur 6.37 Vergelijking van werkelijke c_u met $c_{u,\text{afleidingIII}}$	66
Figuur 6.38 Overzicht locaties gebruikt ter verificatie	67
Figuur 6.39 Plasticiteitsgrafiek.....	68
Figuur 6.40 Activiteitsgrafiek	68
Figuur 6.41 Watergehalte versus volumieke massa	69
Figuur 6.42 Geroerde schuifsterkte versus liquiditeitsindex	69
Figuur 6.43 Relatie tussen liquiditeitsindex en verhouding w/w_L	70
Figuur 6.44 Schuifsterkte versus watergehalte.....	70
Figuur 6.45 Schuifsterkte versus organisch gehalte	71
Figuur 6.46 Schuifsterkte versus % < 2 μm	71
Figuur 6.47 Ongeroerde schuifsterkte versus verhouding w/w_L	75
Figuur 6.48 Groepering op basis van organisch gehalte.....	75



Figuur 6.49 Groepering op basis van organisch gehalte en korrelfractie	76
Figuur 6.50 Liquiditeitsindex versus geroerde schuifsterkte.....	77
Figuur 6.51 Schematisering verloop watergehalte en schuifsterkte	78
Figuur 6.52 Schematisering verloop watergehalte en schuifsterkte	78
Figuur 6.53 Toetsing groep3	79
Figuur 7.1 Liquiditeitsindex versus ongeroerde schuifsterkte.....	80
Figuur 7.2 Liquiditeitsindex versus ongeroerde schuifsterkte met bekende waarden voor de gevoeligheid	81
Figuur 7.3 Liquiditeitsindex versus geroerde schuifsterkte.....	81
Figuur 7.4 Gevoeligheid data versus benadering gevoeligheid Leroueil	82
Figuur 7.5 Verhouding $S_{t,afleiding}$ met S_t versus I_L	82
Figuur 7.6 Verhouding $S_{t,afleiding}$ met S_t versus c_u	83
Figuur 7.7 Correlatie tussen gevoeligheid en liquiditeitsindex, Skempton & Northey (1952)	83
Figuur 7.8 Gevoeligheid versus liquiditeitsindex	84
Figuur 7.9 Betrouwbaarheidsinterval 95% voor groep1.....	84
Figuur 7.10 Combinatiemogelijkheden voor berekening van de gevoeligheid	85
Figuur 7.11 Conversie vergelijking Leroueil van I_L naar w/w_L	87
Figuur 7.12 Benadering S_t voor groep1	88
Figuur 7.13 Benadering S_t voor groep2	88
Figuur 7.14 Benadering van S_t voor groep3	88
Figuur 7.15 Vergelijking benadering IV met IVB voor groep1	89
Figuur 7.16 Vergelijking combinatie IV met IVB voor groep2	89
Figuur 7.17 Vergelijking combinatie IV met IVB voor groep3	89
Figuur 7.18 Vergelijking van $S_{t,cor,IV}$ en werkelijke S_t	90
Figuur 8.1 Controlemogelijkheid watergehalte en volumegewicht.....	91
Figuur 8.2 Controlemogelijkheid consistentiegrenzen	92
Figuur 8.3 Controlemogelijkheid consistentiegrenzen	93
Figuur 8.4 Bepaling van de ongeroerde schuifsterkte en gevoeligheid.....	94

Lijst van tabellen

Tabel 2.1 Typische waarden voor de consistentiegrenzen voor 3 voornamen kleimineralen	7
Tabel 4.1 Invloedsfactoren voor de gevoeligheid (Quigley, 1980)	27
Tabel 5.1 Legenda behorende bij Figuur 5.1	30
Tabel 6.1 Uitkomst voor c_u voor afleiding I	55
Tabel 6.2 Uitkomst voor c_u voor afleiding IB	57
Tabel 6.3 Uitkomst voor c_u voor afleiding IIB	60
Tabel 6.4 Uitkomst voor c_u voor afleiding IIB	62
Tabel 6.5 Vergelijking uitkomst afleiding IB met IIB	63
Tabel 6.6 Uitkomst voor c_u voor afleiding III	65
Tabel 6.7 Legenda behorende bij Figuur 6.38	67
Tabel 6.8 Toetsing afleiding voor de ongeroerde schuifsterkte	72
Tabel 6.9 Toetsing afleiding voor de ongeroerde schuifsterkte	73

Bijlagen

Bijlage I: Consolidatie van een sliblaag

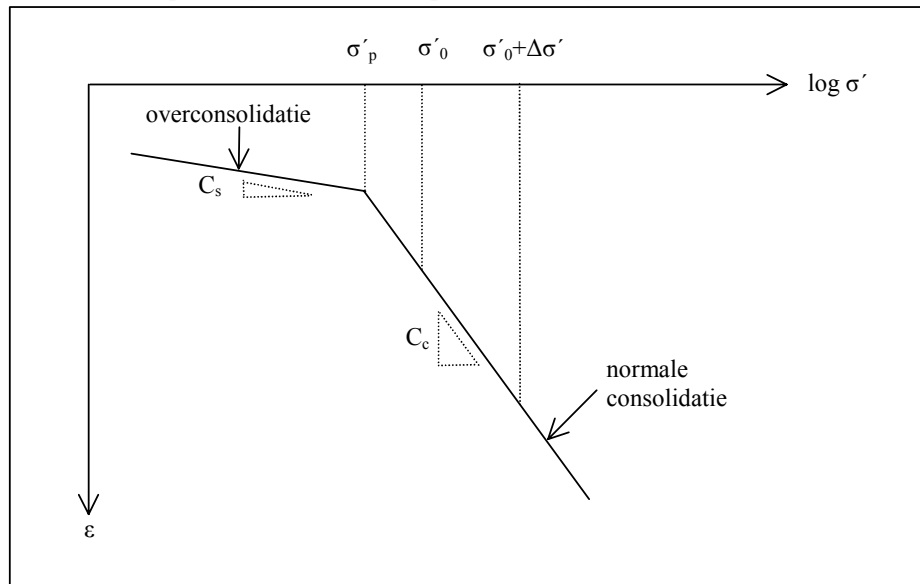
In deze bijlage wordt het proces van consolidatie beschouwd. Dit wordt gedaan aan de hand van eenvoudige voorbeelden: vanuit de theorie van consolidatie van een kleilaag tussen twee zandlagen wordt gekeken naar de consolidatie van sliblagen. Verscheidene onderzoekers hebben onderzoek verricht naar consolidatie van sliblagen: Gibson [1967], Schiffman, Pane & Sunara [1985], Been & Sills [1981] en Toorman [1996]. In deze paragraaf worden de theorieën van genoemde auteurs niet behandeld, maar wordt een beschouwing gegeven van spanningsontwikkeling in sliblagen en de invloed daarvan op de schuifsterkte van het slib.

Dubbelzijdige drainage van kleilaag

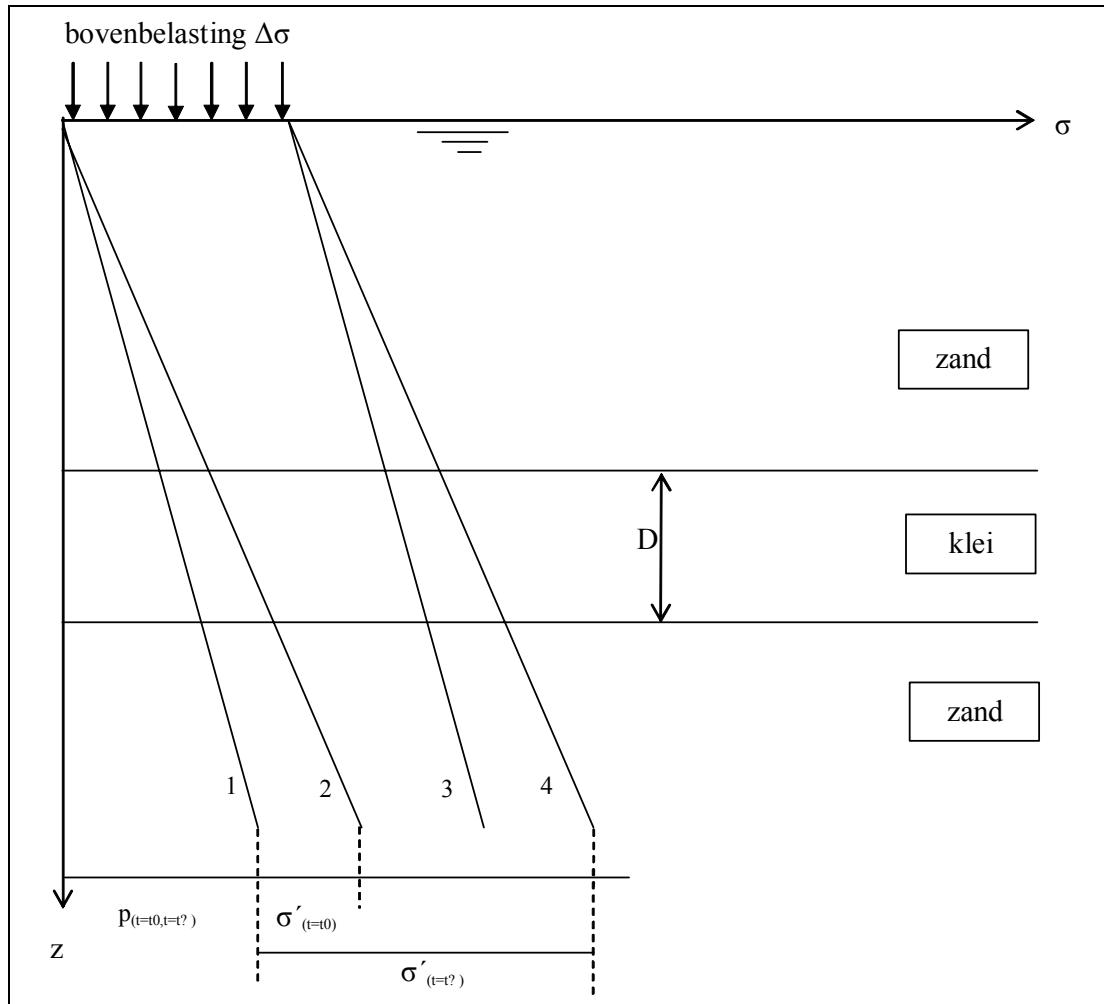
Onder consolidatie wordt verstaan het veranderen van het poriënvolume in het slib t.g.v. totaalspanningsveranderingen, waarbij het poriënwater toe- of afstroomt. De meer gebruikelijke betekenis betreft de verkleining van het poriënvolume t.g.v. het eigen gewicht of een bovenbelasting, waarbij het poriënwater afstroomt; het tegengestelde proces, toename van het poriënvolume, wordt zwel genoemd ofwel negatieve consolidatie.

In deze paragraaf wordt een voorbeeld geschetst van consolidatie van een kleilaag zich bevindend tussen twee zandlagen. Bij dit voorbeeld wordt een tweetal aannamen gedaan:

- alleen primaire rek wordt beschouwd
- σ'_0 (effectieve spanning) bevindt zich op de normaal geconsolideerde tak



Figuur I.1 Karakteristiek verloop tussen effectieve spanning en rek



Figuur I.2 Spanningsverloop in de tijd bij toename bovenbelasting

Verklaring lijnen:

1. verloop waterspanning op $t = t_0$ voordat bovenbelasting is aangebracht, verloop waterspanning op $t = t_\infty$
2. verloop grondspanning op $t = t_0$ voordat bovenbelasting is aangebracht
3. verloop waterspanning kort nadat bovenbelasting is aangebracht
4. verloop grondspanning kort nadat bovenbelasting is aangebracht, verloop grondspanning op $t = t_\infty$

Voor de primaire rek op $t = t_\infty$ geldt:

