

Handboek zettingsvloeiing

CO-353260/10
oktober 1994

Handboek zettingsvloeiing

CO-353260/10
oktober 1994
std/manual

Opgesteld in opdracht van:
Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Postbus 5044
2600 GA Delft

AFDELING GRONDCONSTRUCTIES
projectleider: T. P. Stoutjesdijk
projectbegeleider: M. B. de Groot

GRONDMECHANICA DELFT
Stieltjesweg 2, 2628 CK DELFT
Postbus 69, 2600 AB DELFT

Telefoon (015) 69 35 00
Telefax (015) 61 08 21
Postbank 234342
Bank MeesPierson NV
Rek.nr. 25.92.35.911

1. Rapport nr.	2. Serie nr. ZV-94-14	3. Ontvanger catalogusnummer	
4. Titel en sub-titel Handboek zettingsvloeiing		5. Datum rapport Oktober 1994	
		6. Code uitvoerende organisatie	
7. Schrijvers Ir. T. P. Stoutjesdijk		8. Nr. rapport uitvoerende organisatie CO-353260/10	
9. Naam en adres opdrachtnemer Grondmechanica Delft Postbus 69 2600 AB Delft		10. Projectnaam TAWB*ZETTINGSV	
		11. Contractnummer DWW-869	
10. Naam en adres opdrachtgever Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde Postbus 5044 2600 GA Delft		13. Type rapport Definitief rapport	
		14. Code andere opdrachtgever	
15. Opmerkingen Projectleider DWW: ir. J. Lindenberg			
16. Referaat <p>Ter begeleiding van het PC-programma SLIQ2D is een handleiding geschreven. Het programma SLIQ2D voorspelt het al dan niet optreden van zettingsvloeiingen in losgepakt zand bij een gegeven geometrie en grondgesteldheid. Het programma wordt aangeboden in gebruikersvriendelijke vorm. Samen met de handleiding is het zeer eenvoudig om berekeningen te maken. Het verschijnsel zettingsvloeiing is echter niet zo simpel te beoordelen. Het gebruik van het programma SLIQ2D vereist voor een juiste en zinnige toepassing de nodige kennis omtrent het verschijnsel zettingsvloeiingen en van de precieze werking van programma en modellering. Daarom is de gebruikershandleiding van het PC-programma gekoppeld aan een handboek, waarin achtergronden worden gegeven en waarin de mathematische formuleringen worden vermeld en toegelicht. Het is niet mogelijk de resultaten van de berekeningen juist te beoordelen als men niet weet hoe de invoerparameters moeten worden bepaald, en wat, volgens welke schematisaties en aannames, er berekend wordt.</p> <p>Het PC-programma en het Handboek Zettingsvloeiing zijn opgesteld door Grondmechanica Delft in opdracht van Rijkswaterstaat, Dienst- Weg- en Waterbouwkunde, in het kader van het TAW-onderzoek naar zettingsvloeiingen. De begeleiding bij het tot stand komen van SLIQ2D en Handboek is geleverd door TAW-projectgroep TAW-B13.</p>			
17. Trefwoorden: Zettingsvloeiing, verweking, vooroever, stabiliteit, SLIQ2D		18. Distributiesysteem op aanvraag	
19. Classificatie beperkt toegankelijk	20. Classificatie deze pagina vrij toegankelijk	21. Aantal blz. 100	22. Prijs

INHOUDSOPGAVE

SYNOPSIS		1
	Deel I: Gebruikershandleiding voor het programma SLIQ2D	3
1.1	Functieomschrijving	5
1.2	Installeren van het programma	5
1.3	Starten	6
1.4	Invoerschermen	7
1.5	Hulpfuncties	7
1.6	Gebruik maken van bestaande invoer	7
1.7	Invoeren van nieuwe gegevens	8
1.8	Hoe komt u aan de waarden voor de invoer ?	8
1.9	Het maken van een berekening	8
1.10	Het bekijken van de uitvoer	8
1.11	Grafische uitvoer	9
1.12	Voorzichtigheid geboden	10
1.13	Nieuwe berekening maken, files bewaren	10
1.14	Einde berekeningen	10
1.15	Voorwaarden voor gebruik programma	10
1.16	Ondersteuning van de gebruiker	11
	Deel II: Achtergrondinformatie	13
2.1	Wat is een zettingsvloeiing ?	15
2.2	Dilatantie	15
2.3	Kritieke dichtheidsproeven	16
2.4	Waar komen de parameters voor SLIQ2D vandaan ?	19
2.5	Op welke wijze wordt instabiliteit bepaald ?	20
2.6	Wat is de relatie tussen gedraineerd en ongedraineerd gedrag ?	22
2.7	Hoe worden de beginspanningen bepaald ?	22
2.8	De rekenprocedure in SLIQ2D	23
2.9	Wat is instabiliteit ?	24
2.10	Conclusie	24
	Deel III: Stap voor stap benadering	27
3.1	Wat te doen in een praktijkgeval ?	28
3.2	Bestaande adviespraktijk	28
3.3	Voorgestelde aanpak	29
3.4	Karakterisering van de geometrie	30
3.5	SLIQ2D-berekeningen	33
3.6	Waarden voor de kritieke taludhelling	33
3.7	Wat te doen als de situatie als onvoldoende veilig wordt beschouwd ?	35
3.8	Wanneer uitgebreid onderzoek ?	36
3.9	Grondonderzoek	38
3.10	Boring en elektrische dichtheidsmeting	38
3.11	Minimum en maximum dichtheid	38
3.12	Zeeffromme en afrondingsgetal	39
3.13	Yking elektrische dichtheidsmeting	40
3.14	Natte en droge kritieke dichtheid	40
3.15	Berekeningen	41
3.16	Correctie voor membraanindringing	41
3.17	Fitprocedure	45

3.18	Dilatantecurve	45
3.19	Decompressiecurve	47
3.20	Voorbeeld berekeningsresultaat	48
3.21	Wat te doen met de resultaten van de berekeningen ?	49
3.22	Interpretatie van praktijkvoorbeeld	50
3.23	Tweede methode van aanpak	51
3.24	Verificatie SLIQ2D aan de Zeeuwse praktijk	52
3.25	Verschillende lagen	53
3.26	Wat te doen als er weinig of geen gegevens zijn ?	53
3.27	Wanneer gespecialiseerde hulp vragen ?	54
	Deel IV: Beschrijving SLIQ2D	55
4.1	Feitelijke beschrijving programma	57
4.2	Verdeling van de punten over de geometrie	57
4.3	Bepalen van de spanningen	58
4.4	Bepalen van spanningen bij een geknikt talud	63
4.5	Bepalen van instabiliteit in een punt	63
4.6	Minder conservatief stabiliteitscriterium	72
	Deel V: Verantwoording en onzekerheden	73
5.1	Theoretische achtergronden	75
5.2	Parameters uit de literatuur	78
5.3	Gevoeligheid voor verandering in invoer	79
5.4	Veiligheidsfilosofie	80
5.5	Lacunes in de kennis	82
	Deel VI: Historie van het onderzoek	83
6.1	Voorgeschiedenis	85
6.2	Ervaringsgegevens	85
6.3	Experimentele gegevens	85
6.4	Huidig onderzoek	86
6.5	Buitenland	87
	Appendices	89
	Appendix A: Lijst van figuren	91
	Appendix B: Lijst van symbolen	93
	Appendix C: Literatuurlijst	97
	Appendix D: Technische informatie/onderhoud	103

SYNOPSIS

Voor u ligt het Handboek Zettingsvloeiing. Als het goed is, heeft u dit handboek ontvangen tegelijkertijd met het computerprogramma SLIQ2D.

Er zijn verschillende mogelijkheden om van dit handboek gebruik te maken. U kunt dit boek ter zijde leggen, en pas als u problemen ontmoet met het computermodel weer inkijken. Per slot van rekening is SLIQ2D een tamelijk gebruikersvriendelijk programma, dat met invoerschermen en hulpschermen voor een belangrijk deel zelf de weg wijst. De auteurs van dit handboek menen dat hier grote voorzichtigheid op zijn plaats is. Deze werkwijze kan dienstig zijn voor privé doeleinden, maar niet voor enigerlei toepassing voor serieuze studie of in de praktijk.

Dit handboek is daarom op een wijze ingedeeld, dat ieder volgend deel in het handboek ook een niveau hoger ten aanzien van het begrip en de achtergronden van de materie vertegenwoordigt. Afhankelijk van het belang van uw toepassing zult u derhalve moeten kiezen welk kennisniveau noodzakelijk is. De stappen zijn onderverdeeld in:

	deel:
- gebruikershandleiding	I
- globale informatie over zettingsvloeiingen	II
- stap-voor-stap benadering van een probleem	III
- beschrijving van het programma SLIQ2D	IV
- Verantwoording/onzekerheden	V

Deel VI geeft een overzicht van de onderzoeksinspanningen die hebben geleid tot het schrijven van dit handboek en tot de bundeling van ontwikkelde kennis in de vorm van een computerprogramma. Verdere informatie is opgenomen in appendices.

Het computerprogramma SLIQ2D kan beschouwd worden als de 'state of the art' van de kennis met betrekking tot verweking en zettingsvloeiingen. Bij de beoordeling van de resultaten van berekeningen moet men zich realiseren dat het programma geen kennis vertegenwoordigt die gedurende lange tijd in de praktijk getest is en een grote mate van acceptatie kent. De ontwikkelde methode is nieuw en zal zijn waarde nog moeten bewijzen. Ten aanzien van toepassing in de praktijk is enige terughoudendheid op zijn plaats. In voorkomende gevallen zal het dienstig zijn deskundige hulp in te roepen.

In geen geval kan Grondmechanica Delft (zijnde de auteur van het programma) of de Dienst Weg- en Waterbouwkunde van Rijkswaterstaat (zijnde de opdrachtgever) aansprakelijk worden gesteld voor de gevolgen van onverantwoord gebruik van het programma.

Deel I: Gebruikershandleiding voor het programma SLIQ2D

1.1 Functieomschrijving

Het programma 'SLIQ2D' is een quasi 2-dimensionaal computermodel dat een voorspelling doet omtrent de kritieke taludhelling waarbij, bij gegeven taludhoogte, dichtheid en materiaaleigenschappen, instabiliteit ontstaat ten gevolge van verweking in het zand van (een deel van) de geometrie.

SLIQ2D is een model dat uitgaat van 'statische' verweking (zettingsvloeiing) en is niet geschikt om cyclische verweking (aardbeving, golfbelasting) mee te beoordelen. In principe is het model evenmin geschikt om verweking die optreedt tijdens baggerwerkzaamheden of storten van zand onder water te beschouwen, aangezien niet bekend is in welke mate hier dynamische effecten een rol spelen als inleiding tot instabiliteit. Dat het model hiervoor toch wel eens wordt gebruikt, kan alleen onder de aanname dat de dynamische invloeden klein zijn. Dit moet dan op zijn minst aannemelijk worden gemaakt.

1.2 Installeren van het programma

U bent in het bezit van een diskette met daarop alle programmatuur die is benodigd om het programma SLIQ2D te kunnen draaien. Dit kan op twee manieren: vanaf diskette of vanaf de harde schijf van uw PC. Uw PC heeft wel een numerieke coprocessor nodig. Wilt u het programma vanaf de harde schijf kunnen draaien, dan zult u eerst enige handelingen moeten verrichten.

De PC-programmatuur is beschermd met een softwarematig "COPY PROTECTION SYSTEM". Door middel van dit systeem kunnen de programma's (de executables met extensie *.EXE) alleen op een PC geïnstalleerd worden door het bijgeleverde batch-programma INSTALL.BAT. Dit "INSTALL" programma staat samen met het beschermde programma op de zgn. Productie diskette (floppy).

Elke keer als het beschermde programma geïnstalleerd wordt op een PC, wordt dit geregistreerd door een teller op de Productie diskette met één te verlagen. Vanaf deze Productie diskette kunnen slechts een beperkt aantal kopieën gemaakt worden, zodat slechts op een beperkt aantal PC's tegelijkertijd het programma kan staan. Dit aantal wordt bij levering ingesteld.

Het installeren van het programma gaat als volgt. U wilt bijvoorbeeld het programma installeren vanaf de diskette in de a: drive naar uw harde schijf, bijvoorbeeld de d: drive. Maak eventueel eerst een aparte directory voor het programma aan. Ga vervolgens naar de a: drive waar de Productie diskette inzit en typ in:

```
INSTALL a: d:
```

De volgende meldingen verschijnen nu op het scherm:

```
Moving Protection FROM drive A to drive D - confirm (Y/N)?Y
Current Available Install Count = 9
Protection succesfully Installed
    1 File(s) copied
    1 File(s) copied
    etc.
```

Het beschermde programma is nu gekopieerd van de a: drive naar de d: drive.

De Produktie diskette geeft met de Install Count aan, dat er nog 9 kopieën beschikbaar zijn. U kunt een geïnstalleerd programma ook weer terugzetten op de Produktie diskette door gebruik te maken van het bijgeleverde batch-programma UNINSTAL.BAT. Ga hiertoe eerst naar de directory waar de 'executable' staat. Typ dan in:

```
UNINSTAL d: a:
```

Dit wordt dan tevens geregistreerd op de Produktie diskette, door de eerder genoemde teller (Install Count) met één te verhogen. U heeft dan weer het oorspronkelijke aantal kopieën terug.

Een beschermd programma kan niet gekopieerd worden van de ene disk naar de andere, of van de ene PC naar de andere, zonder gebruik te maken van de batch-programma's INSTALL en UNINSTAL. Het programma moet dus eerst worden teruggezet op de Produktie diskette en daarna opnieuw geïnstalleerd worden op de andere schijf. Het beschermde programma kan wel verplaatst worden van de ene directory naar een andere directory op dezelfde schijf.

Bij installatie van het programma worden er in de "root" directory 2 "hidden files" (verborgen bestanden) aangemaakt, "EV31.SYS" en "EV32.SYS".

Deze files mogen nooit verwijderd of verplaatst worden, anders werkt het programma niet meer. Het beschermde programma moet dan opnieuw geïnstalleerd worden, zodat er een kopie verloren is gegaan.

1.3 Starten

U wilt het programma draaien. Dit kan vanaf diskette of vanaf harde schijf. Over het algemeen zal het programma sneller klaar zijn met rekenen indien u werkt vanaf uw harde schijf. De procedure is eenvoudig: ga naar de directory waar het programma staat en typ:

```
SLIQ2D
```

U krijgt nu het hoofdscherm met programmainformatie op uw monitor. Om verder te gaan drukt u op een willekeurige toets.

1.4 Invoerschermen

U heeft nu het hoofdmenu in beeld. Hieruit moet steeds een keuze worden gemaakt welke activiteit u wilt gaan uitvoeren. Om een activiteit te selecteren kunt u twee dingen doen.

- U kunt met de pijltjestoetsen omhoog of omlaag gaan. Zodra uw keuze oplicht drukt u op de Enter-toets (Op sommige toetsenborden heet dit de Return-toets).
- Bij iedere keuze staat 1 letter vet afgedrukt. Als u deze letter intoetst springt u direct naar deze keuze. Druk vervolgens weer op de Enter-toets.

U komt nu in een volgend invoerscherm. Zodra u daar uw activiteiten heeft afgerond komt u met behulp van functietoets <F10> weer in het hoofdmenu.

Als u het programma voor de eerste maal draait is het nuttig de algemene informatie te lezen. Ga met de pijltjestoetsen naar: About Sliq2D, of toets de letter A in. Druk nu op de Enter-toets en het scherm met algemene informatie wordt zichtbaar. Als u klaar bent met lezen drukt u op de Escape-toets. U komt dan terug in het hoofdmenu.

1.5 Hulpschermen

Binnen het programma zijn diverse hulpschermen beschikbaar. Onder ieder scherm staat een balk met aanwijzingen welke stappen gedaan kunnen worden. Als u op de functietoets <F1> drukt komt een hulpscherm in beeld, waarin informatie wordt gegeven over de activiteit die u op dat moment aan het uitvoeren bent. Als uitgelezen bent op het hulpscherm dan drukt u op de Escape-toets en u bent terug in het hoofdprogramma. Let wel op: sommige hulpschermen bestaan uit meerdere bladzijden. Met behulp van de <Page Up> en <Page Down> toetsen kunt u bladeren.

1.6 Gebruik maken van bestaande invoer

Bij het invoeren van gegevens kunt u gebruik maken van bestaande invoer. Dit is met name aan te bevelen als u een som heeft gemaakt en u wilt een nieuwe berekening maken waarin slechts 1 of 2 gegevens zijn veranderd. Als u SLIQ2D opstart moet u een bestandsnaam opgeven, hetzij een bestaand invoerbestand, of de naam waaronder u de gegevens wilt bewaren. Voordat u kunt gaan rekenen moet een naam zijn gekozen waaronder de gegevens kunnen worden opgeslagen. Kies hiertoe in het hoofdmenu Filenames. U kunt dan de namen van de bestanden opgeven waarin invoer en uitvoer worden opgeslagen. Hierna kan de invoer bij een volgende berekening opnieuw worden opgeroepen en indien nodig veranderd. U kunt ter verdere identificatie twee regels tekst opgeven met een nadere omschrijving van het berekeningsgeval. Als u klaar bent met het opgeven van filenamen en probleemtittels drukt u op de <F10> toets.

1.7 Invoeren van nieuwe gegevens

Het invoeren van gegevens gaat via het Input menu. Dit menu is onderverdeeld in twee aparte invoerschermen voor geometrie en voor fit- en materiaalparameters. Deze kunnen in willekeurige volgorde worden doorlopen. Als u een onwaarschijnlijke waarde invult volgt een waarschuwing. Met de <F10> toets komt u terug in het hoofdmenu voor de invoer. Nadat de invoer compleet is ingevuld, kunt u deze bekijken en controleren via de optie View Input File. Met de optie Return to main menu komt u terug in het hoofdmenu.

1.8 Hoe komt u aan de waarden voor de invoer ?

Een belangrijke vraag is, wat de invoergegevens precies voorstellen, en hoe u aan de juiste waarden van de invoergegevens komt. Een hulpmiddel hierbij zijn de hulpschermen. Bij ieder invoerscherm is een hulpscherm met verklarende tekst aanwezig. Hierin wordt (summier) een beschrijving van de betekenis van de gevraagde invoergegevens gegeven, alsmede een indicatie wat gebruikelijke waarden zijn. Om waarden te verkrijgen die toepasbaar zijn op een bepaald type zand op een bepaalde locatie, moeten van dat zand monsters beschikbaar zijn en moeten kritieke dichtheidsproeven zijn uitgevoerd. De resultaten van deze proeven kunnen worden gebruikt om de invoer te bepalen. De procedure om invoer te bepalen wordt in meer detail behandeld in de volgende delen van dit handboek.

1.9 Het maken van een berekening

Het eigenlijke rekenwerk wordt pas in gang gezet als u hebt aangegeven dat u klaar bent met het invoeren van gegevens. Selecteer Start calculation uit het hoofdmenu. Er verschijnt nu een balk op het scherm waarin wordt aangegeven hoever de berekening is gevorderd, de zogenaamde Indicator of Progress. De berekening kan worden afgebroken door op de Escape-toets te drukken, bijvoorbeeld als u bedenkt iets te zijn vergeten in de invoer. Verbeter dit dan en start opnieuw de berekening.

1.10 Het bekijken van de uitvoer

Als de berekening is voltooid, zijn er twee typen uitvoer gegenereerd. Het eerste is een uitvoerfile, waarin de getallen staan zoals deze uit de berekening komen. Deze kunt u bekijken met View output file. Daarnaast bestaat de mogelijkheid een figuur te bekijken. In de uitvoerfile staat als eerste een lijst van invoergegevens. Hierdoor kunt u controleren of de juiste gegevens zijn gebruikt voor de berekening. De berekeningsresultaten beginnen met de melding: "Instability

first occurs at slope angle:", waarna een getal volgt. Dit getal is de flauwste taludhelling waarbij in ten minste 1 punt in de geometrie instabiliteit is geconstateerd. Vervolgens is een tabel gegeven. In de tabel staan achtereenvolgens de taludhelling, het aantal punten dat voor het eerst bij die specifieke taludhelling instabiliteit vertoont, en het cumulatief aantal punten dat bij hellingen flauwer of gelijk aan die taludhelling instabiel is. De uitvoerfile wordt ook op schijf weggeschreven met als extensie *.SLO. Dit is een ASCII bestand dat buiten het programma om kan worden uitgeprint.

Naast deze uitvoerfile wordt door SLIQ2D ook een 'dump' file gegenereerd. Deze kan alleen buiten het programma worden bekeken. Dump files zijn te herkennen aan de extensie *.SLD. Er wordt een lijst van alle 500 punten gegeven, met daarachter de waarde van de flauwste taludhelling waarbij in dat punt instabiliteit optreedt en gegevens over de grondspanningen in dat punt bij die taludhelling. In die punten waar blijkens de berekening in het geheel geen instabiliteit wordt gevonden, staat op deze punten een 0 aangegeven.

1.11 Grafische uitvoer

Als u een grafische presentatie van het berekeningsresultaat wilt bekijken, dan kiest u Graphic output uit het hoofdmenu. Er verschijnt een figuur op het scherm, waarin een talud is aangegeven, met in de geometrie een aantal isolijnen. Een isolijn geeft aan dat het gebied binnen deze lijn instabiel is bij de taludhelling die bij de waarde van de isolijn hoort. Naarmate deze waarde staat voor een steilere taludhelling wordt dit gebied groter. De isolijn met de steilste taludhelling is vaak niet zichtbaar, omdat deze meestal uit slechts 1 punt bestaat. In het kader onderaan de figuur is dit zichtbaar: achter Isolines staat een getal, met daarachter tussen haakjes: Drawn met een tweede getal. Indien deze getallen niet gelijk zijn is het punt met de steilste taludhelling niet zichtbaar.

Links bovenin het scherm verschijnt een menu, met daarin vier opties:

- To drawing: laat het drawing menu uit beeld verdwijnen. Als u op een willekeurige toets drukt verschijnt het drawing menu weer in beeld
- Settings: hiermee kan het aantal isolijnen, alsmede de minimum en maximum waarde van de isolijn worden opgegeven.
- Print: hiermee wordt gespecificeerd hoe de figuur moet worden afgedrukt.
- Quit: verlaat het grafische scherm

Met de Settings bepaald u hoe het plaatje eruit komt te zien: veel of weinig lijnen binnen welke grenzen.

De Print-optie biedt op zijn beurt weer enige mogelijkheden:

- Output: geeft het print-format aan (HPGL, screendump, matrixprinter)

- Orientation: afhankelijk van de vraag of de print-optie deze keuze biedt kunt u kiezen uit Landscape (volledig A4-formaat), of Portrait (recht op de bladzijde, half A4 formaat).
- Port: u kunt kiezen uit het opslaan in een file of het versturen van de grafiek naar hardware-poort LPT1, LPT2 of LPT3. Op de hardware-poort moet wel een printer aangesloten zijn.
- Plotfile name: als u aangeeft dat de plotgegevens naar een file moeten worden geschreven, dan krijgt deze standaard een naam. U kunt echter een andere naam opgeven.

1.12 Voorzichtigheid geboden

Met het beoordelen en gebruik maken van de resultaten van de berekeningen is voorzichtigheid geboden. Hoewel in het programma een aantal conservatieve aannames zijn verwerkt, kan een soms kleine verandering in invoer een grote rol spelen in het resultaat. In eerste instantie is het daarom nuttig niet alleen de gemiddelde waarde voor een parameter te nemen, maar met meerdere waarden berekeningen te maken. Er ontstaat dan enig idee wat de gevolgen zijn als de situatie ongunstiger is dan u hebt aangenomen. Maar ook dan nog bergt het niet uitvoeren van een welafgewogen studie en het niet raadplegen van deskundigen risico's in zich.

1.13 Nieuwe berekening maken, files bewaren

Om een nieuwe berekening te maken gaat u terug naar het invoermenu, of, als u gebruik wilt maken van bestaande invoergegevens, naar **FileNames**. U verandert wat u wilt en start de berekening opnieuw.

Het is ook mogelijk oude uitvoerfiles te bekijken, door onder **FileNames** de oude invoerfile te selecteren, en vervolgens direct door naar **View output file** te gaan.

1.14 Einde berekeningen

Als u klaar bent met de berekeningen en u wilt het programma verlaten, dan kiest u **Exit SLIQ2D**. Na een bevestigend antwoord (Y) op de vraag of u het programma wilt verlaten bent u uit het programma.

1.15 Voorwaarden voor gebruik programma

U bent in het bezit van een computerprogramma dat niet vrijelijk wordt gedistribueerd. Hiermee heeft u de verplichting verantwoord met dit programma om te springen. U dient de

voorzichtigheid met de resultaten in acht te nemen waartoe in deze handleiding wordt opgeroepen. Als anderen dan uzelf gebruik maken van het programma is het aan u te beoordelen of dit legitiem gebeurt of niet. U blijft echter zelf verantwoordelijk. Voor de gevolgen van onverantwoord gebruik zijn de makers niet aansprakelijk.

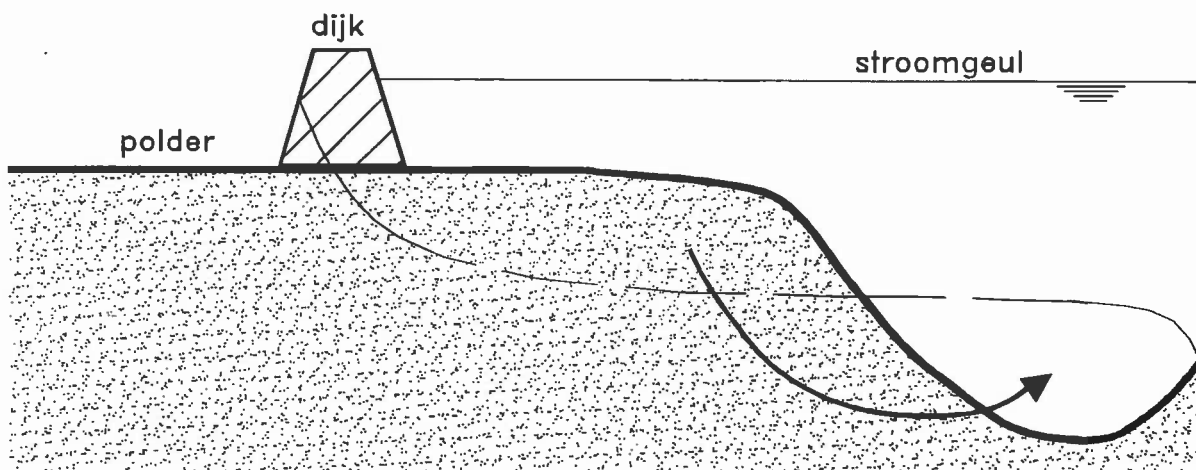
1.16 Ondersteuning van de gebruiker

Aan de geregistreerde gebruikers wordt een zekere mate van ondersteuning verleend. Deze ondersteuning betreft kleine problemen. Bij problemen waar veel tijd of inspanning benodigd is om deze op te lossen kan u in overweging worden gegeven een vergoeding te betalen. Wilt u dit niet, dan zal ook uw probleem niet kunnen worden verholpen.

Deel II: Achtergrondinformatie

2.1 Wat is een zettingsvloeiing ?

Een zettingsvloeiing kan worden omschreven als een stabiliteitsverlies in een grondmassief bestaande uit losgepakt zand onder een relatief steile helling, waarbij de instabiliteit leidt tot de vorming van een zand-watermengsel dat afstroomt en tot rust komt onder een zeer flauwe helling. Een schematische tekening van een zettingsvloeiing is gegeven in figuur II.1.

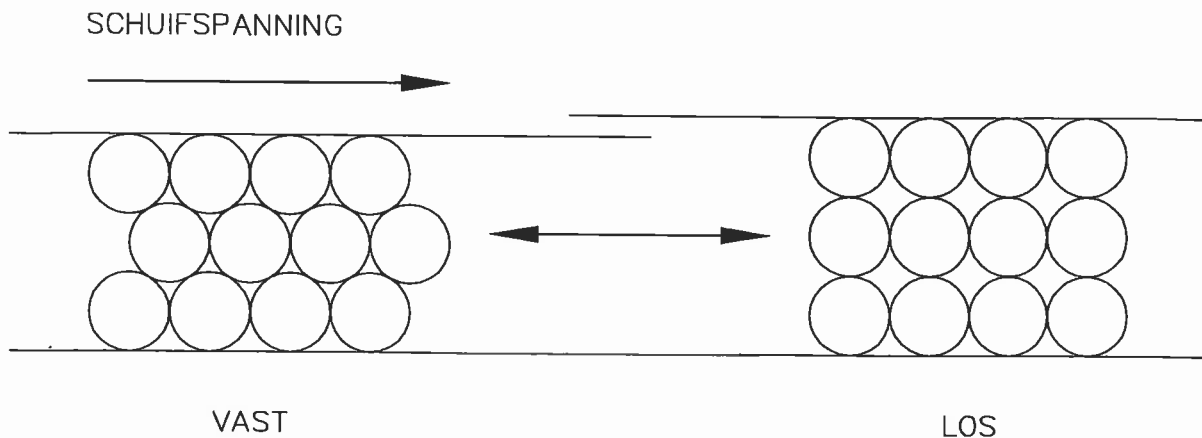


Figuur II.1 Schematische voorstelling van een zettingsvloeiing

De oorzaak van dit verschijnsel ligt in de zogenaamde "verweking" van het zand. Verweking kan worden vergeleken met het ontstaan van drijfzand; het zand kan geen belasting opnemen vanwege de aanwezigheid van water in de poriën dat de zandkorrels uit elkaar drukt. Als ergens in een talud verweking optreedt, kan dit zich uitbreiden en in een groot deel van de geometrie stabiliteitsverlies veroorzaken. Dit heet dan een zettingsvloeiing. Met behulp van het begrip dilatantie van zand kan worden verklaard waarom verweking op kan treden in losgepakt zand en niet in vastgepakt zand.

