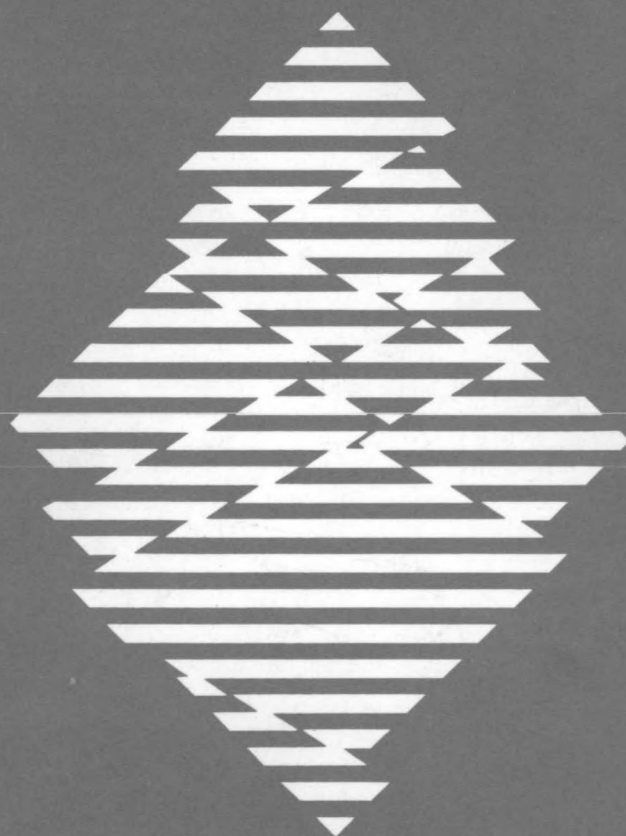
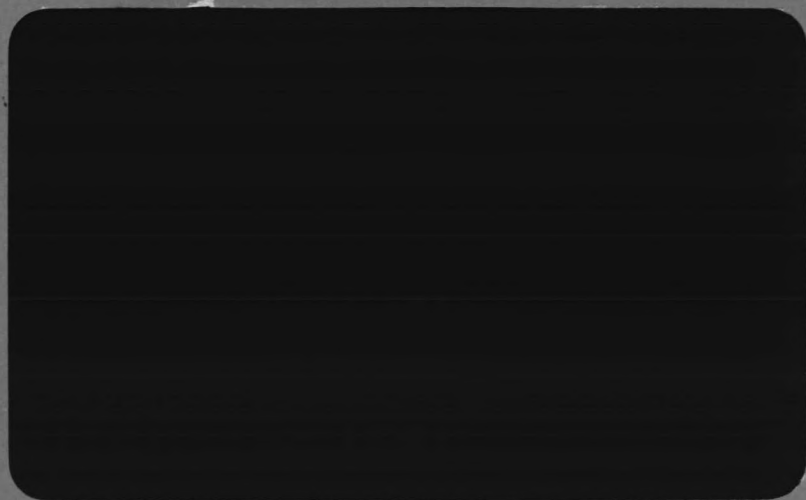


631B



LABORATORIUM voor GEOTECHNIEK



AFDELING DER CIVIELE TECHNIEK
TECHNISCHE HOGESCHOOL DELFT

DE STABILITEIT VAN SLIB OP EEN HELLING
EEN GRONDMECHANISCH COMPUTERMODEL

Delft, februari 1986

P.F. de Swart

hoogleraar: prof.dr.ir. A. Verruijt

Deelstudie bij de sectie Geotechniek
van de afdeling Waterbouwkunde
van de Technische Hogeschool te Delft

VOORWOORD

Dit rapport bevat een deelstudie en een computerprogramma die gemaakt zijn bij de sectie Geotechniek in het kader van het afstuderen bij de vakgroep Waterbouwkunde van de afdeling der Civiele Techniek aan de Technische Hogeschool te Delft.

Het rapport richt zich vooral op de gebruikers van het computerprogramma die over een redelijke grondmechanische achtergrond beschikken zodat niet alle grondmechanische wetten verklaart hoeven te worden. Zij kunnen in dit rapport de theoretische achtergrond van het programma vinden en aan de hand hiervan de invloed van de verschillende variabelen bepalen.

Daarnaast is het rapport bedoeld als uitgangspunt voor een vervolgstudie of computerprogramma dat een groter aantal verschijnselen omvat die de stabiliteit op een helling beïnvloeden.

Het computerprogramma is gemaakt op een Olivetti M24 in GWBASIC en is ook te gebruiken op een IBM-PC met grafische mogelijkheden. De sectie Geotechniek van de Technische Hogeschool te Delft bezit een kopie van de voor deze deelstudie gemaakte programma's.

INHOUD

1.	Inleiding	4
2.	Theoretisch kader	6
2.1	Spanningen tijdens de consolidatie	6
2.2	Consolidatietheorie	11
2.3	Literatuur	14
2.4	Oplossing van de consolidatievergelijking	17
2.4.1	Analytische oplossing	17
2.4.2	Numerieke oplossing	19
2.4.3	Aangepaste numerieke oplossing	20
2.4.4	Rand- en beginvoorwaarden	22
2.5	Zetting van het grondpakket	24
2.6	Afschuifmechanisme	26
2.6.1	Opneembare schuifspanning	26
2.6.2	Optredende schuifspanning	27
2.6.3	Kritische helling	28
2.6.4	Toepasbaarheid van het afschuifmodel	30
3.	Opzet van het computerprogramma	31
3.1	Inleiding	31
3.2	Basisstructuur	32
3.3	Opzet van de invoer	33
3.3.1	Inleiding	33
3.3.2	Onderdelen van de invoer	34
3.4	Opzet van de berekening	37
3.4.1	Strukturdiagram	37
3.4.2	Variabelen bij de berekening	39
3.4.3	Stabiliteit numerieke oplossing	42
3.4.4	Verhoging waterspanningen	44
3.4.5	Interpolatie van de waterspanningen	45
3.4.6	Bepaling kritische helling	47
3.4.7	Variabelen na afschuiving	49
3.4.8	Consolidatie	51

3.5	Opzet van de uitvoer	52
3.5.1	Uitvoer in tabelvorm	52
3.5.2	Uitvoer in grafische vorm	53
4.	Gebruik van het computerprogramma	54
4.1	Hulpprogramma's	54
4.2	Berekeningsvoorbeelden	56
4.2.1	Verwachting	56
4.2.2	Resultaten	57
4.2.3	Conclusie	68
5.	Adviezen voor een vervolgstudie	69
5.1	Tweede-orde effecten	69
5.2	Extra factoren die het afschuiven beïnvloeden	70
6.	Nabeschouwing over het afschuiven van slib	72
7.	Literatuur	73
Bijlage	I. Struktuurdiagram	75
	II. Computerprogramma CONSOLI	79
	III. Computerprogramma CONGRAF	86
	IV. Computerprogramma's Z1,Z2,Z3	93

1. INLEIDING

Na het uitvoeren van een modelonderzoek naar de bezwijk-helling en -spanning van een laag slib in een kantelbak bij de sectie Kustwaterbouwkunde (de Swart 1985) ontstond de behoefte om het bezwijken van slib op een helling vanuit de grondmechanica te bekijken.

Indien het bezwijk- en afschuifmechanisme van slib op een onderwaterhelling verklaart kan worden is het mogelijk de hoeveelheid onderhoudsbaggerwerk bij modderkusten te bepalen en tevens een zo economisch mogelijke vaargeulvorm te ontwerpen. Dit rapport vormt daartoe een eerste aanzet.

Het doel van dit rapport is het opstellen van een grondmechanisch model dat het bezwijkmechanisme van een in dikte toenemende laag slib op een onderwaterhelling weergeeft zodat uiteindelijk een transportberekening gemaakt kan worden.