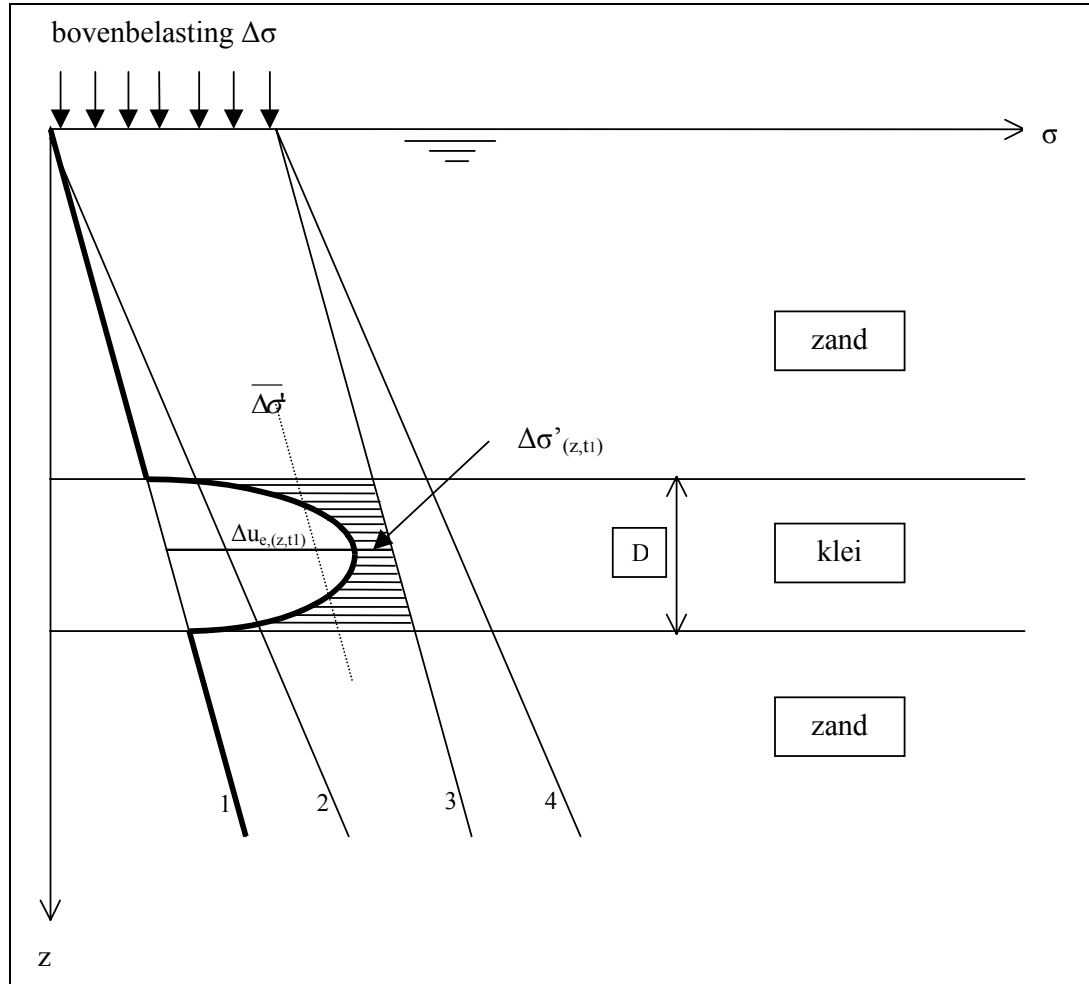
$$\varepsilon_{p,t_\infty} = \frac{1}{1 + e_0} C_c \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right)$$

$$\begin{array}{ll} e_0 & \text{void ratio bij } \sigma'_0 \quad [-] \\ \sigma'_0 & \text{gemiddelde korrelspanning van laag D} \quad [\text{kN/m}^2] \end{array}$$

Voor de eindzetting geldt:

$$\text{zetting: } S = \int_0^D \varepsilon dz = D \varepsilon$$

In onderstaande figuur is het verloop van de waterspanningen en effectieve spanningen gegeven voor $t = t_1$.



Figuur I.3 Verloop van water- en effectieve spanningen gedurende consolidatieproces

Verklaring lijnen:

1. verloop waterspanning op $t = t_1$
2. verloop grondspanning op $t = t_0$ voordat bovenbelasting is aangebracht
3. verloop waterspanning net nadat bovenbelasting is aangebracht
4. verloop grondspanning op $t = t_1$

De zetting op $t = t_1$ kan op de volgende wijze berekend worden:

$$t \rightarrow t_{\infty}, \varepsilon \rightarrow \varepsilon_{p,t_{\infty}}$$

$$t = t_1: \varepsilon_{t1} = \frac{1}{1+e_0} C_c \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'_{t1}(z)}{\sigma'_0} \right)$$

$$S = \int_0^D \varepsilon_{t1} dz = \int_0^D \frac{1}{1+e_0} C_c \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma'_{t1}(z)}{\sigma'_0} \right) dz$$

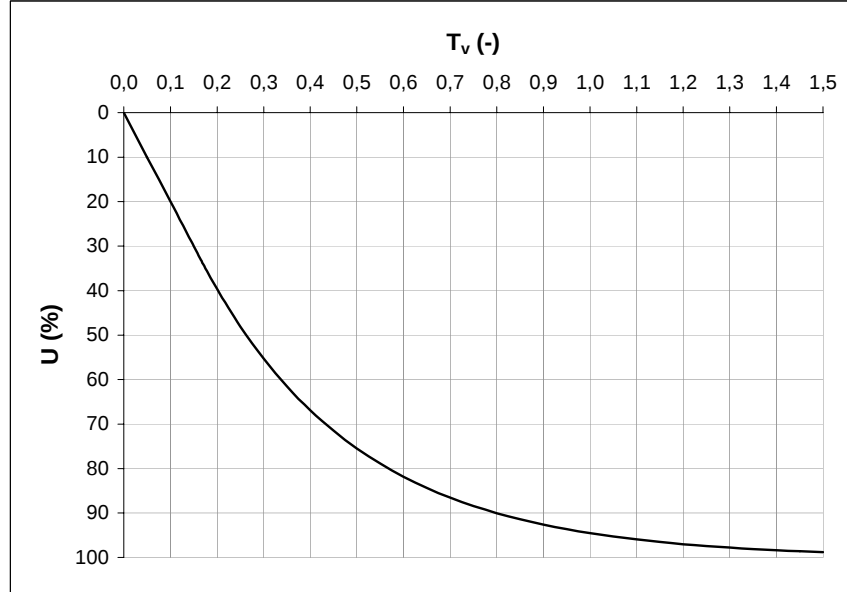
Oplossing van deze integraal is mogelijk via een Laplace-transformatie. De integraal is echter ook oplosbaar wanneer er een aanname gedaan wordt voor de verandering in effectieve spanning.



$$\overline{\Delta\sigma'_{t1}} \therefore \overline{U_{t1}}, \text{ met } \overline{U} = \text{gemiddelde consolidatiegraad}$$

$$\overline{\Delta\sigma'_{t1}} = \overline{U} \Delta\sigma$$

De gemiddelde consolidatiegraad volgt uit onderstaande figuur:



Figuur I.4 Relatie tussen gemiddelde consolidatiegraad en tijdfactor voor enkelzijdige drainage

In Figuur I.4 is T_v een dimensieloze tijdfactor: $T_v = \frac{c_v t}{h^2} \quad [-]$

met t tijd [s]
 h drainage lengte [m]
 c_v consolidatiecoëfficiënt [m^2/s]

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} \quad [m^2/s]$$

k doorlatendheid [m/s]
 γ_w volumieke gewicht water [kN/m^3]
 m_v samendrukkingscoëfficiënt [m^2/kN]

Voor de kromme in Figuur I.4 geldt:

$$U = \frac{2c_v t}{d^2} = 2T_v \text{ voor } T_v < \frac{1}{6} \quad \text{en} \quad U = 1 - \frac{2}{3} e^{\left(\frac{1}{2} - 3T_v\right)} \text{ voor } T_v > \frac{1}{6}$$

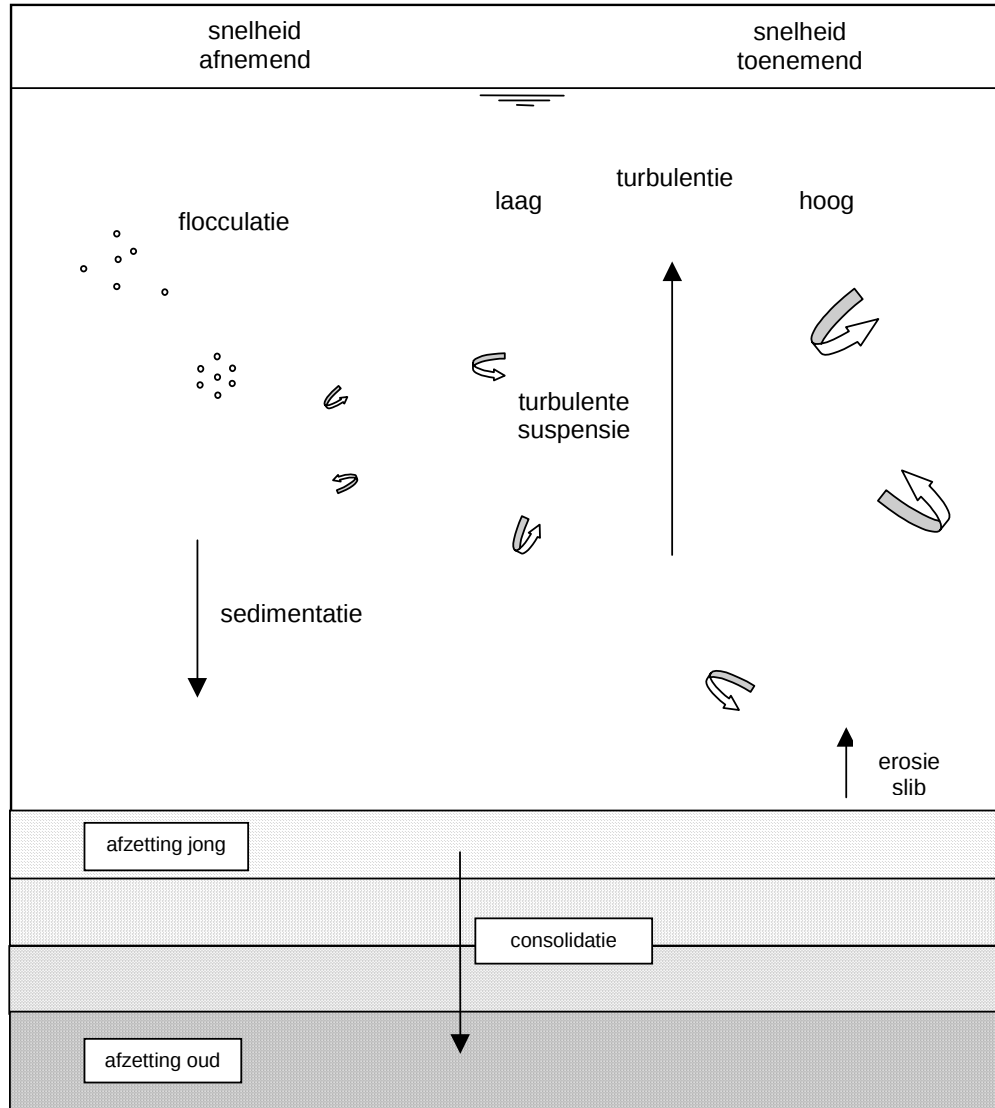
De zetting kan dan berekend worden volgens:

$$S \approx \int_0^D \frac{1}{1+e_0} C_c \log \left(\frac{\sigma'_0 + U \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right) dz$$

$$S_{t=1} \approx D \frac{1}{1+e_0} C_c \log \left(\frac{\sigma'_0 + U \Delta\sigma}{\sigma'_0} \right)$$

Situatie voor afzetting slib

Analoog aan de afleiding van consolidatie van een kleilaag wordt nu de situatie voor een sliblaag afgeleid. Deze beschouwing is driedelig: eerst wordt de ontwikkeling van water- en korrelspanning in de sliblaag afzonderlijk beschouwd. Vervolgens wordt de ontwikkeling van water- en korrelspanning in de kleilaag beschouwd. Daarna wordt een combinatie van beide beschouwd.



Figuur I.5 Geïdealiseerd overzicht bepalende processen

Voor de sterk geschematiseerde sliblagen in Figuur I.5 geldt:

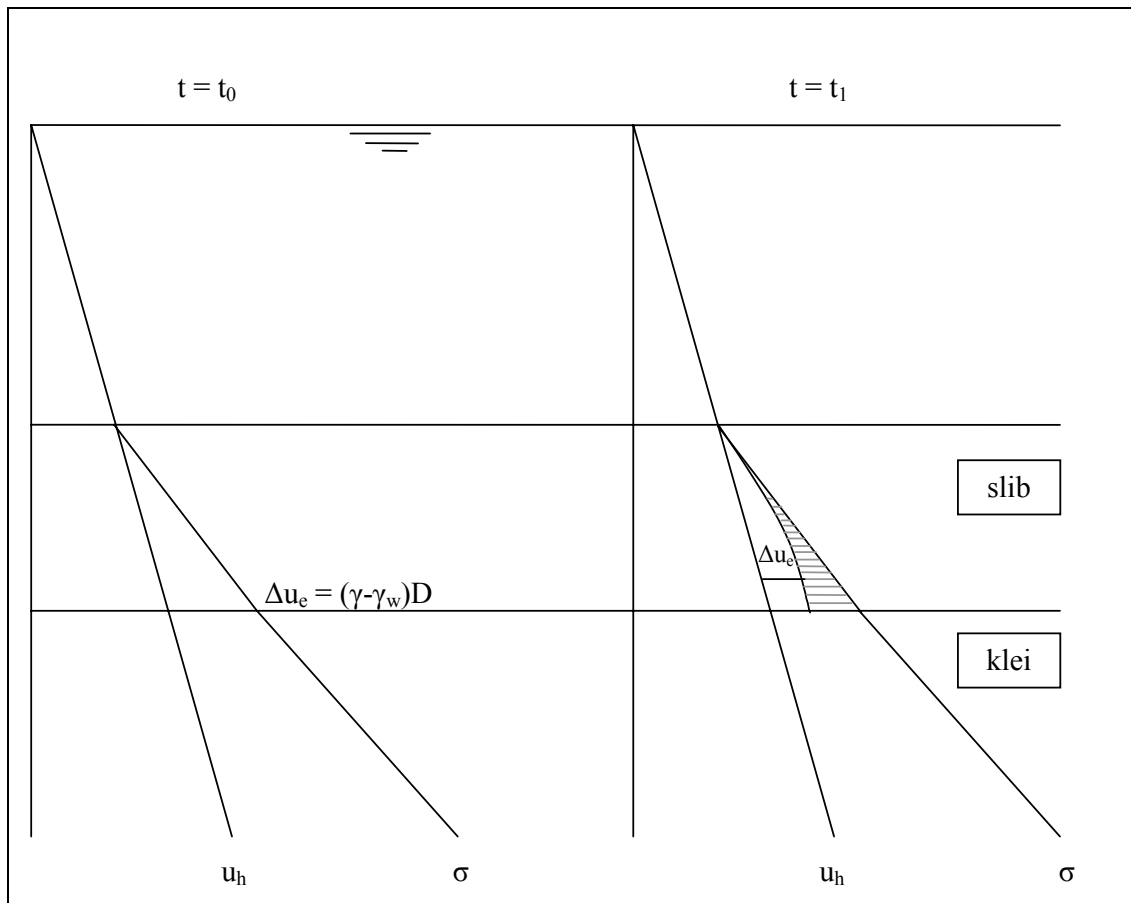
	γ	k	η	m_v
water	γ_w			
sliblaag 3	$\gamma_{s3} > \gamma_w$	k_{s3}	η_{s3}	$m_{v,s3}$
sliblaag 2	$\gamma_{s2} > \gamma_{s3}$	$k_{s2} < k_{s3}$	$\eta_{s2} < \eta_{s3}$	$m_{v,s2} < m_{v,s3}$
sliblaag 1	$\gamma_{s1} > \gamma_{s2}$	$k_{s1} < k_{s2}$	$\eta_{s1} < \eta_{s2}$	$m_{v,s1} < m_{v,s2}$
kleilaag	$\gamma_k > \gamma_{s1}$	$k_k < k_{s1}$	$\eta_k < \eta_{s1}$	$m_{v,k} < m_{v,s1}$

met:

γ	volumegewicht	$[kN/m^3]$
k	doorlatendheidscoëfficiënt	$[m/s]$
η	viscositeit	$[kN/m]$
m_v	samendrukkingscoëfficiënt	$[m^2/kN]$

Beschouwing sliblaag

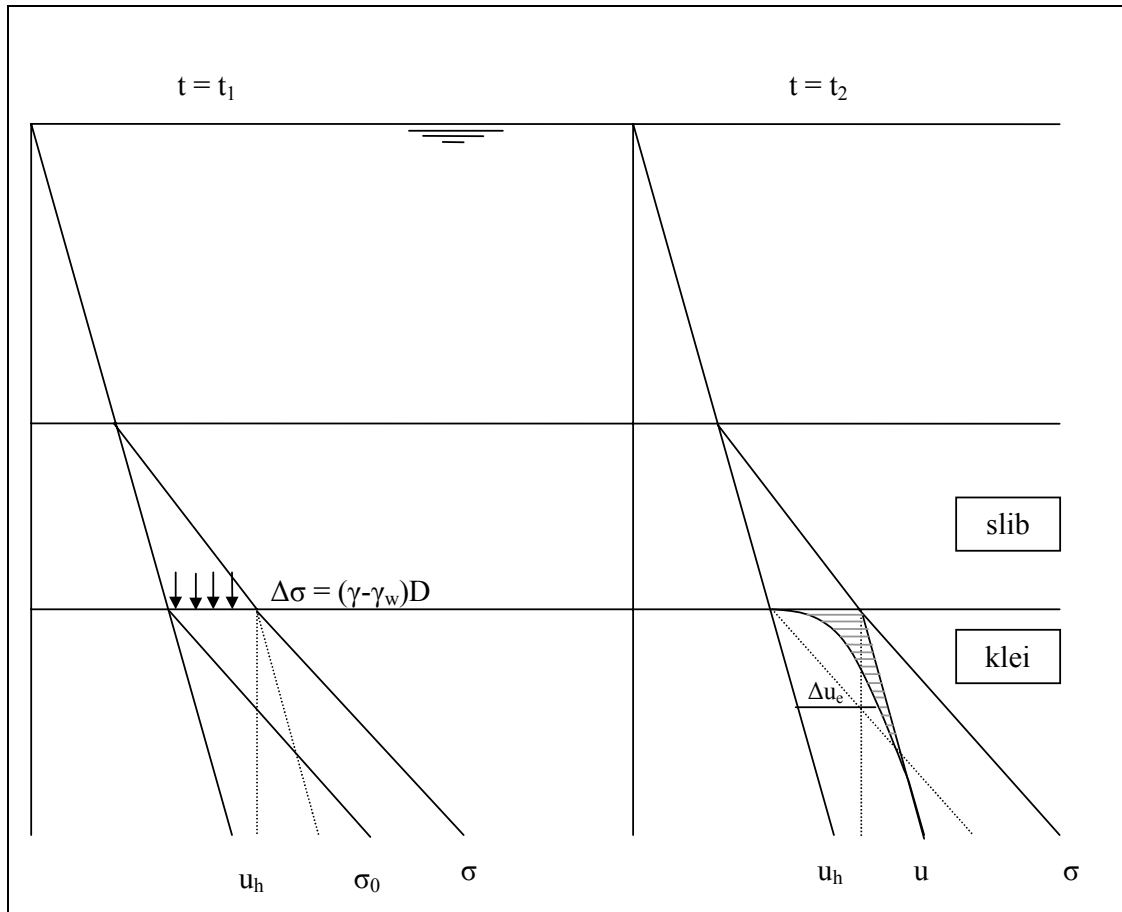
- afzetting sliblaag op kleilaag
- kleilaag wordt als ondoorlatend beschouwd, drainage vindt plaats aan bovenzijde
- op moment van afzetting geldt voor de wateroverspanning: $\Delta u_e = (\gamma - \gamma_w)D$



Figuur I.6 Verloop van water overspanning in de tijd in de sliblaag

Beschouwing kleilaag

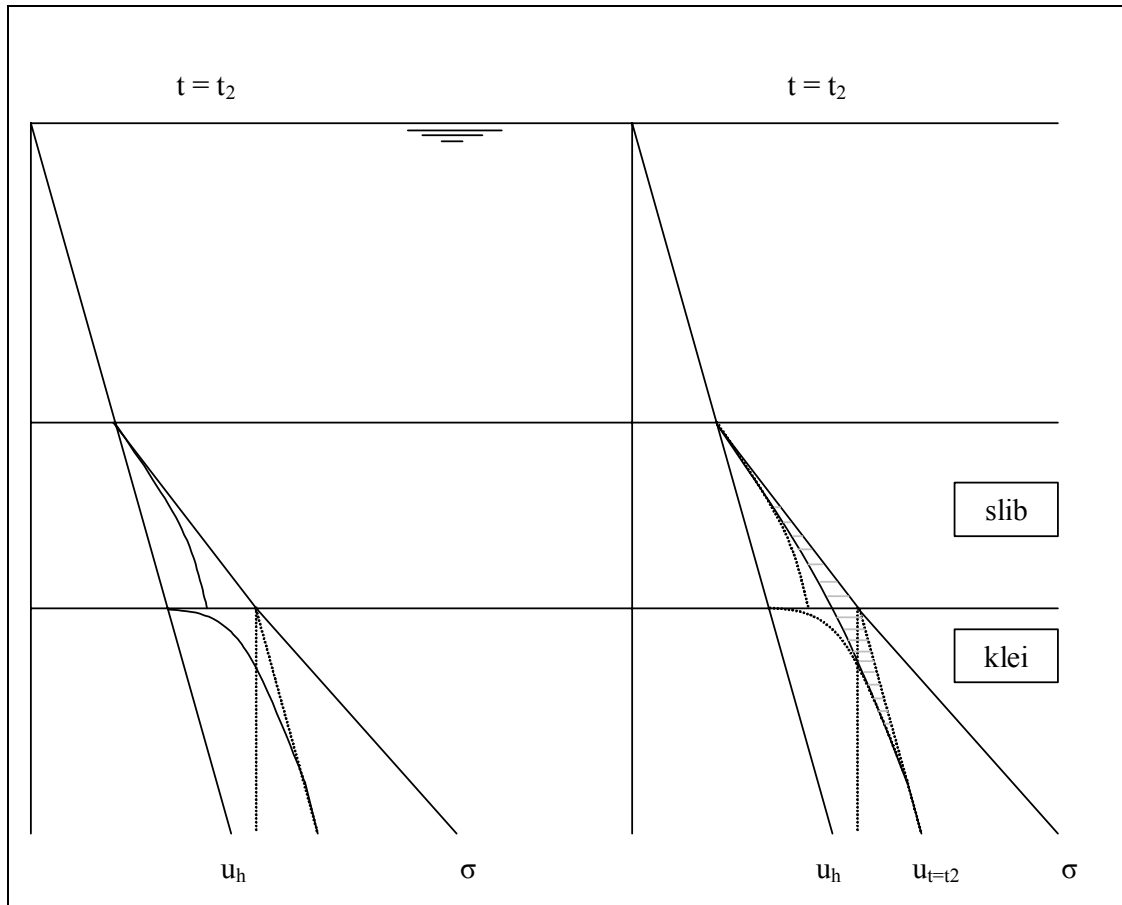
- afzetting sliblaag op kleilaag
- kleilaag wordt beschouwd op het moment dat er geen wateroverspanning in sliblaag aanwezig meer is
- de bovenbelasting is dan $\Delta \sigma = (\gamma - \gamma_w)D$
- kleilaag draineert aan bovenzijde af; kleilaag draineert aan benedenzijde af op zandlaag, maar er wordt aangenomen dat de dikte van de kleilaag groot is en de afname van wateroverspanning aan de benedenzijde wordt niet weergegeven in de figuur.



Figuur I.7 Verloop wateroverspanning in de tijd in de kleilaag

Beschouwing combinatie van kleilaag en sliblaag

Een combinatie van de figuren voor de sliblaag en de kleilaag is weergegeven in het linker deel van de volgende figuur. Omdat de gradienten op de scheiding tussen kleilaag en sliblaag vanwege continuïteit gelijk zijn, wordt het verloop van de waterspanningen weergegeven door de lijn $u_{t=2}$



Figuur I. 8 Waterspanning verloop bij beschouwing combinatie klei en sliblaag

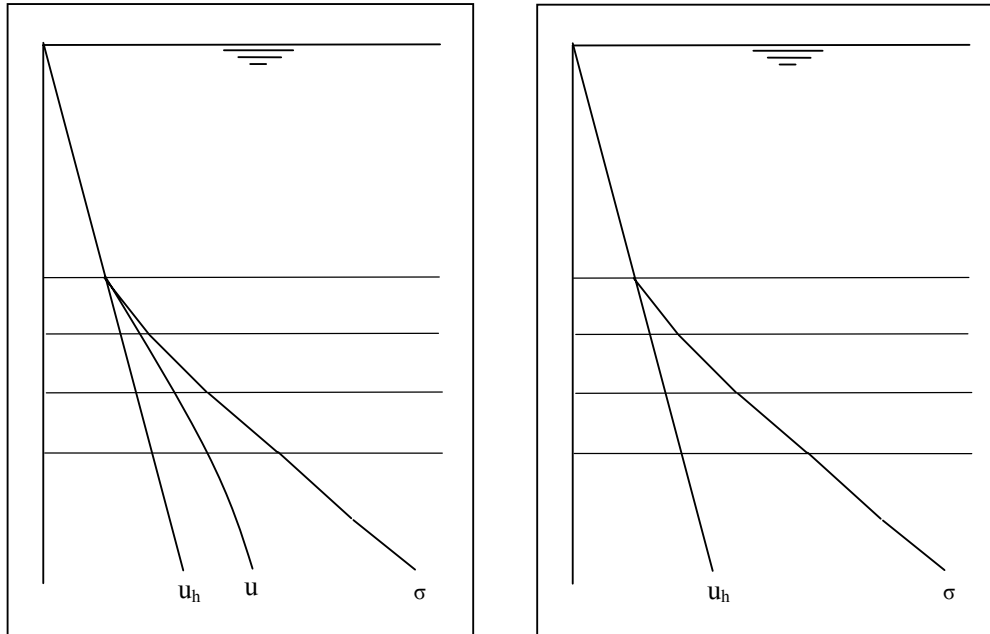
Deze vereenvoudigde beschrijvingen leiden tot het inzicht dat een belangrijke parameter bij het proces van consolidatie de sedimentatiesnelheid is. Onderscheid kan worden gemaakt tussen gebieden met een grote sedimentatiesnelheid (v_s) en gebieden met een geringe sedimentatiesnelheid.