2.2 Dilatantie

Onder dilatantie wordt verstaan de volumeverandering die zand ondergaat onder invloed van alleen een schuifspanningsverandering. In figuur II.2 is het verschil in volume te zien als negen identieke bolletjes in een vlak de meest losse of de meest vaste pakking aannemen.



Figuur II.2 Dilatantie

Als uitgaande van de meest vaste pakking een schuifspanning op de bolletjes wordt uitgeoefend, dan valt in te zien dat deze over elkaar heen zullen gaan schuiven, en dus een lossere pakking aan zullen nemen. Het volume dat wordt ingenomen wordt dan groter. Bij de meest losse pakking liggen de bolletjes los op elkaar. Bij een kleine schuifspanning schuiven de bolletjes in elkaar, zodat het volume dat wordt ingenomen plotseling kleiner wordt.

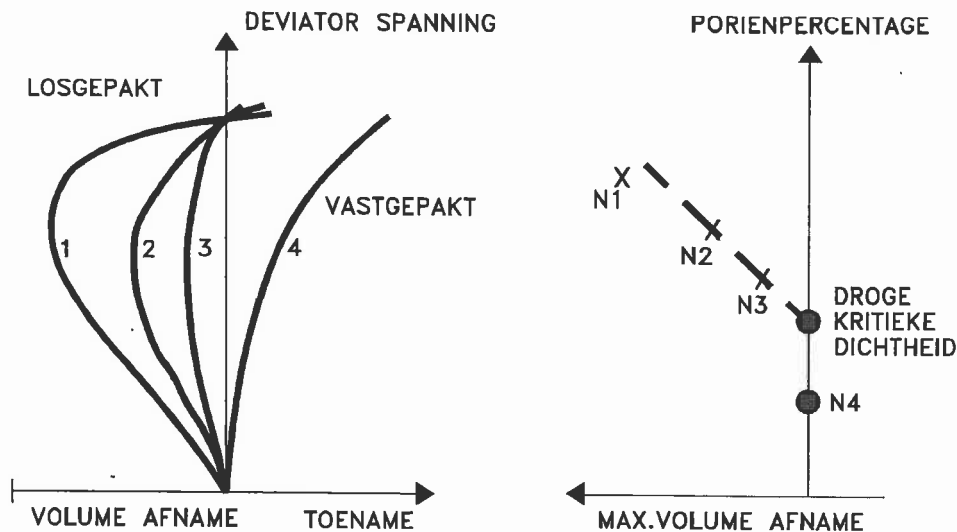
Stel nu, dat de bolletjes zich onder water bevinden en dat de poriën tussen de bolletjes volledig verzadigd zijn met water. Dan kan er geen volumeverandering optreden, tenzij er water in of uit de poriën stroomt. Voor zeer langzame processen is dit geen probleem. Wordt een belasting echter snel aangebracht, dan zal er onvoldoende tijd zijn om het water toe of af te laten stromen, en dan ontstaat er onderdruk of overdruk in het poriënwater. Indien losgepakt zand wordt belast, dan zal het in volume willen verkleinen. Als dit een snel proces is, dan ontstaat er overdruk in het poriënwater. Dit kan zelfs zover gaan, dat de overdruk in het poriënwater zo groot wordt, dat de korrels van elkaar worden gedrukt. Immers, de som van korreldruk en waterdruk (samen de gronddruk) blijft gelijk. Als de waterdruk in de poriën toeneemt, neemt de korreldruk dus af. Het zand is verweekt als de korreldruk nul wordt. In vastgepakt zand is verweking niet mogelijk. Bij belasting wil het korrelskelet in volume vergroten. Als dit snel gebeurt, dan kan er onvoldoende water toestromen om dit mogelijk te maken; er ontstaat onderdruk. De korrels worden steviger tegen elkaar aangedrukt. Het zand zal dan zelfs onder een helling steiler dan de hoek van inwendige wrijving stabiel zijn. Omgekeerd geldt voor losgepakt zand dat bij vrij flauwe hellingen al stabiliteitsverlies op kan treden.

2.3 Kritieke dichtheidsproeven

Wat is de relatie tussen zettingsvloeiing, verweking en dilatantie aan de ene kant, en kritieke dichtheidsproeven aan de andere kant? Wat is kritieke dichtheid?

Om deze vragen te beantwoorden moet eerst worden aangegeven, dat er verschillende soorten

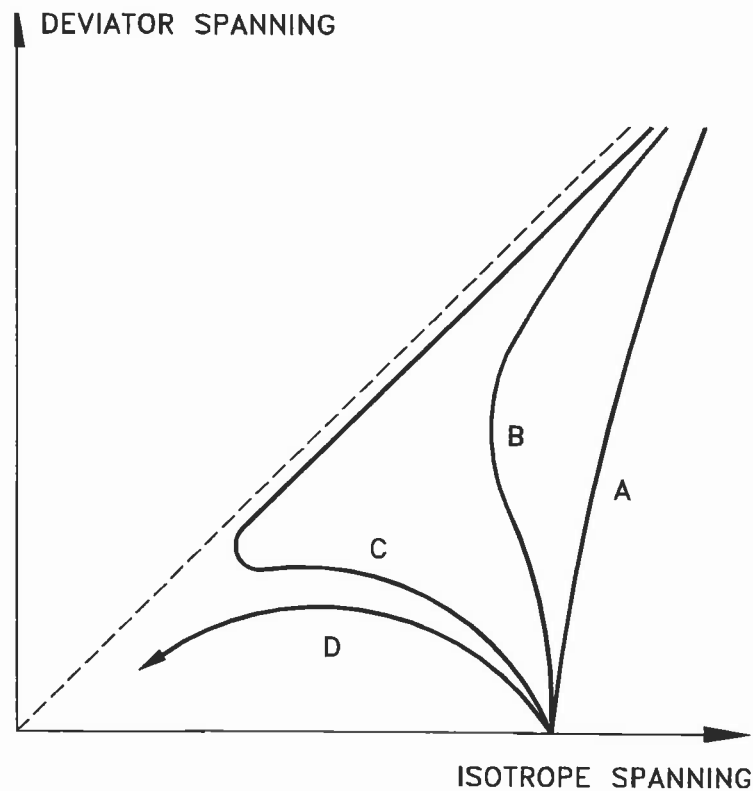
kritieke dichtheidsproeven zijn. In de volledig gedraineerde kritieke dichtheidsproef wordt een droog zandmonster in een triaxiaaltoestel onderworpen aan schuifspanningsbelasting. Er wordt bij verschillende dichtheden gekeken of het monster in volume verkleint (losgepakt zand) of vergroot (vastgepakt zand). De grensdichtheid waarbij noch volumevergroting noch volumeverkleining optreedt noemt men de droge kritieke dichtheid (Lindenberg en Koning [1981]). Een idee van hoe de droge kritieke dichtheid wordt bepaald is gegeven in figuur II.3.



Figuur II.3 Droge kritieke dichtheid

Er is ook een ongedraineerde kritieke dichtheidsproef. Hierin wordt een zo goed mogelijk met water verzadigd zandmonster in een triaxiaaltoestel onderworpen aan schuifspanningsbelasting. Ook hier zal losgepakt zand in volume willen verkleinen. Omdat de proef ongedraineerd wordt uitgevoerd, kan er geen water uit het monster ontsnappen. Er zal wateroverdruk ontstaan. Bij een bepaalde dichtheid zal het monster geheel of gedeeltelijk bezwijken (verweken) tijdens de proef. De pakking waarbij dit net niet optreedt heet natte kritieke dichtheid (zie figuur II.4).

Er is verschil tussen natte en droge kritieke dichtheid. De pakking bij de droge kritieke dichtheid is vaster; er wordt geen volumeverkleining toegestaan. Bij de natte kritieke dichtheid is de pakking losser; er kan enige volumeverkleining optreden. Voor een zandmonster wordt bijvoorbeeld gevonden dat de droge kritieke dichtheid $n_{c,d}$ gelijk is aan 42 % en de natte kritieke dichtheid $n_{c,w}$ gelijk aan 43,5 %.



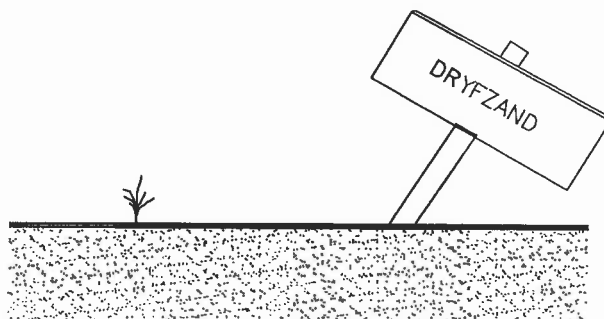
Figuur II.4 Natte kritieke dichtheid

Als alleen de dichtheid van het zand in de beschouwing wordt betrokken, dan zijn er drie trajecten te onderscheiden:

- het zand is vaster gepakt dan de droge kritieke dichtheid (curve A in figuur III.4). Als het zand wordt belast met een schuifspanning treedt in het geheel geen volumeverkleining op. Er ontstaan dus ook geen wateroverspanningen en verweking is uitgesloten.
- het zand is lossier gepakt dan de droge kritieke dichtheid, maar vaster dan de natte kritieke dichtheid (curve B en C). Bij een schuifspanningsverhoging wil het korrel skelet in volume verkleinen. In verzadigd zand treden wateroverspanningen op. Dit zand heet 'mogelijk verwekingsgevoelig'.
- het zand is lossier gepakt dan de natte kritieke dichtheid (curve D). Bij de minste spanningsverandering kan het monster verweken. Deze situatie wordt gekenmerkt als 'zeker verwekingsgevoelig' en absoluut onveilig.

Het tweede en derde traject vormen het gebied waar zich de problemen met verweking en eventueel zettingsvloeiing zich afspelen. Er moet echter wel onderscheid worden gemaakt in 'verwekingsgevoelig' en 'zettingsvloeiingsgevoelig'. Verwekingsgevoelig wil zeggen, dat het zand kan verweken onder bepaalde spanningscondities. Als de spanningen gunstiger zijn treedt geen

verweking op. De spanningen in een talud worden bepaald door de geometrie, ofwel door taludhoogte en taludhelling. Daarom wordt voor het bepalen van de zettingsvloeiingsgevoeligheid van een locatie naast de verwekingsgevoeligheid ook gekeken naar de geometrie (taludhoogte en taludhelling). Het verschil tussen verwekingsgevoelig en zettingsvloeiingsgevoelig wordt geïllustreerd in figuur II.5.



Figuur II.5 Verwekingsgevoelig, niet zettingsvloeiingsgevoelig

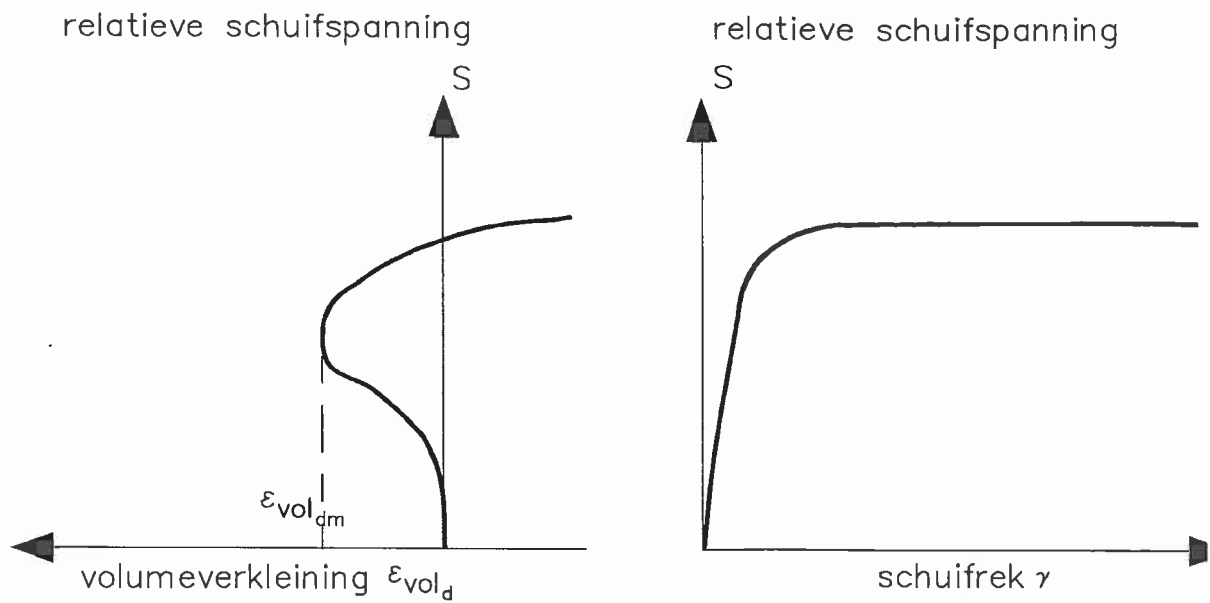
De droge en natte kritieke dichtheid zijn voor een zandsort sterk afhankelijk van de isotrope referentiespanning $\sigma_{vol,0}$, het isotrope spanningsniveau bij het begin van de proef. Deze wordt bij Grondmechanica Delft meestal constant aangehouden op 50 kPa. Er zijn echter ook voorbeelden van triaxiaalproeven bij andere spanningen. De waarde van de referentiespanning bij de proef moet in principe altijd vermeld worden.

2.4 Waar komen de parameters voor SLIQ2D vandaan ?

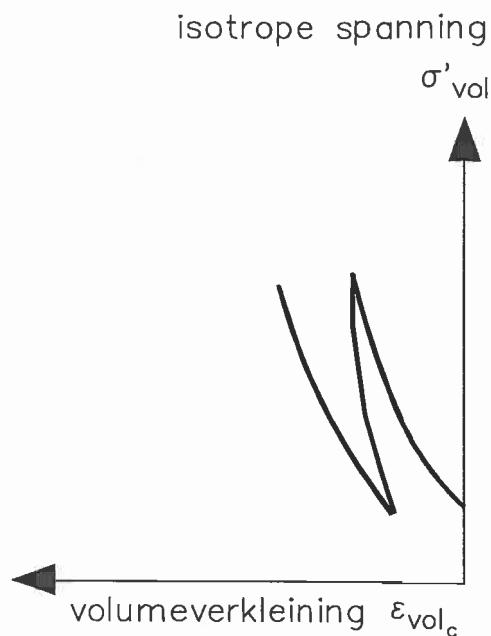
De parameters voor het model SLIQ2D worden afgeleid uit droge dichtheidsproeven. Hierbij is niet het doel de droge kritieke dichtheid te bepalen, maar om te meten wat het gedrag is van los gepakt zand onder droge (ofwel: volledig gedraineerde) omstandigheden. Er wordt hierbij vooral gekeken naar dilatant gedrag en naar het gedrag onder decompressie. De proef kan dan ook worden onderscheiden in twee gedeelten:

- bij constante isotrope spanning wordt de schuifspanning s verhoogd en de resulterende volumeverandering en de optredende schuifrek worden gemeten (figuur II.6).
- bij constante schuifspanning wordt de isotrope spanning verlaagd en wordt de resulterende volumeverandering gemeten (figuur II.7).

De resultaten van de metingen kunnen eenvoudig worden uitgedrukt in formulevorm. Door de parameters in de formules te variëren kunnen de formule en de meting vrijwel hetzelfde resultaat opleveren. Op deze wijze worden de invoerparameters bepaald. Zie voor nadere details deel III, paragrafen 16 tot en met 19.



Figuur II.6 Volumerek en schuifrek als functie van schuifspanning

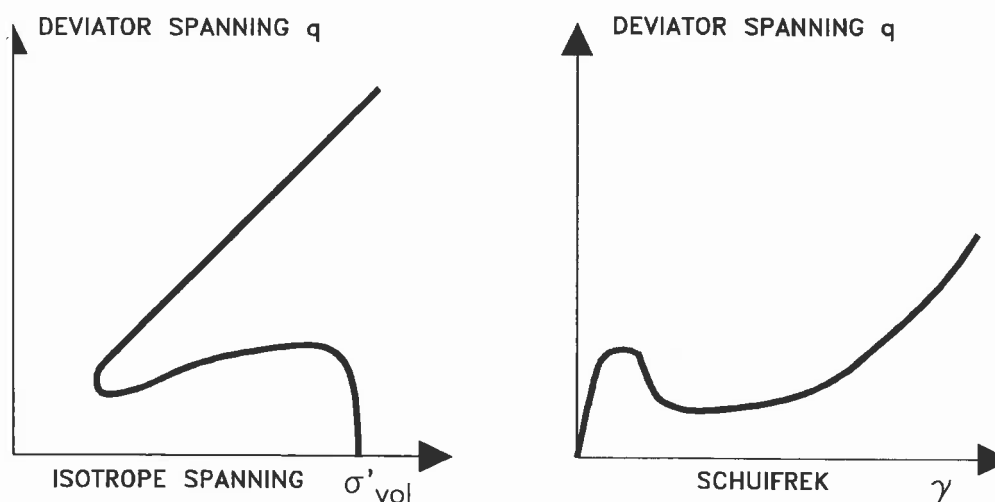


Figuur II.7 Volumerek als functie van isotrope spanning

2.5 Op welke wijze wordt instabiliteit bepaald ?

De definitie van instabiliteit, zoals die wordt gehanteerd in SLIQ2D, kan inzichtelijk worden gemaakt door te kijken naar proefresultaten van de natte (ongedraineerde) kritieke dichtheidsproef

(zie figuur II.8). In de linkse figuur wordt de ontwikkeling van de spanningen weergegeven, met op de horizontale as de isotrope spanning en op de verticale as de deviator- of schuifspanning. Een belangrijk detail is, dat het hier korrelspanningen betreft. Als er wateroverspanning ontstaat neemt de isotrope korrelspanning af.



Figuur II.8 Resultaten ongedraineerde triaxiaaltest

Het spanningspad begint bij schuifspanning nul. Nu wordt tijdens de proef de schuifspanning opgevoerd. Bij vastgepakt zand neemt de isotrope korrelspanning toe, omdat er wateronderspanning ontstaat. Bij losgepakt zand neemt de isotrope korrelspanning af, omdat er wateroverspanning ontstaat. Er kan een situatie ontstaan, dat ook de deviatorspanning afneemt. Blijkens de rechtse grafiek gaat dit gepaard met een grote schuifvervorming.

De spannings situatie in een talud is anders dan die in een triaxiaalproef. Dit wordt in het model in rekening gebracht.

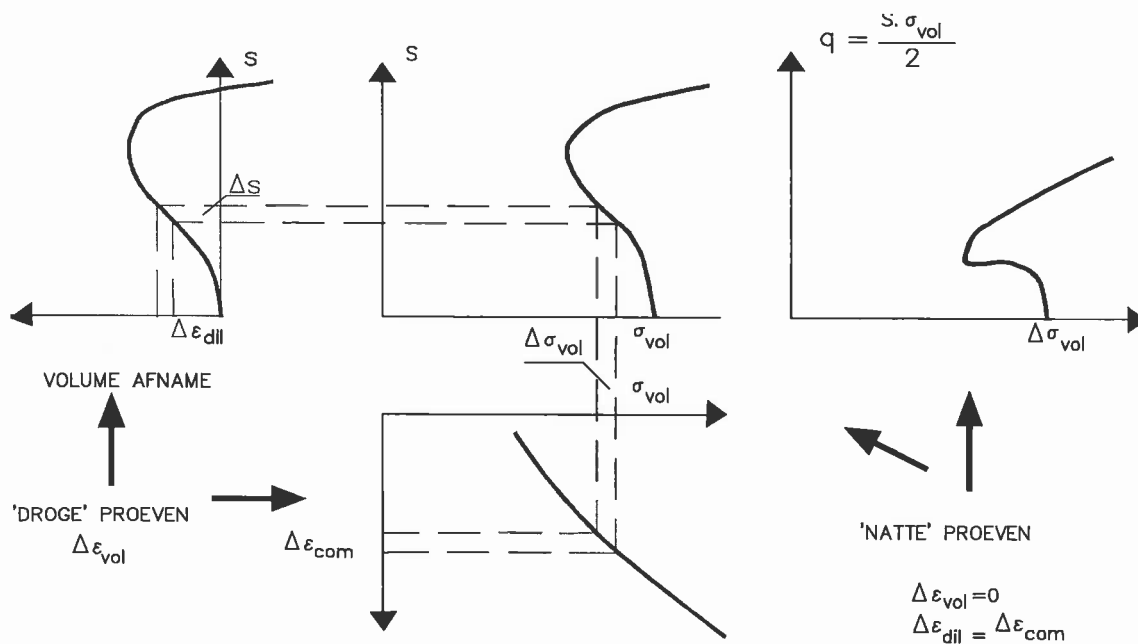
In SLIQ2D zijn de spannings-vervormingsrelaties gebaseerd op droge dichtheidsproeven. Door echter een kleine ongedraineerde spanningsverandering op te leggen kan wel degelijk ongedraineerd gedrag worden gesimuleerd. Hieruit volgt dan een mathematische voorwaarde voor evenwicht:

$$d\gamma_{xy} = \frac{1}{\lambda} d\tau_{xy}$$

Als λ kleiner is dan nul, dan staat hier: een toename in de schuifvervorming γ_{xy} gaat gepaard met een afname in de schuifspanning τ_{xy} . Dit staat gelijk aan instabiliteit. De parameter λ heet de eigenwaarde. Hierin zit een complex van spanningen, spannings-vervormingsrelaties en evenwichtsvoorwaarden, dat echter resulteert in één waarde voor ieder specifiek geval. Voor een uitgebreide beschrijving hoe dit in zijn werk gaat wordt verwezen naar Deel IV.

2.6 Wat is de relatie tussen gedraineerd en ongedraineerd gedrag ?

De invoerparameters zijn afkomstig uit droge (gedraineerde) kritieke dichtheidsproeven. Het instabiliteitscriterium geldt voor ongedraineerd gedrag, zoals bij de natte kritieke dichtheidsproeven. In het voorgaande is gesteld, dat beide in elkaar kunnen worden getransformeerd. Dit kan eenvoudig worden gedemonstreerd. In ongedraineerde proeven kan het volume niet toe- of afnemen. De isotrope grondspanning (is gelijk aan waterspanning plus korrelspanning) blijft constant. Het schuifspanningsniveau neemt toe. Er treedt in losgepakt zand dus een neiging tot volumeverkleining op. Hoe groot deze is kan worden afgelezen uit de (droge) dilatantieproef. Omdat er geen volumeverkleining op kan treden, moet dit gecompenseerd worden met een afname van de korrelspanning (zoals in de droge decompressieproef), zodat een neiging tot volumevergroting ontstaat. Beide neigingen moeten elkaar opheffen. Op deze wijze kan uit de (gedraineerde of droge) dilatantie en decompressieproef het verloop van spanningen in de natte of ongedraineerde proef worden berekend. Hoe dit in zijn werk gaat, is te zien in figuur II.9.



Figuur II.9 Transformatie van gedraineerde naar ongedraineerde resultaten

2.7 Hoe worden de beginspanningen bepaald ?

Bij de opzet van SLIQ2D is aangenomen dat een zettingsvloeiing in een gedraineerde situatie kan ontstaan door een kleine ongedraineerde verandering in schuifspanning. De geometrie is in deze gedachtengang ontstaan door een langzaam proces, zoals erosie of aanzanding, misschien voorzichtig baggeren of opspuiten. De verandering is in ieder geval zo langzaam, dat de begin-

spanningen in het talud volledig gedraineerd kunnen worden verondersteld. Eventuele waterspanningen die tijdens het vormen van het talud zijn ontstaan kunnen dissiperen. Er treden ook geregeld kleine, plotselinge belastingsveranderingen op, zoals een lokaal afschuivinkje of waterspiegeldaling door een passerend schip. Hierop reageert het zand praktisch ongedraineerd. Als de geometrie gunstig genoeg is (een flauwe taludhelling, een kleine taludhoogte) zal geen instabiliteit optreden, en dissiperen de waterspanningen. Er treedt geen blijvende spanningswijziging in het massief op. Maar onder bepaalde omstandigheden zal zo'n kleine, plotselinge belastingsverandering tot instabiliteit in één of meerdere punten leiden, omdat het zand daar, in die specifieke spanningstoestand, geen ongedraineerde wijziging in spanning op kan nemen zonder dat dit tot instabiliteit leidt.

SLIQ2D onderzoekt voor meerdere geometriën of instabiliteit zal optreden als het zand volledig ongedraineerd reageert op een kleine belastingsverandering. Om dat te kunnen doen, moeten de (gedraineerde) beginspanningen, die het resultaat zijn van de voorafgaande, langzame geometrieveranderingen, bekend zijn. Die beginspanningen zijn bepaald door gebruik te maken van berekeningen met het Eindige Elementen Model PLUTO, onder aanname van lineair elastisch-plastisch grondgedrag onder volledig gedraineerde omstandigheden. Door berekeningen te maken voor verschillende taludhellingen en taludhoogtes en de berekende spanningen te veralgemeniseren met behulp van benaderende formules is een consistent beeld verkregen van de spanningen bij een willekeurige taludhoogte en taludhelling. De exacte waarden van de spanningen zijn mede bepaald door het aangenomen grondmodel, en door de gebruikte invoerparameters bij de PLUTO-berekeningen. Het voordeel van de algemenering van deze spanningen in SLIQ2D is, dat nu sommen kunnen worden gemaakt met een goede benadering van de beginspanningen, zonder dat voor iedere som Eindige Elementen berekeningen hoeven te worden gemaakt.

2.8 De rekenprocedure in SLIQ2D

Het programma SLIQ2D neemt achtereenvolgens de volgende stappen:

- Leest de invoer in
- Verdeelt de geometrie in 500 punten (een vierkantennet met 25 punten evenwijdig aan het talud en 20 punten loodrecht op het talud)
- Begint bij een zeer flauw talud
- Berekent in ieder punt de optredende spanning met de benaderende formules
- Kijkt voor ieder punt of er instabiliteit optreedt (of de eigenwaarde λ negatief is) indien er een kleine verandering in schuifspanning, bijvoorbeeld ten gevolge van een taludversteiling, plaatsvindt.
- Maakt het talud een klein stapje steiler en herhaalt de twee voorgaande punten

Door voor ieder punt de flauwste helling te onthouden waarbij instabiliteit optreedt wordt de

uitvoer verkregen zoals die in de uitvoerfile en de grafiek gegeven wordt.

2.9 Wat is instabiliteit ?

In de huidige benadering wordt gesteld, dat geen vloeijing op zal treden als in geen enkel punt instabiliteit wordt gevonden. Als in één punt instabiliteit wordt berekend, dan wordt direct aangenomen, dat het gehele talud hierdoor instabiel wordt. Dit is een conservatieve aanname.

Het is mogelijk een minder conservatief criterium te formuleren (zie de Groot, 1994). Hierbij wordt ervan uitgegaan dat een verlies van stabiliteit in een punt gepaard gaat met een grote schuifvervorming op die plaats in het talud. Echter, aan beide zijden van het punt zit grond die nog niet verweekt is, en die daardoor weerstand zal bieden aan deze schuifvervorming. Hierdoor wordt de verweekte grond, die zijdelings wil vervormen, tegengehouden. In deze visie ontstaat daadwerkelijk bezwijken van de geometrie pas als de weerstand tegen schuifvervorming over een deel van de geometrie dusdanig is afgenomen dat een doorgaande schuifvervorming optreedt. Dit criterium is nader uitgewerkt en vervolgens opgenomen in een testversie van SLIQ2D. Uiteindelijk werd echter besloten om het criterium niet in de officiële SLIQ2D-versie op te nemen. Hiervoor zijn de volgende redenen:

1. het is prettig om een zekere mate van conservatisme in het model te hebben, omdat de uitkomst veilig moet zijn.
2. het verschil tussen het 'conservatieve' criterium en het minder conservatieve criterium bleek niet zeer groot: in de meeste gevallen waarin de berekeningen met beide criteria naast elkaar werden gelegd werd een kritieke taludhelling van bijvoorbeeld 1 : 4 volgens het conservatieve criterium 1 : 4,5 à 5,5 volgens het minder conservatieve criterium. Gebleken is dat een variatie in invoerparameters van gemiddelde waarden naar ongunstige waarden een aanzienlijk grotere invloed kan hebben.

Eén van de zaken die met de gedachtengang van het minder conservatieve stabiliteitscriterium inzichtelijk gemaakt kan worden is het feit dat een dunne laag vloeingsgevoelig materiaal niet hoeft te leiden tot gevaar voor een zettingsvloeijing. Immers, als de dunne laag wordt omgeven door lagen die een goede weerstand tegen schuifvervorming hebben, dan is de geometrie als geheel niet gevoelig voor vloeijingen, omdat er geen doorgaande schuifvoeg kan ontstaan.

2.10 Conclusie

In dit deel is getracht het begrip van het verschijnsel zettingsvloeiingen en de manier waarop dit in SLIQ2D is gemodelleerd toe te lichten. De beschrijving is redelijk oppervlakkig gehouden. In deel III wordt hetzelfde op een meer op de praktijk toegesneden manier behandeld. Deel IV en V

geven de exacte formuleringen en de wetenschappelijke achtergronden aan.

Deel III: Stap voor stap benadering

3.1 Wat te doen in een praktijkgeval ?

In dit deel wordt beschreven wat u moet doen als u in de praktijk met de mogelijkheid van een zettingsvloeiing wordt geconfronteerd. Voor dit geval gaan we uit van een bestaande geometrie; er is een onderwatertalud waar vermoedelijk losgepakt zand voorkomt onder een bekende helling en hoogte. U wilt weten of deze locatie blootstaat aan het risico van een zettingsvloeiing of niet. De verschillende stappen die benodigd zijn om deze vraag te beantwoorden worden in dit deel behandeld.

Om een goed beeld te krijgen van de totale gang van zaken van begin tot eind van een praktijkgeval is een uitgewerkt voorbeeld gegeven. Slechts in een beperkt aantal gevallen zal alles wat in dit hoofdstuk is beschreven ook moeten worden uitgevoerd. Vaak is er al snel voldoende inzicht in de vloeiingsgevoeligheid van een locatie, of is er onvoldoende reden om te verwachten dat een zo volledig mogelijk onderzoek concreet voordeel oplevert. Hierop zal in de eerste paragrafen worden ingegaan.