Aangezien er geen literatuur over dit onderwerp beschikbaar bleek is besloten een computerprogramma op te stellen dat het geschetste probleem zo nauwkeurig mogelijk weergeeft.

Het computerprogramma berekent gedurende een bepaalde periode voor opgegeven taludhelling en grondmechanische parameters:

- het aantal afschuivingen
- de tijdstippen dat de afschuiving plaats zal hebben
- de hoogte van de afschuivende lagen
- het verloop van de achterblijvende laagdikte op het talud

In het computerprogramma zijn alleen eerste orde effecten opgenomen zodat bijvoorbeeld de verdichting van het slibpakket niet voorkomt in het model. Het invoeren van hogere orde effecten voor consoliderend slib is een eindstudie op zich en is niet van invloed op het basismodel van de transportberekening zodat het niet noodzakelijk wordt geacht

deze effecten op te nemen.

Er zijn nog een aantal andere verschijnselen van invloed op het bezwijken van de sliblaag die niet in het programma zijn opgenomen. In de adviezen voor een vervolgstudie wordt hierop nader terug gekomen.

Bij het opzetten van het computerprogramma is ruime aandacht besteed aan een gebruiksvriendelijke in- en uitvoer en een overzichtelijke programmastructuur.

In dit rapport wordt eerst het theoretisch kader van de consolidatie en afschuiving toegelicht waarna in hoofdstuk 3 het computerprogramma behandeld wordt. In hoofdstuk 4 is het gebruik van de computerprogramma's opgenomen met daarna een aantal berekeningsvoorbeelden en bijbehorende conclusies. In hoofdstuk 5 zijn de adviezen voor een vervolgstudie opgenomen terwijl in hoofdstuk 6 een nabeschuwing over de "kantelbak"-proeven en het computermodel worden behandeld. De geraadpleegde literatuur is in hoofdstuk 7 opgenomen waarna in de bijlagen het structuurdiagram en de computerprogramma's zijn afgebeeld.

2. THEORETISCH KADER

Om het afschuifmechanisme van een in dikte toenemende laag slib in een model te kunnen weergeven is het noodzakelijk om eerst de consolidatietheorie voor slib of slappe klei te beschouwen voordat er opneembare schuifspanningen en toelaatbare hellingen bepaald kunnen worden.

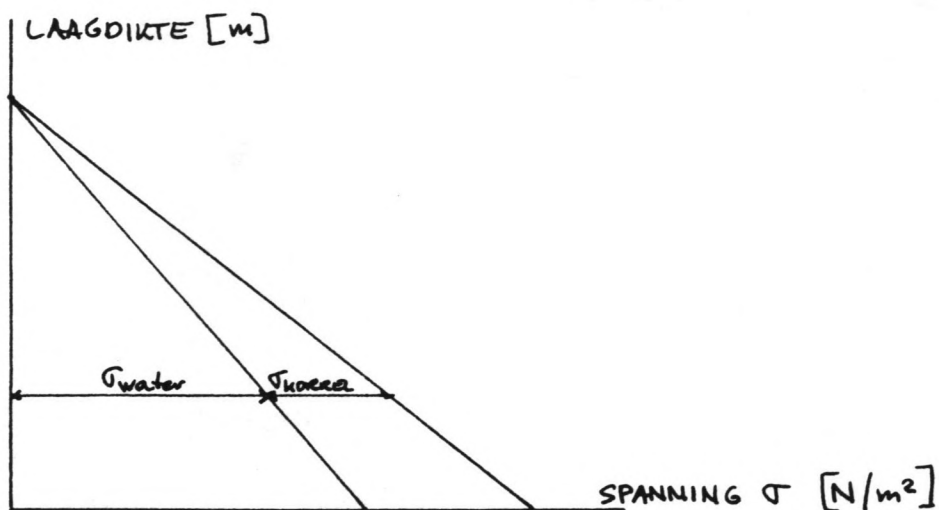
2.1 SPANNINGEN TIJDENS DE CONSOLIDATIE

Vervorming van grond kan worden veroorzaakt door een spanningstoename maar ook door tijdsafhankelijke verschijnselen bij een gelijkblijvende spanning.

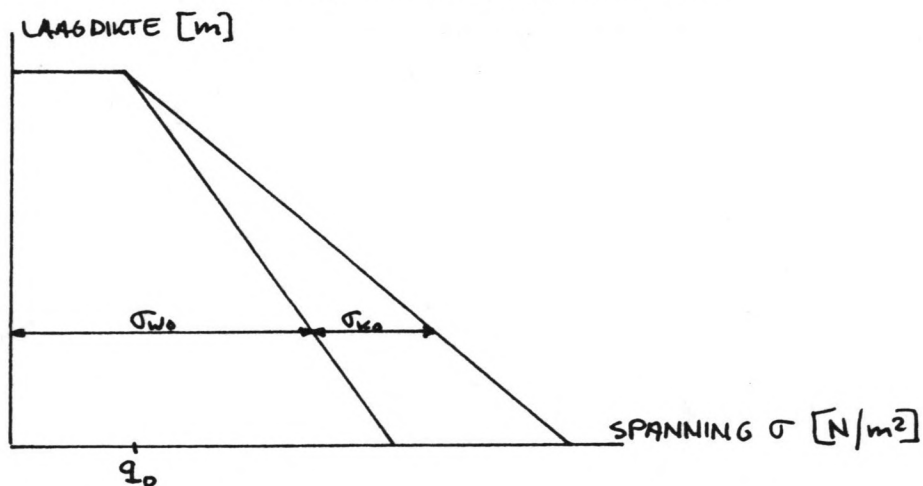
Bij natte grond wordt de vervorming voornamelijk beïnvloed door het uittreden van water ten gevolge van het verminderde porienvolume dat ontstaat door het vergroten van de grondspanning. Afhankelijk van de doorlatendheid van de grond zal er dan een tijdsafhankelijke vertraging in de vervorming (=samendrukking) optreden. Dit verschijnsel noemt men consolidatie.

In deze paragraaf wordt de invloed van consolidatie op de grondspanningen behandeld voordat de eigenlijke consolidatietheorie in paragraaf 2.2 wordt behandeld. De getoonde veranderingen in de waterspanningen gelden in feite voor allerlei grondsoorten maar voor de ene grondsoort is de eindsituatie al na vijf seconden bereikt terwijl deze situatie voor een andere grondsoort misschien pas na vijf eeuwen bereikt is.

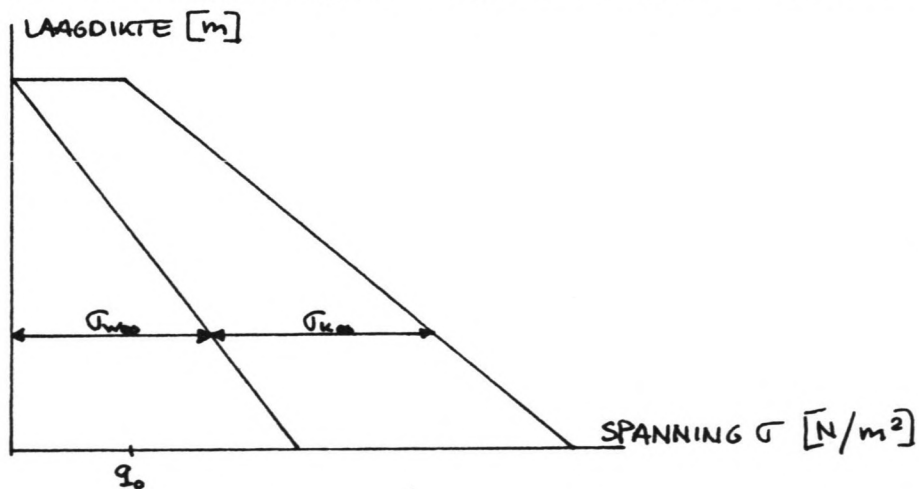
In de figuren 1 t/m 3 is de spanningsverdeling gegeven van grond met een plotselinge bovenbelasting.