Grote sedimentatiesnelheid:

- snelle afzetting opeenvolgende sliblagen
- door de snelle opeenvolgende afzetting heeft het poriewater onvoldoende tijd om af te stromen: gevolg is een wateroverspanning (de waterspanning is groter dan de hydrostatische waterspanning ($= \gamma_w \cdot z$))
- onderconsolidatie
- de toename van de effectieve spanning door de toename van de bovenbelasting (ten gevolge van sedimentatie) is in de sliblagen dus kleiner dan de toename van de bovenbelasting
- het gevolg van de wateroverspanning voor de grootte van de schuifsterkte is dat deze geringer is dan bij normale consolidatie

Geringe sedimentatiesnelheid:

- langzame afzetting opeenvolgende sliblagen
- door langzame afzetting heeft het poriewater voldoende tijd om af te stromen
- normaal geconsolideerd
- de toename van de effectieve spanning door de toename van de bovenbelasting is in de sliblagen gelijk aan de toename van de bovenbelasting



Figuur I. 9 Spanningverloop bij grote sedimentatiesnelheid (links) en geringe sedimentatiesnelheid (rechts)

Voor de schuifsterkte in een sliblaag spelen de sedimentatiesnelheid en de graad van consolidatie een belangrijke rol. Theoretisch kan klei alleen volledig geconsolideerd zijn bij oneindig langzame afzettingen, maar in de praktijk kan 95% consolidatie beschouwd worden als voldoende nauwkeurige benadering:

Gibson [1958]: $U = 95\%$ geldt als $\frac{c_v}{v_s d} > 10$

met:

v_s sedimentatiesnelheid [m/jaar]
 d laagdikte [m]
 c_v consolidatiecoëfficiënt [m^2 /jaar]

$$c_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} \text{ [m/s]}$$

met:

k doorlatendheidscoëfficiënt [m/s]
 m_v samendrukkingscoëfficiënt [m^2 /kN]

$$m_v = \frac{\text{eindzakking}}{\text{laagdikte} * \text{bovenbelasting}}$$

Door Lambe [1979] wordt het einde van primaire consolidatie als volgt geformuleerd:

$$t_{92\%} = \frac{\rho_w g m_v d^2}{k}$$

met:

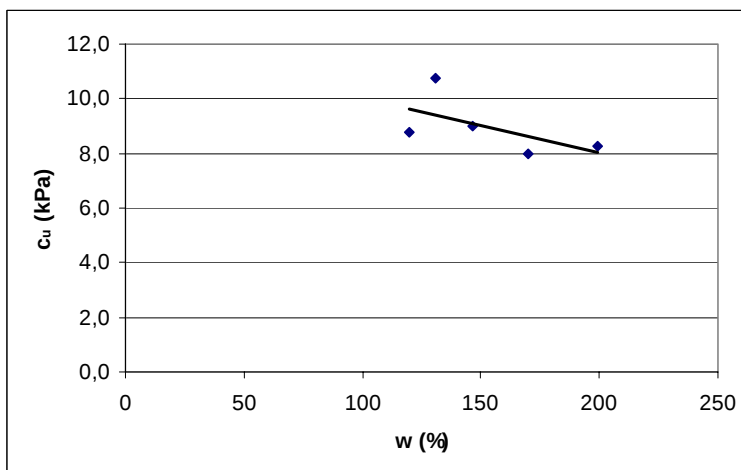
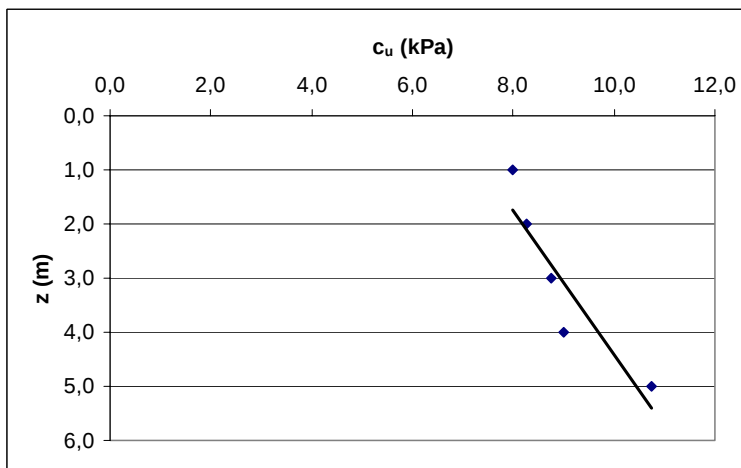
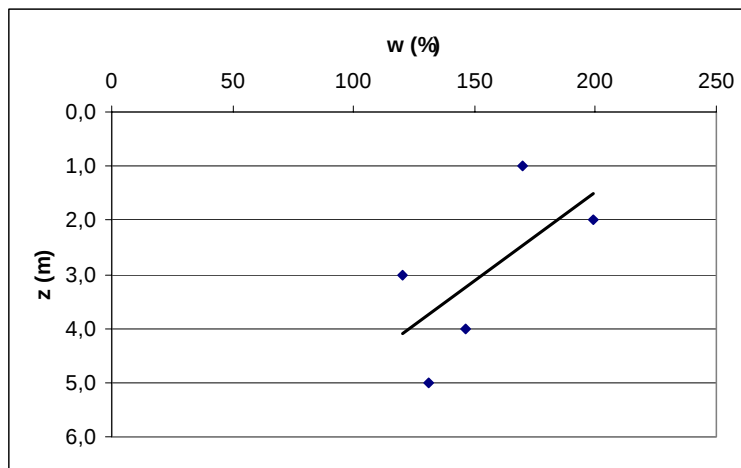
$t_{92\%}$ tijd waarop 92% van consolidatie voltooid is

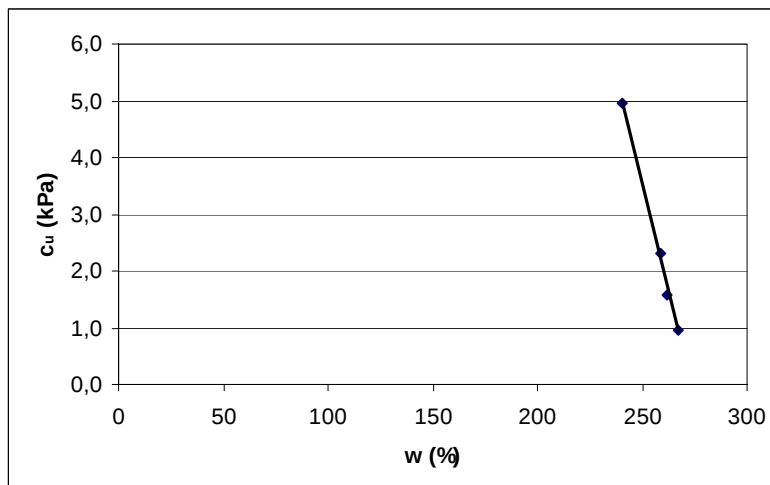
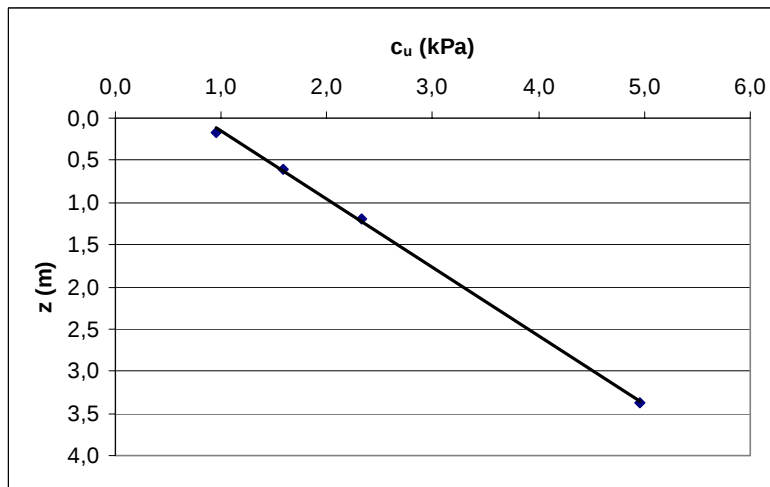
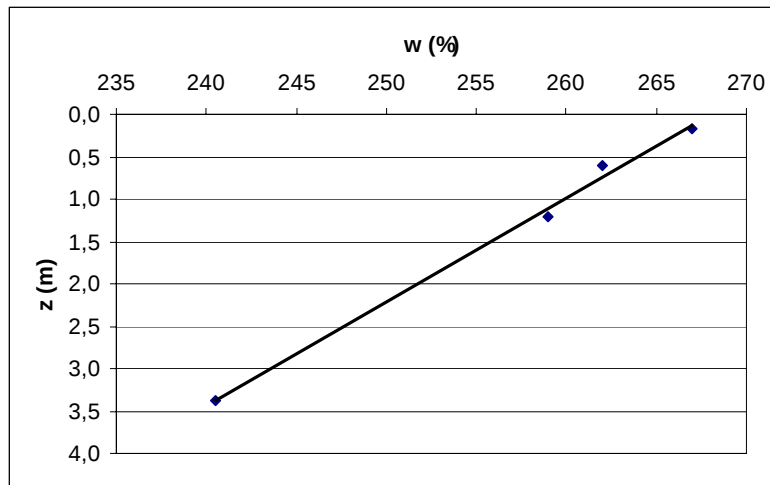
Samenvattend kan gesteld worden dat bepalend voor consolidatie zijn:

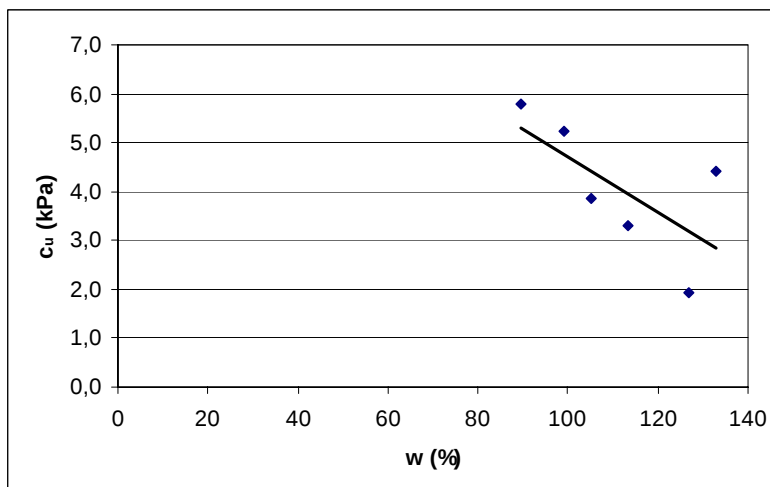
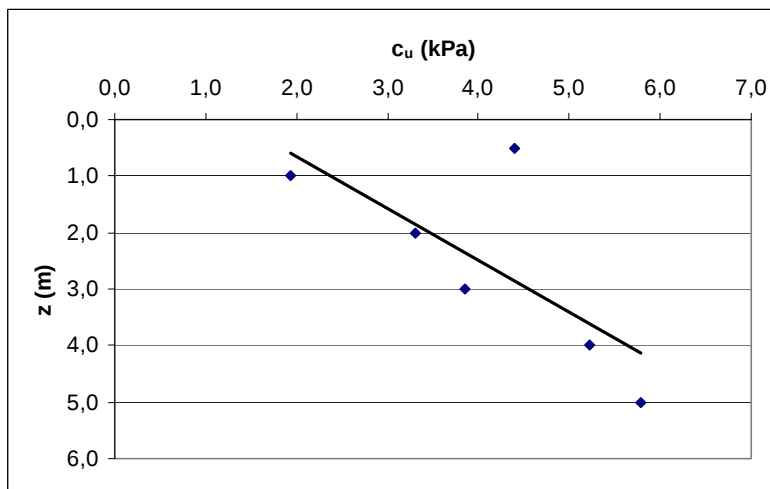
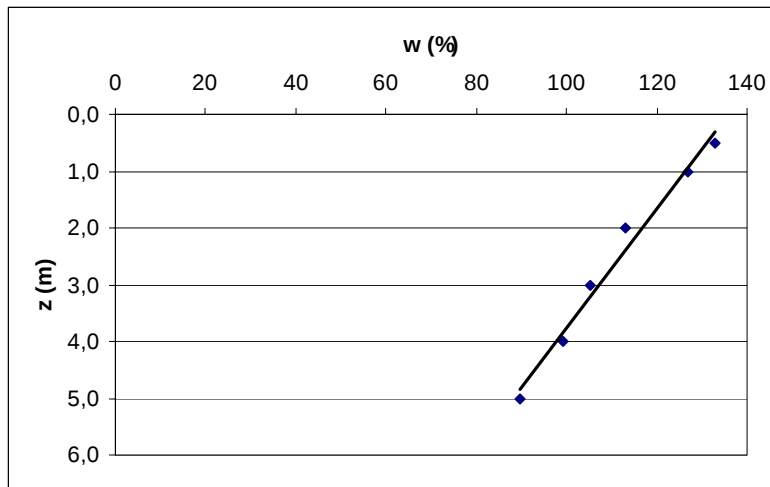
- de snelheid waarmee er materiaal wordt afgezet
- de laagdikte
- de consolidatie eigenschappen van het slib