Een compleet programma van veldonderzoek, laboratoriumonderzoek en bureauonderzoek komt bij het computerprogramma SLIQ2D uit. Bij het gebruik van dit programma moet goed in het oog worden gehouden, dat het programma een beperkt toepassingsgebied heeft. Met name geldt dat de spanningen in een talud zijn afgeleid voor volledig gedraineerde omstandigheden. Dit wil zeggen, dat het talud tot stand is gekomen als gevolg van een zeer langzaam proces, zoals bijvoorbeeld erosie. Het is nog onduidelijk in hoeverre meer dynamische omstandigheden, zoals bijvoorbeeld baggeren en storten van zand onder water hier onder vallen.

Onder bepaalde omstandigheden kan worden afgeschat of een te baggeren helling onder statische omstandigheden stabiel is of niet, en kan aan de hand van een inschatting van de dynamische invloed van de baggerwerkzaamheden de haalbaarheid van een zekere taludhelling onder gegeven grondgesteldheid worden onderzocht. Hier is echter grote voorzichtigheid geboden.

3.2 Bestaande adviespraktijk

In Zeeland is het gebruikelijk de stabiliteit van de vooroevers te beoordelen aan de hand van de zogenaamde "Zeeuwse criteria". Deze zijn opgesteld naar aanleiding van een onderzoek naar de stabiliteit van de vooroevers dat is uitgevoerd door Wilderom (1979). Er werden gegevens verzameld van circa 150 zettingsvloeiingen, waarmee kon worden vastgesteld dat in de meeste gevallen waarbij een zettingsvloeiing had plaatsgevonden werd voldaan aan alle drie de volgende criteria:

- het zand bestond uit jong holocene marine afzettingen.
- het zand was (vermoedelijk) losgepakt.
- de steilste helling over ten minste 5 meter hoogte kort voor het optreden van de instabiliteit

bedroeg 1 : 3 of steiler.

Het eerste criterium werd verbonden met het aanzanden van oude stroomgeulen. Oorspronkelijk bestond Zeeland uit aanzienlijk meer eilanden dan tegenwoordig. In de loop der historie werden deze eilanden verbonden tot de huidige geografie ontstond. De oorspronkelijke stroomgeulen zijn aangezand. Het bleek volgens Wilderom dat een groot deel van de vloeingsgevoelige gebieden zich ter plaatse van zo'n aangezande stroomgeul bevonden. De plaatsen waar jong holocene afzettingen worden gevonden zijn bij de beheerders bekend middels de geologische kaarten langs de dijken.

Ten aanzien van het tweede punt is in feite weinig bekend. In een aantal gevallen is na een opgetreden vloeijing de dichtheid van het zandpakket gemeten. Plaatselijk werden dan meestal wel losse pakkingen aangetroffen. Bekend is voorts dat snel aangezande geulen een losse pakking kunnen vertonen. De theorie rond losse pakkingen en zettingsvloeiingen is inmiddels zo ver gevorderd dat deze eis overigens wel onderbouwd kan worden.

Het derde, geometrische, criterium geeft aan dat taludhelling en taludhoogte van belang zijn. In tegenstelling tot de gemiddelde taludhelling en de totale taludhoogte in SLIQ2D wordt hiermee een steilste taludhelling en de hoogte waarover deze voorkomt bedoeld. Op dit criterium, dat gebaseerd is op ervaring, valt theoretisch wel wat aan te merken, zoals het feit dat een iets flauwere taludhelling over een grotere taludhoogte zeker zo gevoelig voor zettingsvloeiingen kan zijn. Het is echter een feit dat het 1 : 3 criterium in Zeeland de laatste 15 jaar overwegend met succes is toegepast.

Een nadeel van de methode is, dat de ervaring zich beperkt tot Zeeland. Derhalve zijn de bevindingen voor andere gebieden en andere omstandigheden niet zonder meer toepasbaar. Zaken als de invloed van de korreldiameter of de grootte van de getijrange of de geologische (spannings)geschiedenis kunnen nog niet worden gemodelleerd. Hiervoor is meer fundamentele kennis nodig.

Een voorbeeld van een andere omstandigheid is de situatie bij zandwinputten. Zeker in het verleden werd bij het verstrekken van vergunningen veelal uitgegaan van een steilste taludhelling van 1 : 4. Taludhoogte speelde hierbij geen rol. Tegenwoordig wordt hier, mede gezien de ontwikkeling dat bestaande zandwinputten dieper worden uitgebaggerd teneinde zand te winnen zonder nieuwe locaties te hoeven gebruiken, wat genuanceerder over gedacht.

3.3 Voorgestelde aanpak

In eerste instantie dient te worden nagegaan wat de eenvoudigste manier is om een uitspraak te doen over de vloeingsgevoeligheid van een bepaalde locatie. Ten aanzien van de Zeeuwse vooroevers in getijgebieden wordt hierbij niet veel afgeweken van de huidige adviespraktijk. De eerste twee criteria kunnen worden gehandhaafd. Het vaststellen van een al dan niet losse pakking is in veel gevallen niet mogelijk zonder grondonderzoek. Bij de jonge marine afzettingen kan

men daar eenvoudig van uitgaan. In een later stadium kan men dan alsnog besluiten tot het uitvoeren van grondonderzoek.

Ten aanzien van de geometrie wordt een meer genuanceerde aanpak voorgesteld.

Met de huidige kennis kan worden ingezien dat het criterium "een steilste helling 1 : 3 over ten minste 5 meter hoogte" aangescherpt kan worden. Door onderzoek is aangetoond dat:

- het uitmaakt of de steilste helling onderaan, middenin of bovenaan het talud wordt gevonden
- het niet alleen de steilste helling is welke bepalend is, maar dat ook de helling van de rest van het talud invloed heeft
- dat een minder steile helling, doch over een grotere taludhoogte even vloeiingsgevoelig kan zijn
- dat ook de totale taludhoogte invloed heeft, met andere woorden, een steile helling van 1 : 3 over 5 meter hoogte in een talud met een totale hoogte van 40 meter is ongunstiger dan dezelfde helling bij een totale taludhoogte van 10 meter.

Deze gevoeligheden zijn onderzocht met het model SLIQ2D (Stoutjesdijk, 1994b). Bij deze studie is ook een heranalyse van de gegevens van Wilderom (1979) uitgevoerd, om te zien of de trends welke uit de berekeningen volgden bevestigd konden worden met de gegevens van in het verleden opgetreden oever- en dijkvallen. Hiertoe is een procedure ontwikkeld om de taludgeometriën op een zo reproduceerbaar mogelijke manier in categoriën in te kunnen delen.

3.4 Karakterisering van de geometrie

In het algemeen kan de dwarsdoorsnede van een talud worden benaderd met ten hoogste drie lijnen. Er zijn dan vijf taludtypen te onderscheiden (zie ook figuur III.1):

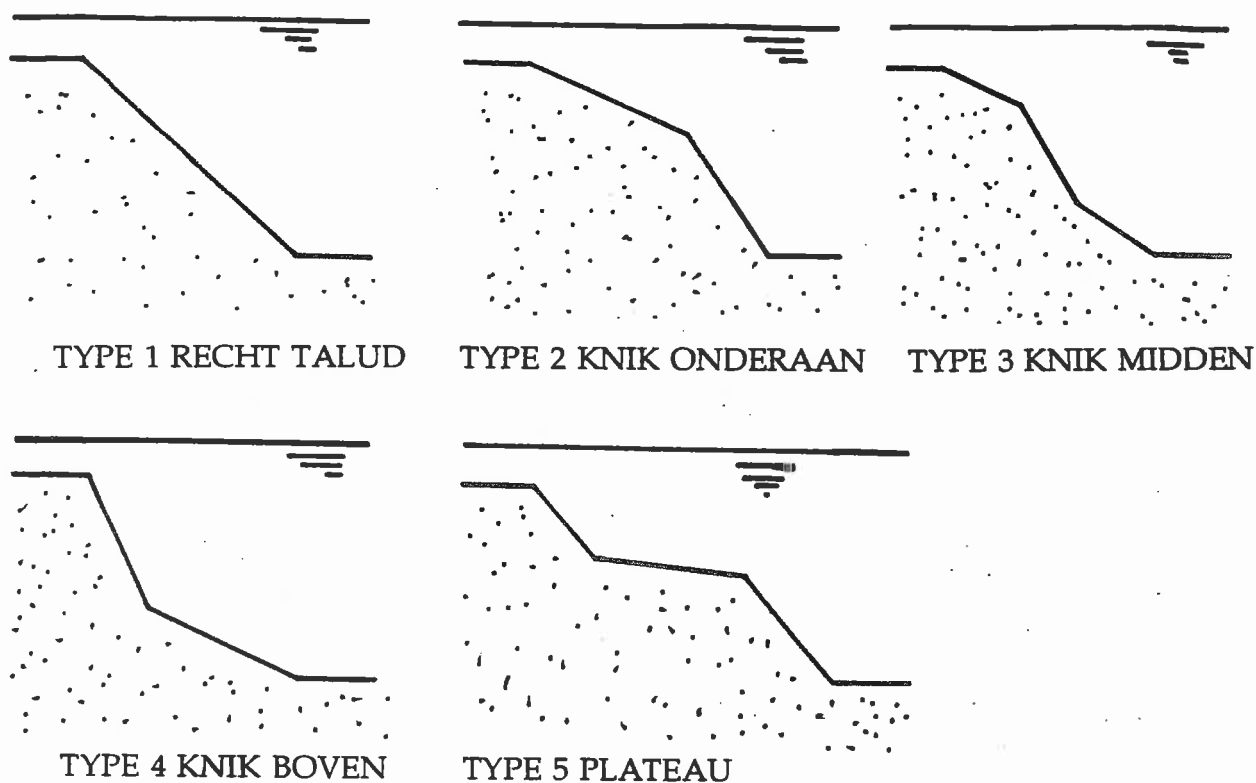
Type 1: een recht talud

Type 2: een geknikt talud met het steilste gedeelte onderaan het talud

Type 3: een geknikt talud met het steilste gedeelte in het midden

Type 4: een geknikt talud met het steilste gedeelte bovenaan het talud

Type 5: een geknikt talud met steile gedeelten onderaan en bovenaan het talud, en in het midden een plateau



Figuur III.1 Standaard taludtypen

Omdat het doel was om de praktijkgevallen te vergelijken met de resultaten van SLIQ2D berekeningen, en omdat SLIQ2D alleen geschikt is om te rekenen met taludtypen 1 en 2, moeten de taludtypen 3, 4 en 5 worden omgewerkt tot ofwel taludtype 1, ofwel taludtype 2. Dit gaat als volgt:

- taludtype 3 bestaat uit 3 lijnstukken. Deze situatie wordt gekarakteriseerd door drie taludhellingen, en drie hoogtes waarover deze voorkomen. Beginnend aan de top van het talud zijn dit α_1 , α_2 , α_3 en h_1 , h_2 , h_3 . Taludtype 3 wordt omgewerkt tot taludtype 2 door het onderste, flauwe gedeelte te elimineren volgens de formule:

$$h_2 \text{ wordt } h_2 + h_3 \frac{\cot \alpha_2}{\cot \alpha_3}$$

in feite wordt het middengedeelte nu onderaan het talud geplaatst, en wordt het flauwe gedeelte onderaan het talud verdisconteerd door de hoogte waarover het steile voorkomt iets te vergroten.

- taludtype 4 bestaat uit twee lijnstukken. Dit kan worden beschreven met twee taludhellingen (α_1 en α_2) en twee hoogtes (h_1 en h_2) waarover deze voorkomen. Ook in dit geval wordt het flauwe gedeelte onderaan het talud in rekening gebracht door de hoogte h_1 te vergroten volgens:

$$h_1 \text{ wordt } h_1 + h_2 \cdot \frac{\cot \alpha_1}{\cot \alpha_2}$$

Er ontstaat een taludtype 1.

- taludtype 5 bestaat uit drie lijnstukken, wat wordt beschreven met α_1 , α_2 , α_3 en h_1 , h_2 , h_3 . Er zijn twee steile hellingen. Uit SLIQ2D-berekeningen blijkt dat een steile helling onder aan het talud ongunstiger is dan een steile helling boven aan het talud. Daarom wordt als algemene stelregel gehanteerd dat de bovenste twee lijnstukken kunnen worden geschematiseerd met behulp van 1 lijnstuk welke loopt van de top van het talud naar de bovenkant van het steile gedeelte onder aan het talud. Hierdoor ontstaat ofwel een taludtype 2 ofwel een taludtype 4. Het taludtype 4 wordt op de hiervoor beschreven manier omgewerkt tot een taludtype 1. Van de gegeven werkwijze kan worden afgeweken als h_1 veel groter is als h_3 of als de helling boven aan het talud dusdanig veel steiler is als de helling onder aan het talud dat het bovenste gedeelte maatgevend wordt geacht. In dat geval worden de onderste twee lijnstukken samengevoegd en ontstaat een taludtype 4. Deze wordt vervolgens omgewerkt tot een taludtype 1.

Door deze procedure te volgen kan iedere geometrie worden gekarakteriseerd door ofwel een recht talud ofwel een geknikt talud met een steilste helling onder aan het talud. Voor een recht talud zijn dan eenvoudig de taludhelling en de totale taludhoogte maatgevend. Voor een geknikt talud moet rekening worden gehouden met de totale taludhoogte, en met α_1 , α_2 , h_1 en h_2 . Als alleen de steilste helling wordt beschouwd, dan wordt voor de geometriën van opgetreden vallen (Wilderom) het resultaat van tabel III.1 gevonden.

Talud type	Steilste helling (gemiddeld over alle gevallen)
1	1 : 4,1
2	1 : 3,5
3	1 : 2,6
4	1 : 2,3
5	1 : 3,3

Tabel III.1 Steilste helling per taludtype van in het verleden opgetreden vallen

Volgens de verwachting is taludtype 1 het ongunstigst, omdat de steilste helling over de volledige taludhoogte aanwezig is. Dan komen taludtypen 2 en 5, waarbij de steilste taludhelling onder aan het talud ligt. Taludtypen 3 en 4 zijn het gunstigst, omdat de steilste helling hoger op het talud

aanwezig is.

Wat opvalt in tabel III.1 is dat de steilste helling voor taludtypen 1, 2 en 5 gemiddeld flauwer is dan 1 : 3. Bovendien komen deze steilste hellingen niet over 5 meter hoogte voor maar gemiddeld over circa 20 meter.

3.5 SLIQ2D-berekeningen

In Stoutjesdijk (1994b) is vervolgens een systematische serie SLIQ2D berekeningen uitgevoerd teneinde de belangrijkste invloeden te onderzoeken. Hierbij zijn de zandsoort, de relatieve dichtheid, de taludhoogte, de taludhelling boven de knik (indien aanwezig) en hoogte van het gedeelte boven de knik (indien aanwezig) gevarieerd. Vervolgens wordt door SLIQ2D de taludhelling berekend waarbij instabiliteit ontstaat. Dit is de taludhelling over de gehele taludhoogte indien er sprake is van een ongeknikt talud, en de taludhelling onder de knik indien er sprake is van een geknikt talud. Dit wordt aangeduid met 'kritieke taludhelling'.

Naar aanleiding van de berekeningen werden als voornaamste conclusies getrokken dat:

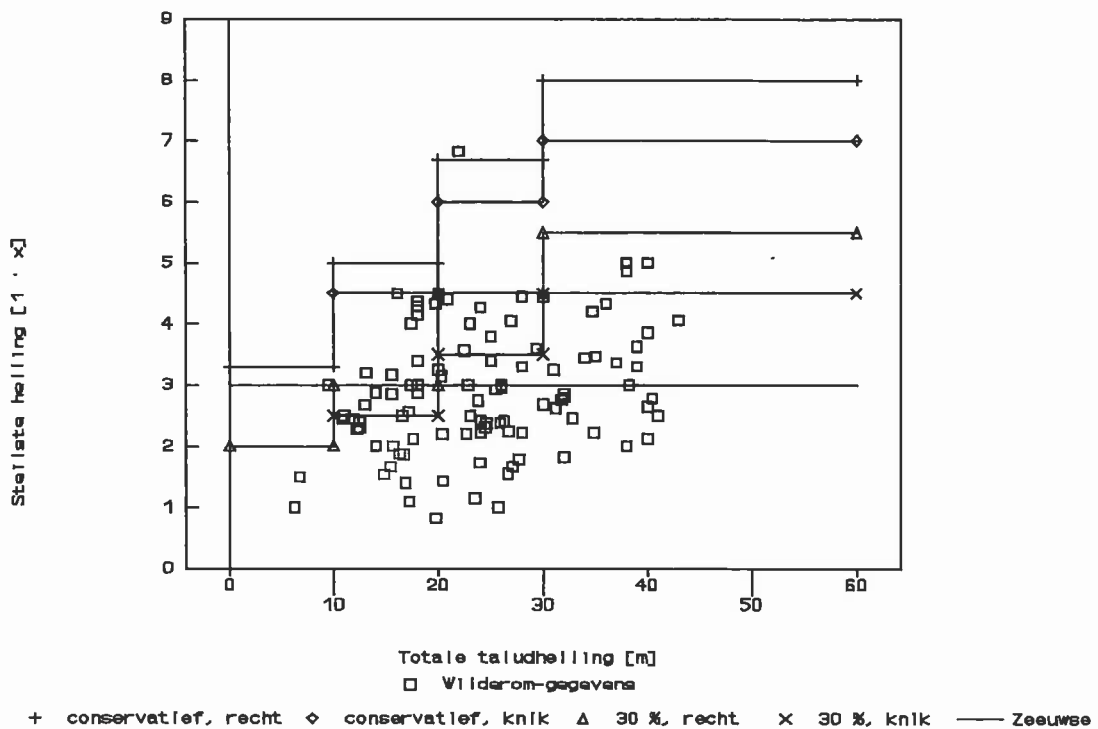
- de eigenschappen van de zandsoorten grote invloed hadden op het resultaat.
- de zanddichtheid waarvoor de berekening werd uitgevoerd grote invloed had.
- indien een geknikt talud wordt beschouwd, dan is de invloed hiervan groter naarmate de knik scherper is (groter verschil in taludhelling onder en boven de knik) en naarmate het knikpunt lager op het talud ligt. Een geknikt talud heeft alleen significante invloed op het rekenresultaat als h_1/h_2 kleiner is dan 1 en $\cot\alpha_1/\cot\alpha_2$ kleiner is dan 2.
- de meeste invloed wordt uitgeoefend door de totale taludhoogte en de steilste helling. Bij een geknikt talud kan de situatie iets gunstiger liggen ten opzichte van een ongeknikt talud als de hoogte waarover het steilste gedeelte voorkomt klein is, en als de helling boven de knik flauw is.

3.6 Waarden voor de kritieke taludhelling

Voor de kritieke taludhelling (de taludhelling over de gehele hoogte bij een recht talud, of de steile helling onder de knik bij een geknikt talud) kunnen alleen indicatieve waarden worden gegeven. Deze waarden zijn namelijk gekoppeld aan het gewenste veiligheidsniveau. Hiervoor zijn geen algemene voorschriften. Gekozen kan worden voor een conservatieve of veilige benadering, waarbij de kans op het optreden van een zettingsvloeiing klein is, of een benadering waarbij een zeker risico aanvaardbaar wordt geacht. Deze keuze moet per geval worden gemaakt.

Om een idee te geven van de consequenties van de verschillende benaderingen is figuur III.2 samengesteld. In de figuur zijn de totale taludhoogte en de steilste of kritieke taludhelling tegen

elkaar uitgezet. De vierkanten zijn afgeleid uit de in het verleden opgetreden oever- en dijkvallen, welke zijn afgeleid uit een heranalyse van de gegevens van Wilderom (1979). De punten stellen echter niet de steilste taludhelling over 5 meter taludhoogte voor, maar *de steilste helling welke voorkomt in het talud, ongeacht de hoogte waarover deze wordt gevonden, uitgezet tegen de totale taludhoogte*. Er is een grote spreiding te zien. Deze spreiding kan overigens verklaard worden doordat de puntenwolk is samengesteld uit gevallen uit heel Zeeland, waarbij de zandeigenschappen en de dichtheid waarbij de val is ontstaan nogal wat variatie kunnen vertonen.



Figuur III.2 Vergelijking van de verschillende criteria

Ter vergelijking zijn vijf verschillende criteria in de figuur ingetekend:

- het bekende Zeeuwse criterium (een taludhelling 1 : 3 over tenminste 5 meter). Te zien is dat, zeker voor grotere taludhoogtes, nogal wat punten boven deze lijn liggen.
- een lijn welke is aangeduid als 'conservatief, recht'. Deze lijn is gebaseerd op SLIQ2D-berekeningen voor een recht talud, waarbij de parameters bewust zo zijn gekozen dat de resultaten aan de bovengrens van de puntenwolk terecht komen. Een voordeel ten opzichte van het 'Zeeuwse criterium' is dat de invloed van de taludhoogte nu beter tot zijn recht komt. Voor grotere taludhoogtes lijkt de lijn overigens wel erg conservatief (1 : 7 à 8). Een

taludhelling van bijvoorbeeld 1 : 6 geeft een betere overeenstemming met de praktijk. Omdat er geen praktijkgevallen zijn met een taludhoogte groter dan 45 meter is enig conservatisme overigens wel op zijn plaats.

- een lijn welke is aangeduid als 'conservatief, knik'. Deze lijn kan worden toegepast als wordt voldaan aan de eisen $h_1/h_2 > 1$ en $\cot\alpha_1/\cot\alpha_2 > 2$. Er is dan sprake van een talud met een relatief flauwe helling boven de knik en een relatief kleine hoogte waarover de steile helling voorkomt.
- twee lijnen welke zijn aangeduid als '30 %, recht' en '30 %, knik'. Deze lijnen geven de grens aan waarbij ongeveer 30 % van de gevallen van Wilderom boven deze lijnen komen te liggen.
- een lijn welke is aangeduid met 'Zeeuwse'. Dit is het Zeeuwse criterium: een helling van 1 : 3 is kritiek, mits deze over een hoogte van meer dan 5 meter voorkomt.

3.7 Wat te doen als de situatie als onvoldoende veilig wordt beschouwd ?

Met behulp van de voorgaande beschrijvingen kan een geometrie, met mogelijk losgepakt zand, en een bekende taludhelling en taludhoogte, worden beoordeeld op basis van alleen de geometrische karakteristieken. Wat is de aangewezen gang van zaken als, naar het oordeel van de verantwoordelijke persoon, de situatie als onvoldoende veilig moet worden beschouwd ?

Er zijn twee mogelijkheden, waarbij niet meteen gedacht hoeft te worden aan het nemen van maatregelen zoals bestorten of het uitvoeren van een groot terrein-, laboratorium- en bureauonderzoek. Men kan denken aan het uitvoeren van sonderingen, teneinde vast te stellen of de grond inderdaad uit losgepakt zand bestaat. Hoewel de correlatie tussen dichtheid en sondeerwaarde slechts beperkte waarde heeft, wordt op deze wijze toch een indicatie verkregen omtrent de pakking van de ondergrond. Door een deskundige interpretatie kan op deze wijze ook een beter idee worden verkregen van de vloeingsgevoeligheid van de lokatie.

Een andere mogelijkheid is om de breedte van de vooroever in de beschouwing te betrekken. Het gaat bij het beoordelen van de veiligheid met name om de vraag of bij een eventuele vloeijing de dijk in gevaar wordt gebracht of niet. Er wordt dan dus gekeken naar de kans dat, als een vloeijing optreedt, de teen van de dijk wordt bereikt.

De inscharingslengte, gedefiniëerd als de horizontale afstand tussen de top van het talud voor de vloeijing en de plaats van de steile aanzethelling na de vloeijing, kan eigenlijk alleen als kansfunctie benaderd worden. De kans dat de inscharingslengte groter is dan de breedte van de vooroever kan worden berekend door de inscharingslengte als normaal verdeelde statistische grootte te veronderstellen met een verwachtingswaarde van 2,63 maal de taludhoogte en een standaardafwijking van 1,69 maal de taludhoogte. Deze getallen zijn afgeleid in Stoutjesdijk (1994d) op basis van de gegevens van Wilderom (1979). Er kan nu bijvoorbeeld worden berekend dat er 95 % kans bestaat dat de inscharingslengte kleiner is dan 5,4 maal de taludhoogte.

Deze methode levert al snel waarden voor de inscharingslengte van 100 meter of meer op. Er moet dus, wil de methode zinvol zijn, een brede vooroever aanwezig zijn. De grootste inscharingslengte welke uit de grafieken die van de dwarsdoorsnedes bij de gegevens van Wilderom is gemeten bedraagt overigens 312 meter.

Alleen indien men de schade en eventueel herstel als gevolg van een vloeijing wenst te aanvaarden, en er komen geen constructies of mensenlevens in gevaar, dan kan dit een aanvaardbare methode zijn.

3.8 Wanneer uitgebreid onderzoek ?

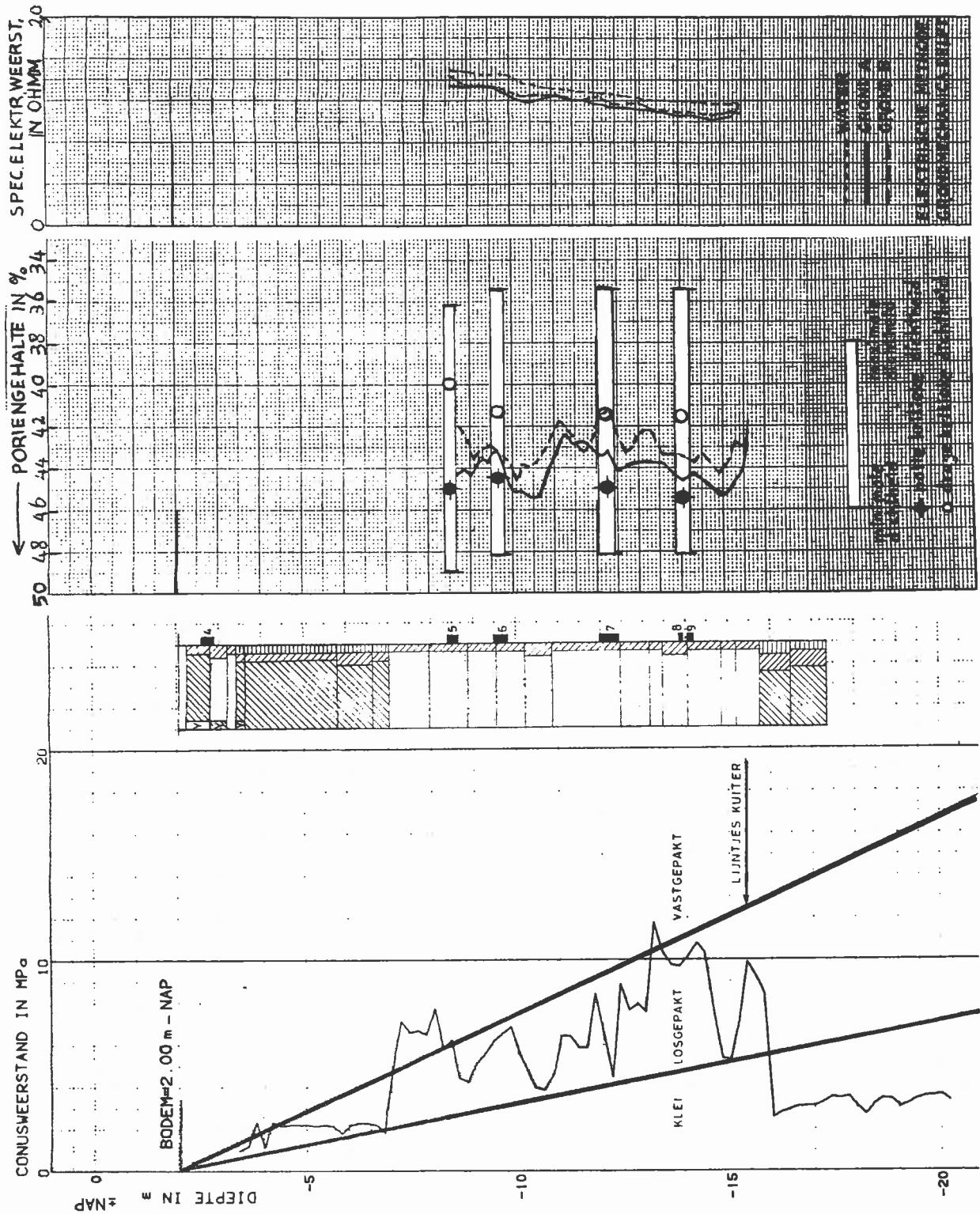
Indien volgens de eenvoudige criteria het optreden van een zettingsvloeijing niet kan worden uitgesloten, en men de gevolgen van een vloeijing niet wenst te aanvaarden, dan staan er twee mogelijkheden open:

- men kan de taludhelling beschermen, bijvoorbeeld door bestorting
- men kan nader onderzoek uitvoeren.

Bestorting voorkomt dat een verdere versteiling van het talud optreedt. Nadeel van bestorten is dat het, zeker als het een grotere lengte betreft, nogal kostbaar is. Andere methoden, zoals verdichting, zijn, eveneens uit kostenoverwegingen, weinig toegepast. Daarom kan nader onderzoek worden overwogen. Uit dit onderzoek kan volgen dat bestorting niet nodig is, of dat kan worden volstaan met beperkte maatregelen. Vaak echter zal ook na een uitgebreid onderzoek de conclusie zijn dat een zettingsvloeijing niet uitgesloten wordt geacht, en dan zijn maatregelen alsnog noodzakelijk. Als vuistregel wordt hiervoor gegeven dat de kosten van nader onderzoek, gedeeld door de kans dat als uitkomst wordt gevonden dat er niet bestort hoeft te worden, lager uitvallen dan de kosten van bestorten.