Figuur 1. Grondspanningen: uitgangssituatie



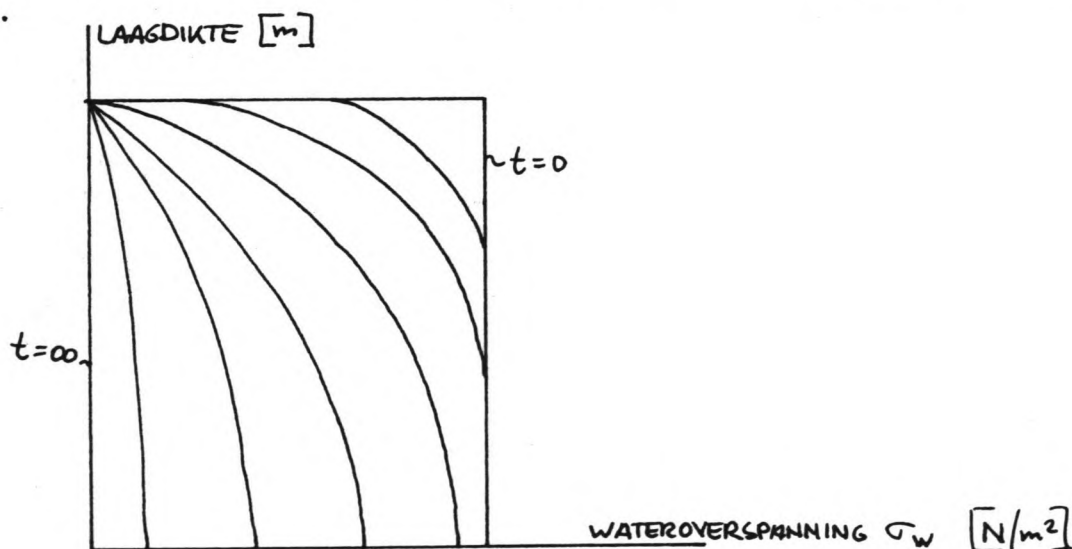
Figuur 2. Grondspanningen: na plotselinge bovenbelasting



Figuur 3. Grondspanningen: eindsituatie na lange tijd

In figuur 1 is een in rust zijnde uitgangssituatie aangegeven waar op het tijdstip t_0 een spanningsverhoging optreedt door een bovenbelasting. Een fraktie later is de waterspanning met q_0 toegenomen tot de situatie in figuur 2. De toegenomen waterspanning wordt veroorzaakt door het niet snel genoeg wegstromen van water dat zich in de porien van het grondpakket bevindt. Na een bepaalde tijd t_{00} is al het water door de extra spanning van de bovenbelasting weggestroomd waardoor samendrukking van de grond optreedt. De waterspanning σ_w is gedurende het wegstromen van het water afgenomen van σ_{w0} tot $\sigma_{w\infty}$ terwijl de korrelspanning is toegenomen van σ_{k0} tot $\sigma_{k\infty}$.

Door de plotselinge bovenbelasting ontstaat er een overdruk in het water die vaak wordt aangeduid met de term wateroverspanning. Op het tijdstip t_0 heeft de wateroverspanning de vorm van een rechthoek zoals in figuur 4 te zien is.



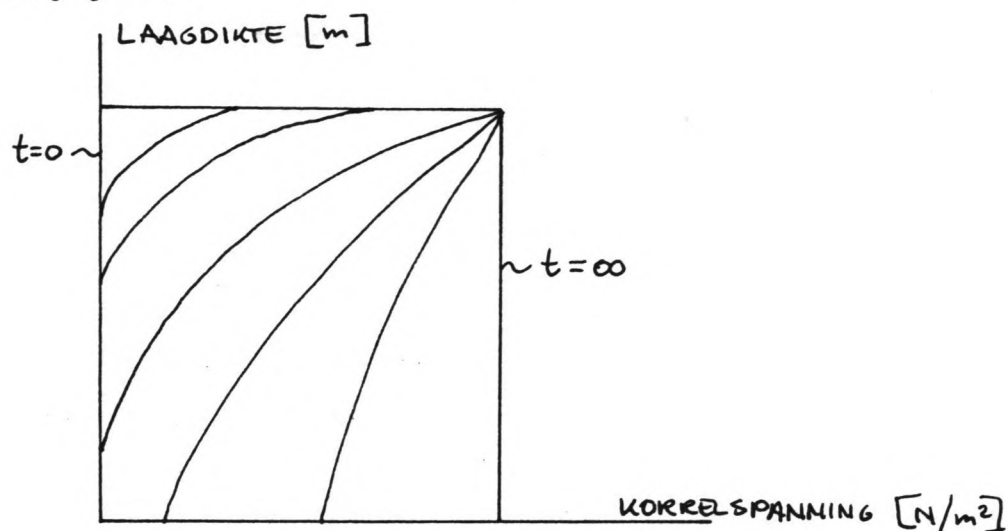
Figuur 4. Verloop wateroverspanningen per tijdstap

Aangezien in dit geval de bodem ondoorlatend wordt aangenomen en de (over)spanning aan het oppervlak in principe nul is zal de spanning aan het oppervlak het snelste afnemen en aan de ondoorlatende bodem het langzaamste zoals in figuur 4 aangegeven is.

Door het afnemen van de wateroverspanning neemt de korrelspanning toe volgens:

$$\sigma_{\text{korrel}} = \sigma_{\text{grond}} - \sigma_{\text{water}} - \sigma_{\text{overspanning}} \quad (1)$$

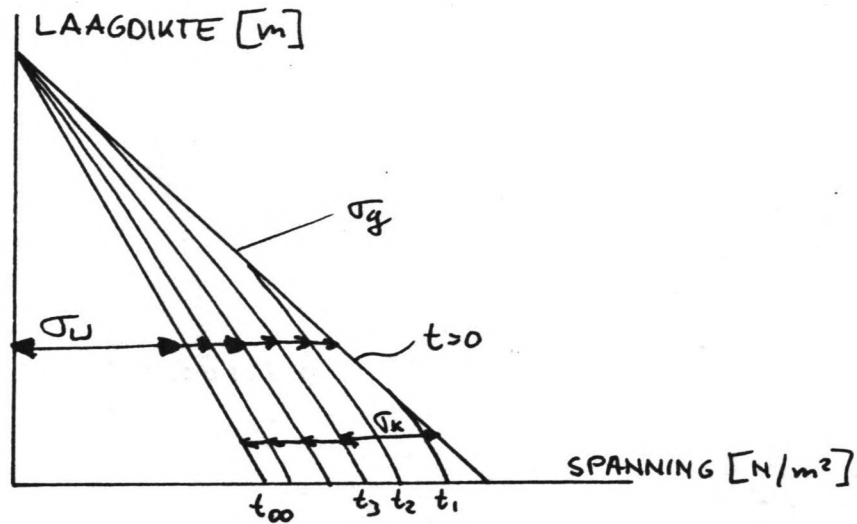
In figuur 5 is het verloop van de extra korrelspanning weergegeven.



Figuur 5. Verloop extra korrelspanningen

Hoewel de korrelspanning van belang is voor de uiteindelijke berekening wordt de aandacht vooral gericht op de wateroverspanningen omdat die het beste te berekenen zijn.