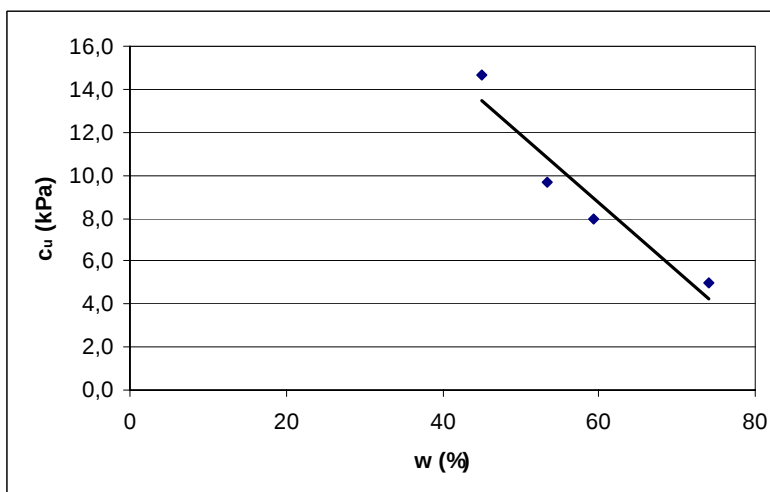
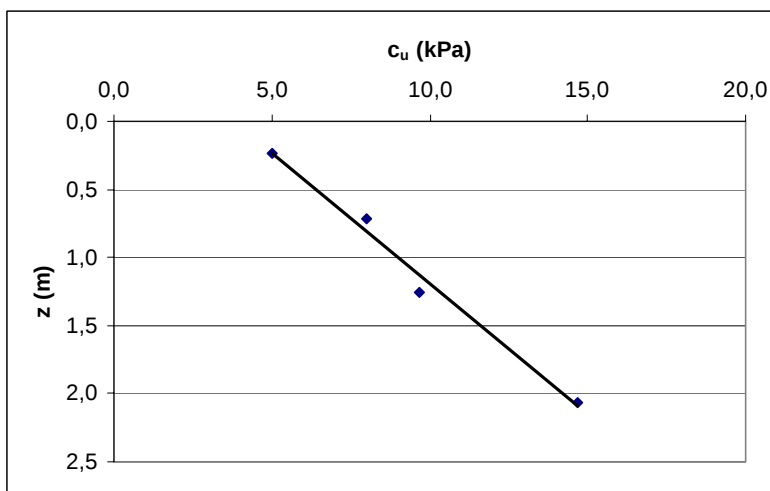
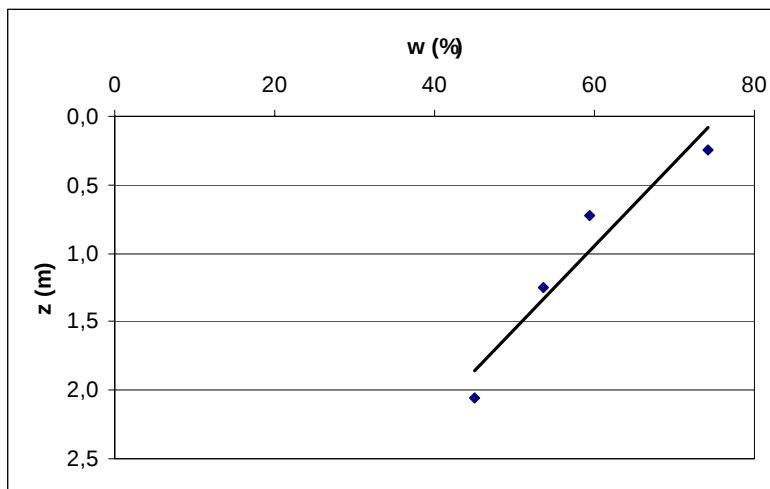
Bijlage II: Dataverzameling

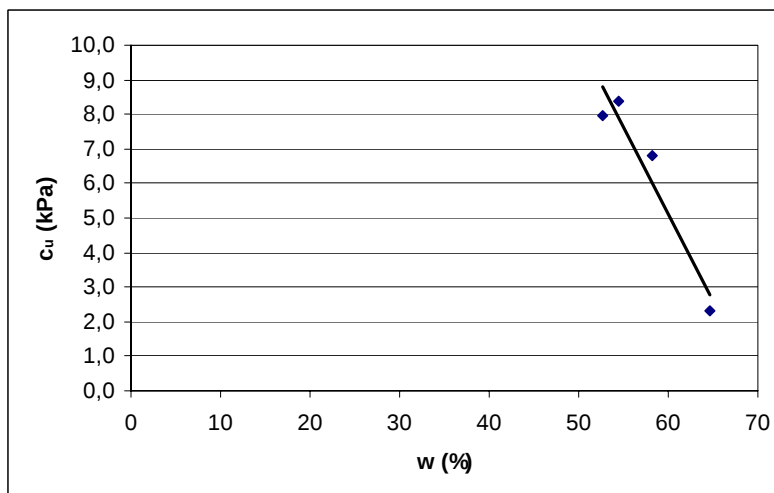
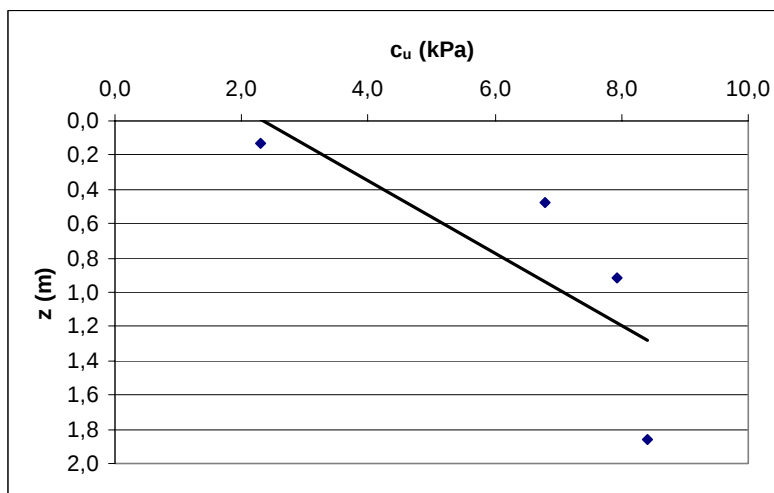
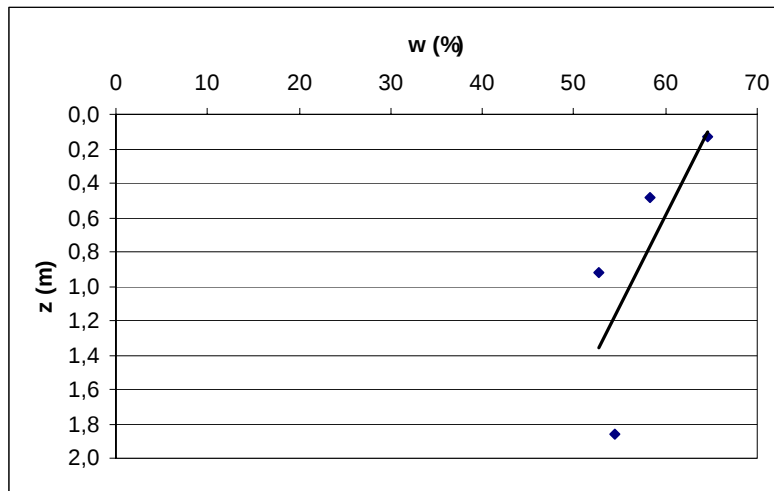
Bijlage III: Relaties tussen watergehalte, schuifsterkte en diepte

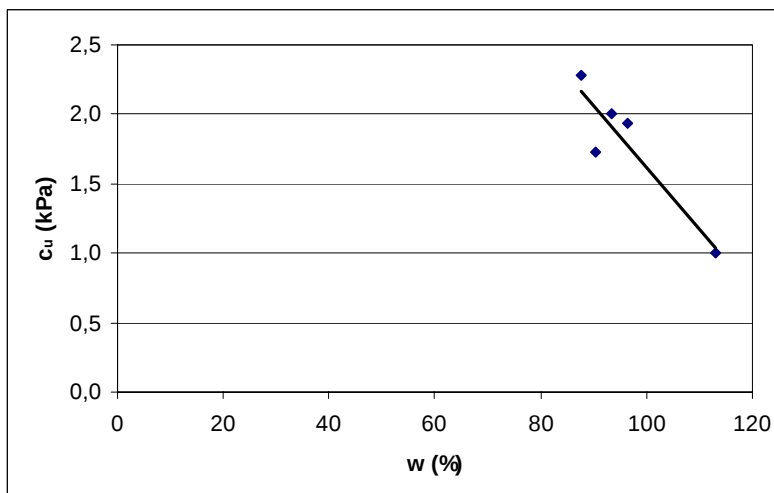
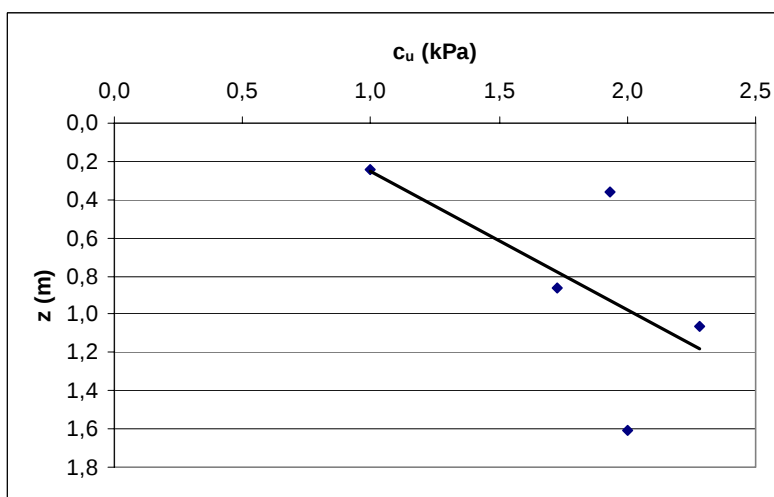
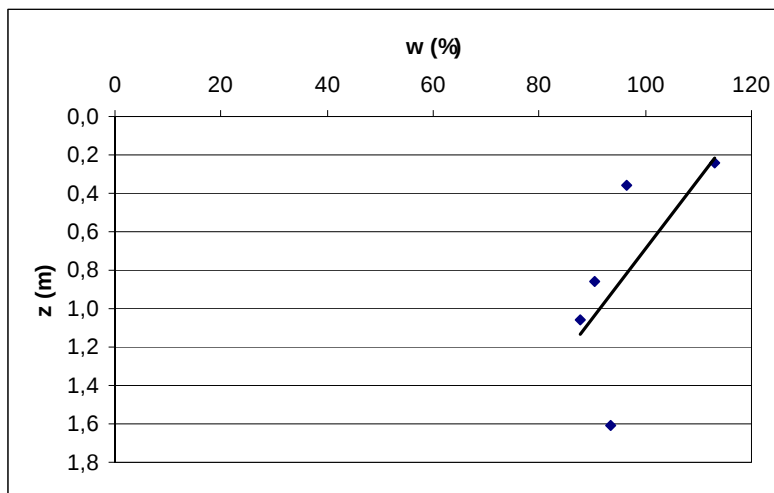


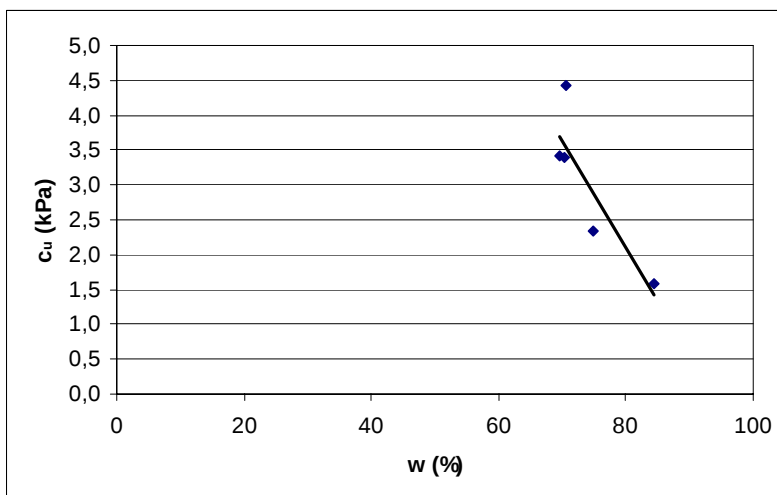
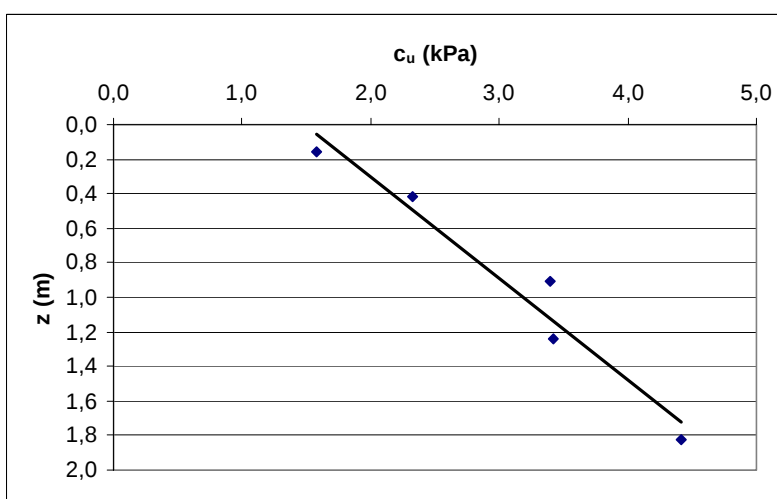
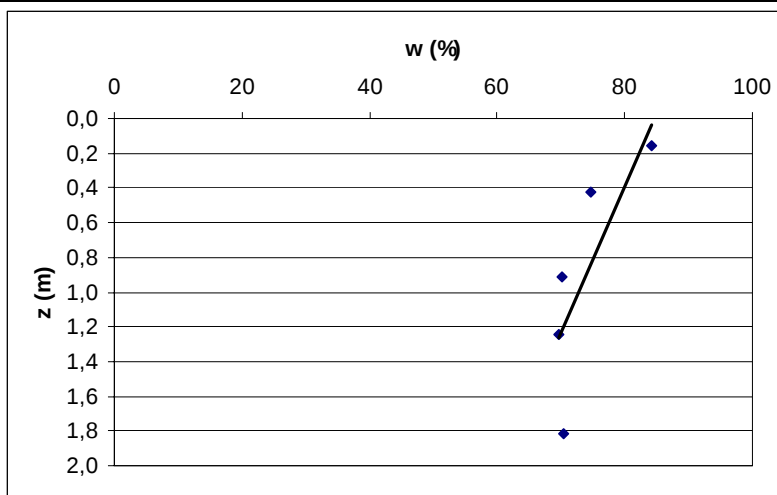