Als bijvoorbeeld de kosten van bestorten 2,5 miljoen gulden bedragen en men schat de kans dat met nader onderzoek niet bestort hoeft te worden op 10 % ($p = 0,1$) dan kan men uitrekenen dat nader onderzoek voor maximaal 2,5 ton een verantwoord bedrag kan zijn. Een inschatting op basis van de huidige inzichten geeft aan dat de genoemde kans van 10 % in de meeste gevallen de bovengrens zal zijn. Voor een uitgebreid en redelijk volledig onderzoek, inclusief boringen en dichtheidsmetingen op het water, is het bedrag van 2 à 2,5 ton een redelijke indicatie.

Nader onderzoek is een rekbaar begrip. In het meest eenvoudige geval worden alleen dichtheidsmetingen of sonderingen langs de oevers uitgevoerd. In het meest uitgebreide geval worden, bij voorkeur op het water, dichtheidsmetingen, sonderingen en boringen verricht, worden in het laboratorium zeefkrommes, minimum dichtheden, maximum dichtheden en afrondingsgetallen bepaald, worden droge en natte triaxiaalproeven uitgevoerd, en wordt met bureaustudie, berekeningen en analyse een inschatting gegeven van de stabiliteit van de beschouwde helling.



Figuur III.3 Grondonderzoek en laboratoriumonderzoek voor praktijkvoorbeeld

3.9 Grondonderzoek

De eerste stap in het nader beoordelen van een bestaande situatie is het uitvoeren van een gedegen grondonderzoek.

Uit het voorgaande zal duidelijk zijn geworden, dat zettingsvloeiingen plaatsvinden in losgepakt zand. De twee eerste vragen zijn dus: betreft het zand en zo ja, is dit losgepakt? Deze vragen kunnen in een verkennend onderzoek worden beantwoord door sonderingen met meting van de mantelwrijving uit te voeren. Met behulp van het wrijvingsgetal kan een indicatie worden verkregen omtrent de grondsoort.

De conusweerstand kan gebruikt worden om de orde-grootte van de dichtheid af te schatten. Hiervoor wordt in Nederland vaak gebruik gemaakt van de zogeheten 'lijntjes van Kuitert' die op basis van de sondeerweerstand onderscheid maakt in klei, losgepakt zand en vastgepakt zand. Deze lijnen zijn ook aangegeven in figuur III.3. Internationaal worden vaak verbanden afgeleid door Baldi of Schmertmann toegepast. De correlatie tussen de conusweerstand en de dichtheid is over het algemeen matig.

3.10 Boring en elektrische dichtheidsmeting

Blijkt er inderdaad sprake te zijn van losgepakt zand, dan wordt het van belang te weten wat de dichtheid precies is. Hiervoor kunnen elektrische dichtheidsmetingen worden uitgevoerd. Bij de elektrische dichtheidsmeting wordt een sondeerstang de grond ingeduwd. Op twee punten langs de sondeerstang zitten elektrische sensoren die bepalen wat de elektrische geleidbaarheid van grond plus water is. Tevens wordt de geleidbaarheid van het grondwater ter plaatse gemeten. Aangezien deze elektrische geleiding voornamelijk door het water in de poriën plaatsvindt, is de verhouding van deze twee geleidbaarheden een maat voor het poriëngehalte. Een voorbeeld van het resultaat van een elektrische dichtheidsmeting is gegeven in figuur III.3.

Is men van plan SLIQ2D toe te gaan passen, dan moeten ook boringen worden uitgevoerd, met als doel enerzijds de classificatie van de grond, en voorts om uit de boringen monsters te kunnen nemen voor bepoeving in het laboratorium (korrelverdeling, kritieke dichtheidsproeven, minimum en maximum dichtheden, dichtheidsijking, afrondingsgetal). In figuur III.3 is ook de bijbehorende informatie uit de boring gegeven.

3.11 Minimum en maximum dichtheid

Het laboratoriumonderzoek wordt uitgevoerd op monsters die uit de boringen komen. Het aantal monsters dat genomen wordt is afhankelijk van de mate waarin de grond variabel is en van de omvang en het belang van het project.

Uit enkele onderzoeken wordt aanvullende informatie gehaald, waar een deskundige al veel

aan heeft. Aanbevolen wordt om van ieder monster in ieder geval minimum en maximum dichtheid te bepalen.

De minimum dichtheid (maximum poriëngehalte n_{max}) wordt bepaald door zand zo los mogelijk in een koker te strooien. De maximum dichtheid (minimum poriëngehalte n_{min}) wordt bepaald door in een koker laagjes zand te strooien en deze met trillingen te verdichten.

Bij een eerste inventarisatie speelt het begrip relatieve dichtheid een grote rol. De relatieve dichtheid is gedefiniëerd als:

$$Dr = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}}$$

waarin: Dr = relatieve dichtheid in procenten
 n_{max} = maximum poriëngehalte
 n_{min} = minimum poriëngehalte
 n = poriëngehalte (in-situ of van monster)

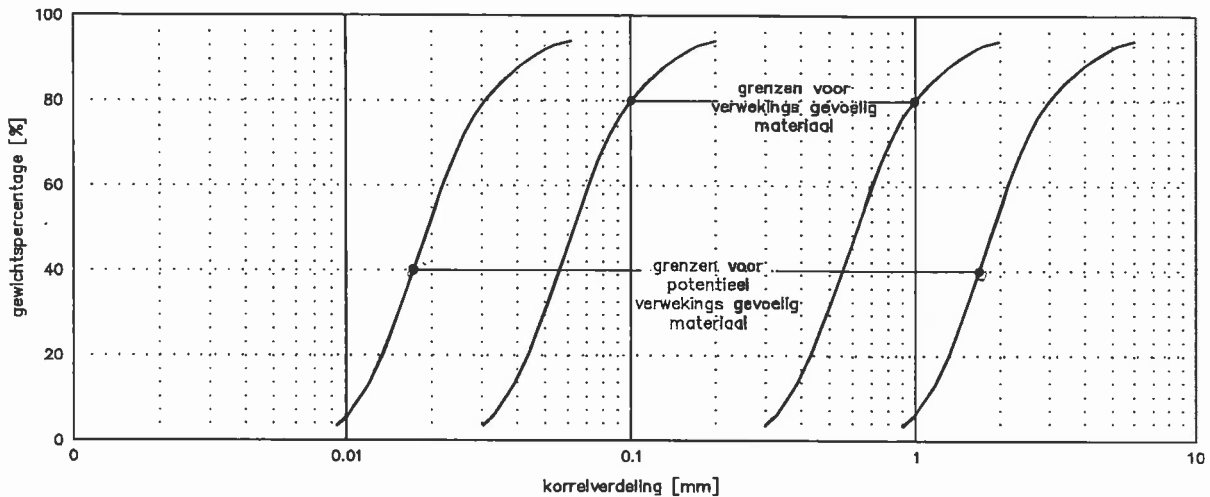
Als het poriëngehalte in-situ en de minimum en maximum dichtheid bekend zijn dan kan de relatieve dichtheid worden berekend. Hieraan kan de volgende classificatie worden gekoppeld:

$Dr < 0,33$: losgepakt zand
 $0,33 < Dr < 0,67$: middelmatig gepakt zand
 $0,67 < Dr$: vastgepakt zand

In het praktijkvoorbeeld zijn uit de boring vier monsters uit het losse zand geselecteerd. In figuur III.3 zijn de minimum en maximum dichtheid van de monsters aangegeven met een balk in het dichtheidsdiagram.

3.12 Zeefkromme en afrondingsgetal

Hoewel de relatie nog niet theoretisch kan worden gekwantificeerd, lijken de gemiddelde korreldiameter en de hoekigheid van de korrels in de praktijk een rol te spelen in de vraag bij welke taludhelling en taludhoogte een vloeijing optreedt. De korreldiameter is bepalend voor de doorlatendheid. Deze kan een rol spelen in de vraag hoe snel optredende waterspanningen kunnen dissiperen. Dit speelt waarschijnlijk ook een rol bij de identificatie van het verwekinggevoelige gebied op basis van de zeefkromme, zoals in figuur III.4 (Ishihara, 1986). Overigens vallen de meeste Nederlandse zanden binnen de aangegeven grenzen van het meest verwekingsgevoelige gebied. Naast de korrelgrootte kan het ook van belang te zijn te weten welk percentage silt zich in de grond bevindt.



Figuur III.4 Verwerkingsgevoeligheid als functie van korreldiameter (Ishihara, 1986)

De afronding van de korrels kan invloed hebben op de hoek van inwendige wrijving en de gevoeligheid van het materiaal voor schuifvervorming. Het bepalen van het afrondingsgetal gebeurt onder de microscoop. Door aan een groot aantal korrels een cijfer te geven wordt de gemiddelde afronding bepaald. Een volmaakt rond materiaal heeft een afrondingsgetal 1. Zeer hoekig materiaal heeft een afrondingsgetal van bijvoorbeeld 0,3. Deze getallen worden ook wel met 100 vermenigvuldigd.

3.13 Yking elektrische dichtheidsmeting

Om een zo correct mogelijk beeld te krijgen van de terreindichtheid wordt op de monsters vaak een ijking van de elektrische dichtheidsmeting uitgevoerd. Hiertoe wordt in het laboratorium van een monster bij een aantal (bekende) dichtheden de elektrische geleidbaarheid gemeten. Dit legt een rechtstreeks verband tussen dichtheid en elektrische geleidbaarheid. Het is van belang dit voor een aantal monsters te doen, omdat er tussen locaties verschillen mogelijk zijn van één of meer procenten in het poriënpercentage. De aanwezigheid van kleilaagjes of schelpmateriaal beïnvloedt de elektrische geleidbaarheid.

3.14 Natte en droge kritieke dichtheid

Een onmisbare schakel tussen de praktijk en het model SLIQ2D zijn volledig gedraineerde

triaxiaalproeven, inclusief decompressieproef. Op ieder monster moeten bij verschillende dichtheden, liefst zo dicht mogelijk bij de terreindichtheid, proeven worden gedaan. De gemeten volumeveranderingen en schuifrekken als functie van dichtheid en spanning worden gebruikt om de invoer voor SLIQ2D te genereren.

Strikt genomen is het niet nodig om kritieke dichtheden van een monster te bepalen. Toch is het aan te bevelen om niet alleen de droge kritieke dichtheid te bepalen, maar liefst ook ongedraineerde proeven te doen om de natte kritieke dichtheid van een monster te bepalen. In het voorbeeld in figuur III.3 zijn deze ook aangegeven. Als algemene stelregel kan worden gehanteerd, dat naarmate de in-situ dichtheid gerekend vanaf de meest vaste pakking dichter naar de natte kritieke dichtheid nadert de situatie ongunstiger is.

3.15 Berekeningen

Het minimale programma om met SLIQ2D zinnige berekeningen uit te kunnen voeren is derhalve:

- boringen om monsters te kunnen nemen
- elektrische dichtheidsmeting om de dichtheid ter plaatse te meten
- gedraineerde triaxiaalproeven om de spannings-vervormingsrelaties te bepalen.

Met de resultaten van de gedraineerde triaxiaalproeven hebt u in principe voldoende informatie om berekeningen te kunnen maken met SLIQ2D. De resultaten moeten dan nog wel gecorrigeerd worden voor membraanindringing en de gemeten verbanden moeten worden omgezet in parameters die als invoer voor SLIQ2D gebruikt kunnen worden.

Deze omwerking is voornamelijk een tamelijk specialistische procedure. In de volgende paragrafen wordt uitgelegd waaruit deze bestaat.

3.16 Correctie voor membraanindringing

De proefresultaten worden eerst gecorrigeerd voor membraanindringing. Bij een gedraineerde triaxiaalproef wordt een monster in een rubber membraan geplaatst in een cel die met water gevuld is. Dit water in de cel staat onder een zekere druk. De lucht in de poriën van het monster wordt eveneens onder druk gehouden. Het korrel skelet oefent als het belast wordt een zekere horizontale druk uit. De effectieve horizontale spanning wordt bepaald door de celdruk, de luchtdruk en de horizontale druk van het monster. Tijdens de proef verandert de effectieve horizontale spanning. Hierdoor wordt het membraan ofwel enigszins tussen de korrels van het monster naar binnen gedrongen, of naar buiten gedrukt. In beide gevallen is er sprake van een volumeverandering die niet moet worden toegeschreven aan de volumeverandering van het monster. Hiervoor moet dus worden gecorrigeerd. Deze correctie voor membraanindringing is

afhankelijk van de relatieve dichtheid van het monster en van de korreldiameter. Dit kan in formulevorm worden uitgedrukt:

$$e_{cor} = (32,4 \cdot D_{50} + 0,0004 + (0,5 - \frac{Dr}{100}) \cdot 0,00342) \cdot \Delta \sigma_{h,eff}^{0,64}$$

waarin: e_{cor} = correctie voor membraanindringing [%]

D_{50} = karakteristieke korreldiameter [m]

Dr = relatieve dichtheid [%]

$\Delta \sigma_{h,eff}$ = verandering in effectieve horizontale spanning [Kpa]

Een zand met een D_{50} van 160 μm ($160 \cdot 10^{-6}$ m, fijn zand) en een relatieve dichtheid van 25 % (losgepakt) heeft bij een verandering in effectieve horizontale spanning sinds het begin van de proef van 40 kPa een membraancorrectie ter grootte van 0.068 %.

$\Delta \sigma_{ver}$	$2 \cdot \Delta \sigma_{dev}$	$\Delta \sigma_{h,eff}$	Opmerking:
decompressieproef			
0 kPa	0 kPa	0 kPa	begin proef
40 kPa	0 kPa	40 kPa	
0 kPa	0 kPa	0 kPa	einde proef
dilatantieproef:			
0 kPa	0 kPa	0 kPa	begin proef
0 kPa	30 kPa	-10 kPa	
0 kPa	60 kPa	-20 kPa	
0 kPa	90 kPa	-30 kPa	
0 kPa	120 kPa	-40 kPa	einde proef

Tabel III.2 Effectieve horizontale spanning

Bij de dilatantieproef en de decompressieproef worden duidelijk andere spanningspaden gevolgd. Hier moet bij het bepalen van de membraancorrectie duidelijk onderscheid in gemaakt worden. Bij de dilatantieproef wordt de gemiddelde normaalspanning constant gehouden:

$$\sigma'_{vol} = \frac{\sigma'_v + 2\sigma'_h}{3} = \text{constant}$$

ofwel het spanningspad:

$$\Delta\sigma'_h = -\frac{1}{2}\Delta\sigma'_v$$

wordt doorlopen. In combinatie met de formule:

$$2 \cdot \sigma'_{dev} = \sigma'_v - \sigma'_h$$

wordt gevonden dat tijdens de proef geldt:

$$\Delta\sigma'_h = -\frac{\Delta\sigma'_{dev}}{3}$$

De volumeverandering wordt gemeten via het celwater. De hoogteverandering van het waterniveau in een stijgbuisje dat in verbinding staat met het celwater wordt gemeten. De celspanning mag dus niet veranderen, met andere woorden:

$$\sigma_{cel} = \text{constant of } \Delta\sigma_{cel} = 0$$

Indien de verticale spanning wordt verhoogd moet de horizontale spanning afnemen. De enige manier om dit te realiseren is om de druk in het monster aan te passen, ofwel:

$$\Delta\sigma_{h,m} = -\frac{1}{2}\Delta\sigma'_v$$

In tabel III.2 is het verloop van de effectieve horizontale spanning gegeven. In de tabel is er van uit gegaan dat de celdruk bij het begin van de proef 50 kPa is. In Nederland is dat gebruikelijk. Bij de decompressieproef wordt de deviatorspanning constant gehouden. Dit betekent dat:

$$\Delta\sigma'_v = -\Delta\sigma'_h$$

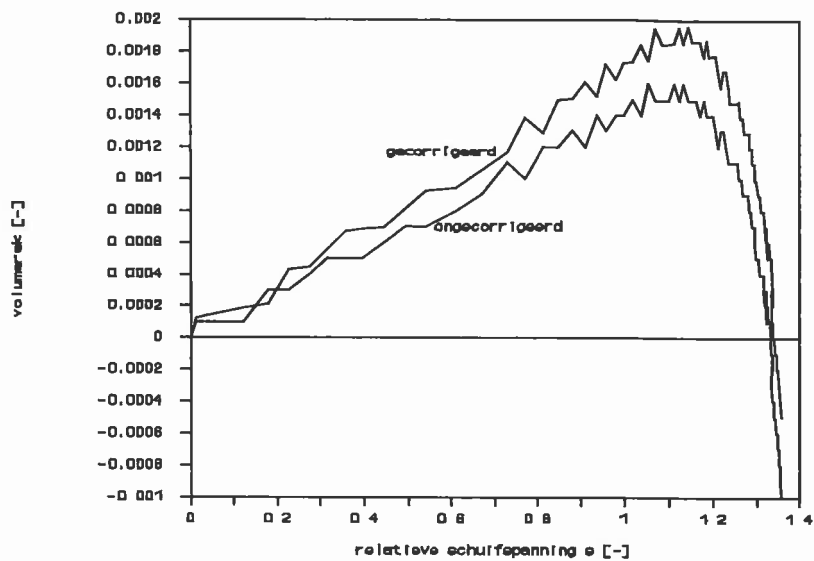
De isotrope spanning wordt in de proef veranderd. Nu kan worden afgeleid dat moet gelden:

$$\Delta\sigma'_{vol} = \frac{\Delta\sigma'_v + 2 \cdot \Delta\sigma'_h}{3} = \Delta\sigma'_h$$

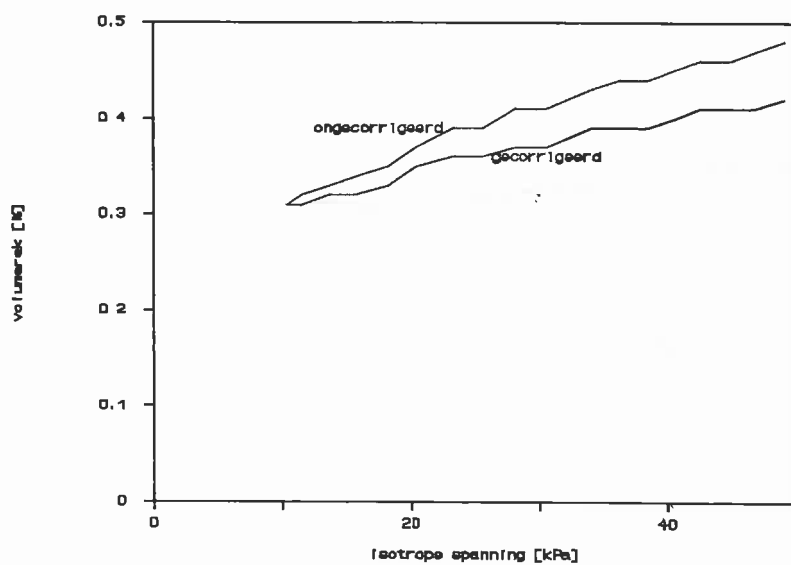
In de compressie-decompressieproef wordt eerst het spanningstraject van 10 kPa naar 50 kPa doorlopen. Dit is compressie. De effectieve horizontale spanning neemt toe. Bij het begin van de decompressieproef moet de gemeten volumeverkleining verminderd worden. Tijdens de decompressieproef neemt het verschil tussen gemeten en gecorrigeerd af tot 0 bij een spanningsniveau van 10 kPa (effectieve horizontale spanning 0).

Bij de dilatantieproef neemt de effectieve horizontale spanning af. De gemeten volumeverkleining moet vermeerderd worden.

Voorbeelden van de decompressieproef en de dilatantieproef, gecorrigeerd en ongecorrigeerd, zijn gegeven in figuren III.5 en III.6.



Figuur III.5 Membraancorrectie voor dilatantiecure



Figuur III.6 Membraancorrectie voor decompressiecurve

3.17 Fitprocedure

Nadat de resultaten van de triaxiaalproeven zijn gecorrigeerd voor membraanindringing worden fits gemaakt van de gemeten spannings-vernappingsrelaties. Bij Grondmechanica Delft gebeurt dit met behulp van speciale programmatuur. Hieruit volgen parameters als $\epsilon_{vol_{dm0}}$, s_{max} , s_2 , m , r en Ks_0 die u moet invoeren in het programma.

Door de gebruikte vergelijkingen te bestuderen (zie volgende paragrafen), en proberenderwijs de (gecorrigeerde) proefresultaten na te rekenen kunt u op een simpele, maar arbeidsintensieve manier zelf een schatting maken van de getallen.

3.18 Dilatantiecijve

Een voorbeeld van het resultaat van de dilatantieproef is te zien in figuur III.5. Uitgezet is de relatieve schuifspanning s tegen de dilatante volumerek ϵ_{vol_d} . In figuur III.7 is deze kromme genormeerd op 1; alle waarden voor ϵ_{vol_d} zijn gedeeld door $\epsilon_{vol_{dm0}}$, in dit geval gelijk aan 0,00349. Naar links op de x-as is volumeverkleining uitgezet. Het monster neemt dus eerst af in volume. Bij hogere schuifspanning neemt het volume toe. Gegeven zijn de meetpunten, die overigens al zijn gecorrigeerd voor membraancorrectie. De formule voor deze kromme luidt:

$$\epsilon_{vol_d} = \epsilon_{vol_{dm0}} \left(A \cdot s^m - \frac{B \cdot s^r}{s_{max} - s} \right)$$

met: ϵ_{vol_d} = dilatante volumerek

$\epsilon_{vol_{dm0}}$ = maximale dilatante volumerek

s = relatieve schuifspanning

m, r = fitconstanten

A, B = constanten, bepaald door m, r, s_{max}, s_2

s_2 = relatieve schuifspanning waarbij de $\epsilon_{vol_{dm0}}$ optreedt

s_{max} = asymptoot

De constanten A en B kunnen worden berekend door te eisen dat bij schuifspanning s_2 (het punt waarbij de maximale dilatante volumerek optreedt) ϵ_{vol_d} gelijk is aan $\epsilon_{vol_{dm0}}$ en dat in dat punt de afgeleide gelijk is aan 0. Hieruit volgt:

$$A = \frac{1}{s_2^m} + \frac{m}{s_2^r \left(r - m + \frac{s_2}{s_{max} - s_2} \right)}$$

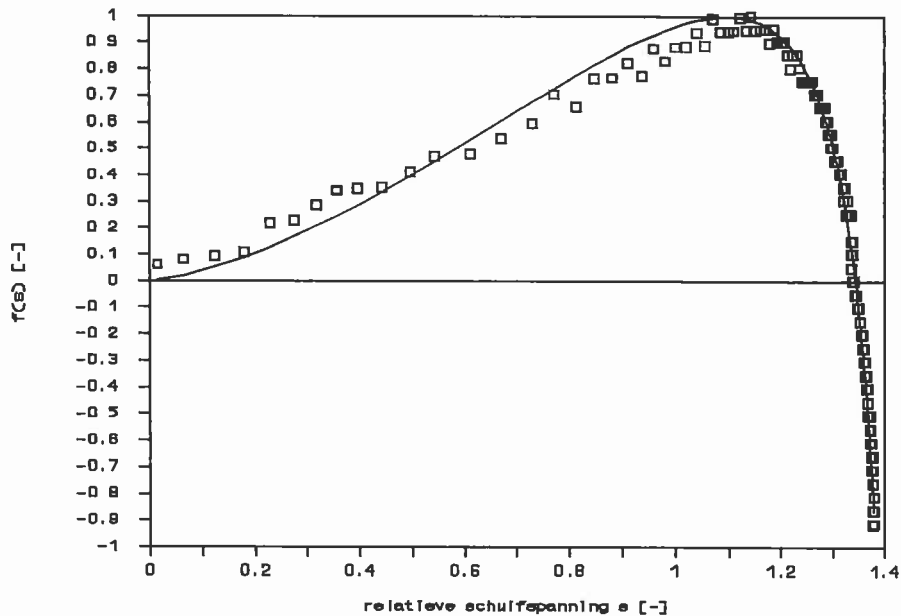
en:

$$B = \frac{m \cdot (s_{max} - s_2)}{s_2^r \left(r - m + \frac{s_2}{s_{max} - s_2} \right)}$$

De waarden van s_2 en s_{max} kunnen redelijk worden geschat (zie ook figuur III.7). Door verschillende waarden voor m en r uit te proberen kan op deze manier een redelijke benadering van de

curve gevonden worden.

In figuur III.7 is eveneens het resultaat van de fitprocedure gegeven. Het blijkt dat met $m = 1,95$, $r = 6,67$, $s2 = 1,23$, $smax = 1,45$ een goed resultaat wordt behaald. Afgeleid kan worden dat $A = 0,715$ en $B = 0,01$.



Figuur III.7 Proefresultaat en fit dilatantiecurve

Een ander probleem is, dat de proef slechts bij één isotrope spanning wordt uitgevoerd, te weten 50 kPa. In het terrein kunnen ook andere isotrope spanningen voorkomen. In SLIQ2D wordt dit verdisconteerd door het gevonden resultaat te vermenigvuldigen met een factor:

$$\left(\frac{\sigma'_{vol}}{\sigma'_{vol0}} \right)^v$$

met: σ'_{vol} = isotrope spanning
 σ'_{vol0} = isotrope spanning tijdens proef
 v = macht

De waarde van de macht v geeft aan wat de invloed is van de isotrope spanning op het proefresultaat. Dit kan in feite alleen bepaald worden door proeven te doen op hetzelfde monster bij dezelfde dichtheid, maar met een andere isotrope spanning. Dit is ook al enkele malen uitgevoerd.

Daaruit volgde een waarde van v van 0,8 à 2. Aanbevolen wordt om proeven te doen bij verschillende waarden van σ'_{vol0} , bijvoorbeeld bij 20 kPa, 50 kPa en 100 kPa. Als er geen proeven bij verschillende isotrope spanningen zijn gedaan is 1,2 een redelijke versterkwaarde.

3.19 Decompressiecurve

De tweede curve die moet worden gefit is de decompressiecurve. Deze curve geeft het verloop van de volumerek $evol_c$ weer als functie van het isotrope spanningsniveau σ'_{vol} .

Hierbij wordt een decompressiemodulus K_s geïntroduceerd volgens:

$$d\text{evol}_c = -\frac{d\sigma'_{vol}}{K_s}$$

$$K_s = -\frac{d\sigma'_{vol}}{d\text{evol}_c}$$

hogere $K_s \Rightarrow$ minder verzwak

waarin $d\text{evol}_c$ = de volumeverandering

$d\sigma'_{vol}$ = de verandering in isotrope spanning

K_s = de decompressiemodulus

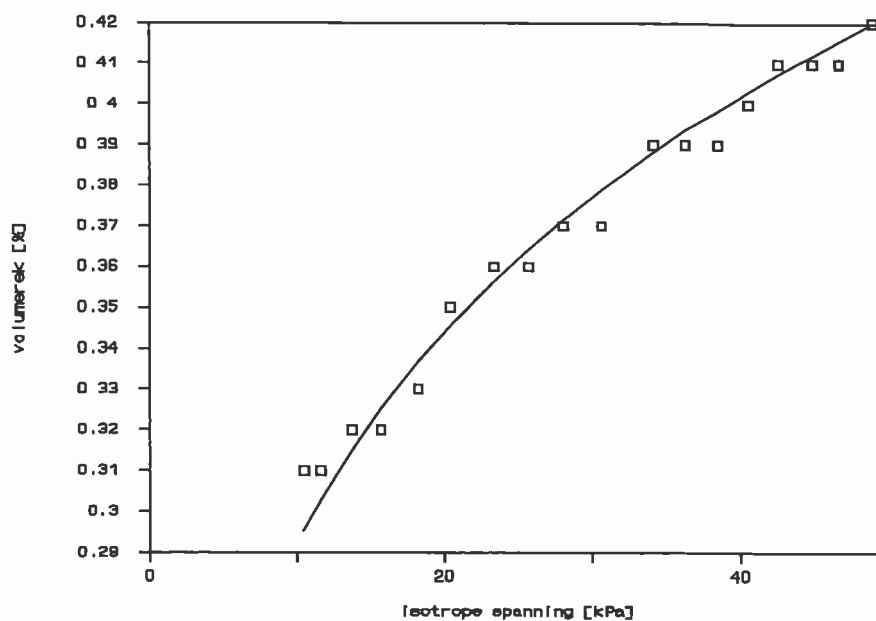
De decompressiemodulus K_s is de afgeleide van de kromme in figuur III.8. K_s is een functie van het isotrope spanningsniveau volgens:

$$K_s = K_{s0} \left(\frac{\sigma'_{vol}}{\sigma'_{vol0}} \right)^n$$

waarin: K_{s0} = de decompressiemodulus bij het begin van decompressie

σ'_{vol0} = isotroop spanningsniveau bij het begin van decompressie

n = nache



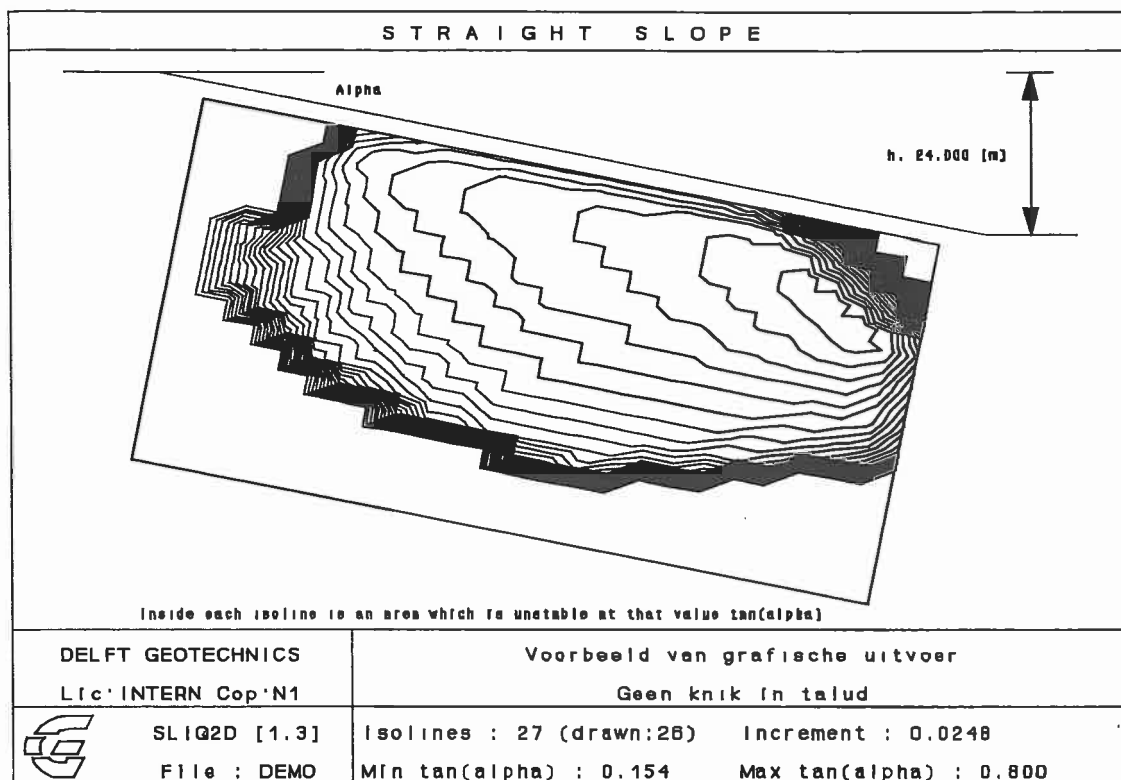
Figuur III.8 Proefresultaat en fit decompressiecurve

De macht u geeft, net als de macht v bij de dilatatiecurve, aan hoe sterk de decompressiemodulus afhankelijk is van het spanningsniveau. De macht u kan het nauwkeurigst bepaald worden als een groot spanningstraject wordt doorlopen, bijvoorbeeld van 200 kPa tot 20 kPa. Helaas worden de proeven meestal gedaan bij een beperkt spanningstraject van 50 kPa naar 10 kPa. Dit maakt het moeilijk een goede schatting van u te geven. Uit eerdere onderzoeken is gebleken, dat u meestal een waarde heeft tussen 0,5 en 1. Een waarde van 0,8 is een redelijke verstekwaarde. De waarde van K_{s_0} kan proberenderwijs worden bepaald.