Tot nu toe is uitgegaan van een laag grond die door een extra belasting consolideert. Het is echter ook mogelijk dat een slib-watermengsel consolideert onder invloed van het eigengewicht. Er ontstaat dan eerst een driehoekige spanningsfiguur zoals in figuur 6 te zien is.



Figuur 6. Verloop van de spanningen bij een consoliderend slib-water mengsel

Indien de bodem ondoorlatend is zal het verloop van de wateroverspanning wederom via een kromme verlopen. In dit geval zal echter de korrelspanning aan de bodem het eerst toenemen en pas het laatst aan het oppervlak van de laag grond.

2.2 CONSOLIDATIETHEORIE

In deze paragraaf wordt een verkorte afleiding van de klassieke consolidatietheorie gegeven zoals die onder andere door Verruijt (1983) behandeld wordt.

De consolidatie kan beschreven worden door de grond als lineair-elastisch materiaal aan te nemen waarbij kleine vervormingen optreden.

Het verband tussen de verticale rek en de verticale korrelspanning is dan in een xyz-assenstelsel met de z-as omhoog:

$$\varepsilon = -m_v * \sigma' \quad (2)$$

waarbij	ε	=	vertikale rek	$[-]$
	m_v	=	samendrukbaarheidscoëfficiënt	$[m^2/N]$
	σ'	=	vertikale korrelspanning	$[N/m^2]$

Met de definitie voor de korrelspanning

$$\sigma' = \sigma - p \quad (3)$$

waarbij	σ	=	vertikale grondspanning	$[N/m^2]$
	p	=	waterspanning	$[N/m^2]$

volgt er dan uit (2) en (3)

$$\varepsilon = -m_v (\sigma - p) \quad (4)$$

De verticale grondspanning wordt als bekend aangenomen zodat een relatie voor de waterspanning de enige onbekende is. Die is als volgt te bepalen.

Voor een volumedeeltje geldt dat de volumeverandering ten gevolge van de samendrukking van het water gelijk is aan:

$$\Delta V_1 = - \beta n V \Delta p \quad (5)$$

waarbij ΔV_1 = volumeverandering tgv drukverandering $[m^3]$
 β = samendrukbaarheid van water (met lucht) $[m^2/N]$
 n = poriegehalte van de grond ($0 < n < 1$) $[-]$
 V = volume grond $[m^3]$
 Δp = drukverandering $[N/m^2]$

Hierbij wordt aangenomen dat de gronddeeltjes niet samen-drukbaar zijn.

Door de verticale samendrukking vindt wateruitstroming plaats volgens

$$\Delta V_2 = - \frac{\partial q_z}{\partial z} V \Delta t \quad (6)$$

waarbij ΔV_2 = volumeverandering tgv waterstroming $[m^3]$
 $\partial q_z / \partial z$ = stromingsgradient $[1/s]$
 V = volume grond $[m^3]$
 Δt = tijdstap $[s]$

De relatieve verticale lengteverandering wordt dan

$$\epsilon = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta V_1 + \Delta V_2}{V} = - n \beta \Delta p - \frac{\partial q_z}{\partial z} \Delta t \quad (7)$$

waaruit volgt

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = - n \beta \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (8)$$

Volgens de wet van Darcy geldt

$$q_z = - \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial p}{\partial z} \quad (9)$$

waarin q_z = debiet $[m^3/s/m^2]$
 k = doorlatendheid $[m/s]$
 γ_w = volumegewicht $[N/m^3]$
 $\partial p / \partial z$ = drukgradient $[N/m]$

Onder de aanname dat k en m_v constant zijn voor de tijd volgt er met (4), (8) en (9):

$$(m_v + n\beta) \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + m_v \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (10)$$

ofwel

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w(m_v + n\beta)} \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{m_v}{(m_v + n\beta)} \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (11)$$

ofwel

$$\frac{\partial p}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + C_w \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (12)$$

met de constanten $C_v = \frac{k}{\gamma_w(m_v + n\beta)}$ (13)

$$C_w = \frac{m_v}{m_v + n\beta} \quad (14)$$

De factor C_v wordt de consolidatiecoëfficiënt genoemd.

Vergelijking (12) geeft na oplossing de wateroverspanningen waarna de samendrukking van de grond te berekenen is. De oplossing van deze vergelijking wordt in paragraaf 2.4 behandeld.

2.3 LITERATUUR

Uit de literatuur blijkt dat een aantal aannamen die bij de klassieke consolidatietheorie gelden voor gewone grond, niet meer gerechtvaardigd zijn voor slappe klei en havenslib.

In de klassieke consolidatietheorie is aangenomen dat de vervormingen klein zijn en dat de doorlatendheid k en de samendrukbaarheid m_v constant zijn. Voor grote vervormingen blijken deze constanten echter te variëren.

Volgens Lee and Sills (1981) is het verband tussen de rek en de consolidatiecoëfficiënt C_v te bepalen volgens:

$$C_v^* = C_v (1 + \epsilon)^2 \quad (15)$$

waarbij C_v^* = gecorrigeerde consolidatiecoëfficiënt voor grote rekken

C_v = consolidatiecoëfficiënt voor kleine rekken

ϵ = eindrek

Vergelijking (15) volgt uit praktijkproeven met grote rekken die zijn vergeleken met proeven met kleinere rekken. Indien de consolidatiecoëfficiënt wordt aangepast is de klassieke theorie goed bruikbaar voor consolidatieberekeningen met slappe klei en slib.

Uit dezelfde publikatie van Lee and Sills blijkt dat voor de doorlatendheid k beter een relatie met het poriëngetal genomen kan worden aangezien anders de consolidatiedifferentiaalvergelijking moeilijk op analytische wijze opgelost kan worden. Aangenomen is:

$$k_e = \gamma_w k_0 (1 + e) \quad (16)$$

waarbij k_e = doorlatendheid

γ_w = soortelijkgewicht water

k_0 = constante

e = poriëngetal

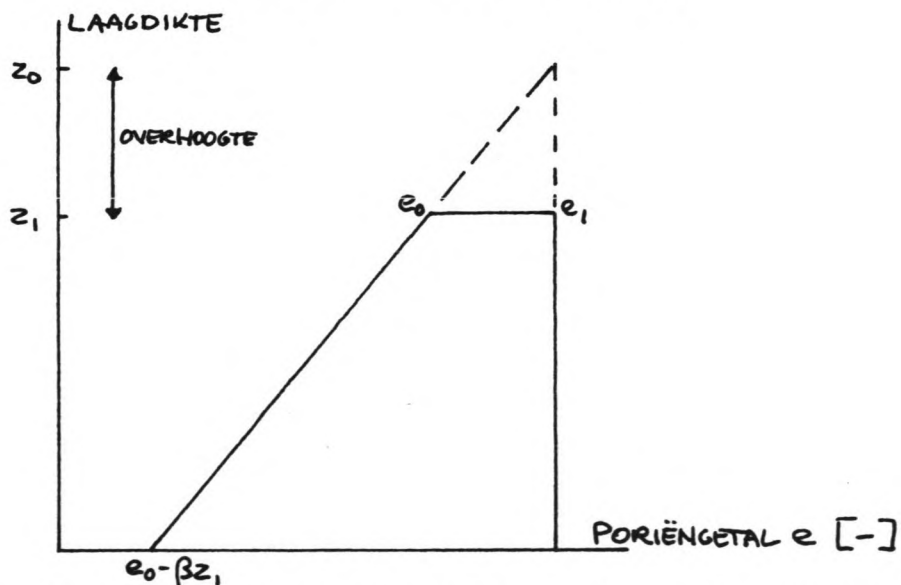
Door de afgeleide van korrelspanning en poriengetal als constante aan te nemen verandert formule (16) niets aan de consolidatiecoëfficiënten C_v en C_w . Een betere aanname leidt dus niet tot aanpassing van de consolidatievergelijking.