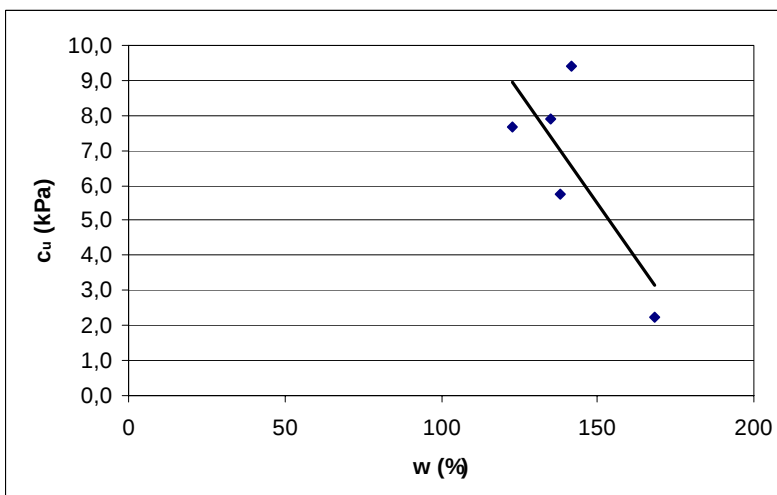
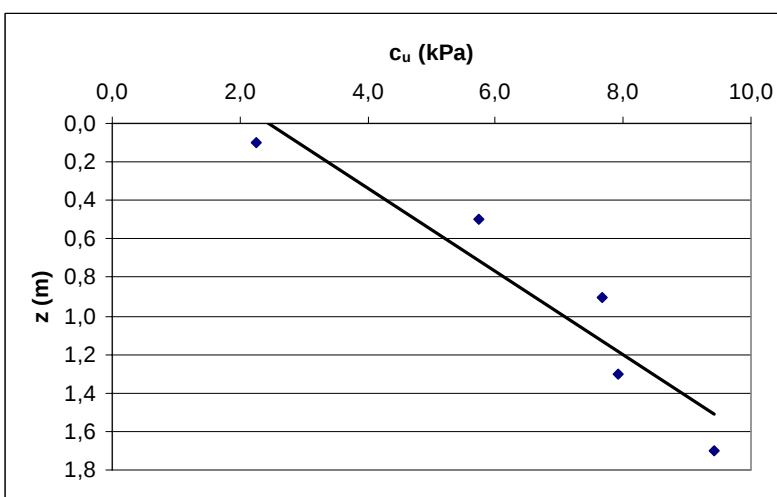
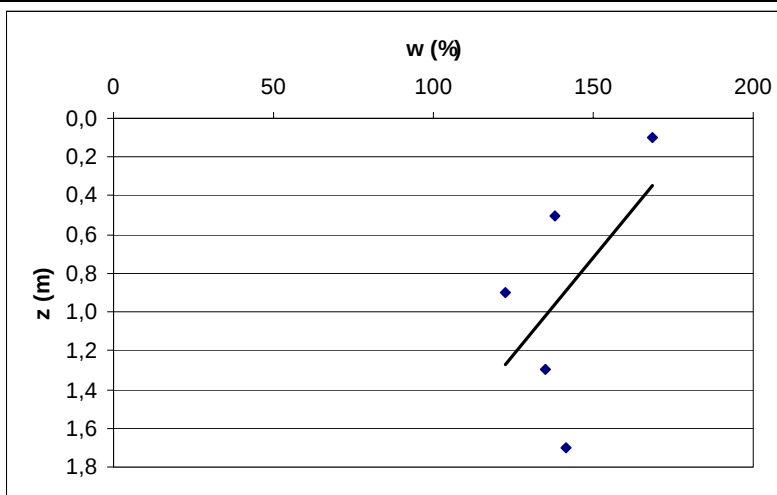


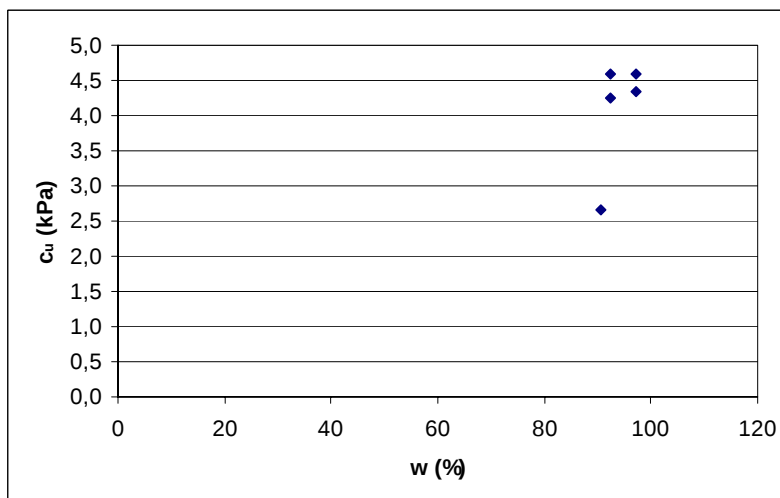
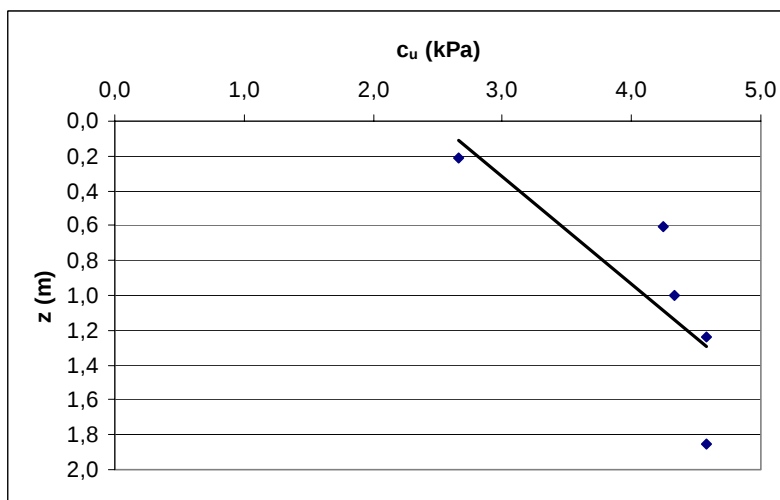
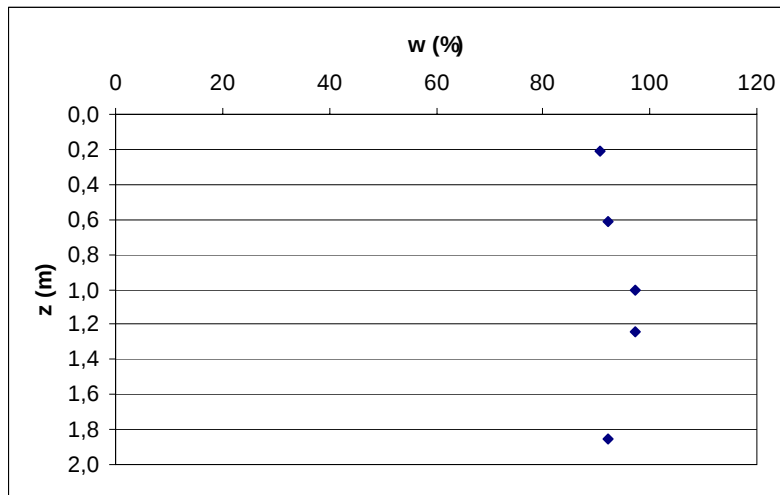


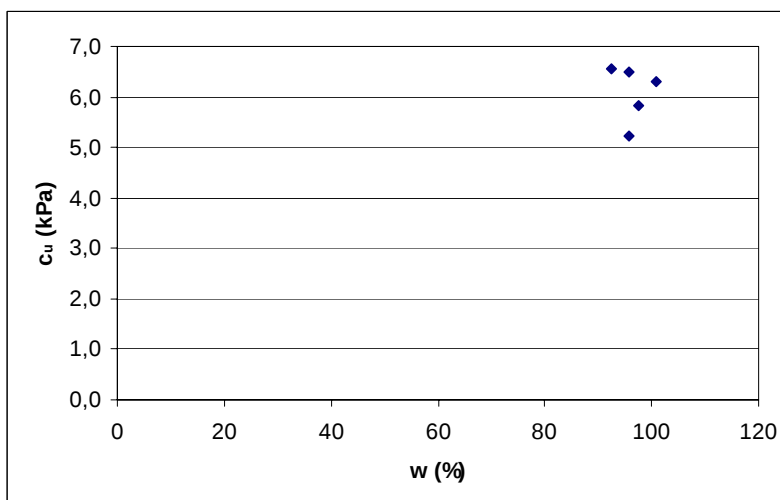
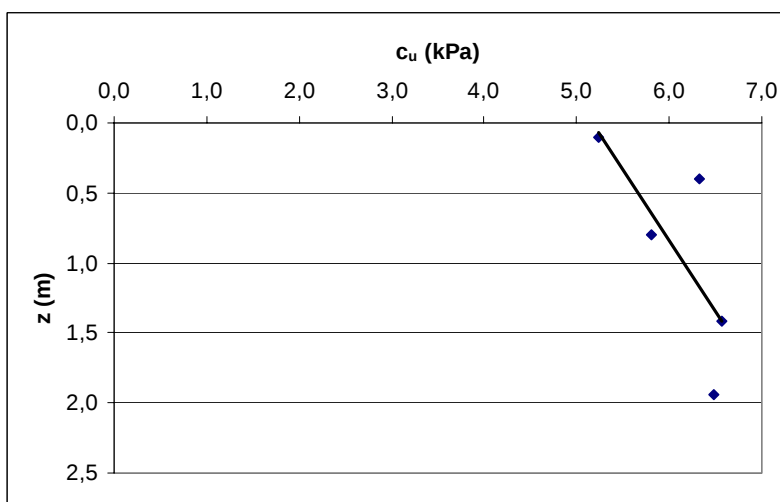
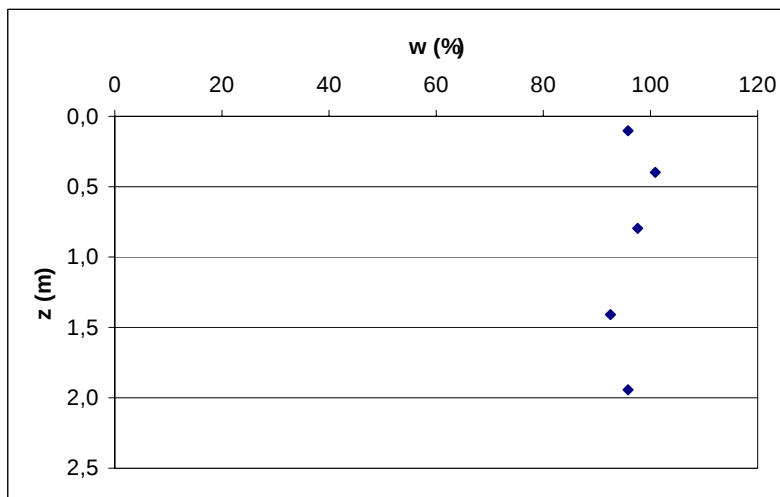