In figuur III.8 is het resultaat van de fitprocedure gegeven voor $K_{s_0} = 43981$ kPa en $u = 0,81$.

3.20 Voorbeeld berekeningsresultaat

Met de gevonden waarden voor de fitparameters kan een SLIQ2D-berekening worden gemaakt. In figuur III.9 is de grafische presentatie van het rekenresultaat te zien. De kritieke taludhelling (de taludhelling waarbij voor het eerst ergens in de geometrie instabiliteit ontstaat) is $\tan\alpha_{cr} = 0,154$ ofwel 1 : 6,5.

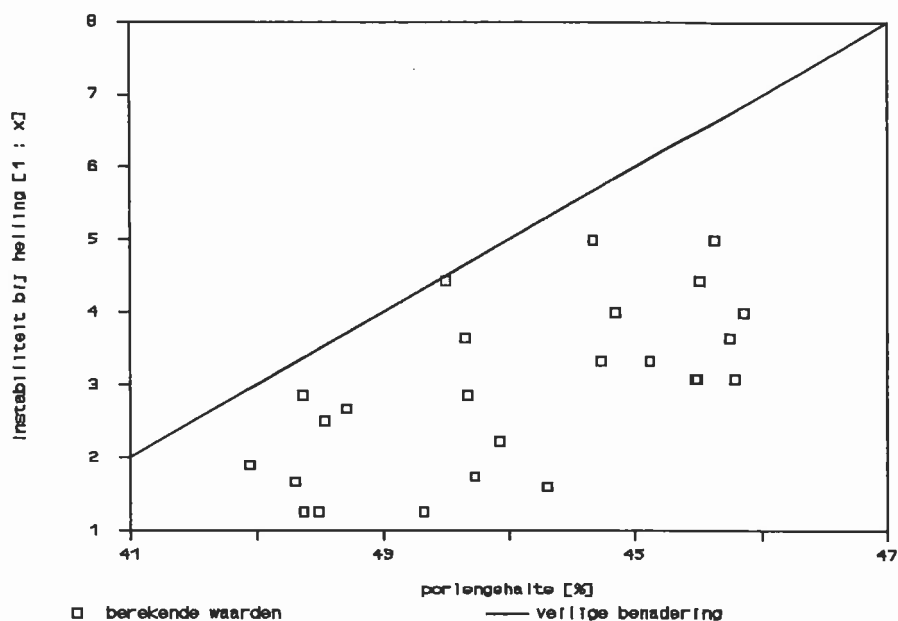


Figuur III.9 Voorbeeld rekenresultaat

3.21 Wat te doen met de resultaten van de berekeningen ?

In dit voorbeeld zijn van 4 monsters bij 6 verschillende dichtheden droge dichtheidsproeven uitgevoerd. U kunt kijken welke dichtheden het beste overeenkomen met de terreindichtheid en alleen die proeven verder uitwerken. Om een idee te krijgen van de gevoeligheid van de resultaten is het beter zoveel mogelijk proeven uit te werken en te berekenen. Uit de $4 \times 6 = 24$ proeven kunt u in principe 24 sets met invoergegevens aanmaken. De uitkomsten van de berekeningen zullen een aanzienlijke spreiding vertonen. Een voorbeeld is te zien in figuur III.10.

Een idee van hoe groot deze spreiding is, kan ook worden verkregen door de invoerparameters te variëren binnen grenzen die redelijk worden geacht als afwijking van de gemeten waarden. In het algemeen geldt, dat er beter geen advies gegeven kan worden als men geen idee heeft van de spreiding in de resultaten van de berekeningen en van de variatie in terreinomstandigheden. Men moet zich altijd afvragen wat de consequenties zijn als de omstandigheden ongunstiger blijken dan men heeft aangenomen of dan gemeten is.



Figuur III.10 Resultaat serie berekeningen

3.22 Interpretatie van praktijkvoorbeeld

In dit praktijkvoorbeeld is nu bekend wat enerzijds de in-situ dichtheid is ($42\% < n_{\text{in-situ}} < 46\%$), en anderzijds wat bij deze dichtheid volgens de SLIQ2D-resultaten de kritieke taludhelling is. Omdat ook de spreiding in de kritieke taludhelling bekend is kan op eenvoudige wijze de kans berekend worden dat de kritieke taludhelling de bestaande helling in-situ bereikt. Uit figuur III.10 kan worden afgelezen, dat als de in-situ taludhelling steiler is dan 1 : 5 de kans op instabiliteit snel toeneemt. Bij nadere interpretatie kunnen bijvoorbeeld de volgende overwegingen een rol spelen:

- het grondonderzoek is niet op de vooroever uitgevoerd, omdat dit te kostbaar is. Er is een locatie net achter de dijk gekozen. Het is niet zonder meer te zeggen of dezelfde grondgesteldheid ook voor de vooroever geldt. In veel gevallen geldt dat de variatie in grondeigenschappen over korte afstand aanzienlijk kan zijn, zodat hiermee een aanzienlijke onzekerheid wordt geïntroduceerd. Men kan in kritieke gevallen overwegen te trachten op één locatie buitendijks grondonderzoek te doen en dit te vergelijken met de resultaten binnendijks.
- omdat SLIQ2D zich op een relatief nieuw gebied bevindt wat betreft kennis is de gegeven kritieke taludhelling bewust aan de 'veilige' kant gekozen. Wellicht is dit te veilig. Totdat er

meer ervaring is met het model is dit echter zeer moeilijk in te schatten. Bovendien is een kleine variatie in materiaaleigenschappen soms voldoende om het nodige verschil in uitkomst te genereren.

- in figuur III.10 staan de resultaten van alle grondmonsters. Er wordt dus niet alleen gerekend met de mogelijke spreiding per monster, maar er wordt ook impliciet gerekend met de variabiliteit van de ondergrond. Dit is een reden om aan te nemen, dat de gehanteerde spreiding in resultaten voor de kritieke taludhelling te groot zou kunnen zijn.
- uit het grondonderzoek blijkt, dat de meest gevoelige laag niet over de gehele diepte aanwezig is. SLIQ2D geeft als rekenresultaat de kritieke taludhelling in een punt in de geometrie. Als dit punt niet in de meest gevoelige laag ligt, dan is ook de kans op een vloeijing kleiner. Men moet dan wel een goed idee hebben van hoe deze laag verloopt over de geometrie.

Concluderend kan worden gesteld, dat indien alle spreidingen (spreiding in de ondergrond, in laboratoriumresultaten en rekenresultaten) worden meegenomen, altijd een redelijk grote kans op een vloeijing berekend kan worden. Er is altijd wel een punt in de geometrie dat met de gecombineerde onzekerheden instabiel wordt. In de praktijk blijkt dit meestal wel mee te vallen. Er is ruimte voor interpretatie. Men dient zich te realiseren, dat men zich bij interpretatie begeeft men zich in de richting van de grenzen van het toelaatbare. Zeker voor praktische toepassing is het inschakelen van een deskundige voor een 'second opinion' betreffende de interpretatie een voorwaarde voor verantwoord gebruik.

3.23 Tweede methode van aanpak

Het is mogelijk de verschillende resultaten uit de fitprocedure te beschouwen als steekproeven uit een verzameling. De verzameling bestaat uit de gehele geometrie. Men kan met andere woorden alle proefresultaten in grafieken uit te zetten en trachten algemene verbanden van de fitparameter als functie van de relatieve dichtheid af te leiden die specifiek voor zo'n locatie gelden. Dit is reeds toegepast (zie Stoutjesdijk, 1994a). Hieruit bleek dat het voor de meeste parameters voldoende is om een rechtlijnig verband met de relatieve dichtheid aan te houden. Alleen voor de maximale contractante volumerek $evol_{dm0}$ wordt een logaritmisch verband aanbevolen:

$$\ln\left(\frac{evol_{dm0}}{0,001}\right) = \frac{Dr_1 - Dr}{Ced}$$

met: Dr = relatieve dichtheid

Dr_1 = relatieve dichtheid waarbij $evol_{dm0} = 0,001$

Ced = parameter welke de afhankelijk aangeeft van $evol_{dm0}$ met de dichtheid

In de Groot [1992] is dit verband voor een aantal gevallen onderzocht. Voor Dr_1 werden waarden gevonden van 0,10 à 0,83 en voor Ced waarden tussen 0,04 à 0,20. Het is van groot belang in te zien, dat hier niet volstaan kan worden met het trekken van een lijn door alle meetpunten. Dit

leidt tot een verkeerde waarde van Ced. Indien per monster wordt gekeken, blijkt dat de variatie van $\epsilon_{vol_{dm0}}$ met de relatieve dichtheid sterker is dan zou volgen indien simpel door alle punten een lijn wordt getrokken. In feite moet per monster een waarde voor Ced worden bepaald, zodat een goede indruk ontstaat welke waarde reëel is.

Indien voor iedere parameter een verband is gevonden met de relatieve dichtheid, kan vervolgens voor een willekeurige waarde van deze relatieve dichtheid een berekening worden gedaan. Door dit voor meerdere dichtheden te doen kan de gevoeligheid van de oplossing voor de relatieve dichtheid worden gevonden. Dit geeft een goed idee over de vraag bij welke taludhellingen mogelijk problemen ontstaan.

3.24 Verificatie SLIQ2D aan de Zeeuwse praktijk

Bij de interpretatie dient rekening gehouden te worden met:

1. spreiding tussen werkelijke waarden en de gevonden verbanden met de relatieve dichtheid
2. verschil in gemeten en in-situ eigenschappen.

Hierdoor is het noodzakelijk de resultaten voorzichtig te beoordelen. Dit bleek ook uit een verificatiestudie (Stoutjesdijk, 1994a) waarbij de resultaten van SLIQ2D werden vergeleken met de gegevens van enkele locaties in Zeeland waar oever- of plaatvallen zijn opgetreden. Van een aantal locaties waren peilingen voor en na de val beschikbaar en was na het optreden van de val terrein- en laboratoriumonderzoek uitgevoerd. Hieruit werden, hiervoor beschreven als de tweede methode van aanpak, relaties van de invoerparameters met de relatieve dichtheid afgeleid. Het bleek mogelijk om op deze wijze met SLIQ2D de kritieke taludhelling als functie van de relatieve dichtheid te bepalen. Bij vergelijking van deze resultaten met de gemeten dichtheden in-situ bleek de voorspelling met SLIQ2D in de meeste gevallen in de buurt te zitten, maar soms ook te optimistisch, dit wil zeggen dat bij dezelfde dichtheid een kritieke taludhelling werd gevonden die, in vergelijking met de taludhelling waarbij in de praktijk instabiliteit was ontstaan, te steil was.

Om een idee te krijgen hoe gevoelig de oplossing is, werd een tweede serie berekeningen uitgevoerd, met als enige verschil met de eerste serie dat het verband tussen $\epsilon_{vol_{dm0}}$ en de relatieve dichtheid niet gemiddeld maar ongunstig werd aangenomen. Het bleek, dat in vergelijking met werkelijk opgetreden vloeiingen, de berekening met de ongunstige aanname de taludhelling en de taludhoogte voor de val vaak dichter benaderde.

Aanbevolen wordt om bij gebruik van deze methode voor alle parameters, behalve voor $\epsilon_{vol_{dm0}}$, gemiddelde waarden te kiezen. Voor $\epsilon_{vol_{dm0}}$ worden ongunstige waarden genomen.

3.25 Verschillende lagen

Vaak bestaat een geometrie uit een aantal lagen grond. Bijvoorbeeld de dichtheid van het zandpakket varieert over de diepte. SLIQ2D rekent met eigenschappen van zand die over het gehele grondmassief gelijk zijn. Het is in zo'n geval de beste benadering om meerdere SLIQ2D-berekeningen te maken, voor iedere laag apart. Het resultaat van zo'n berekening moet men dan wel alleen laten gelden voor de betreffende zandlaag. Het is niet mogelijk berekeningen te doen voor ander materiaal dan zand.

Indien sprake is van duidelijk te onderscheiden lagen met verschillende eigenschappen, dan kan de beoordeling van de situatie vrij complex zijn. Als bijvoorbeeld de bovenste laag uit zand bestaat onder een vrij flauwe helling, en onderaan wordt stijve klei gevonden, dan lijkt er geen gevaar voor vloeiingen te bestaan. Als de kleilaag echter erodeert en onder een steeds steilere helling komt te staan, dan kan dit tevens invloed op de spanningen in de zandlaag hebben. Voorts bestaat er gevaar voor inleiding van een vloeijing door een kleine afschuiving in de kleilaag. De situatie kan ook omgekeerd zijn: een kleilaag op een zandlaag. In de literatuur is de aanwezigheid van een afdekkende laag vaak als positief beoordeeld. Volgens de huidige theorie is dit slechts beperkt waar: op het ontstaan van een vloeijing in de nabijheid van de teen van het talud heeft klei bovenaan het talud weinig of geen invloed. Er moet met de volledige taludhoogte (zand plus klei) gerekend worden. De aanwezigheid van klei heeft pas invloed als de vloeijing is ontstaan: de klei kan remmend werken op de omvang van een vloeijing.

Er wordt gewezen op de mogelijkheid te rekenen met een minder conservatief stabiliteitscriterium. In deze redenering wordt een groter gedeelte van de geometrie in de beschouwing betrokken. Met name bij meerlagensystemen kan dit verschillen geven ten opzichte van de stabiliteitsbenadering in SLIQ2D. De beoordeling van dit soort systemen is echter vrij complex en specialistisch en de procedure is daarom niet in dit handboek opgenomen.

3.26 Wat te doen als er weinig of geen gegevens zijn ?

De hier gepresenteerde praktijkbenadering bestaat uit een eerste oriënterend onderzoek aan de hand van geometrische criteria, eenvoudige berekeningen of beperkt grondonderzoek. Indien het optreden van een zettingsvloeiing niet met voldoende zekerheid kan worden uitgesloten en verdergaand onderzoek vanuit economisch oogpunt zinvol lijkt, dan volgt daarna een programma van terreinonderzoek, laboratoriumonderzoek, berekeningen en studie. Soms zullen hiervoor de tijd en de middelen niet beschikbaar zijn. De vraag is dan: kan bij een onderzoek, inclusief SLIQ2D-berekeningen, ook met minder worden volstaan ? Het antwoord op deze vraag luidt: eigenlijk niet. Een specialist zal misschien van sommige invoerparameters een idee hebben, of op basis van de grondgegevens een bepaald idee hebben welke helling mogelijk is. Er kan een inspanning worden gepleegd om inderdaad met minder gegevens een goede schatting te kunnen maken. Hierin is het van belang, dat er zoveel mogelijk gegevens uit de praktijk worden verwerkt. In de Groot [1992] en Stoutjesdijk [1994a] is hierover het een en ander terug te vinden

van literatuur, andere studies en andere onderzoekslocaties.

Zoals al eerder in dit deel is aangegeven zal de kostenafweging vaak doorslaggevend zijn voor de vraag in welke mate nadere studie lonend is.

3.27 Wanneer gespecialiseerde hulp vragen ?

Het is in vrijwel alle gevallen dienstig om bij het opzetten en uitvoeren van een onderzoek en bij de beoordeling van de resultaten van het programma een specialist in te schakelen, zeker zo lang u zelf betrekkelijk weinig ervaring heeft. Een specialist zal het beste in kunnen schatten wat de benodigde activiteiten zijn om tot resultaat te komen, wat de resultaten voorstellen en hoe deze geïnterpreteerd dienen te worden. Bij het gebruik van de resultaten van het programma SLIQ2D wordt steeds aangegeven dat er voorzichtigheid betracht dient te worden. Men dient zich te bedenken, dat men zich op de grens van een kennisgebied bevindt waar nog relatief weinig ervaring is.

Deel IV: Beschrijving SLIQ2D

4.1 Feitelijke beschrijving programma

In dit hoofdstuk worden de hoofdlijnen van het programma SLIQ2D behandeld. Dit wordt voornamelijk gedaan om een indruk te krijgen van de probleemaanpak. Dit hoofdstuk is voor een groot deel ontleend aan Stoutjesdijk [1991a en 1991b].

Nadat de filenamen en de invoergegevens zijn ingevoerd doorloopt het programma SLIQ2D een aantal stappen:

- a. Bij een flauwe taludhelling ($\tan\alpha = 0,05$; helling 1 : 20) wordt een raster van 25 punten langs de taludhelling en 20 punten over een afstand 2 maal de taludhoogte loodrecht op de taludhelling gelegd.
- b. Voor ieder van deze 500 punten worden de spanningen bepaald.
- c. Met de berekende spanningen wordt bekeken of in dat punt bij die taludhelling instabiliteit op kan treden of niet.
- d. De instabiele punten worden opgeslagen in het geheugen.
- e. De taludhelling wordt een stap versteild.
- f. Onderdelen a. tot en met e. worden herhaald, totdat helling 1 : 1,5 wordt bereikt.
- g. De uitvoer wordt weggeschreven naar het opgegeven uitvoerbestand.

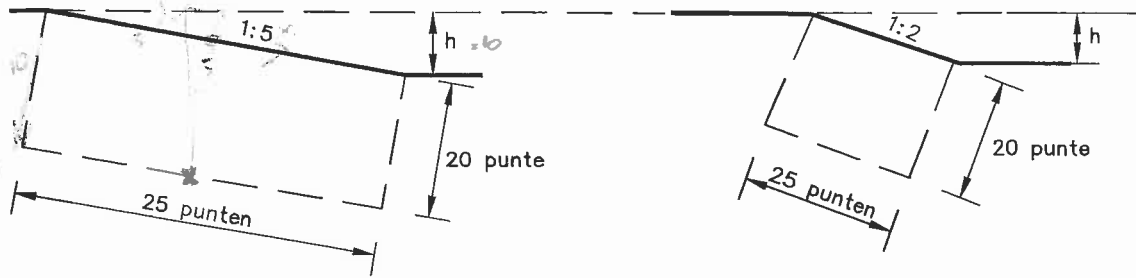
De onderdelen a., b. en c. worden in de hierna volgende paragrafen nader toegelicht.

4.2 Verdeling van de punten over de geometrie

Zoals boven staat omschreven wordt bij een bepaalde taludhelling een raster van 500 punten gelegd. Het is daarbij van belang om in te zien, dat bij iedere taludhelling andere punten horen. Als de taludhelling versteild wordt, vervormt ook het raster. Voor twee taludhellingen is het raster aangegeven in figuur IV.1. In de uitvoer van SLIQ2D worden daarom ook geen x-y coördinaten in meters opgegeven, maar rasterpunten, bijvoorbeeld $x = 5$, $y = 12$, en een taludhelling α . Desgewenst kan hieruit voor een gegeven geometrie de exacte plaats in de dwarsdoorsnede berekend worden met de formules:

$$x(\text{meters}) = \frac{h}{\sin\alpha} \cdot \frac{x(\text{gridpunt})}{26}$$

$$y(\text{meters}) = \frac{1}{20} \cdot 2 \cdot h \cdot y(\text{gridpunt})$$



Figuur IV.1 Raster voor de verschillende taludhellingen

Hierbij wordt uitgegaan van een assenstelsel door de top van het talud, met de positieve x-as wijzend naar beneden langs het talud en de positieve y-as wijzend naar beneden loodrecht op het talud.

Als bijvoorbeeld in de uitvoerfile gemeld wordt, dat voor een geometrie met een taludhoogte $h = 10$ m, een taludhelling $\alpha = 0,25$ rad in het punt $x = 5$ en $y = 12$ instabiliteit wordt gevonden, dan is dat in het punt $x = 7,8$ meter, $y = 12$ meter.

4,8

4.3 Bepalen van de spanningen

De spanningen in een talud zijn bepaald op basis van berekeningen met het eindige elementen model PLUTO. Omdat het ondoenlijk is om voor iedere som met SLIQ2D opnieuw eindige elementen berekeningen te maken, is er voor gekozen de uitkomsten van de PLUTO-berekeningen te benaderen met formules. In algemene vorm worden de spanningen beschreven door (zie figuur IV.2):

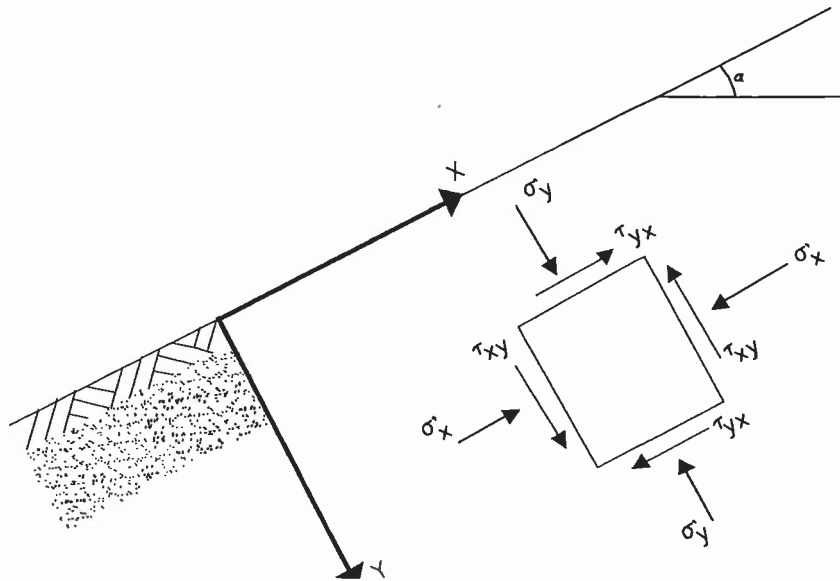
$$\sigma'_y = \gamma y_p \cos \alpha_p$$

$$\sigma'_x = K_{op} \sigma'_y$$

$$\tau_{xy} = \gamma y_p \sin \alpha$$

- met: σ'_y = de normaalspanning loodrecht op het talud
 σ'_x = de normaalspanning evenwijdig aan het talud
 τ_{xy} = schuifspanning
 γ = het onderwatergewicht van zand
 $= (1 - n)(\rho_s - \rho_w) g$
 n = poriëngehalte
 ρ_s = volumiek gewicht van zand
 ρ_w = volumiek gewicht van water
 y_p = de "schijnbare" afstand loodrecht op het talud
 α_p = de "schijnbare" taludhelling
 K_{op} = de "locale" Ko-waarde

K_o = de verhouding tussen spanningen evenwijdig aan en loodrecht op het talud



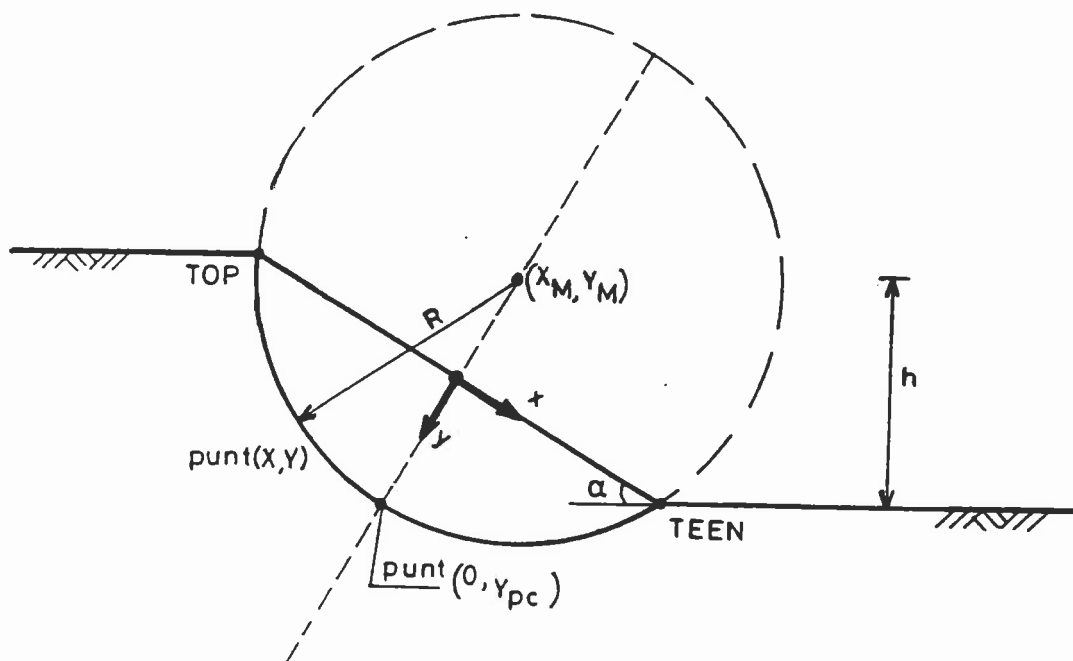
Figuur IV.2 Spanningen in talud

De termen "schijnbare" afstand, "schijnbare" taludhelling en "locale" K_o -waarde duiden erop, dat er hier sprake is van een eindig talud. Dezelfde formules als bovenstaand worden namelijk gebruikt voor een oneindig lang talud. In dat geval zijn de "schijnbare" afstand, de "schijnbare" taludhelling en de "locale" K_o -waarde gelijk aan de werkelijke afstand, de werkelijke taludhelling en de werkelijke K_o -waarde. In een 2-dimensionale situatie wordt met "schijnbaar" en "locaal" aangeduid welke waarde deze grootheden moeten hebben als dezelfde eenvoudige beschrijving van spanningen wordt gebruikt.

Als uitkomst van de PLUTO-berekeningen werden de grootheden y_p , α_p en K_{op} gebruikt. Hiervoor zijn benaderende formules gezocht. Voor de "schijnbare" diepte y_p werd gevonden dat deze gelijk kon worden gekozen aan de werkelijke diepte:

$$y_p = y$$

De contourlijnen voor de "schijnbare" taludhelling α_p die de top en de teen van het talud snijden, en waarvan het middelpunt ergens op een lijn loodrecht op en door het midden van het talud gaan (zie figuur IV.3). Terwille van de eenvoud van de formules is de oorsprong van het assenstelsel halverwege de taludhelling gekozen.



Figuur IV.3 Benadering voor schijnbare taludhelling

Als men een punt (x, y) in de geometrie heeft gekozen ligt de cirkel vast, aangezien door drie punten (top van het talud, teen van het talud en punt (x, y)) slechts 1 cirkel gaat. Het middelpunt en de straal van de cirkel kunnen als volgt worden gevonden:

$$M = (x_m, y_m) = \left(0, \left(\frac{x}{2} + \frac{h}{4 \sin \alpha} \right) \cdot \left(x - \frac{h}{2 \sin \alpha} \right) \cdot \frac{1}{y} + \frac{1}{2y} \right)$$

$$R = \sqrt{(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2}$$

De waarde van α_p in het punt (x, y) wordt gegeven in de formule:

$$\tan \alpha_p = \left(1 - \sqrt{\frac{y_{pc} \tan \alpha}{1,825 \cdot h}} \right) \tan \alpha$$

met: $y_{pc} = R - y_m$

Deze oplossing is geldig voor:

$$y_{pc} < \frac{1,825 \cdot h}{\tan \alpha}$$

Indien y_{pc} groter is dan deze waarde dan is de schijnbare taludhelling gelijk aan nul. Op grote

diepte is de taludhelling aan de oppervlakte niet meer van invloed op de spanningen.