Een verschijnsel dat wel van invloed is op de toepassingsmogelijkheid van de klassieke consolidatietheorie is het verdichten van het oppervlak van een laag slappe klei of slib gedurende het consolideren onder eigen gewicht. Dit verschijnsel is waargenomen door Been and Sills (1981) en is te beschrijven door aan te nemen dat de laag slib een overhoogte heeft en dat er aan het oppervlak van de fictieve laag geen verdichting van het slib plaatsvindt. Dit is te beschrijven met:

$$z_0 = z_1 + \frac{e_1 - e_0}{\beta} \quad (17)$$

waarbij z_0 = hoogte imaginaire laag tov nul nivo
 z_1 = hoogte aanwezige laag
 e_1 = poriengetal bij aanvang consolidatie
 e_0 = poriengetal bij einde consolidatie
 β = richtingscoëfficient

In figuur 7 is vergelijking (17) weergegeven.



Figuur 7. Aanname overhoogte voor consolidatie van slib

Vergelijking (17) bevat naast z_0 echter nog een onbekende die geschat moet worden namelijk het poriengetal e_0 aan het einde van de consolidatie. Hierdoor wordt het noodzakelijk een iteratie uit te voeren om de juiste waarden voor e_0 en β te bepalen.

Samenvattend blijkt dat de klassieke consolidatietheorie zoals weergegeven in vergelijking (12) goed toepasbaar is voor berekeningen met slappe klei en havenslib indien de constanten onder bepaalde omstandigheden aangepast worden.

2.4 OPLOSSING VAN DE CONSOLIDATIEVERGELIJKING

In deze paragraaf worden twee oplossingen voor de consolidatie differentiaalvergelijking gegeven en verder uitgewerkt voor de geldende begin en randvoorwaarden.

2.4.1 ANALYTISCHE OPLOSSING

In 1958 loste Gibson (1958) voor een in dikte toenemend grondpakket een vergelijking op die grote gelijkenis vertoont met vergelijking (12):

$$C_v \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial u}{\partial t} - \gamma' \frac{dh}{dt} \quad (18)$$

waarbij h = laagdikte

γ' = soortelijk gewicht nat slib - water

u = wateroverspanning

t = tijd

C_v = consolidatiefactor

x = verticale as

In vergelijking (18) ontbreekt de factor C_w die echter in een groot aantal gevallen de waarde een heeft. Voor slib waar gasvorming optreedt is deze factor echter kleiner dan een.

$$\text{Met de randvoorwaarden: } u = 0 \text{ voor } x = h \quad (19)$$

$$\partial u / \partial x = 0 \text{ voor } x = 0 \quad (20)$$

$$\text{en } h = m \cdot t \quad (21)$$

$$\frac{x}{h} = x/h(t) \quad (22)$$

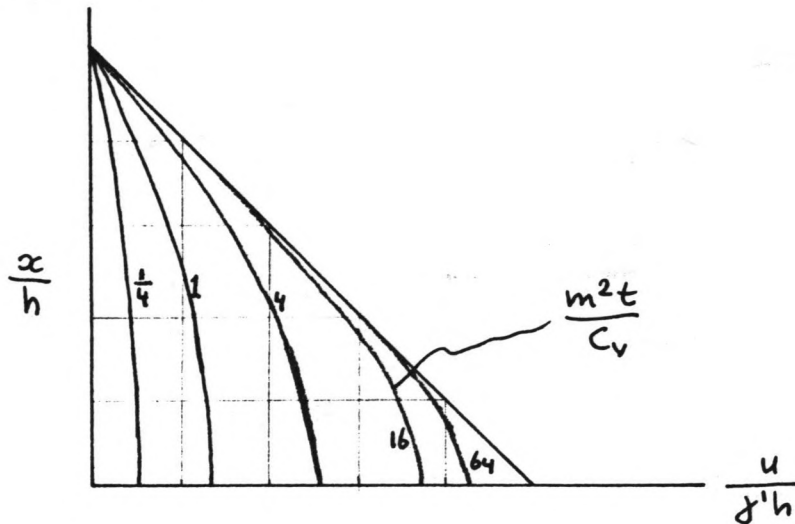
volgt er als oplossing:

$$u = \gamma' m t - \gamma' (C_v t)^{-1/2} \exp\left\{-\frac{x^2}{4C_v t}\right\} \int_0^\infty \tanh\left\{\frac{m \xi}{2C_v}\right\} \cosh\left\{\frac{x \xi}{2C_v t}\right\} \cdot \dots$$

$$\dots \cdot \exp\left\{-\frac{\xi^2}{4C_v t}\right\} d\xi \quad (23)$$

Vergelijking (23) is van zo'n omvang dat er een computer nodig is om snel enige antwoorden te verkrijgen. Een nadeel van deze oplossing is dat hij niet bruikbaar is voor een transport berekening van afgeschoven slib aangezien superpositie van waterspanningen zeer lastig is.

In figuur 8 is een grafische oplossing van vergelijking (23) weergegeven.



Figuur 8. Grafische weergave analytische oplossing volgens Gibson (1958).

2.4.2 NUMERIEKE OPLOSSING

Uit het voorgaande blijkt dat het oplossen van vergelijking (12) op analytische wijze een redelijk grote inspanning vergt. Aangezien het doel van dit rapport het voorspellen van taludhellingen is wordt gekozen voor een eenvoudiger oplossingsmethode namelijk de numerieke methode.

Bij deze methode is een computer noodzakelijk die echter ook gewenst is om de analytische oplossing met variërende parameters op te lossen.

Het omzetten van vergelijking (12) in differentiequotienten geeft de volgende aannamen:

$$\text{Vervang } \partial p / \partial t \text{ door: } -\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{p_i(t+dt) - p_i(t)}{dt} \quad (24)$$

$$\text{en } \partial \sigma / \partial t \text{ door: } -\frac{\partial \sigma}{\partial t} = -\frac{\sigma_i(t+dt) - \sigma_i(t)}{dt} \quad (25)$$

$$\text{en } \partial^2 p / \partial z^2 \text{ door: } \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{p_{i+1}(t) - 2p_i(t) + p_{i-1}(t)}{(dz)^2} \quad (26)$$

Door substitutie van (24), (25) en (26) in (12) ontstaat

$$p_i(t+dt) = p_i(t) + C_v \cdot dt / (dz)^2 \{ p_{i+1}(t) - 2p_i(t) + \dots \\ \dots + p_{i-1}(t) \} + C_w \{ \sigma_i(t+dt) - \sigma_i(t) \} \quad (27)$$