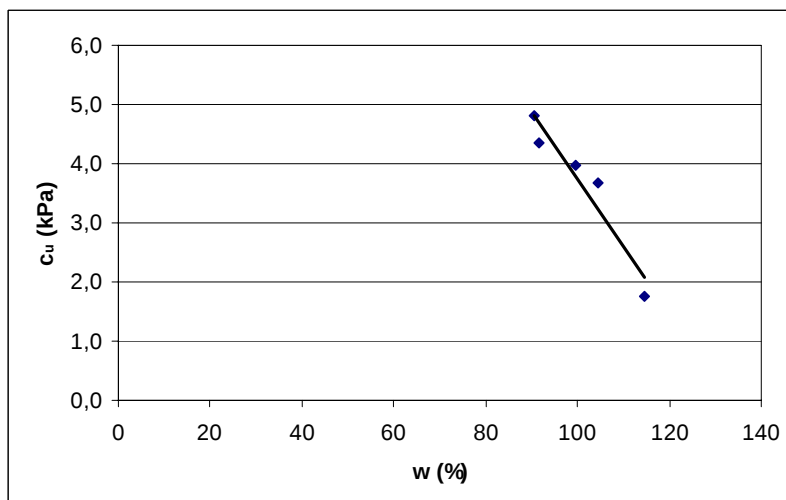
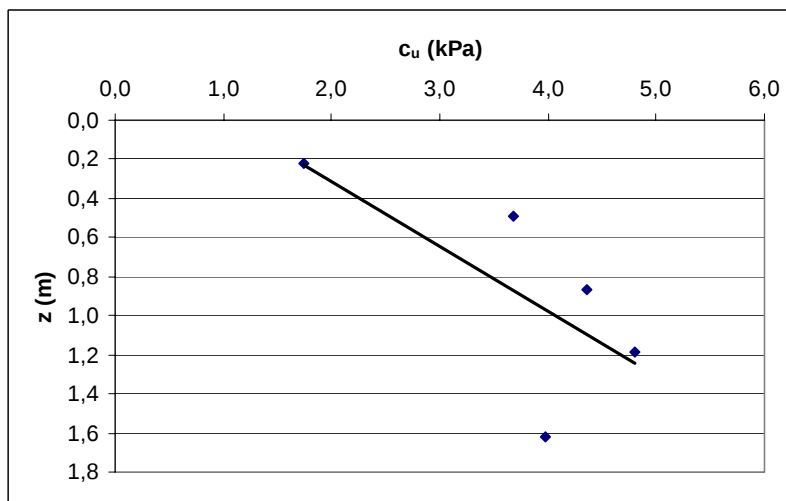
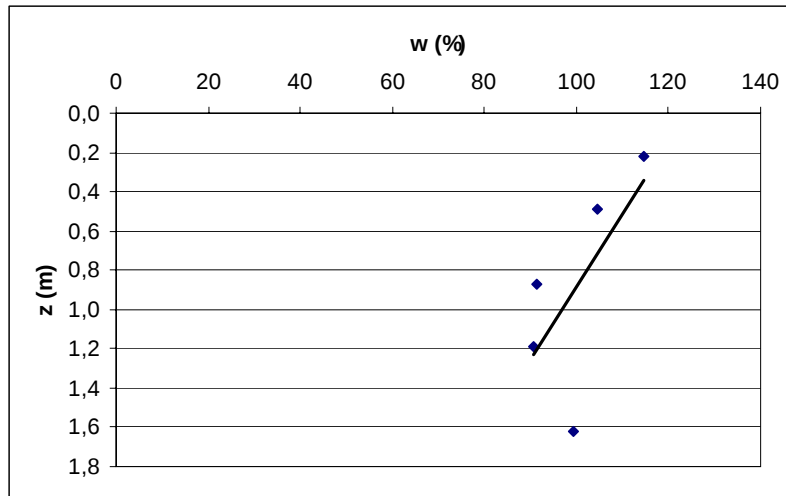


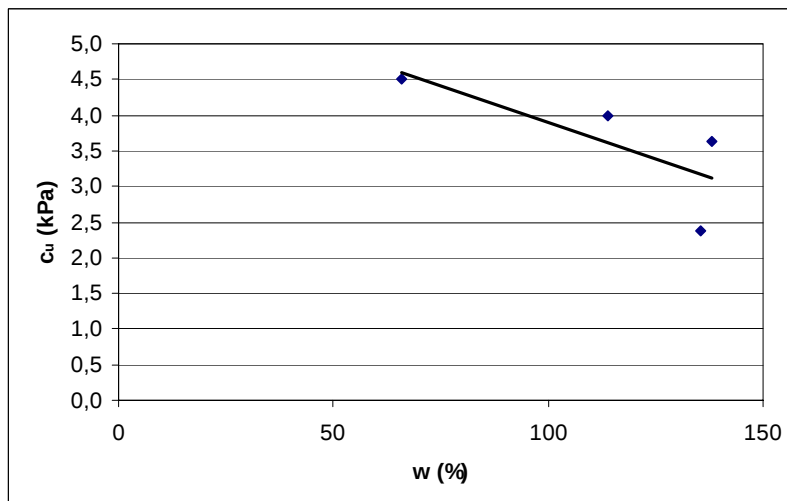
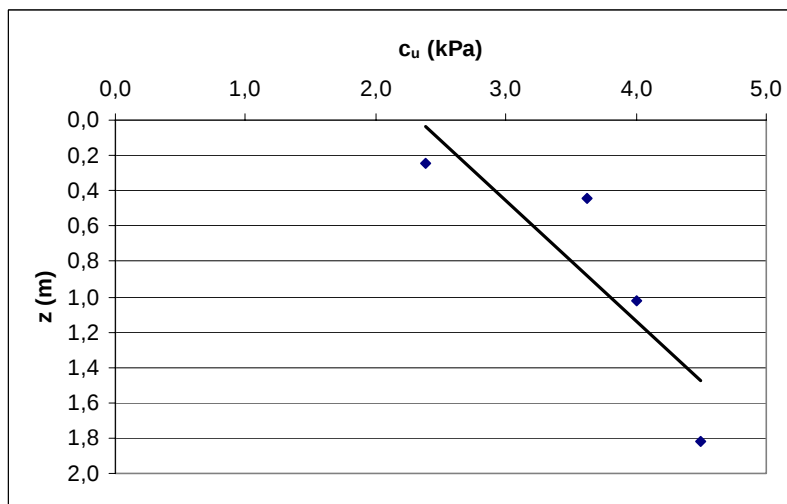
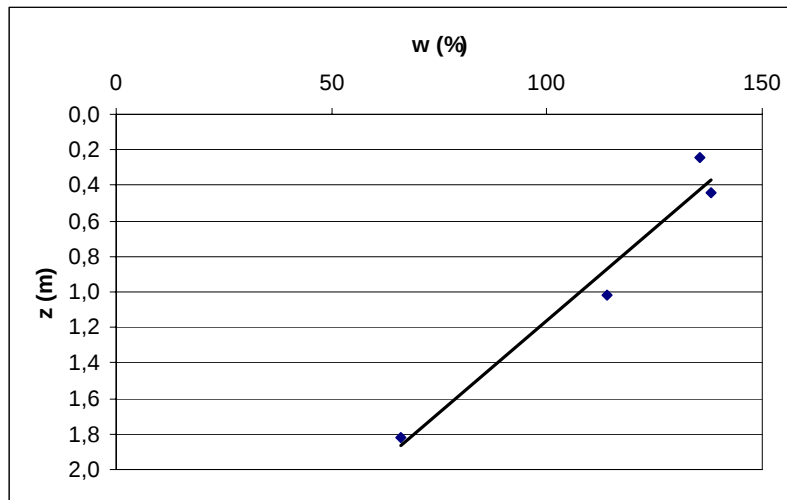


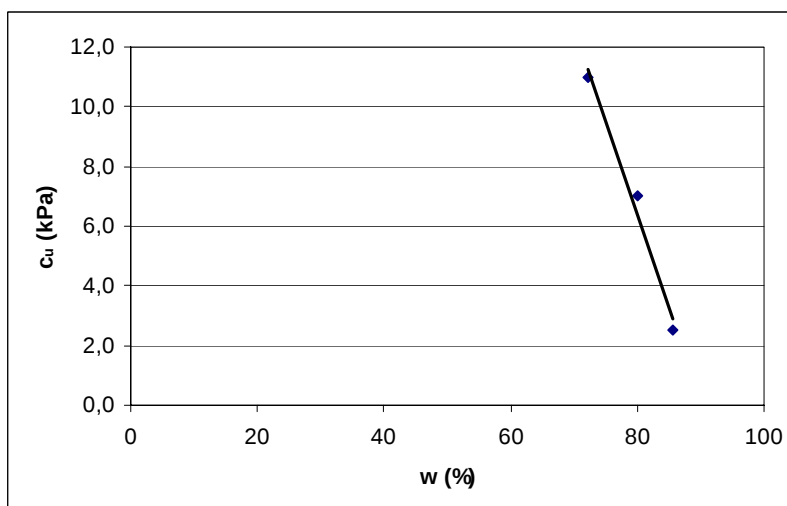
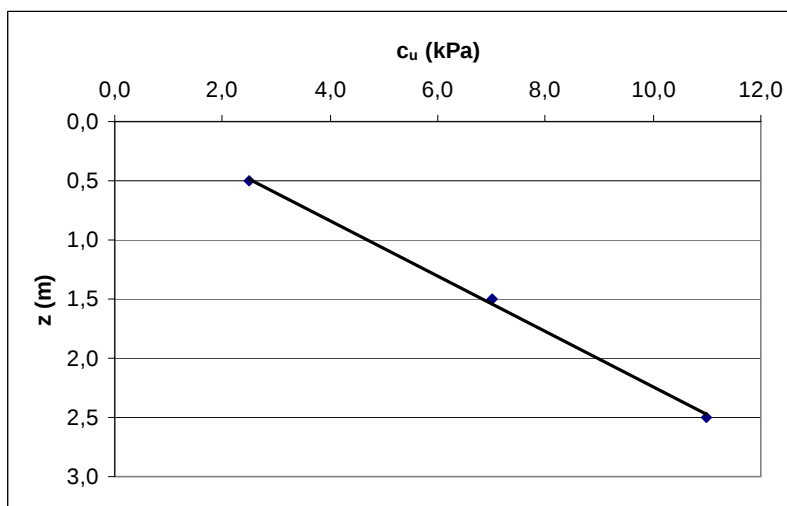
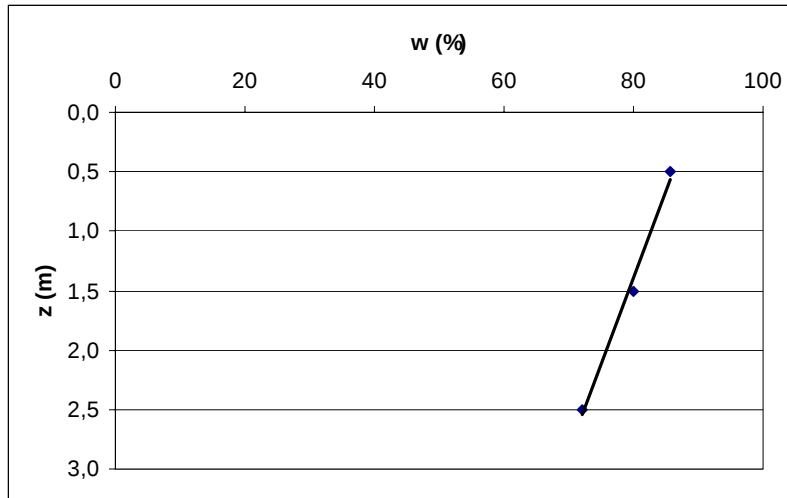


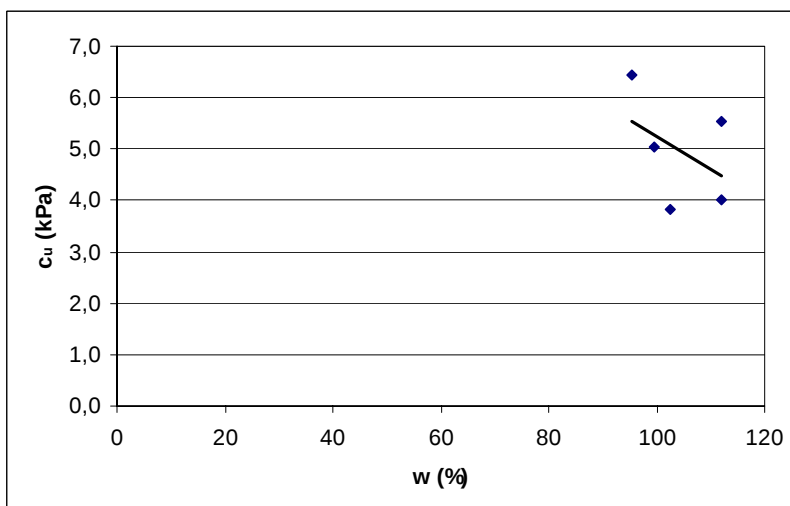
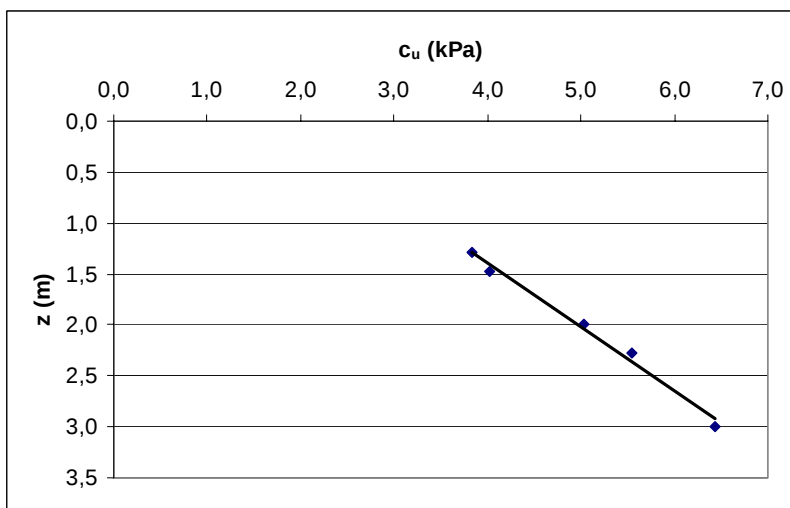
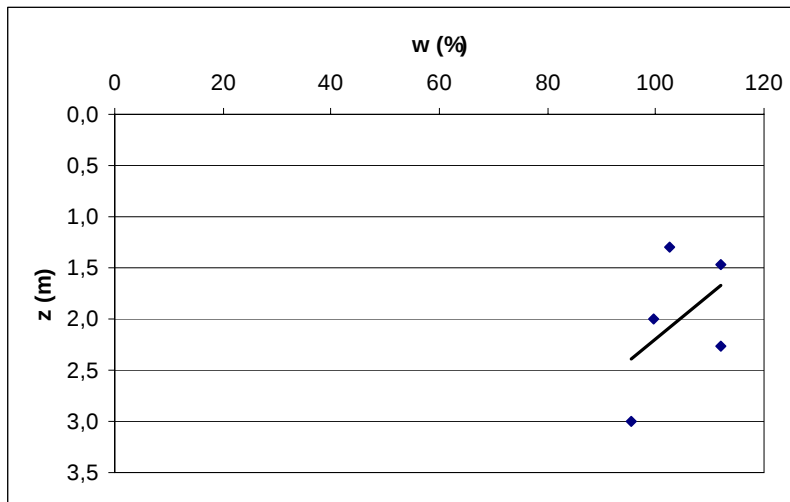