De waarden voor de "locale" K_{op} -waarde (K_{op}) kunnen eveneens met cirkels worden benaderd. Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen de bovenzijde van het talud (K_{op} waarden kleiner of gelijk aan 0,7) en de onderzijde van het talud (K_{op} waarden groter dan 0,7). De contourlijnen voor K_{op} kleiner of gelijk aan 0,7 hebben een middelpunt dat ligt op een lijn $x = -h \cdot \tan \alpha$, waarbij de oorsprong in de top van het talud is gekozen (zie figuur IV.4). De middelpunten van de cirkels, die de contourlijnen van K_{op} -waarden groter dan 0,7 voorstellen liggen eveneens op een lijn $x = h \cdot \tan \alpha$, maar nu is de oorsprong gekozen in de teen van het talud (zie figuur IV.5). Waar de cirkels de lijn loodrecht op het talud door de top, respectievelijk de teen van het talud, snijden, wordt een waarde y_0 gevonden. Het snijpunt met de taludrand wordt aangeduid met x_0 . Deze waarden zijn benaderd op basis van PLUTO-berekeningen, met als resultaat:

voor de bovenzijde van het talud:

$$x_0 = 0,285 \cdot h \cdot \tan^{-2} \alpha \cdot K_{op}^{1,88 \tan^{-0,45} \alpha}$$

$$y_0 = 11,14 \cdot h \cdot \tan^{-0,53} \alpha \cdot K_{op}^{4,25 \tan^{-0,085} \alpha}$$

voor de onderzijde van het talud:

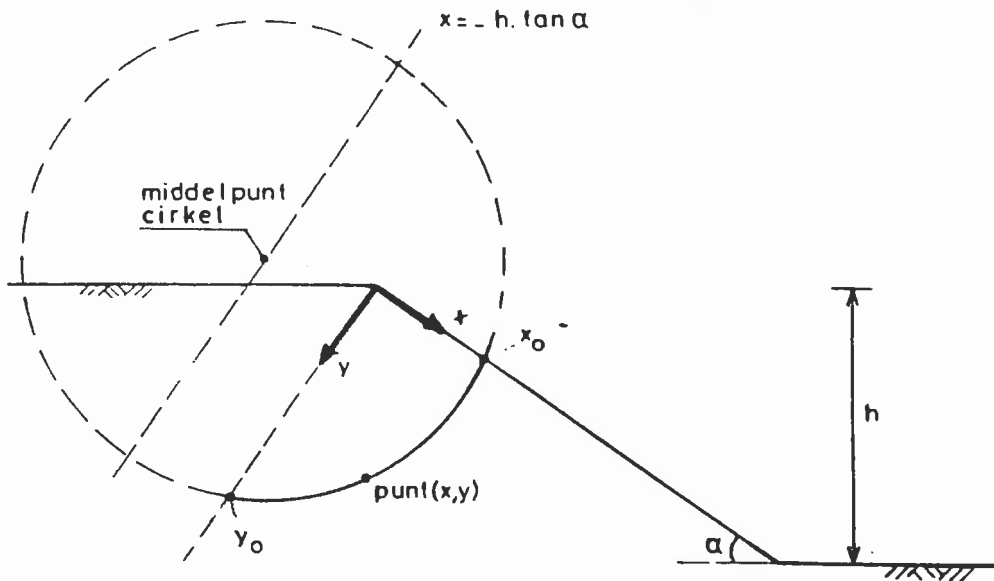
$$x_0 = 0,91 \cdot h \cdot \tan^{-0,32} \alpha \cdot K_{op}^{1,25 \tan^{-0,38} \alpha}$$

$$y_0 = 0,9 \cdot h \cdot \tan^{0,1} \alpha \cdot K_{op}^{-1,4 \tan^{-0,45} \alpha}$$

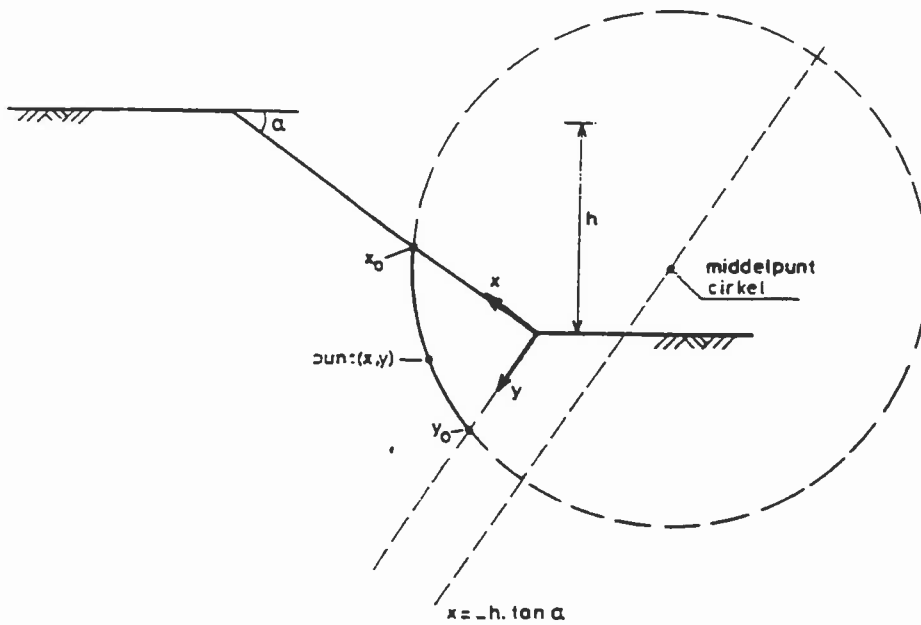
De procedure om de K_{op} -waarde in een punt (x,y) te vinden is als volgt:

- Bepaal of een punt aan de onderzijde of aan de bovenzijde van het talud ligt, door K_{op} gelijk te stellen aan 0,7 en te kijken of het punt (x,y) binnen deze cirkel ligt of erbuiten.
- Schat y_0 en bereken de bijbehorende waarde voor K_{op} .
- Bereken straal en middelpunt van de cirkel door de punten (x,y) en (0, y_0).
- Bereken x_0 door het snijpunt van de taludrand met de cirkel te bepalen.
- Bereken de K_{op} -waarde die bij deze x_0 hoort.
- Vergelijk de beide K_{op} -waarden, en stel zonnig de schatting voor y_0 bij.

Er ontstaat op deze manier een iteratieprocedure waarbij de juiste K_{op} -waarde wordt gevonden.



Figuur IV.4 Benadering voor locale K_0 -waarde (top talud)



Figuur IV.5 Benadering voor locale K_0 -waarde (teen talud)

4.4 Bepalen van spanningen bij een geknikt talud

De uitbreiding van een geometrie met een recht talud naar een geometrie met een steiler gedeelte aan de onderkant van het talud kan vrij eenvoudig worden gerealiseerd. De spanningen worden nu twee maal berekend:

- 1 maal alsof het gehele talud een helling heeft die gelijk is aan het flauwere gedeelte bovenaan het talud
- 1 maal alsof het gehele talud een helling heeft die gelijk is aan het steilere gedeelte van het talud.

Met deze spanningen kan een gewogen gemiddelde worden vastgesteld voor bijvoorbeeld de "schijnbare" taludhelling α_p bij een geknikt talud volgens:

$$\alpha_p = \frac{(2 \cdot l_1 - x) \cdot \alpha_{p,1}}{2 \cdot l_1} + \frac{x \cdot \alpha_{p,2}}{2 \cdot l_1}$$

voor het gedeelte boven de knik en:

$$\alpha_p = \frac{(l_1 + l_2 - x) \cdot \alpha_{p,1}}{2 \cdot l_2} + \left(0,5 + \frac{(x - l_1)}{2 \cdot l_2}\right) \cdot \alpha_{p,2}$$

voor het gedeelte onder de knik. Hierin zijn:

- l_1 = lengte langs talud van top tot aan de knik
- l_2 = lengte langs talud van knik tot aan de teen
- x = afstand langs talud van het beschouwde punt
- $\alpha_{p,1}$ = waarde van α_p bij taludhelling boven de knik
- $\alpha_{p,2}$ = waarde van α_p bij taludhelling onder de knik

Op dezelfde manier kan ook de waarde voor K_{op} worden bepaald voor een geometrie met een geknikt talud.

4.5 Bepalen van instabiliteit in een punt

Om een instabiliteitscriterium te kunnen formuleren zijn een aantal voorwaarden opgelegd. Deze zijn:

- Als uitgangspunt worden de spanningen in een punt gebruikt, zoals deze uit de hiervoor beschreven procedure volgen. Deze spanningen gelden voor volledig gedraineerde omstandigheden. Dit impliceert, dat de geometrie zeer langzaam tot stand is gekomen, bijvoorbeeld door

- erosie. Eventuele waterspanningen die hierbij zijn ontstaan zijn volledig gedissipeerd.
- In de instabiliteitsprocedure wordt een kleine, ongedraineerde schuifspanningsverandering opgelegd. Deze spanningsverandering vindt dusdanig snel plaats, dat eventuele waterspanningen geen tijd krijgen om te dissiperen. Bekeken wordt of de grond in het punt stabiel of instabiel gedrag vertoond.
 - De procedure geldt steeds voor 1 spanningstoestand, dus voor 1 punt. Er is geen invloed van drainage of herverdeling van spanningen.

In het navolgende zal het instabiliteitscriterium punt voor punt worden afgeleid.

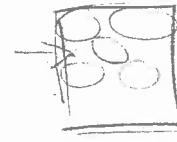
- Definities

De volgende definities en uitgangspunten worden gebruikt:

1. ϵ positief : volumeverkleining
 σ' positief: drukspanning

2. $d\epsilon_z = 0$

$$d\epsilon_z = \frac{1}{E} (d\sigma'_z - \nu^* (d\sigma'_x + d\sigma'_y))$$



dus:

$$d\sigma'_z = \nu^* (d\sigma'_x + d\sigma'_y)$$

Hier wordt ν^* gebruikt in plaats van ν , om uit te drukken dat er geen sprake is van een zuiver elastische dwarscontractiecoëfficiënt. In SLIQ2D wordt voor ν^* de waarde 0,4 aangenomen.

3. de constitutieve vergelijkingen worden gesplitst in een elastisch deel en een plastisch deel:

Elastisch:

$$d\gamma_{xy}^e = \frac{1}{G} d\tau_{xy}$$

met:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \cdot K_s$$

$$d\epsilon_y^e = \frac{1}{E} (d\sigma'_y - \nu (d\sigma'_x + d\sigma'_z))$$

$$d\epsilon_x^e = \frac{1}{E} (d\sigma_x' - \nu (d\sigma_y' + d\sigma_z'))$$

met: $E = 3 \cdot (1 - 2\nu) \cdot K_s$

en :

$$K_s = K_{s0} \left(\frac{\sigma'_{vol}}{\sigma'_{vol0}} \right)^n$$

In het vervolg zullen E en G niet meer worden gebruikt, maar alleen ν en K_s . Hierbij is ν de elastische dwarscontractiecoëfficiënt. In SLIQ2D heeft deze de waarde 0.3.

Plastisch:

$$\begin{aligned} d\epsilon_{vol}^P &= d\epsilon_{vol}^d = \frac{\delta}{\delta s} (\epsilon_{vol}^d) ds \\ &= \frac{\delta}{\delta s} \left[\epsilon_{vol}^d_{ano} \left(\frac{\sigma'_{vol}}{\sigma'_{vol0}} \right)^\nu \left(A \cdot s^m - \frac{B s^r}{s_{max} - s} \right) \right] \\ &= \frac{\delta}{\delta s} \left[\epsilon_{vol}^d_{ano} \left(\frac{\sigma'_{vol}}{\sigma'_{vol0}} \right)^\nu \left(A \cdot m s^{m-1} - B \left(\frac{r s^{r-1}}{s_{max} - s} + \frac{s^r}{(s_{max} - s)^2} \right) \right) \right] ds \end{aligned}$$

Hierin worden de parameters A en B uitgedrukt in de invoergrootheden m, r, s_{max} en s_2 volgens:

$$A = \frac{1}{s_2^m} + \frac{m}{s_2^r \left(r - m + \frac{s_2}{s_{max} - s_2} \right)}$$

en:

$$B = \frac{m (s_{max} - s_2)}{s_2^r \left(r - m + \frac{s_2}{s_{max} - s_2} \right)}$$

De plastische schuifvervorming wordt als volgt beschreven:

$$\begin{aligned} d\gamma^P &= \frac{\delta}{\delta s} \left[\frac{1}{G^*} \cdot \frac{s}{1 - \left(\frac{s}{s_{max}} \right)^2} \left(\frac{\sigma'_{vol}}{\sigma'_{vol0}} \right)^\nu \right] ds \\ &= \frac{\delta}{\delta s} \left[\frac{1}{G^*} \cdot \frac{1 + \left(\frac{s}{s_{max}} \right)^2}{\left(1 - \left(\frac{s}{s_{max}} \right)^2 \right)^2} \left(\frac{\sigma'_{vol}}{\sigma'_{vol0}} \right)^\nu \right] ds \end{aligned}$$

Hierin is G^* een dimensieloze plastische glijdingsmodulus. Er wordt aangenomen, dat als s

constant blijft er geen plastische rekken optreden, ook al wijzigt σ_{vol} .
In SLIQ2D is G^* een functie van de relatieve dichtheid Dr volgens:

$$G^* = 7.5 \cdot Dr \text{ als } Dr \geq 10 \%$$

$$G^* = 75 \quad \text{als } Dr < 10 \%$$

4. De isotrope spanning wordt:

$$\sigma'_{vol} = \frac{1}{3} (\sigma'_x + \sigma'_y + \sigma'_z) = \frac{1}{3} (1 + \nu^*) (\sigma'_x + \sigma'_y)$$

5. In algemene vorm kan de flexibiliteitsmatrix als volgt gedefiniëerd worden:

$$\begin{bmatrix} d\gamma_{xy} \\ d\epsilon_y \\ d\epsilon_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_4 & c_5 & c_6 \\ c_7 & c_8 & c_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\tau_{xy} \\ d\sigma'_y \\ d\sigma'_x \end{bmatrix}$$

6. Bij de uitwerking wordt de scheiding tussen elastische en plastische rekken aangehouden, zodat:

$$\begin{bmatrix} d\gamma_{xy} \\ d\epsilon_y \\ d\epsilon_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\gamma_{xy}^e \\ d\epsilon_y^e \\ d\epsilon_x^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d\gamma_{xy}^p \\ d\epsilon_y^p \\ d\epsilon_x^p \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} d\gamma_{xy}^e \\ d\epsilon_y^e \\ d\epsilon_x^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1^e & c_2^e & c_3^e \\ c_4^e & c_5^e & c_6^e \\ c_7^e & c_8^e & c_9^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\tau_{xy} \\ d\sigma'_y \\ d\sigma'_x \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} d\gamma_{xy}^p \\ d\epsilon_y^p \\ d\epsilon_x^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1^p & c_2^p & c_3^p \\ c_4^p & c_5^p & c_6^p \\ c_7^p & c_8^p & c_9^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\tau_{xy} \\ d\sigma'_y \\ d\sigma'_x \end{bmatrix}$$

- Elastische rekken

De coëfficiënten c_1^e tot en met c_9^e , zoals gedefiniëerd in punt 6., kunnen direct worden afgeleid uit de constitutieve vergelijkingen voor elastische vervorming, zoals gegeven in punt 3.:

$$d\gamma_{xy}^e = \frac{1}{G} d\tau_{xy}$$

met:

$$d\epsilon_y^e = \frac{1-\nu\nu^*}{E} d\sigma_y' - \frac{\nu(1+\nu^*)}{E} d\sigma_x'$$

$$d\epsilon_x^e = \frac{1-\nu\nu^*}{E} d\sigma_x' - \frac{\nu(1+\nu^*)}{E} d\sigma_y'$$

$$G = \left(\frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \right) \cdot Ks$$

$$= \left(\frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \right) \cdot (Ks_0 \left(\frac{\sigma'_{vol}}{\sigma'_{vol0}} \right)^\nu)$$

en:

$$E = 3(1-2\nu) \cdot Ks = 3(1-2\nu) \cdot (Ks_0 \left(\frac{\sigma'_{vol}}{\sigma'_{vol0}} \right)^\nu)$$

zodat:

$$c_1^e = \frac{1}{G}$$

$$c_2^e = c_3^e = c_4^e = c_7^e = 0$$

$$c_5^e = c_9^e = \frac{1-\nu\nu^*}{3(1-2\nu)} \cdot \frac{1}{Ks}$$

$$c_6^e = c_8^e = \frac{\nu(1+\nu^*)}{3(1-2\nu)} \cdot \frac{1}{Ks}$$

- Plastische rekken: eerste stap

Het verband tussen de (incrementen van de) plastische rekken en de (incrementen van de) spanningen kan als volgt geschreven worden:

$$\begin{bmatrix} d\epsilon_{vol}^p \\ d\gamma^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} ds$$

Volgens punt 3. geldt:

$$b_1 = \epsilon_{vol0} \left(\frac{\sigma'_{vol}}{\sigma'_{vol0}} \right)^\nu \cdot \left(A \cdot m \cdot s^{m-1} - B \cdot \left(\frac{r s^{r-1}}{s_{max}-s} + \frac{s^r}{(s_{max}-s)^2} \right) \right)$$

Bovenstaand verband kan niet rechtstreeks worden gebruikt voor de bepaling van de definitieve matrix. Hiertoe moet ds worden gesplitst in $d\tau_{xy}$, $d\sigma_y$ en $d\sigma_x$. Vervolgens moeten $d\epsilon_{vol}^p$ en $d\gamma^p$

$$b_2 = \frac{1}{G^*} \cdot \frac{1 + \left(\frac{s}{s_{max}}\right)^2}{\left(1 - \left(\frac{s}{s_{max}}\right)^2\right)^2} \left(\frac{\sigma_{vol}}{\sigma_{vol0}}\right)^v$$

worden uitgedrukt in $d\gamma_{xy}$, $d\epsilon_y$ en $d\epsilon_x$. Dit wordt gedaan in de tweede, respectievelijk de derde stap.

- Plastische rekken: tweede stap

De grootheid ds , zoals gedefiniëerd in 4., wordt gedifferentieerd naar σ_x , σ_y en τ_{xy} :

$$\begin{aligned} ds &= \frac{\delta s}{\delta \sigma'_x} d\sigma'_x + \frac{\delta s}{\delta \sigma'_y} d\sigma'_y + \frac{\delta s}{\delta \sigma'_z} d\sigma'_z \\ &= f_4 d\sigma'_x + f_5 d\sigma'_y + f_6 d\sigma'_z \end{aligned}$$

In feite wordt een transformatie uitgevoerd volgens:

$$ds = [f_4 \quad f_5 \quad f_6] \begin{bmatrix} d\sigma'_x \\ d\sigma'_y \\ d\sigma'_z \end{bmatrix}$$

met als resultaat:

$$f_4 = \frac{3 \cdot (1+\nu^*)}{q} \cdot \frac{(\sigma'_x - \sigma'_y) \cdot (\sigma'_x + \sigma'_y) - 6q(1+\nu^*)}{(1+\nu^*)^2 \cdot (\sigma'_x + \sigma'_y)^2}$$

$$f_6 = \frac{6}{(1+\nu^*) \cdot (\sigma'_x + \sigma'_y)} \cdot \frac{1}{2q} \cdot 2 \cdot \tau_{xy}$$

waarin:

$$q = \sqrt{\left(\frac{1}{4} \cdot (\sigma'_y - \sigma'_x)^2 + \tau_{xy}^2\right)}$$

- Plastische rekken: derde stap

De volgende transformatie wordt uitgewerkt:

Daarvoor wordt gebruik gemaakt van de volgende twee relaties:

$$\begin{bmatrix} d\gamma_{xy}^p \\ d\epsilon_y^p \\ d\epsilon_x^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 \\ h_5 & h_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\epsilon_{vol}^p \\ d\gamma^p \end{bmatrix}$$

$$d\epsilon_{vol}^p = d\epsilon_y^p + d\epsilon_x^p$$

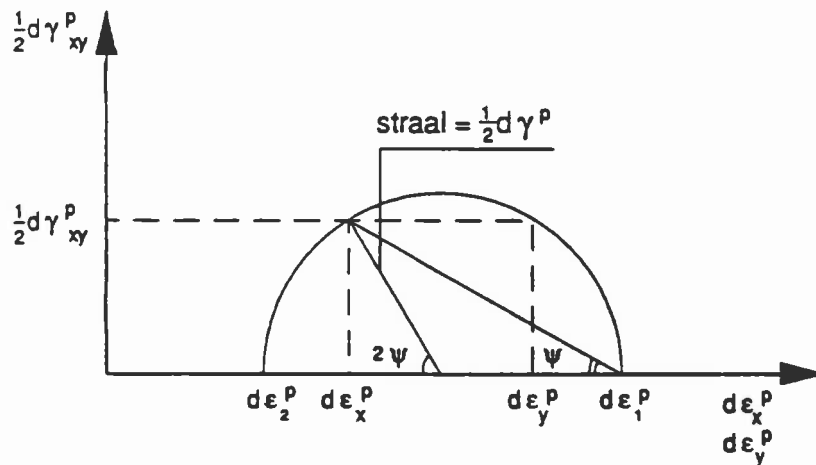
$$d\gamma^p = \sqrt{((d\gamma_{xy}^p)^2 + (d\epsilon_y^p - d\epsilon_x^p)^2)}$$

Deze twee relaties worden gevonden uit de cirkel van Mohr toegepast op de rekincrementen (zie figuur IV.6), met als hulpgrootheden $d\epsilon_1$ en $d\epsilon_2$ waarvoor geldt:

$$d\epsilon_{vol}^p = d\epsilon_1 + d\epsilon_2$$

$$d\gamma^p = d\epsilon_1 - d\epsilon_2$$

ψ is de hoek (ten opzichte van het x-y stelsel) van hoofdrichtingen van plastische rekincrementen (zie figuur IV.6). Hierna kan gebruik gemaakt worden van de regel, dat de hoofdrichtingen van de plastische rekincrementen samenvallen met de richtingen van de hoofdspanningen. Daardoor kan de hoek ψ worden uitgedrukt in de spanningen:



Figuur IV.6 Cirkel van Mohr toegepast op plastische rekincrementen

$$\psi = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2 \cdot \tau_{xy}}{\sigma'_y - \sigma'_x}\right) \text{ of } \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\tan \alpha_p}{1 - K_{op}}\right) \text{ als } K_o < 1$$

$$\psi = \frac{\pi}{2} + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2 \cdot \tau_{xy}}{\sigma'_y - \sigma'_x}\right) \text{ of } \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\tan \alpha_p}{K_{op} - 1}\right) \text{ als } K_o > 1$$

Nu volgt:

$$h_1 = 0$$

$$h_2 = \sin(2 \cdot \psi)$$

$$h_3 = h_5 = 0,5$$

$$h_4 = -h_6 = 0,5 \cdot \cos(2 \cdot \psi)$$

- Plastische rekken: vierde stap

De coëfficiënten c_1^p t/m c_9^p kunnen nu worden berekend:

$$\begin{bmatrix} d\gamma_{xy}^p \\ d\epsilon_y^p \\ d\epsilon_x^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1^p & c_2^p & c_3^p \\ c_4^p & c_5^p & c_6^p \\ c_7^p & c_8^p & c_9^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\tau_{xy} \\ d\sigma'_y \\ d\sigma'_x \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_3 & h_4 \\ h_5 & h_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} [f_6 \ f_5 \ f_4] \begin{bmatrix} d\tau_{xy} \\ d\sigma'_x \\ d\sigma'_y \end{bmatrix}$$

$$c_1 = (h_1 \cdot b_1 + h_2 \cdot b_2) \cdot f_6 = \sin(2 \cdot \psi) \cdot b_2 \cdot f_6$$

$$c_2 = (h_1 \cdot b_1 + h_2 \cdot b_2) \cdot f_5 = \sin(2 \cdot \psi) \cdot b_2 \cdot f_5$$

$$c_3 = (h_1 \cdot b_1 + h_2 \cdot b_2) \cdot f_4 = \sin(2 \cdot \psi) \cdot b_2 \cdot f_4$$

$$c_4 = (h_3 \cdot b_1 + h_4 \cdot b_2) \cdot f_6 = 0,5 \cdot (b_1 + \cos(2 \cdot \psi) \cdot b_2) \cdot f_6$$

$$c_5 = (h_3 \cdot b_1 + h_4 \cdot b_2) \cdot f_5 = 0,5 \cdot (b_1 + \cos(2 \cdot \psi) \cdot b_2) \cdot f_5$$

$$c_6 = (h_3 \cdot b_1 + h_4 \cdot b_2) \cdot f_4 = 0,5 \cdot (b_1 + \cos(2 \cdot \psi) \cdot b_2) \cdot f_4$$

$$c_7 = (h_5 \cdot b_1 + h_6 \cdot b_2) \cdot f_6 = 0,5 \cdot (b_1 - \cos(2 \cdot \psi) \cdot b_2) \cdot f_6$$

$$c_8 = (h_5 \cdot b_1 + h_6 \cdot b_2) \cdot f_5 = 0,5 \cdot (b_1 - \cos(2 \cdot \psi) \cdot b_2) \cdot f_5$$

$$c_9 = (h_5 \cdot b_1 + h_6 \cdot b_2) \cdot f_4 = 0,5 \cdot (b_1 - \cos(2 \cdot \psi) \cdot b_2) \cdot f_4$$

- Som van elastische en plastische rekken

De elastische en plastische rekken kunnen gesuperponeerd worden:

$$c_1 = c_1^e + c_1^p$$

$$c_2 = c_2^e + c_2^p$$

$$c_3 = c_3^e + c_3^p$$

$$c_4 = c_4^e + c_4^p$$

$$c_5 = c_5^e + c_5^p$$

$$c_6 = c_6^e + c_6^p$$

$$c_7 = c_7^e + c_7^p$$

$$c_8 = c_8^e + c_8^p$$

$$c_9 = c_9^e + c_9^p$$

- Bepaling eigenwaarde van de flexibiliteitsmatrix

Bij de beoordeling van de stabiliteit wordt een kleine schuifspanningsverandering verondersteld bij ongedraineerd grondgedrag. In de ongedraineerde toestand is de volumeverandering gelijk aan nul en kan slechts schuifvervorming optreden. In het 1-dimensionale geval (oneindig lang talud) kan worden gesteld, dat $d\varepsilon_x = 0$. Omdat de volumeverandering $d\varepsilon_{vol} = d\varepsilon_x + d\varepsilon_y = 0$, is dan ook $d\varepsilon_y = 0$. Het stelsel reduceert in het ongedraineerde, 1-dimensionale geval dus tot:

$$\begin{bmatrix} d\gamma_{xy} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & c_3 \\ c_4 & c_5 & c_6 \\ c_7 & c_8 & c_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\tau_{xy} \\ d\sigma'_y \\ d\sigma'_x \end{bmatrix}$$

Hieruit kan worden afgeleid:

$$d\gamma_{xy} = d\tau_{xy} \left(c_1 - \frac{c_7}{c_9} c_3 + \left(c_2 - \frac{c_8}{c_9} c_3 \right) \cdot \frac{c_4 - \frac{c_7}{c_9} c_6}{\frac{c_8}{c_9} c_6 - c_5} \right)$$

of kortweg:

$$d\gamma_{xy} = \frac{1}{\lambda} d\tau_{xy}$$

Hierin is λ de eigenwaarde de stijfheidsmatrix. Indien de berekende $\lambda < 0$, dan is er sprake van instabiliteit.

Ook als er sprake is van een eindig talud wordt bij de beoordeling van de stabiliteit een kleine schuifspanningsverandering verondersteld bij ongedraineerd grondgedrag. Ook geldt hier, dat de volumeverandering in die ongedraineerde toestand gelijk aan nul is, zodat $d\varepsilon_y = -d\varepsilon_x$. Met alleen

deze voorwaarde is het stelsel echter niet op te lossen. Er moet een tweede voorwaarde gesteld worden, die zo goed mogelijk overeenkomt met de variatie in de x-richting. Bij gebrek aan 2-dimensionale ongedraineerde berekeningen wordt hiervoor dezelfde aanname gebruikt als in het 1-dimensionale geval. Hoewel in principe in ieder punt rek evenwijdig aan het talud mogelijk is, kan deze rek alleen gerealiseerd worden als de naast het punt gelegen grond deze rek toestaat. Als bijvoorbeeld onder aan het talud een rekincrement evenwijdig aan het talud op zou treden, dan moeten alle punten die op die diepte liggen evenwijdig aan het talud meeverplaatsen. Er zou aangenomen kunnen worden, dat zo'n verplaatsing niet mogelijk is, omdat de naastliggende punten aan een bijna gelijke belastingsverandering onderworpen zijn. Dan geldt onder deze aanname nog steeds: $d\epsilon_x = d\epsilon_y = 0$.

4.6 Minder conservatief stabiliteitscriterium

De aanname dat als in 1 punt in de geometrie instabiliteit ontstaat dat dit kan leiden tot het bezwijken van de volledige taludhelling is vermoedelijk conservatief. In de Groot (1994) is een formulering gegeven voor een minder conservatief stabiliteitscriterium. Indien in een punt verweking optreedt dan zal in dit punt een neiging tot een grote schuifvervorming bestaan. Dit kan worden uitgedrukt in:

$$d\gamma_{xy} = \frac{d\tau_{xy}}{\lambda}$$

In de naastgelegen punten zal deze neiging minder sterk aanwezig zijn. Aangenomen wordt dat de schuifvervorming exponentieel afneemt met de afstand tot het verweekte punt:

$$d\gamma_{xy}(x) = d\gamma_{xy,\max} \exp\left(-\frac{|x|}{x_1}\right)$$

met $0,3h < x_1 < h$. Het talud als geheel kan alleen instabiel worden als de integraal van de schuifspanningsverandering langs een schuifvoeg negatief is. In formulevorm:

$$\int_A^B \left(\frac{d\tau_{xy}}{d\gamma_{xy,\max}} \right) dx < 0$$

$$\int_A^B \left(\lambda \frac{d\gamma_{xy}}{d\gamma_{xy,\max}} \right) dx < 0$$

In Stoutjesdijk (1994a) is dit criterium toegepast en vergeleken met het gebruikelijke stabiliteitscriterium. Hieruit bleek dat de invloed van de verbeterde formulering van het stabiliteitscriterium op de resultaten beperkt bleef. In het algemeen werd een iets steilere kritieke taludhelling. Een kritieke taludhelling van 1 : 4 volgens het oude criterium werd, indien het minder conservatieve criterium werd gebruikt, bijvoorbeeld 1 : 3,5 of 1 : 3.

Deel V: Verantwoording en onzekerheden

5.1 Theoretische achtergronden

De modellering van het ontstaan van een zettingsvloeiing is gebaseerd op theoretische overwegingen. Een goed begrip van deze overwegingen is van eminent belang voor een goed gebruik van het model. Dit begrip is ook cruciaal bij het afschatten voor welke omstandigheden het model en voor welke omstandigheden het model niet geschikt is.