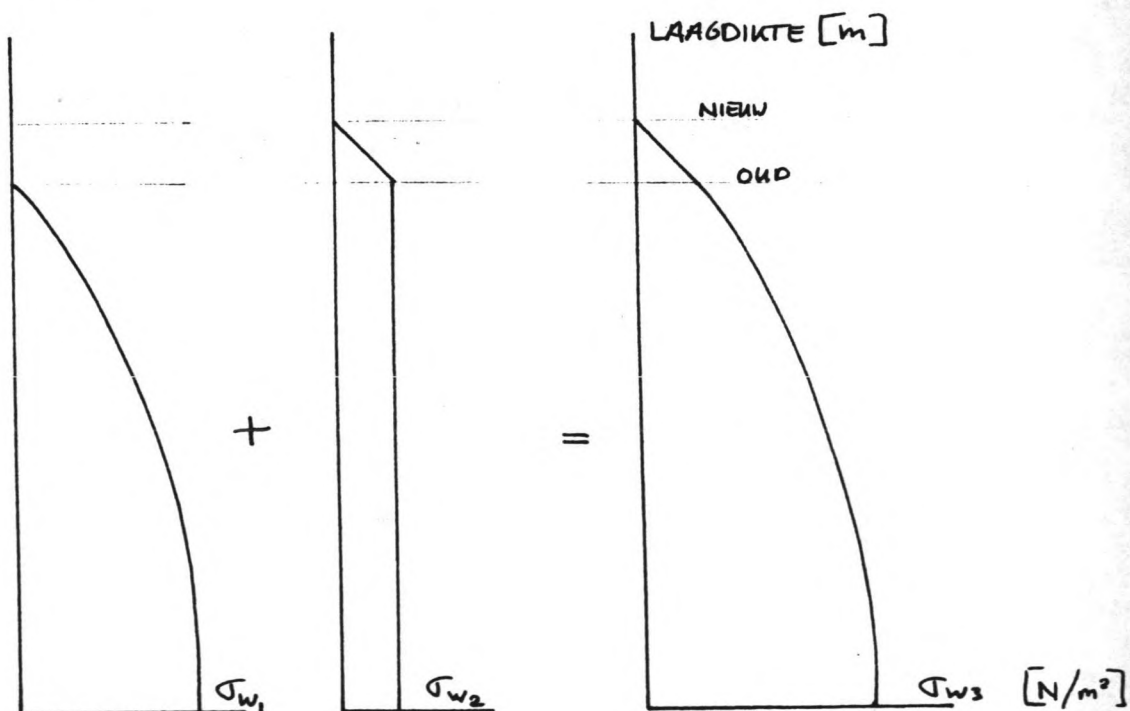
Na het invoeren van de begin en randvoorwaarden kan de berekening uitgevoerd worden.

2.4.3 AANGEPASTE NUMERIEKE OPLOSSING

In de meeste gevallen wordt voor de bovenbelasting van de grond een constante waarde aangenomen waardoor het rechter deel van vergelijking (27) wegvalt zodat deze makkelijker opgelost kan worden.

In dit geval neemt de laagdikte en ook de waterspanning toe zodat het laatste deel van vergelijking (27) een constante factor is.

Als oplossing van vergelijking (27) is er in dit geval voor gekozen de constante belastingtoename buiten de vergelijking te halen en C_w de waarde een te geven zodat er een scheiding ontstaat tussen ophoging en consolidatie in het numerieke model. Het voordeel hiervan is dat gedurende korte tijd (1 dag) de laagdikte constant is waardoor een aantal variabelen constant blijven zodat het computer-programma van het model eenvoudiger samengesteld kan worden. Een aanvaardbaar nadeel is dat de ophoging nu semi-continu plaatsvindt. In figuur 8 is de gekozen oplossingsmethode weergegeven.



Figuur 8. Opzet numeriek model voor de wateroverspanningen.

Vergelijking (27) is nu gereduceerd tot de "stationaire" consolidatievergelijking zoals die in de praktijk het meeste wordt toegepast:

$$p_i(t+dt) = p_i(t) + \alpha \{p_{i+1}(t) - 2p_i(t) + p_{i-1}(t)\} \quad (28)$$

$$\text{met } \alpha = C_v \cdot dt / (dz)^2$$

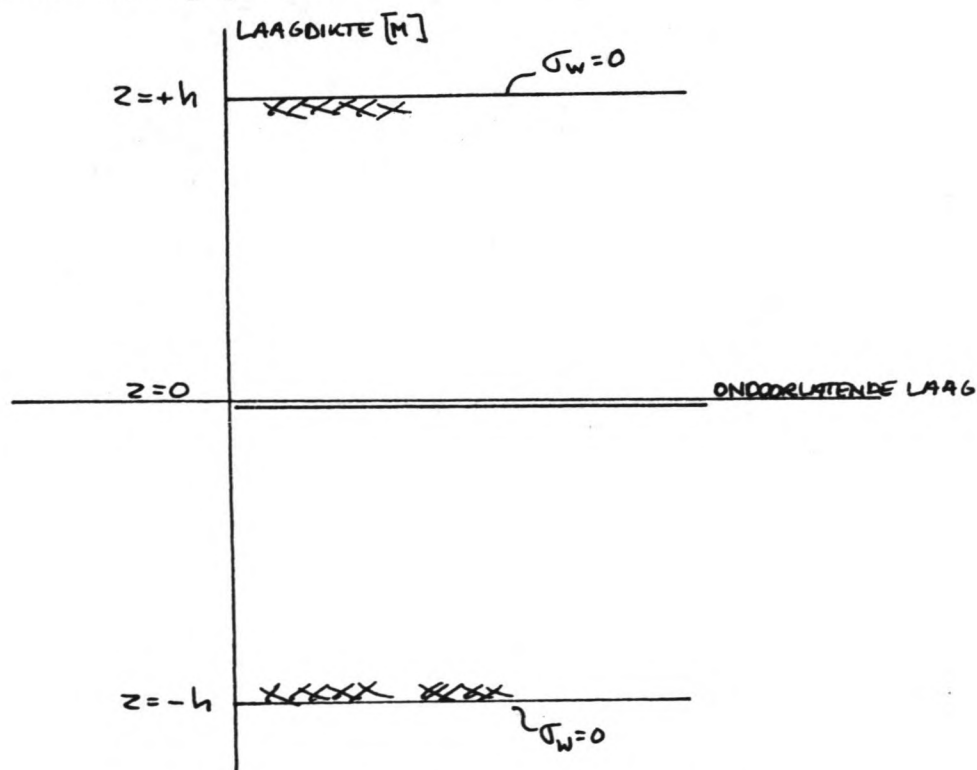
De vergroting van de laagdikte gebeurt door de water-spanningen $p_i(t)$ te verhogen voordat de consolidatie aanvangt.

2.4.4 RAND- EN BEGINVOORWAARDEN

Nu de oplossingsmethode bepaald is moeten er nog een aantal rand- en beginvoorwaarden opgesteld worden.

1) Randvoorwaarden.

Voor de consolidatieberekening is een randvoorwaarde aan het oppervlak en een aan de onderkant van de sliblaag nodig. De oppervlaktevoorwaarde is snel te bepalen door de aanname dat de wateroverspanning daar nul is. De randvoorwaarde voor de onderkant van de sliblaag kan een voorwaarde voor de waterspanning zijn maar ook een voorwaarde voor de doorlatendheid van de ondergrond. In dit geval is aangenomen dat de ondergrond van de sliblaag ondoorlatend is zoals dat in laboratoriumomstandigheden voorkomt. Deze randvoorwaarde houdt in dat de sliblaag gespiegeld kan worden waardoor een laagdikte ontstaat die tweemaal zo groot is met aan de boven en onderkant een wateroverspanning die nul is. In figuur 9 is dit weergegeven.



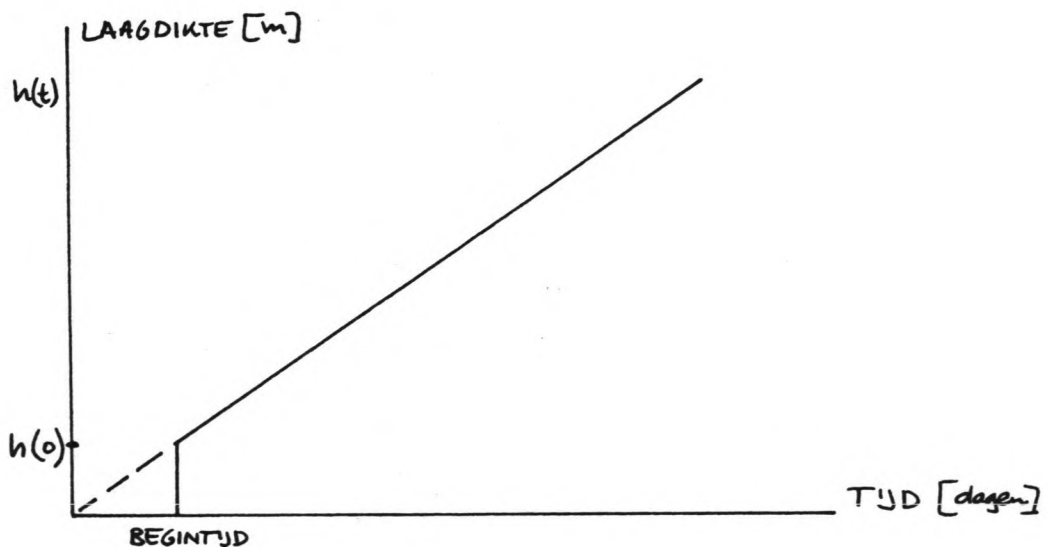
Figuur 9. Schematisatie van de sliblaag.