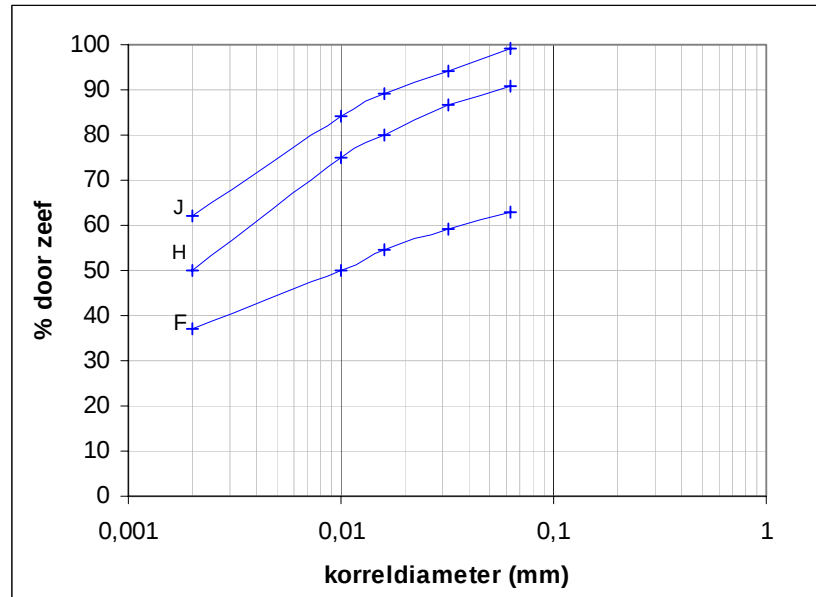


Bijlage IV: Benadering korrelverdelingskromme

Van een aantal locaties uit de verzameling van slibdata is de gehele korrelverdeling bekend, terwijl voor de rest alleen de fracties $< 2 \mu\text{m}$ en $< 63 \mu\text{m}$ bekend zijn. Dit zijn dus twee punten op een korrelverdelingslijn. Volgens onderstaand stappenplan is gekeken of de bekende korrelverdelingen te benaderen zijn met een kansverdelingsfunctie.

Stap 1

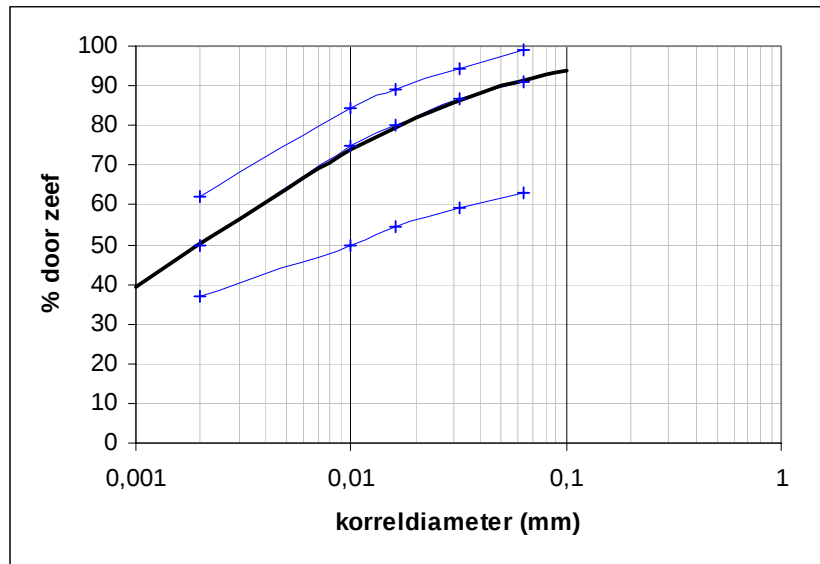
De bekende korrelverdeling.



Figuur IV.1 Korrelverdelingsdiagram

Stap 2

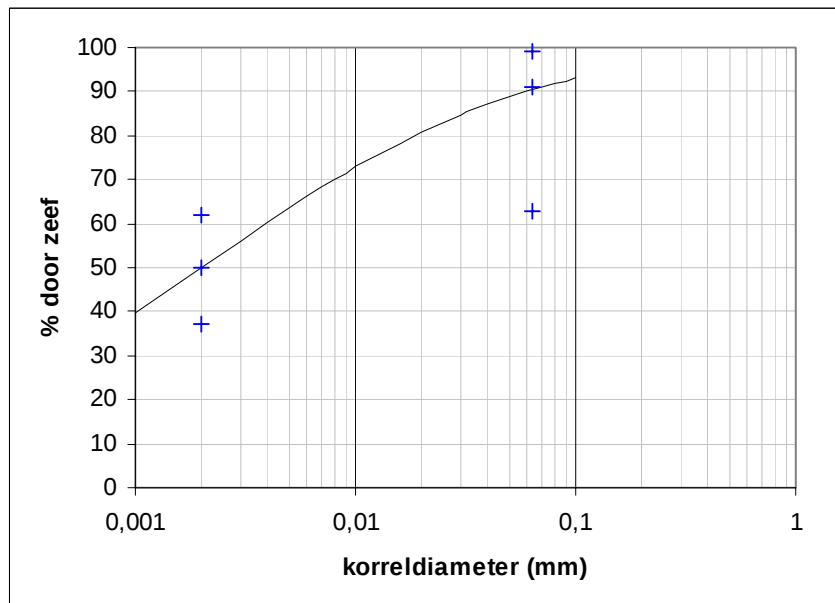
Benadering van de bekende korrelverdelingskromme met een kansverdelingsfunctie. Dit is een iteratief proces waarbij handmatig een gemiddelde en een standaard deviatie worden ingevoerd voor de functie *normdist* (normal cumulative distribution) in Excel. Gekeken wordt in hoeverre de kansverdelingsfunctie de korrelkromme benadert en of dit mogelijk is met meerdere combinaties van verschillende waarden voor het gemiddelde en de standaarddeviatie. Uit Figuur IV.2 kan geconcludeerd worden dat het mogelijk is een korrelverdelingskromme te benaderen met een kansverdelingsfunctie.



Figuur IV.2 Benadering van korreldiagram door kansverdelingsfunctie

Stap 3

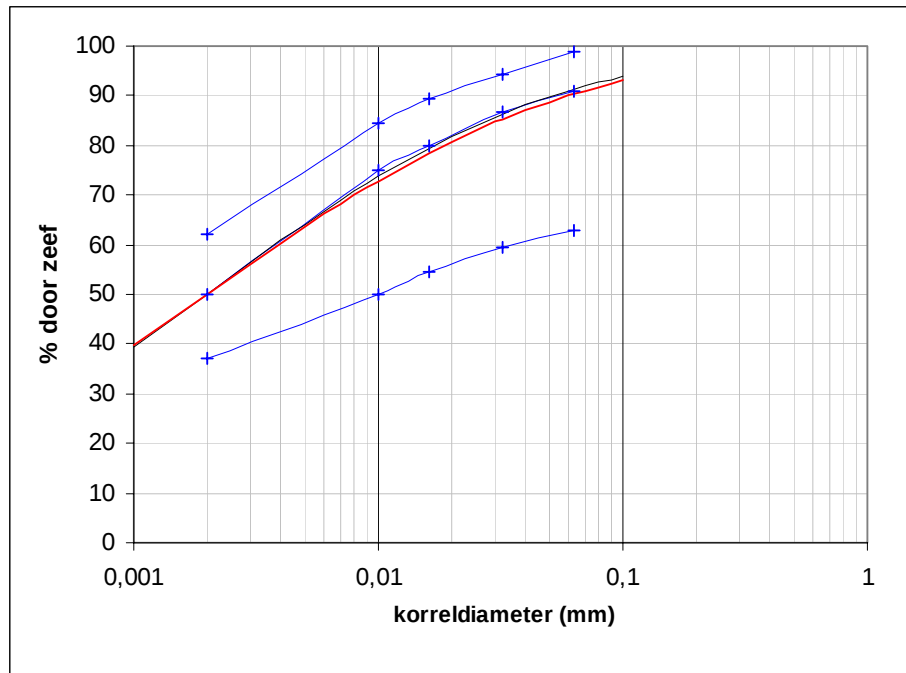
Benadering van twee punten op de bekende korrelverdelingskromme met een kansverdelingsfunctie, zie Figuur IV.3. Dit is een iteratief proces waarbij handmatig een gemiddelde en een standaard deviatie worden ingevoerd voor de functie *normdist* (normal cumulative distribution) in Excel. Voor de korreldiameter behorende bij de fractie $< 2 \mu\text{m}$ en de korreldiameter behorende bij de fractie < 63 punten is er één combinatie van gemiddelde en standaarddeviatie mogelijk waarbij de cumulatieve kansverdelingsfunctie door de 2 bekende punten gaat.



Figuur IV.3 Kansverdeling gebaseerd op twee punten

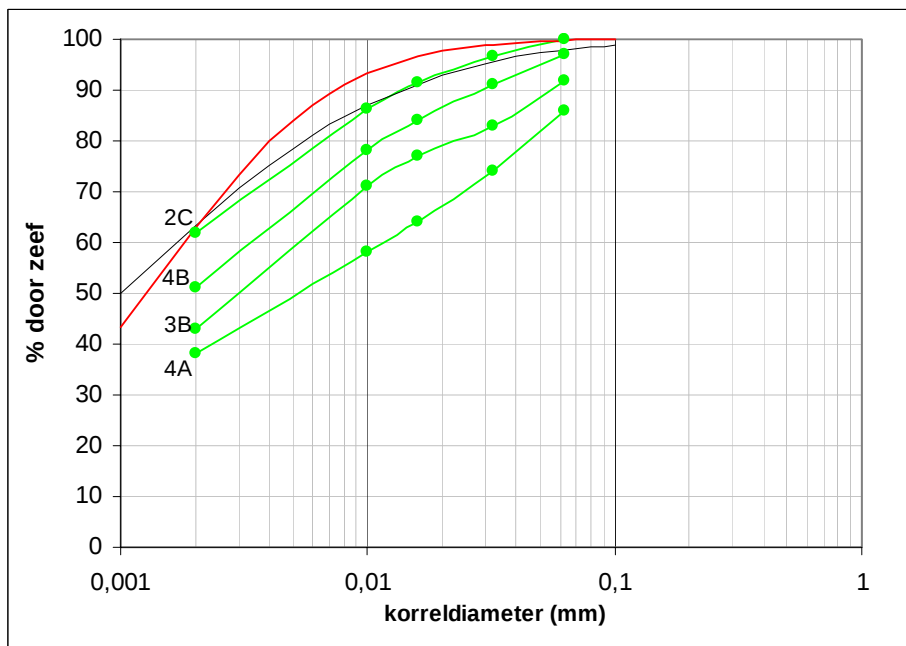
Stap 4

Tenslotte moet gecontroleerd worden of de kansverdelingsfunctie op basis van de 2 punten geen grote afwijking vertoont met de werkelijke kromme. Figuur IV.4 laat zien dat de benadering uitstekend voldoet aan de werkelijke korrelverdeling.



Figuur IV.4 Vergelijking kansverdelingsfuncties

In Figuur IV.5 is de benaderende kansverdelingsfunctie te zien voor een korrelverdeling van de locatie Hier is duidelijk een minder goede overeenkomst tussen de benadering en de werkelijke korrelverdeling.



Figuur IV.5 Kansverdelingfuncties voor korreldiagram

In Tabel IV.1 worden de absolute en relatieve fout geven tussen de benadering van de 16 μm fractie met de kansverdelingsfunctie en de 16 μm fractie uit de bekende korrelverdelingen.

Tabel IV.1 Uitkomst bepaling 16 µm-fractie

		% < 16 µm	kansverdeling		afwijking	
		werkelijk	best fit	2 pt.	relatief (%)	absoluut
XXX		89,3	90,0	94,3	5,6	5,0
		80,0	79,4	78,4	2,0	1,6
		54,4	53,7	52,7	3,1	1,7
XXX		91,4	91,4	96,7	5,8	5,3
		88,8	89,5	92,4	4,1	3,6
		85,0	86,9	94,4	11,1	9,4
		84,0	83,0	86,9	3,5	2,9
		77,0	78,3	78,6	2,1	1,6
		73,0	73,9	81,3	11,4	8,3
		64,0	67,7	70,1	9,5	6,1
XXX		76,5	74,0	73,2	4,3	3,3
		70,0	71,0	79,6	13,7	9,6

gem 6,3 4,9