Het eerste punt ter overweging is, voor welke omstandigheden de modellering is opgezet. Er wordt in SLIQ2D van uit gegaan, dat de spanningen in een gegeven geometrie **volledig gedraïneerd** zijn ontstaan. Dit wil zeggen, dat er geen wateroverspanningen ontstaan. Gedacht wordt hierbij aan de Zeeuwse situatie; een talud versteilt onder invloed van erosie. Deze aanname impliceert dat het model eigenlijk niet geschikt is om vloeiingen tijdens baggerwerkzaamheden of storten van zand te berekenen. Dit zijn processen waarbij drainage en snelle spanningsverandering kunnen overheersen.

De vraag of een punt in de geometrie stabiel of instabiel is wordt **volledig ongedraïneerd** beschouwd. Dit is een keuze. Voor deze modellering is gekozen, omdat een kortdurend proces verondersteld wordt. Aan het constitutieve stelsel wordt een kleine schuifspanningsverandering opgelegd. Bekeken wordt of het systeem stabiel dan wel instabiel reageert. Bij een kleine schuifspanningsverandering kan men zich bijvoorbeeld lokale kleine afschuivingen als gevolg van erosie, golven, scheepsgolven, trillingen en dergelijke voorstellen.

De stabiliteitsprocedure is dus volledig ongedraïneerd verondersteld. De parameters voor het constitutief gedrag komen echter uit **gedraïneerde (droge) triaxiaalproeven**. Dit is op het eerste gezicht wat vreemd. Het is echter mogelijk uit de constitutieve parameters uit gedraïneerde proeven, het gedrag van dezelfde grond bij ongedraïneerd gedrag te voorspellen. De procedure die hiervoor wordt gebruikt wordt hier toegelicht.

Als onder gedraïneerde omstandigheden de (relatieve) schuifspanning wordt verhoogd, dan treedt bij losgepakt zand plastische contractie op. In een gedraïneerde proef wordt deze contractie gemeten, en in de SLIQ2D-procedure beschreven volgens:

$$d\epsilon_{vol,d} = \frac{\partial}{\partial s}(\epsilon_{vol,d}) = \frac{\partial}{\partial s}(\epsilon_{vol,d,0} \left(\frac{\sigma'_{vol}}{\sigma'_{vol,0}}\right)^v f(s)) ds$$

waarin $f(s)$ de functie is die de vorm van de curve beschrijft:

$$f(s) = A s^m - \frac{B s^r}{s_{max} - s}$$

In ongedraïneerde omstandigheden, dit wil zeggen dat er geen volumeverandering kan plaatsvinden, veroorzaakt deze neiging tot volumeverkleining van het korrelskelet wateroverspanning van het poriënwater. Hierdoor neemt de korrelspanning af. Zoals al eerder beschreven kan het gedrag bij decompressie worden gemeten onder volledig gedraïneerde omstandigheden. In SLIQ2D wordt dit verband beschreven met de formule:

$$d\epsilon_{vol_c} = -\frac{d\sigma'_{vol}}{K_s}$$

waarin de decompressiemodulus K_s wordt geschreven als:

$$K_s = K_{s_0} \left(\frac{\sigma'_{vol}}{\sigma'_{vol_0}} \right)^n$$

Onder ongedraineerde omstandigheden geldt dat er geen volumeverandering op kan treden, dus dat:

$$d\epsilon_{vol_d} = -d\epsilon_{vol_c}$$

Hieruit kan het verloop van spanningen worden berekend onder ongedraineerde omstandigheden:

$$\frac{d\sigma'_{vol}}{ds} = -(\sigma'_{vol})^{(u+v)} \cdot \frac{K_{s_0} \cdot \epsilon_{vol_{dm0}}}{(\sigma'_{vol_0})^{(u+v)}} \cdot \frac{df(s)}{ds}$$

Als eenmaal het beginpunt van deze curve vastligt met de isotrope spanning $\sigma'_{vol,A}$ bij relatieve schuifspanning $s = 0$, dan ligt de gehele curve vast. Deze kan door integratie worden afgeleid:

$$\sigma'_{vol} = \frac{\sigma'_{vol_0}}{\left[\frac{(u+v-1) \cdot K_s \cdot \epsilon_{vol_{dm0}}}{\sigma'_{vol_0}} f(s) + \left(\frac{\sigma'_{vol_0}}{\sigma'_{vol,A}} \right)^{(u+v-1)} \right]^{\frac{1}{u+v-1}}}$$

ofwel:

$$\sigma'_{vol} = \frac{p^*}{\left[f(s) + \left(\frac{p^*}{\sigma'_{vol,A}} \right)^{u+v-1} \right]^{\frac{1}{u+v-1}}}$$

waarin p^* de contractie spanning wordt genoemd, met als definitie:

$$p^* = \left[\frac{\sigma'_{vol_0}^{u+v}}{(u+v-1) \cdot K_{s_0} \cdot \epsilon_{vol_{dm0}}} \right]^{\frac{1}{u+v-1}}$$

Omdat K_{s_0} rechtevenredig is met $(\sigma'_{vol})^u$ en $\epsilon_{vol_{dm0}}$ met $(\sigma'_{vol})^v$ is p^* géén functie van de keuze van σ'_{vol_0} . De contractiespanning is, voor één zandsoort, alleen een functie van de dichtheid. Uitgezet tegen de dichtheid ontstaat een lijn die sterke overeenkomst vertoont met de steady state line (zie figuur VI.1).

Bij benadering geldt $(u + v) = 2$, zodat:

$$\sigma'_{vol} = \frac{p^*}{f(s) + \frac{p^*}{\sigma'_{vol,A}}}$$

$$p^* = \frac{\sigma'_{vol,0}}{Ks_0 \epsilon_{vol,0}}$$

Bij ongedraineerde proeven is het gebruikelijk de isotrope spanning uit te zetten tegen de deviatorspanning q . Dit is eenvoudig om te rekenen:

$$q = \frac{s \cdot \sigma'_{vol}}{2}$$

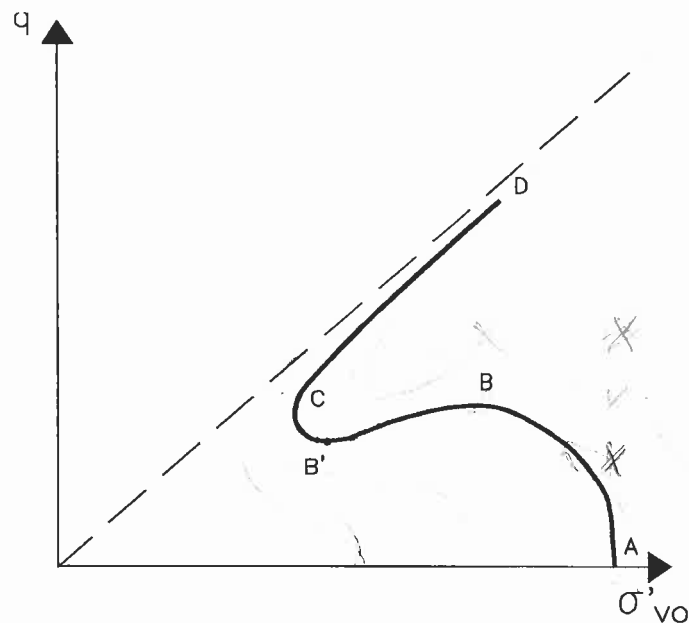
Het resultaat is te zien in figuur V.1. De figuur laat een ongedraineerd spanningspad zien voor een losgepakt zand. In dit spanningspad zijn de volgende trajecten te onderscheiden:

- van A tot B :afnemende isotrope spanning (wateroverspanning) bij toenemende deviatorspanning.
- van B tot B': zowel isotrope als deviatorspanning nemen af.
- van B' tot C: afnemende isotrope spanning bij toenemende deviatorspanning.
- C en verder : zowel isotrope als deviatorspanning nemen toe.

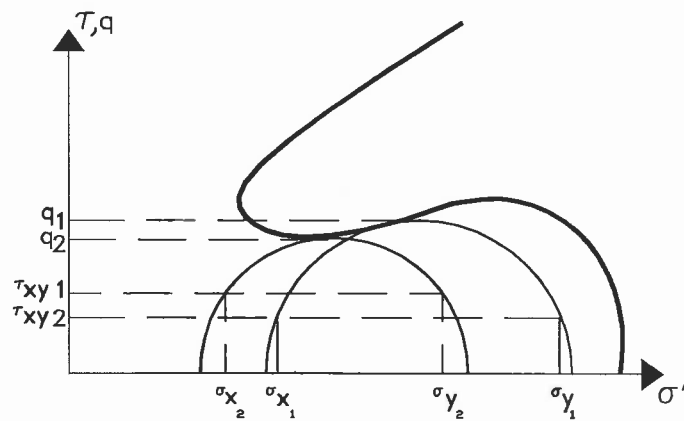
In principe wordt in de ongedraineerde triaxiaalproef de deviatorspanning monotoon verhoogd. Het gedeelte van B tot C (afnemende en vervolgens weer toenemende deviatorspanning) moet snel doorlopen worden, immers, de randvoorwaarde eist dat de deviatorspanning verder toe moet kunnen nemen. Hierdoor ontstaat dus ook snel grote wateroverspanning. In de proef zijn twee mogelijkheden: het monster bezwijkt, of het monster vertoont even grote schuifvervorming maar bezwijkt niet. In het model zijn deze mogelijkheden er niet: volgens de mathematische formulering wordt altijd de tweede mogelijkheid genomen. Er moet in het mathematische model dus een bezwijkcriterium gekozen worden.

Voor de zekerheid kan men het criterium van de natte kritieke dichtheid nemen: instabiliteit treedt op zodra de deviatorspanning afneemt. In een talud zal het ongedraineerde spanningspad gelijk zijn aan dat in een triaxiaalproef. Maar de situatie is dan niet volledig spanningsgestuurd en de normaalspanningen in vlakken loodrecht op het talud zullen meestal iets toenemen op het moment dat de deviatorspanning afneemt. Daardoor treedt meestal nog niet direct instabiliteit op.

Overeenkomstig daarmee wordt in SLIQ2D als bezwijkcriterium (of: stabiliteitscriterium) gesteld, dat de schuifspanning niet af mag nemen: $d\tau_{xy} \geq 0$. Dat dit ook daadwerkelijk een beter criterium is kan uit de cirkel van Mohr afgeleid worden. In figuur V.2 is een situatie geschetst met afnemende deviatorspanning, doch toenemende schuifspanning.



Figuur V.1 Spanningspad bij ongedraineerde proef



Figuur V.2 Cirkel van Mohr: deviatorspanning q neemt af, schuifspanning τ_{xy} neemt toe

5.2 Parameters uit de literatuur

Uit bovenstaande blijkt, dat het ongedraineerde gedrag van grond beschreven kan worden met de resultaten van gedraineerde triaxiaalproeven. In de formulering spelen de parameters Ks_0 en u voor elastische volumerek en $\epsilon_{vol_{dm0}}$, v en de vormfunctie $f(s)$ voor plastische volumerek een grote rol.

In de Groot [1992] is een onderzoek verricht naar de vraag of informatie over deze invoerparameters van SLIQ2D uit gegevens van buitenlandse en binnenlandse literatuur kan worden verkregen. Gekeken is naar gegevens van zowel gedraineerde als ongedraineerde proeven. De resultaten van

deze studie kunnen gebruikt worden om een indicatie te krijgen van de waarde van parameters als er geen of weinig metingen beschikbaar zijn.

Uit een inventarisatie van gedraineerde proeven komt naar voren dat:

- de waarde van u tussen de 0,6 en 1,4 ligt. In SLIQ2D wordt een verstekwaarde van 1 gebruikt.
- waarden van K_{s0} tussen 50.000 kPa en 120.000 kPa worden gevonden. Een grote waarde van K_{s0} is ongunstig: deze behoort echter bij de vastere pakkingen. *bv $K_{s0} = 50 \text{ MPa} + Dr \cdot 70 \text{ MPa}$*
- de waarde van v ligt tussen 0,75 en 2,5. In SLIQ2D wordt een verstekwaarde van 1,25 gebruikt. *$K_{sc} = s_c + (Dr - 0,3) \cdot 1,75$*
- voor de maximale contractie $\epsilon_{vol_{dm0}}$ wordt gevonden dat deze een functie is van de relatieve dichtheid volgens:

$$\epsilon_{vol_{dm0}} = 0,001 \exp\left(\frac{Dr_1 - Dr}{Ced}\right)$$

waarin Dr_1 de relatieve dichtheid is waarbij $\epsilon_{vol_{dm0}}$ gelijk is aan 0,001 (Dr_1 tussen 0,1 en 0,8, gemiddeld 0,3) en Ced een coëfficiënt tussen 0,04 en 0,20 (gemiddeld 0,13). Uit deze vergelijking kan een goede schatting gemaakt worden van $\epsilon_{vol_{dm0}}$ bij een willekeurige dichtheid, mits enkele punten (minimaal twee) van de curve uit proefresultaten bekend zijn.

- voor de parameter s_2 uit de functie $f(s)$ wordt gevonden, dat s_2 tussen 0,8 à 1,5 ligt (gemiddeld 1,15). Parameter s_{max} is per monster een functie van de relatieve dichtheid: naarmate het zand vaster gepakt is stijgt de waarde van s_{max} . De waarden van m en r zijn moeilijker direct vast te stellen; wellicht kan uit de maximale afgeleide van de dilatatiecurve naar de relatieve schuifspanning, gecombineerd met het schuifspanningsniveau waar deze optreedt, een tendens gevonden worden. *zie voorbedwaarden blz. 46*

Als de beginspanning $\sigma_{vol,A}$ en de spanning σ_{vol0} waarbij de proeven zijn gedaan buiten beschouwing worden gelaten, dan wordt de vorm van het ongedraineerde spanningspad gedomineerd door de combinaties van $(u+v)$ en $(\epsilon_{vol_{dm0}} \cdot K_{s0})$, ofwel door de waarde van de contractie spanning p^* . Uit spanningspaden van ongedraineerde triaxiaalproeven kan worden afgeleid dat de gecombineerde waarde $(u+v)$ tussen 1,5 en 2,5 moet liggen. Het quotiënt $(\epsilon_{vol_{dm0}} \cdot K_{s0})$ neemt af met afnemende relatieve dichtheid. Hetzelfde geldt voor p^* .

5.3 Gevoeligheid voor verandering in invoer

Met behulp van probabilistische berekeningen [den Adel, 1991] en een parameterstudie [Stoutjesdijk, 1991] is getracht na te gaan in hoeverre het model gevoelig is voor verandering in invoerparameters. Hieruit bleek duidelijk, dat niet alle parameters een even grote invloed hebben op het resultaat.

In de parameterstudie is voor alle invoerparameters een mogelijke afwijking van 10 % verondersteld. Als slechts één parameter tegelijkertijd werd gevarieerd, dan was de invloed op het resultaat beperkt. De kritieke taludhelling varieerde van 1 : 3,6 tot 1 : 4,4. Een aardige indruk van de totale gevoeligheid van het model werd verkregen door alle parameters tegelijkertijd 'gunstig' danwel 'ongunstig' te kiezen. De uitkomst varieerde van 'in het geheel niet instabiel' tot een kritieke taludhelling van 1 : 5,7.

In de probabilistische studie werd voor één locatie de resultaten van een aantal proeven omgewerkt tot invoerparameters met een verwachtingswaarde en een standaardafwijking. Vervolgens werd voor verschillende taludhellingen de kans op verweking (eigenwaarde $\lambda < 0$) berekend. De uitkomsten varieerden van een kans van 5 % op verweking bij een helling 1 : 5 tot een kans van 54 % bij een helling 1 : 2,1. De uitspraak: "een kans van 5 % op verweking bij een helling 1 : 5" betekent praktisch gezien dat, bij gegeven verwachtingswaarden van de invoerparameters en gegeven (standaard)afwijkingen, een kans van 5 % bestaat dat de combinatie van parameters in werkelijkheid dusdanig ongunstig is dat (volgens het model) verweking ontstaat. Praktisch gezien is de kans dat geen verweking ontstaat dus veel groter, te weten 95 %. De hoge kans op verweking, met name bij steilere taludhellingen, kan worden toegeschreven aan de gehanteerde grote spreiding in invoergegevens, en in de spreiding in in-situ dichtheid. Deze grote spreiding is gegenereerd door van alle monsters de waarden voor een parameter samen te voegen. Vermoedelijk is een correctere procedure om per situatie of eventueel per grondlaag van minimaal enkele meters dikte de onzekerheden af te schatten van de voor die grondlaag bepaalde parameters. Op die manier wordt vermeden dat de lokale variabiliteit van de ondergrond voor iedere parameter voor grote spreiding zorgt.

Een aardige bijkomstigheid van de gehanteerde benadering is, dat ook de bijdrage per parameter aan de totale kans kan worden afgeleid. Dit varieert overigens met de grootte van de spreiding die aan een parameter wordt toegekend. Het bleek, dat $evol_{dm0}$, v , m , Ks_0 en u de grootste bijdrage hadden.

Op basis van de parameterstudie en de probabilistische studie zijn in de huidige versie van SLIQ2D een aantal parameters, waarvan was aangetoond dat deze vrijwel geen invloed op het resultaat van een berekening hadden, vervangen door standaardwaarden (v en v^*) of door een functie van de relatieve dichtheid (G^* en onderwatergewicht γ). Er worden alleen parameters ingevoerd die invloed hebben op de uitkomst van de berekening.

5.4 Veiligheidsfilosofie

Als alle invoerparameters voor het model SLIQ2D exact bekend zijn voor een gegeven situatie, dan is de berekende kritieke taludhelling (de helling waarbij voor het eerst instabiliteit ontstaat) vermoedelijk een conservatief criterium met betrekking tot het werkelijk optreden van een zettingsvloeiing. Anderzijds is er voldoende reden om een ruime veiligheidsmarge aan te nemen:

- Er wordt geen rekening gehouden met de spreiding in de invoergegevens. Deze spreiding is in de meeste gevallen zo groot (denk aan verschillen in in-situ dichtheid, in-situ grondeigenschappen, de invloed van een iets andere membraancorrectie, de nauwkeurigheid van de laboratoriumproeven, modelonzekerheden) dat als er wel rekening mee zou worden gehouden, bijvoorbeeld in een probabilistische analyse, altijd een vrij grote kans bestaat dat in een punt verweking op kan treden.
- Meestal zijn de beschikbare gegevens niet exact bekend op de locatie waar het probleem zich voordoet, bijvoorbeeld omdat het uitvoeren van grondonderzoek op een onderwatertalud vrij kostbaar is. Ook wanneer de gegevens wel exact op locatie zijn gemeten, dan nog is dat op slechts enkele punten. De variabiliteit van de ondergrond kan aanzienlijk zijn.
- De invloed van dunne of dikkere laagjes slib of klei, die vrij ondoorlatend zijn, is onbekend. In de praktijk zijn deze laagjes vaak wel aanwezig. De gelaagdheid van grond kan een belangrijke rol spelen, en die is slechts gedeeltelijk te modelleren.
- Bij het bepalen van de kritieke taludhelling speelt de spanningstoestand een grote rol. Deze spanningstoestand kan niet ter plekke worden gemeten. Hoewel in SLIQ2D een benadering voor de spanningstoestand wordt gehanteerd die zeker niet onredelijk is, kunnen de in-situ spanningen anders zijn. Hierin spelen ontlasting door erosie, de wijze van afzetting en de zogeheten "spanningsgeschiedenis" een meer of minder belangrijke rol. De invloed hiervan is nauwelijks vast te stellen.

Het is mogelijk de eigenwaarde λ als betrouwbaarheidsfunctie te gebruiken in een tweede orde probabilistische benadering. Hierbij wordt voor iedere invoerparameter een verwachtingswaarde, een spreiding en een statistische distributie gedefiniëerd. In de spreiding kan ook een deel van de bovenstaande onzekerheden worden verdisconteerd. Vervolgens wordt de kans dat λ kleiner is dan nul berekend. Vanwege het totaal aan onzekerheden en daarom de grote spreiding van de invoerparameters wordt echter steevast een grote kans op een zettingsvloeiing berekend. In dit geval is het echter eerder verantwoord om rekening te houden met gunstige invloeden, zoals:

- herverdeling van spanningen.
- invloed van dissiperen van wateroverspanning door drainage.
- het feit dat verweking in 1 punt vermoedelijk niet voldoende is voor het ontstaan van een volledig stabiliteitsverlies.
- de meest ongunstige eigenschappen komen slechts over een beperkt deel van de geometrie voor.

Aanbevolen wordt om vooralsnog het criterium:

"Verweking in 1 punt is voldoende tot het inleiden van een zettingsvloeiing"

te hanteren, en in praktijksituaties ook hiermee nog zeer voorzichtig om te gaan. Deze formulering klinkt onnodig conservatief, aangezien de verwachting is, dat, door herverdeling van

spanningen en de invloed van drainage op het dissiperen van wateroverspanningen, een groter gedeelte van de geometrie zijn draagkracht moet verliezen om plaatselijk afschuiven en om zo instabiliteit van het talud in zijn geheel in te luiden. In de Groot [1994] is dit ook aangetoond. Met de gekozen conservatieve formulering kunnen echter ook de andere modelonzekerheden verdisconteerd worden.

5.5 Lacunes in de kennis

SLIQ2D is een reflectie van het kennisniveau dat tot op heden is bereikt. Het programma zou omschreven kunnen worden als een model met een solide fysische achtergrond. Anderzijds heeft het model een beperkt toepassingsgebied, een beperkte verificatie en een aantal modelonzekerheden. Voorts wordt als nadeel gezien, dat het gebruik van het model in praktijksituaties een redelijk grote mate van expertise vereist, en dus voor de adviespraktijk vooralsnog een beperkte waarde heeft. Deze punten worden onderstaand nader toegelicht.

- Beperkt toepassingsgebied

Het model is alleen geschikt om toegepast te worden op taluds die volledig gedraineerd zijn ontstaan, dus bijvoorbeeld door erosie. Het model is niet zonder meer geschikt om te rekenen aan dynamische processen, zoals baggerwerkzaamheden of het storten van zandlichamen onder water. Wellicht zou voor deze situaties nog wel gebruik gemaakt kunnen worden van de stabiliteitsprocedure, als aangetoond kan worden dat de belastingsveranderingen zo langzaam gaan dat het zand nagenoeg gedraineerd reageert, of als een procedure ontwikkeld kan worden om de ontstane waterspanningen op een correcte manier in de grondspanningen te verdisconteren.

- Modelonzekerheid

Er is een marge tussen werkelijke en berekende spanningen, er kan sprake zijn van invloed van gelaagdheid van de ondergrond en vermoedelijk nog meer zaken waar in de modellering geen rekening mee wordt gehouden. Alle onzekerheden worden in feite verdisconteerd in de conservatieve aanname, dat de kritieke taludhelling bereikt is als in 1 punt verweking optreedt. Rekening houdend met alle onzekerheden levert een advies in de regel relatief flauwe hellingen op. Dit kan, gerekend naar de ervaringen in de adviespraktijk, te behoudend zijn om winst op te leveren.

- Advies is in de praktijk kostbaar

Het gebruik van het model is in die zin eenvoudig, dat het gebruikersvriendelijk is opgezet. Anderzijds is het voor het bepalen van de parameters nodig om grondonderzoek, laboratoriumonderzoek en fitprocedures te verrichten. Vervolgens hangt de uiteindelijke afschatting van de kans op een vloeijing voor een groot deel af van de expertise van de gebruiker. Dit maakt dat de kring van potentiële gebruikers beperkt is.

Deel VI: Historie van het onderzoek

6.1 Voorgeschiedenis

De eerste ideeën betreffende verweking van zand en zettingsvloeiingen werden geformuleerd door Terzaghi [1925]. Casagrande [1938] en Geuze [1948] introduceerden het begrip kritieke dichtheid. Vanuit Zeeland zijn v.d. Broecke, van der Linden (1945, 1949, 1954) en Wilderom (1952a, 1952b, 1972, 1979) bekende namen. Later werd door TOW-G6 (Toegepast Onderzoek Waterstaat) veel aandacht aan triaxiaalproeven en natte en droge kritieke dichtheid besteed (Lindenberg [1978]).

6.2 Ervaringsgegevens

De eerste aanzet om te komen tot goede regelgeving voor de adviespraktijk was het rapport van Wilderom [1979] met daarin de verzamelde gegevens over opgetreden oevervallen in Zeeland. Davis [1983] verrichte onderzoek naar de kans op vloeiingen en de gevolgen daarvan voor de rand van de oeverbescherming van de stormvloedkering in de Oosterschelde.

Uit de inventarisatie van opgetreden oevervallen werden praktisch bruikbare criteria voor het optreden van zettingsvloeiingen afgeleid, en kon ook de omvang en hellingen na een vloeiing in kaart worden gebracht.

De constatering van Wilderom dat zettingsvloeiingen alleen optreden in jonge mariene afzettingen (geologisch criterium) werd betwist door Kuitert en Krajicek [1983], die aannemelijk maakten dat langs de oevers van de Oud en Nieuw-Noord-Bevelandse polder ten minste drie vloeiingen waren opgetreden in oud wadzand.

In het TOW-onderzoek "Kritieke dichtheid" werd het criterium, dat zand losgepakt moest zijn om te kunnen verweken onderbouwd met de begrippen natte en droge kritieke dichtheid. In Lindenberg en Koning [1981] is een goed overzicht hiervan gegeven.

6.3 Experimentele gegevens

Tussen 1973 en 1976 werden in de Grote Stroomgoot van het Waterloopkundig Laboratorium De Voorst een groot aantal zettingsvloeiingsproeven uitgevoerd. Hierbij werd op grote schaal (2 tot 2.5 m hoog en 30 m lang) vloeiingen gesimuleerd door een losgepakt zandbed op te bouwen tegen een klep, en vervolgens deze klep plotseling weg te trekken. Het doel van de proeven was het begrijpen van het verschijnsel zettingsvloeiing.

Interessant zijn de metingen tijdens de sluiting van het Slaak (Silvis [1986], de Groot et al [1987]). Met diverse methoden werden hier vloeiingen geregistreerd.

In de Brutusbak van Grondmechanica Delft (hoogte 1 m, breedte 1 m en lengte 2 m) werd een helling van losgepakt zand tot vloeien gebracht door van onder water toe te voeren (Molenkamp [1987]). Hierdoor fluidiseerde het zandpakket en vloeide uit.

De beste registraties van vloeiingen werden gemaakt bij de grootschalige proeven in de

Cuttergoot (2.5 m hoog, 0.5 m breed en 32 m lang) van het Waterloopkundig Laboratorium in Delft (Mastbergen en Bezuijen [1988a, 1988b], Bezuijen en Mastbergen [1988]). Hierbij werd het opbouwen van een zandlichaam onder water bestudeerd. Tijdens de proeven met fijn zand (135 μm) traden tijdens de proeven een aantal vloeiingen op die veel inzicht hebben verschaft omtrent het vloeiingsmechanisme. Opvallend was voorts, dat bij de proeven met middelgrof zand (225 μm) geen vloeiingen werden waargenomen.

6.4 Huidig onderzoek

Het huidige onderzoek naar zettingsvloeiingen, waarvan deze handleiding en het programma SLIQ2D de laatste stand van zaken weergeven, kreeg in 1985 richting. In Lindenberg [1985] werd geconcludeerd, dat:

"..de kennis omtrent oevervallen/zettingsvloeiingen belangrijke hiaten vertoont. Met name is dit het geval bij de fysisch-grondmechanische achtergrondkennis. (.....). Voor de beantwoording van de vragen is een opklimmende graad van inzicht in het zettingsvloeiingsverschijnsel vereist."

Het onderzoek sinds 1985 is dan ook gericht geweest op het verkrijgen van fundamenteel inzicht in het verschijnsel zettingsvloeiingen.

Bij het begin van het onderzoek was de verwachting dat het gehele proces van verweking, begin van beweging, afstroming en sedimentatie kon worden doorgrond en beschreven. Dit pad werd, noodgedwongen, verlaten. Aan het stromen van zandwatermengsels werd onder andere veel aandacht besteed in het MODVLO-onderzoek. De theoretische verbinding tussen verweking van een klein deel van de geometrie en een voortschrijdende vloeïng is tot op heden niet gelegd.

Voorts werd aandacht besteed aan het ontwikkelen van een terrein-meetmethode ter voorspelling van de verwekingsgevoeligheid van een locatie (de Graaf [1987] en Viergever [1991a, 1991b]). Hierbij werd gedacht aan onder andere pressiometer, speciale conustypen, speciale vane-test-apparatuur en non-destructieve methoden. Tot op heden zijn deze ideeën niet geconcretiseerd.

In het onderzoek hebben meerdere modellen een rol gespeeld, waarvan de belangrijkste zijn:

- het analytisch model (o.a. Sellmeijer [1989])
- het eindige elementen model MANCHESTER/MONOT (Silvis, Meijers en Molenkamp, meerdere publicaties)
- het één-dimensionale programma MSLIQ, met schaduwprogramma's (Lindenberg [1988], Silvis [1988a, 1988b, 1989a, 1989b, 1989c])

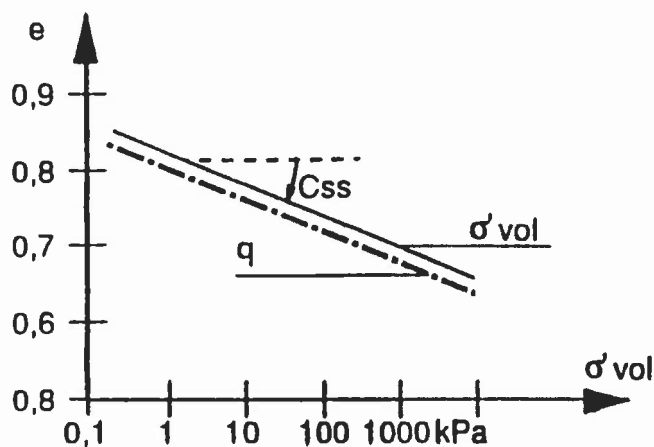
Uiteindelijk werd besloten het model MSLIQ uit te breiden tot een programma met een twee-

dimensionale spanningsbeschrijving en een puntsbenadering voor de stabiliteit (Stoutjesdijk [1991a]). De reden voor deze keuze was, dat geoordeeld werd, dat deze aanpak het meeste perspectief bood om tot een model te komen dat in de praktijk toepasbaar zou zijn. Dit model kreeg de naam SLIQ2D.