2) Beginvoorwaarden.

Uitgangspunt voor de berekening is de continue laagdikte toename waarbij de beginlaagdikte nul is bij aanvang van de berekening. Het is echter onmogelijk om de consolidatieberekening uit te voeren als de laagdikte nul is zodat er een beginlaagdikte gekozen moet worden waarbij de berekening wel kan worden begonnen.

Indien de beginlaagdikte te groot is zal er tegelijkertijd stationaire consolidatie optreden terwijl ook de laagdikte vergroot wordt. Het tegelijkertijd optreden van deze verschijnselen kan worden voorkomen door de beginlaagdikte niet te groot te kiezen, bijvoorbeeld enkele centimeters.

Door het kiezen van een beginlaagdikte wordt de berekening een aantal dagen na de tijdsoorsprong begonnen zodat er een begintijd ontstaat die evenredig is met de beginlaagdikte zoals in figuur 10 te zien is.



Figuur 10. Beginvoorwaarden

2.5 ZETTING VAN HET GRONDPAKKET

Het verloop van de waterspanning kan nu berekend worden zodat ook de vervorming van het grondpakket te bepalen is. Uit vergelijking (4):

$$\epsilon = - m_v (\sigma - p) \quad (29)$$

volgt na integratie:

$$h = \int_0^h dz = - m_v \int_0^h (\sigma - p) dz = - m_v \int_0^h dz + m_v \int_0^h p dz \quad (30)$$

Het eerste deel van vergelijking (30) is de volledige zetting waar de waterspanningen weer bij opgeteld worden. Pas als alle waterspanningen tot nul gereduceerd zijn is de zetting volledig.

Net als bij de waterspanningen kan vergelijking (30) numeriek opgelost worden. Door de integralen te vervangen door sommaties volgt dan:

$$h = - \sum_{j=1}^I (p_{0j} + p_{0j-1}) m_v h/2i + \sum_{j=1}^I (p_j + p_{j-1}) m_v h/2i \quad (31)$$

De relatieve hoogte is dan
$$\epsilon = \frac{h(t) - \Delta h(t)}{h(t)} \quad (32)$$

Door de zetting neemt ook de dichtheid van het grondpakket toe waarbij het slib aan de onderkant van het grondpakket sterker verdicht dan aan de oppervlakte. Deze verdichting is te berekenen door tijdens iedere consolidatiestap van het numerieke model het aantal gronddeeltjes constant te houden terwijl het volume afneemt volgens vergelijking (32).

Een geschikte methode om de dichtheidstoename te berekenen maakt gebruik van de C_{dd} -waarde. Dit is de concentratie droge dichtheid ofwel het aantal kilogrammen vaste stof dat zich in 1 m^3 water bevindt.

Indien de dichtheid van water en grond bekend is geldt:

$$\rho = m \cdot \rho_{\text{vast}} + (1 - m) \cdot \rho_{\text{water}} \quad (33)$$

waarbij ρ = dichtheid mengsel $[\text{kg}/\text{m}^3]$
 m = gedeelte vaste stof $(0 < m < 1)$
 ρ_{vast} = dichtheid vaste stof $[\text{kg}/\text{m}^3]$
 ρ_{water} = dichtheid water $[\text{kg}/\text{m}^3]$

Uit deze vergelijking kan het gehalte vaste stof berekend worden:

$$m = \frac{\rho - \rho_{\text{water}}}{\rho_{\text{vast}} - \rho_{\text{water}}} \quad (34)$$

waarna de C_{dd} -waarde te bepalen is volgens:

$$C_{dd} = m \cdot \rho_{\text{vast}} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (35)$$

Na het bekend worden van de C_{dd} -waarde kan ook weer de dichtheid van het mengsel bepaald worden door:

$$\rho = C_{dd} + \left(1 - \frac{C_{dd}}{\rho_{\text{vast}}}\right) \cdot \rho_{\text{water}} \quad [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (36)$$

Tijdens de consolidatieberekening zijn alleen de laatste twee vergelijkingen van belang.

2.6 AFSCHUIFMECHANISME

In deze paragraaf wordt behandeld welke helling het slib kan opnemen voordat er afschuiving plaatsvindt.

2.6.1 OPNEEMBARE SCHUIFSPANNING

Na het bepalen van de korrelspanningen kan de opneembare schuifspanning met de wet van Coulomb bepaald worden:

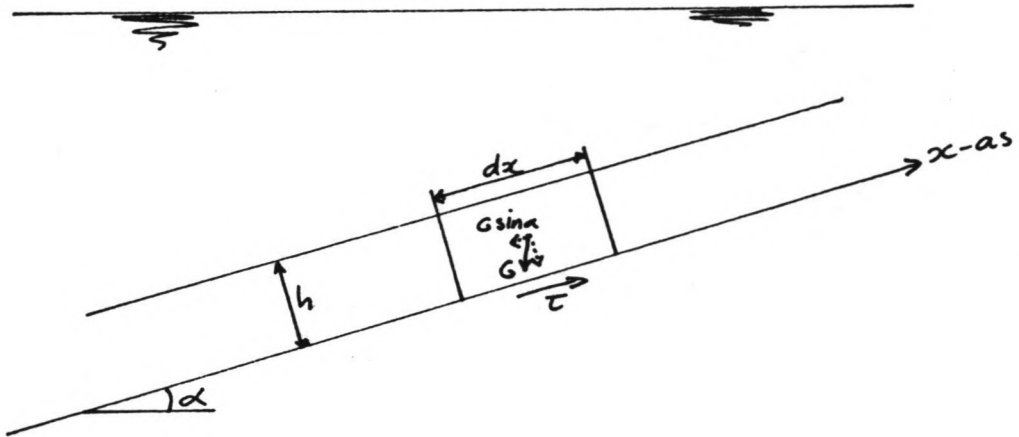
$$\sigma_k = C + \tau \tan \phi \quad [\text{N/m}^2] \quad (37)$$

waarin τ_k = kritische schuifspanning $[\text{N/m}^2]$
 C = cohesie $[\text{N/m}^2]$
 τ = normaalkorrelspanning $[\text{N/m}^2]$
 ϕ = hoek van inwendige wrijving $[-]$

De cohesie en hoek van inwendige wrijving zijn materiaalconstanten die voor een bepaalde dichtheid gelden. Bij de consolidatie van slib-water mengsels varieert de dichtheid zeer snel zodat ook de constanten aangepast moeten worden. In paragraaf 2.6.4 en hoofdstuk 5 wordt op het probleem van de materiaalconstanten teruggekomen.

2.6.2 OPTREDENDE SCHUIFSPANNING

Voor een laag slib op een helling is de volgende relatie op te stellen naar aanleiding van figuur 10A.



Figuur 10A. Evenwicht van een laag slib op een helling (per eenheid van breedte).