Sinds 1991 is de aandacht veelal gericht geweest op het verbeteren en definitief maken van dit model. Aandacht is er geweest voor de parameterkeuze (Stoutjesdijk [1991c, 1992], de Groot [1993]), voor de formulering van de stabiliteitsvoorwaarde (de Groot [1994a], Stoutjesdijk [1991b]) en voor toetsing en verificatie (de Groot [1994b], Stoutjesdijk [1994]).

6.5 Buitenland

In het buitenland wordt de verwekingsproblematiek meestal vanuit een andere invalshoek bekeken dan in Nederland. De literatuur uit Japan, de Verenigde Staten en veel andere landen heeft vaak cyclische verweking als onderwerp, met name omdat tijdens aardbevingen bezwijken van taluds kan optreden. Zo is figuur III.2 afkomstig uit een artikel over aardbevingen.



Figuur VI.1 Steady state line

De Angelsaksische literatuur (zie ook de Groot [1992]) legt de nadruk op de resultaten van ongedraineerde triaxiaalproeven. Hierbij wordt gekeken naar punt C, respectievelijk punt D van figuur V.1. Punt C gaat gepaard met grote schuifvervormingen bij vrijwel constante spanning (Poulos, 1981). Punt D is het eindpunt van de proef. Volgens de theorie gaat de schuifvervorming

bij die spanning onbeperkt door en is het punt D, ongeacht de beginspanning van de proef altijd hetzelfde (voor 1 dichtheid). Dit noemt men *steady state*, respectievelijk *critical state*. Volgens velen vallen de punten C en D samen. Vermoedelijk is dat onjuist en wordt dat veroorzaakt door de wijze waarop men de proeven doet (met monsters die een grotere hoogte dan breedte hebben). Door de *steady state* of *critical state* te bepalen voor een aantal poriëgehalten ontstaat een 'steady state line' of 'critical state line'; een logaritmisches verband tussen spanningen en het poriëgehalte (zie figuur VI.1). Het idee is, dat men als ongedraineerd wordt belast altijd op deze lijn terecht komt, ongeacht de momentane spanningen. Als de momentane spanningen boven de *steady state line* liggen, dan is dat gevaarlijk; de isotrope korrelspanning, respectievelijk de deviatorspanning moeten afnemen om bij de *steady state line* te komen. Door de spanningen en poriëgehalten *in situ* te vergelijken met de *steady state line* probeert men de verwerkingsgevoeligheid van de grond af te schatten. Een direct verband tussen taludhelling, taludhoogte en porositeit met mogelijke instabiliteit, zoals dat in SLIQ2D gebeurt, wordt niet gelegd. Interessant is in dit verband het artikel van Lade (1992).

Internationaal wordt de term kritieke dichtheid gebruikt voor wat in de Nederlandse terminologie "droge kritieke dichtheid" heet. Het begrip "natte kritieke dichtheid" is niet ingeburgerd. In plaats daarvan wordt de "steady state" of "critical state" gebruikt. Dat is in principe iets anders (de Groot [1992]). Uit de definities is echter af te leiden, dat de "steady state" dichtheid tussen de droge en de natte kritieke dichtheid bij een gegeven spanningsniveau ligt. Het voordeel van de *steady state* boven de kritieke dichtheid is, dat de *steady state* bij verschillende spanningsniveaus bepaald wordt, terwijl de kritieke dichtheid over het algemeen bij 1 isotroop spanningsniveau is bepaald. Bekend is, dat de kritieke dichtheid verandert met veranderende isotrope spanning, maar kwantitatief is minder bekend. De *steady state* geeft wel informatie over het verloop met de isotrope spanning. De beste schatting van de *steady state line* (althans de ligging van de punten C), op basis van droge kritieke dichtheidsproeven, verkrijgt men door de contractiespanning p^* uit te zetten als functie van de dichtheid.

Vanuit het riviereengebied van de Mississippi komt een geluid dat enerzijds sterk aan de Zeeuwse criteria doet denken, maar anderzijds niet strookt met de gedachten die in Nederland bestaan ten aanzien van het ontstaan van vloeiingen (Torrey [1993]). Er is een duidelijke overeenkomst tussen de Zeeuwse vooroevers en die langs de Mississippi voor wat betreft de criteria die worden gehanteerd om het optreden van vloeiingen te voorspellen: in beide gevallen wordt de aanwezigheid van een bepaald type zand over een minimale hoogte van 5 m aangehouden als voorwaarde. Bij de Mississippi geldt voorts een criterium voor de terugschrijding; als deze de dijk niet bereikt worden geen maatregelen getroffen, anders wel. Een groot verschil wordt gevonden in de beschrijving van het ontwikkelen van een vloeiing. Torrey veronderstelt hierbij dat het zand middelvast tot vast gepakt is. Hiervan uitgaande beschrijft hij een proces dat enige overeenkomst heeft met het bressen in vastgepakt zand. Opmerkelijk is dus dat vloeiingen juist op zouden treden in vastgepakt zand, en niet in losgepakt zand. Er zijn echter onvoldoende gegevens van de dichtheid om deze conclusie hard te kunnen maken.

Appendices

Appendix A: Lijst van figuren

- II.1 Schematische voorstelling van een zettingsvloeiing
- II.2 Dilatantie
- II.3 Droge kritieke dichtheid
- II.4 Natte kritieke dichtheid
- II.5 Verwekingsgevoelig, niet zettingsvloeiingsgevoelig
- II.6 Volumerek en schuifrek als functie van schuifspanning
- II.7 Volumerek als functie van isotrope spanning
- II.8 Resultaten ongedraineerde triaxiaaltest
- II.9 Transformatie van gedraineerd naar ongedraineerde resultaten

- III.1 Standaard taludtypen
- III.2 Vergelijking van de verschillende criteria
- III.3 Grondonderzoek en laboratoriumonderzoek voor praktijkvoorbeeld
- III.4 Verwekingsgevoeligheid als functie van korreldiameter (Ishihara, 1986)
- III.5 Membraancorrectie voor dilatatiecurve
- III.6 Membraancorrectie voor decompressiecurve
- III.7 Proefresultaat en fit dilatatiecurve
- III.8 Proefresultaat en fit decompressiecurve
- III.9 Voorbeeld rekenresultaat
- III.10 Resultaat serie berekeningen

- IV.1 Raster voor verschillende hellingen
- IV.2 Spanningen in talud
- IV.3 Benadering voor schijnbare taludhelling
- IV.4 Benadering voor locale K_0 -waarde (top talud)
- IV.5 Benadering voor locale K_0 -waarde (teen talud)
- IV.6 Cirkel van Mohr toegepast op plastische rekincrementen

- V.1 Spanningspad bij ongedraineerde proef
- V.2 Cirkel van Mohr: deviatorspanning neemt af, schuifspanning neemt toe

- VI.1 Steady state line

Appendix B: Lijst van symbolen

A	= constante in beschrijving dilatatiekromme	[-]
B	= constante in beschrijving dilatatiekromme	[-]
b_1, b_2	= coëfficiënten	[-]
c_1 t/m c_9	= coëfficiënten van flexibiliteitsmatrix	[-]
c_1^e t/m c_9^e	= coëfficiënten van elastische flexibiliteitsmatrix	[-]
c_1^p t/m c_9^p	= coëfficiënten van plastische flexibiliteitsmatrix	[-]
Ced	= maat voor de invloed van relatieve dichtheid op $\epsilon_{vol_{dm0}}$	[-]
Dr	= relatieve dichtheid	[-]
Dr1	= relatieve dichtheid waarbij $\epsilon_{vol_{dm0}} = 0,001$	[-]
D_{50}	= karakteristieke korreldiameter	[m]
$d\epsilon_x, d\epsilon_y, d\epsilon_z$	= rekincrementen in x-, y- en z-richting	[-]
$d\epsilon_x^e, d\epsilon_y^e, d\epsilon_z^e$	= elastische rekincrementen in x-, y- en z-richting	[-]
$d\epsilon_x^p, d\epsilon_y^p, d\epsilon_z^p$	= plastische rekincrementen in x-, y- en z-richting	[-]
$d\epsilon_{vol}^p$	= verandering van plastische volumerek	[-]
$d\epsilon_{vol_d}$	= verandering van dilatante volumerek	[-]
$d\epsilon_{vol_c}$	= de verandering in volumerek bij (de)compressie	[-]
$d\epsilon_1, d\epsilon_2$	= verandering in hoofdrekken	[-]
$d\sigma_{vol}'$	= de verandering in het isotrope spanningsniveau	[kN/m ²]
$d\sigma_x', d\sigma_y', d\sigma_z'$	= spanningsincrementen in x-, y- en z-richting	[kN/m ²]
$d\gamma^p$	= verandering van de plastische schuifvervorming	[-]
$d\gamma_{xy}^p$	= verandering van de plastische schuifvervorming in xy-vlak	[-]
$d\gamma_{xy}^e$	= verandering van de elastische schuifvervorming in xy-vlak	[-]
ds	= verandering in relatieve schuifspanning	[-]
$d\tau_{xy}$	= verandering in schuifspanningsniveau	[kN/m ²]
E	= elasticiteitsmodulus	[kN/m ²]
f_4, f_5, f_6	= coëfficiënten	[-]
G	= glijdingsmodulus	[kN/m ²]
G^*	= dimensieloze plastische glijdingsmodulus	[-]
h	= taludhoogte	[m]
h_1 t/m h_6	= coëfficiënten	[-]
K_o	= verhouding tussen normaalspanning loodrecht op en normaalspanning evenwijdig aan het talud	[-]
K_{op}	= locale K_o -waarde bij taludhelling α_p	[-]
K_s	= de stijfheid van het korreelskelet bij decompressie	[kN/m ²]
K_{s0}	= stijfheid bij het begin van de decompressieproef	[kN/m ²]
M	= middelpunt van cirkel	[-]
m	= macht in de vergelijking voor de dilatatiekromme	[-]
n	= poriëngehalte	[%]
$n_{c,d}$	= poriëngehalte bij droge kritieke dichtheid	[%]

$n_{c,w}$	= poriëngehalte bij natte kritieke dichtheid	[%]
$n_{in-situ}$	= poriëngehalte in-situ	[%]
n_{max}	= poriëngehalte bij maximum dichtheid	[%]
n_{min}	= poriëngehalte bij minimum dichtheid	[%]
p^*	= contractie spanning	[kN/m ²]
q	= deviatorspanning	[kN/m ²]
R	= straal van cirkel	[m]
r	= macht in de vergelijking voor de dilatatiekromme	[-]
s	= relatieve schuifspanning	[-]
s_{max}	= maximum relatieve schuifspanning	[-]
s_2	= relatieve schuifspanning waarbij maximale contractante volumerek optreedt	[-]
u	= macht in vergelijking voor decompressiecurve	[-]
v	= macht in vergelijkingen dilatatie- en schuifvervormingscurve	[-]
x	= afstand evenwijdig aan het talud	[m]
x_m	= x-coördinaat van middelpunt cirkel	[m]
x_0	= snijpunt Ko-lijn met rand talud	[m]
x_1	= maat voor de demping van een maximale schuifvervorming met de afstand	[m]
y	= afstand loodrecht op het talud	[m]
y_m	= y-coördinaat van middelpunt cirkel	[m]
y_p	= schijnbare diepte	[m]
y_{pc}	= equivalente diepte midden onder het talud	[m]
y_0	= snijpunt Ko-lijn met lijn loodrecht op talud	[m]
α	= taludhelling	[°]
α_p	= schijnbare taludhelling	[°]
$ecor$	= correctie op volumerek voor membraanindringing	[-]
$evol_c$	= volumerek als gevolg van (de)compressie	[-]
$evol_d$	= dilatante volumerek	[-]
$evol_{dm0}$	= maximale dilatante volumerek bij triaxiaalproef	[-]
$\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	= rek in x-, y- en z-richting	[-]
γ	= het onderwatergewicht van zand	[kN/m ³]
γ_s	= het volumiek gewicht van zand	[kN/m ³]
γ_w	= het volumiek gewicht van water	[kN/m ³]
γ^p	= plastische schuifvervorming	[-]
γ^e	= elastische schuifvervorming	[-]
λ	= eigenwaarde van de stijfheidsmatrix	[kN/m ²]
σ_{cel}	= celspanning in triaxiaalcel	[kN/m ²]
σ_{dev}	= deviatorspanning tijdens triaxiaalproef	[kN/m ²]
$\sigma_{h,m}$	= luchtdruk in monster tijdens triaxiaalproef	[kN/m ²]
$\sigma_{h,eff}$	= effectieve horizontale spanning	[kN/m ²]
σ_{vol}	= isotroop spanningsniveau	[kN/m ²]
σ_{vol0}	= isotroop spanningsniveau bij begin proef	[kN/m ²]

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	= korrelspanningen in x-, y- en z-richting	[kN/m ²]
ν	= dwarscontractiecoëfficiënt	[-]
ν^*	= niet zuiver elastische dwarscontractiecoëfficiënt	[-]
τ_{xy}	= schuifspanning	[kN/m ²]
λ	= eigenwaarde	[-]
ψ	= richting van het vlak waarop de grootste hoofdspanning werkt ten opzichte van de x-richting	[°]

Appendix C: Literatuurlijst

- Adel, H. den, 1991
Faalkansberekeningen aan zettingsvloeiingen.
ZV-91-13, CO-316500/8
- Bezuijen, A., D. R. Mastbergen, 1988
On the construction of sand fill dams, part 2: soil mechanical aspects
Modelling of soil-water structure interaction, Delft
- Broecke, P. M. v.d., 1946
De oever- en dijkval aan de Wilhelminapolder op 9 April 1943
PT
- Casagrande, A., 1938
The shearing resistance of soils and its relation to the stability of earth dams
Proc. Soil and Found. Engineering Conf., Boston
- Davis, P. G. J., 1983
Problematiek van de randen van de bodembescherming Stormvloedkering Oosterschelde
P.T. Civiele Techniek 38, nr. 5, blz 24-34
- Geuze, E. C. W. A., 1948
Critical density of some Dutch sands
Proc. 2. Int. Conf. Soil Mech., Rotterdam
- Graaf, H. J. van der, 1987
Zettingsvloeiingen, Literatuurstudie naar methoden om dilatantie van ongeroerd zand te meten
ZV-87-15, CO-287160/5
- Groot, M. B. de, F. Silvis, H. van Rossum, M. J. Koster, 1987
Liquefied sand flowing over a gentle slope
9th European Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng., Dublin
- Groot, M. B. de, 1991
Basis-adviesmethode zettingsvloeiingen talud.
ZV-91-23, CO-311600/15
- Groot, M. B. de, 1992
SLIQ-parameters bepaald uit literatuur.
ZV-92-04, CO-332210/2
- Groot, M. B. de, H. den Adel, T. Stoutjesdijk, C. J. van Westenbrugge, 1994 ?
Risk analysis of flow slides.
Ter publicatie aangeboden aan Coastal Engineering, ZV-92-06
- Groot, M. B. de, 1994a
Stabiliteitscriterium zettingsvloeiing talud
ZV-92-02, CO-341940/15
- Groot, M. B. de, 1994b
Verificatie SLIQ2D aan proeven in de Cuttergoot
CO-341940/17

- Groot, M. B. de, T. Stoutjesdijk, 1994 ?
Steady state of loose sand predicted from drained tests.
Concept publicatie.
- Heteren, J. van, J. Lindenberg, F. Silvis, H. Verwoert, 1990
Brochure voorlichtingsmiddag "Verweking van Zand en Zettingsvloeiing"
ZV-90-18
- Ishihara, K., 1986
Stability of Natural Deposits during Earthquakes
Collected papers Vol 24, Dept. Civil Engineering, University of Tokio
- Koenders, M. A., J. B. Sellmeijer, 1991
Liquefaction of unstable slopes.
ZV-91-05a
- Koppejan, A. W., B. M. van Wamelen en L. J. H. Weinberg
Coastal Flow Slides in the Dutch Province of Zeeland
Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Mech., Rotterdam
- Kuitert, C., P. V. F. S. Krajicek, 1983
Het ontstaan van zettingsvloeiingen langs de vooroever van de Oud- en Nieuw-Noord-
Bevelandpolder
CO-416096
- Lade, P. V., 1992
Static Instability and Liquefaction of Loose Fine Sandy Slopes
Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 188, No. 1
- Linde, Q. M. v.d., 1945
Het ontstaan van oever- en dijkvallen
OTAR
- Linde, Q. M. v.d., 1949
Oevervallen in de Nederlandse provincie Zeeland
OTAR
- Linde, Q. M. v.d., 1954
Het ontstaan van oever- en dijkvallen in Zeeland
OTAR
- Lindenberg, J., 1978
Kritieke dichtheid van zand, eindverslag.
TOW "Kritieke dichtheid, CO-232032/7.
- Lindenberg, J., H. L. Koning, 1981
Critical density of sand
Geotechnique 31, No. 2, blz. 231-245
- Lindenberg, J., 1985
Inventarisatie adviespraktijk zettingsvloeiingen
CO-416509/1

- Lindenberg, J., 1986a
Algemene beschouwing over spanningen en deformaties in taluds
CO-416671/18
- Lindenberg, J., 1986b
Oevervallen in Zeeland
I² Bouwkunde en Civiele Techniek
- Lindenberg, J., 1986c
Zettingsvloeiingen in het buitenland
I² Bouwkunde en Civiele Techniek
- Lindenberg, J., 1987
Oriëntatie invloed spanningsgeschiedenis op verwekingsgedrag van zand
ZV-87-18, CO-286260/8
- Lindenberg, J., 1988
Verweking en zettingsvloeiing
ZV-88-01, SE-690507/3, CO-290760/7
- Mastbergen, D. R., A. Bezuijen, 1988a
Storten van zand onder water, verslag van experimentele studie
CO-284462/45, Z216
- Mastbergen, D. R., A. Bezuijen, 1988b
Storten van zand onder water, verslag experimentele vervolgstudie, middelgrof zand
CO-294750, Z261
- Molenkamp, F., 1987
Liquefaction Test in the Brutus Tank
ZV-87-23, SE-690504/2
- Molenkamp, F., 1988
Calculation of deformation, instability and failure in soil mechanics
ZV-88-11, C)-295710/3
- Molenkamp, F., 1989
Liquefaction as an instability.
Artikel ICSMFE 1989, ZV-89-08a
- Molenkamp, F., 1990
Simulation of undrained deformation of infinite slope.
ZV-90-13a, CO-311600/12
- Molenkamp, F., 1991
Liquefaction Analysis of Slope
ZV-91-19, SE-703456/1.
- Nelissen, H., 1985
De mogelijkheid van zettingsvloeiingen bij zandsluitingen
CO-416619/9

- Poulos, S. J., 1981
The Steady State of Deformation
ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 107, 553-562
- Sellmeijer, J. B., 1985
Simpele aanpak verwekingsproblematiek
CO-261062
- Sellmeijer, J. B., 1988
Verwekingsfront ten gevolge van stoot
ZV-89-03, SE-690503
- Sellmeijer, J. B., 1989
Zettingsvloeiingen. Analytische beschouwing
ZV-89-07, SE-700454
- Silvis, F., 1986
Zandsluiting Slaak. Meetverslag onderwaterstort
CO-285230/18
- Silvis, F., 1988a
Oriënterende studie naar grondmechanische aspecten bij ontgrondingskuilen
CO-291720/12
- Silvis, F., 1988b
Oriëntatie verweking. Rekenprocedure praktijk. Deel 1.
ZV-88-02, SE-690507/2, CO-290760/6, CO-295480/2
- Silvis, F., 1988c
Oriëntatie verweking. Rekenprocedure praktijk. Deel 2.
ZV-88-14, CO-295500/2, CO-295710/9, CO-299110/9
- Silvis, F., 1989a
Oriëntatie verweking. Rekenprocedure praktijk. Deel 3.
ZV-89-04, CO-295710/14
- Silvis, F., 1989b
Oriëntatie verweking. Rekenprocedure praktijk. Deel 4.
ZV-89-04, CO-302130/8
- Silvis, F., 1989c
Oriëntatie verweking. Rekenprocedure praktijk. Deel 5.
ZV-89-13, CO-305290/6
- Silvis, F., 1990a
Vergelijking formules analytisch model Sellmeijer en MSLIQ.
ZV-90-06, Aanvulling op ZV-89-12
- Silvis, F., 1990b
Hindcast zettingsvloeiing cuttergootproef P05 met MSLIQ.
ZV-91-03, SE-702457/1

-
- Silvis, F., M. B. de Groot, 1994 ?
Flow Slides in the Netherlands
Concept publicatie, ZV-91-17
 - Stam, F., 1986
Verslag VLAVO-berekeningen
CO-416671
 - Stoutjesdijk, T., 1991a
Modellering twee-dimensionale aspecten in het model MSLIQ.
ZV-91-14, CO-316500/7
 - Stoutjesdijk, T., 1991b
Afleiding en discussie van de instabiliteitsvoorwaarde in het model SLIQ2D.
ZV-91-21, CO-329710/7
 - Stoutjesdijk, T., 1991c
Parameterstudie van het model SLIQ2D.
ZV-91-22, CO-326890/9
 - Stoutjesdijk, T., 1992
Kiezen definitieve parameters voor het model SLIQ2D.
ZV-92-08, CO-332210/1
 - Stoutjesdijk, T., 1994a
Verificatie SLIQ2D aan de Zeeuwse praktijk
CO-341940/10
 - Stoutjesdijk, T., M. B. de Groot, J. Lindenberg, 1994 ?
Flow slide prediction method: influence of slope geometry.
Concept publicatie.
 - Stoutjesdijk, T., M. B. de Groot, J. Lindenberg, 1994 ?
An Engineering Approach to Coastal Flow Slides.
ICCE Kobe, Japan
 - Stoutjesdijk, T., 1994b
Optredingscriteria voor zettingsvloeiingen
CO-353260
 - Stoutjesdijk, T., 1994c
Ontgrondingskuilen, bergingsmodellen en berekeningen SLIQ2D
CO-353470
 - Terzaghi, K., 1925
Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage
Uitg. Frans Deuticke, Wenen
 - Terzaghi, K., 1956
Varieties of submarine slope failures
Proc. 8th Texas Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Austin
-

- Torrey, V. H. III, 1993
Flow Slides in Mississippi River Banks
Proc. Rip-rap Workshop, Fort Worth, USA
- Viergever, M. A., 1991a
Terreinmeetapparatuur t.b.v. bepaling parameters zettingsvloeiings-gevoeligheid.
ZV-91-08, SE-703462
- Viergever, M. A., 1991b
Zettingsvloeiingsgevoeligheid. Correlatieonderzoek.
ZV-91-15, CO-316500/9
- Waterloopkundig Laboratorium, 1981
Onderzoek naar zettingsvloeiingen, gidsonderzoek
M 1233
- Wilderom, M. H., 1952a
Aantekeningen over oever- en dijkvallen in Zeeland
PT 7/8
- Wilderom, M. H., 1952b
Het ontstaan van oever- en dijkvallen in de provincie Zeeland
OTAR 1952
- Wilderom, M. H., 1964
Tussen afsluitdammen en Deltadijken, deel I t/m IV
- Wilderom, M. H., 1972
Plaatvallen, Artikel in OTAR
- Wilderom, M. H., 1979
Resultaten van het vooroeveronderzoek langs de Zeeuwse stromen, Rijkswaterstaat, Studiedienst Vlissingen, Nota 75.2

Appendix D: Technische informatie/onderhoud

- Stroomschema

Het technische gedeelte van het programma SLIQ2D bestaat uit een hoofdprogramma en 4 subroutines. Schematisch kan dit als volgt worden uitgewerkt:

Declaraties																					
Invoerprocedure																					
Voor $\tan\alpha = 0,05$ t/m $0,65$, variabele stapgrootte doe																					
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td colspan="3">Voor $x = 1$ t/m 25, stapgrootte 1 doe</td> </tr> <tr> <td colspan="3"> <table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td colspan="2">Voor $y = 1$ t/m 20, stapgrootte 1 doe</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Subroutine ALFA_FIT (bepaal schijnbare taludhelling)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Subroutine KO_FIT (bepaal locale Ko-waarde)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Subroutine SPAN (bepaal spanningen)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Subroutine STABI (bepaal eigenwaarde)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Voorwaarde: als $\lambda < 0$ sla gegevens instabiele punt op</td> </tr> </table> </td> </tr> </table>				Voor $x = 1$ t/m 25 , stapgrootte 1 doe			<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td colspan="2">Voor $y = 1$ t/m 20, stapgrootte 1 doe</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Subroutine ALFA_FIT (bepaal schijnbare taludhelling)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Subroutine KO_FIT (bepaal locale Ko-waarde)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Subroutine SPAN (bepaal spanningen)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Subroutine STABI (bepaal eigenwaarde)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Voorwaarde: als $\lambda < 0$ sla gegevens instabiele punt op</td> </tr> </table>			Voor $y = 1$ t/m 20 , stapgrootte 1 doe		Subroutine ALFA_FIT (bepaal schijnbare taludhelling)		Subroutine KO_FIT (bepaal locale Ko-waarde)		Subroutine SPAN (bepaal spanningen)		Subroutine STABI (bepaal eigenwaarde)		Voorwaarde: als $\lambda < 0$ sla gegevens instabiele punt op	
Voor $x = 1$ t/m 25 , stapgrootte 1 doe																					
<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td colspan="2">Voor $y = 1$ t/m 20, stapgrootte 1 doe</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Subroutine ALFA_FIT (bepaal schijnbare taludhelling)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Subroutine KO_FIT (bepaal locale Ko-waarde)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Subroutine SPAN (bepaal spanningen)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Subroutine STABI (bepaal eigenwaarde)</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Voorwaarde: als $\lambda < 0$ sla gegevens instabiele punt op</td> </tr> </table>			Voor $y = 1$ t/m 20 , stapgrootte 1 doe		Subroutine ALFA_FIT (bepaal schijnbare taludhelling)		Subroutine KO_FIT (bepaal locale Ko-waarde)		Subroutine SPAN (bepaal spanningen)		Subroutine STABI (bepaal eigenwaarde)		Voorwaarde: als $\lambda < 0$ sla gegevens instabiele punt op								
Voor $y = 1$ t/m 20 , stapgrootte 1 doe																					
Subroutine ALFA_FIT (bepaal schijnbare taludhelling)																					
Subroutine KO_FIT (bepaal locale Ko-waarde)																					
Subroutine SPAN (bepaal spanningen)																					
Subroutine STABI (bepaal eigenwaarde)																					
Voorwaarde: als $\lambda < 0$ sla gegevens instabiele punt op																					
Schrijf de resultaten naar uitvoerfile en plotfile																					
Naar keuze: Ga terug naar invoer, Bekijk uitvoer, Print uitvoer, Teken figuur																					
Einde programma																					

Fig. D1 Stroomschema SLIQ2D

- Technische informatie

Het programma SLIQ2D kan worden gedraaid op een IBM (compatible) personal computer, model XT of AT, met de volgende specificaties:

- MS-DOS of PC-DOS operating system
- minimaal 250 kB RAM
- een Hercules, EGA of VGA (compatible) grafische kaart + beeldscherm
- een numerieke co-processor.

Het programma SLIQ2D is in Turbo-Pascal geschreven, met gebruikmaking van de grafische gebruikersvriendelijke standaard software bibliotheek uit de M-serie van Grondmechanica Delft. Grafische en alpha-numerieke uitvoer vindt plaats op het beeldscherm en een EPSON (compatible) dot-matrix printer van het type FX, RX of MX. Plotjes kunnen met gebruikmaking van de HP-GL plotcode in een file worden opgeslagen, welke geschikt is om te worden afgedrukt op een HP-Colorpro plotter met A4-formaat plotjes of op een HP-Laserprinter die HP-GL plotcode kan verwerken. De HP-GL plot code kan ook via een tekstverwerker worden gebruikt. Via een screendump kan de plot ook op een printer welke direct op de PC is aangesloten worden afgedrukt.

In- en uitvoer wordt ofwel via het beeldscherm uitgewisseld, maar wordt tevens in bestanden opgeslagen welke in ASCII formaat op schijf worden opgeslagen. In totaal worden drie bestanden gegenereerd:

- een bestand met extensie *.SLI: het invoerbestand
- een bestand met extensie *.SLO: het uitvoerbestand dat ook op het beeldscherm verschijnt
- een bestand met extensie *.SLD: een dump file met uitgebreide uitvoergegevens.

Het programma werkt met een menustructuur welke bestaat uit hoofdmenu's en helpmenu's. De hoofdmenu's worden bediend met de <ENTER> en pijltjestoetsen. Met functietoets <F10> wordt een menu hoger gesprongen. De helpmenu's verschijnen in beeld als op functietoets <F1> wordt gedrukt.

- Regeling betreffende onderhoud

Het programma SLIQ2D is geschreven door de afdeling W&I (Wiskunde & Informatica) van Grondmechanica Delft. De user-interface maakt gebruik van de standaard GD software. Deze is niet vrijelijk beschikbaar. Onderhoud kan bestaan uit het verbeteren van geconstateerde fouten en gebreken in het programma, en in het programmeren van toevoegingen, wijzigingen en uitbreidingen op wens van gebruikers. Een deel van het onderhoud kan eventueel worden bekostigd uit de exploitatie (verkoopopbrengsten) van het programma. Omdat het programma niet vrijelijk wordt gedistribueerd zijn de verkoopopbrengsten gering. De kosten voor onderhoud zullen worden gedragen door hetzij de eigenaars van het programma (RWS, Dienst Weg- en Waterbouwkunde en Grondmechanica Delft) danwel door derden welke bereid zijn wijzigingen in het programma te financieren. In het laatste geval wordt door de eigenaars van het programma beslist over de wenselijkheid van zo'n wijziging.

Voor het programma SLIQ2D gelden de bepalingen van de Software-overeenkomst tussen Rijkswaterstaat en Grondmechanica Delft.