De evenwichtsvergelijking is:

$$\tau dx = G \sin \alpha = \rho h dx g \sin \alpha \quad [\text{N/m}] \quad (38)$$

Voor kleine hoeken geldt $\sin \alpha = l$

$$\text{Waaruit volgt } \tau = \rho g h l \quad [\text{N/m}^2] \quad (39)$$

waarbij	τ = schuifspanning	$[\text{N/m}^2]$
	ρ = dichtheid	$[\text{kg/m}^3]$
	g = zwaartekrachtsversnelling	$[\text{m/s}^2]$
	h = laagdikte	$[\text{m}]$
	l = helling	$[-]$

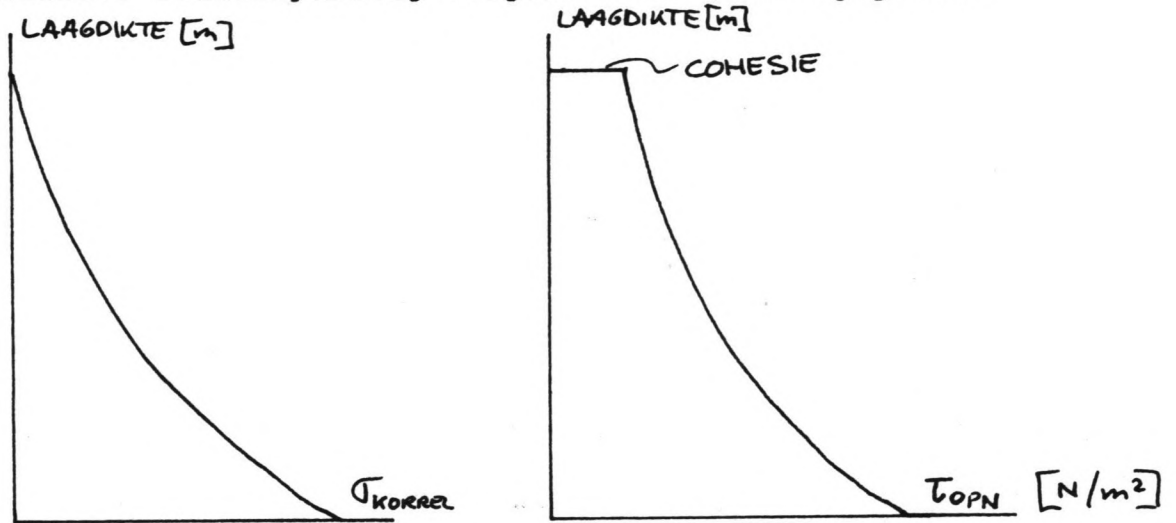
Op het moment van evenwichtsverlies geldt $\tau = \tau_k$ ofwel de optredende schuifspanning is gelijk aan de kritieke schuifspanning.

Uit vergelijking (39) volgt dan de kritieke helling:

$$l_k = \frac{\tau_k}{\rho g h} \quad (40)$$

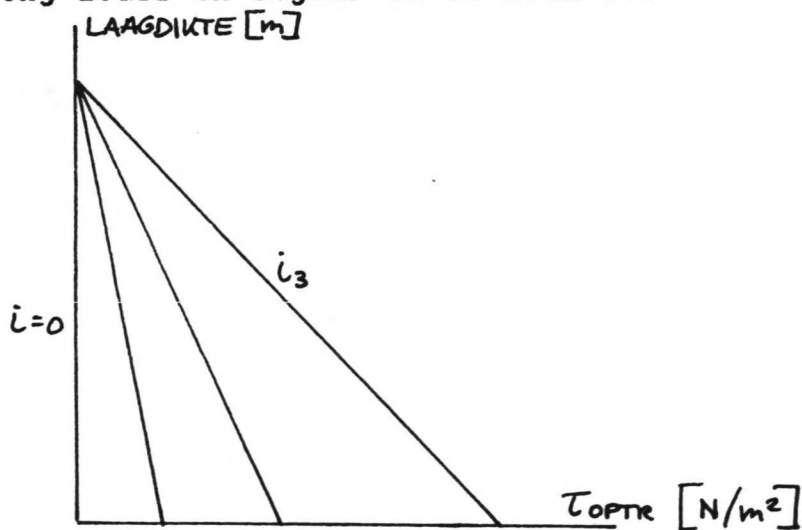
2.6.3 KRITISCHE HELLING

In figuur 11 is de korrelspanning met de daarbij behorende opneembare schuifspanning volgens Coulomb weergegeven.



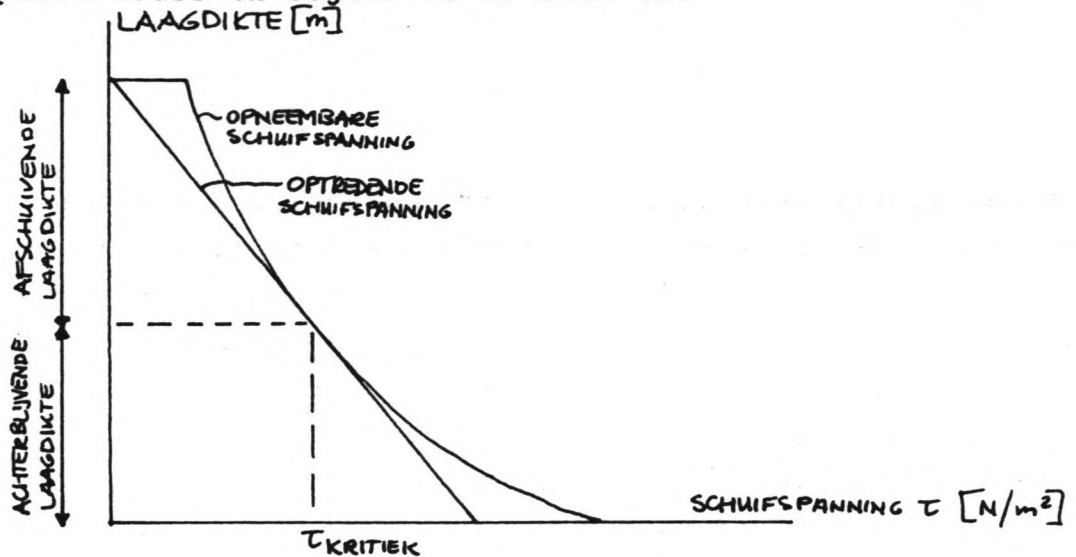
Figuur 11a,b. Korrelspanning en opneembare schuifspanning.

Uit vergelijking (39) blijkt dat de optredende schuifspanning bij constante hoogte lineair evenredig is met de helling zoals in figuur 12 te zien is.



Figuur 12. Verloop optredende schuifspanningen voor verschillende hellingen.

Door nu de figuren 11b en 12 over elkaar te leggen is het mogelijk de kritieke helling en de kritieke afschuifhoogte te bepalen zoals in figuur 13 te zien is.



Figuur 13. Bepaling kritieke helling en afschuifhoogte.

Zolang de helling waar het slib op sedimenteert en consolideert kleiner is dan de kritieke helling zal er geen afschuiving plaatsvinden.

Bij een helling die groter is dan de kritieke helling zal de kritieke hoogte afschuiven waarna een restlaag met een relatief grote dichtheid achter blijft. Hierop zetten zich dan weer nieuwe lagen af met een relatief lage water en korrelspanning. Uit berekeningen met het model moet duidelijk worden of deze restlaag nog invloed heeft op een eventuele volgende afschuiving.

2.6.4 TOEPASBAARHEID VAN HET AFSCHUIFMODEL

In de vooraf gaande paragrafen is voor het berekenen van de opneembare schuifspanning van de wet van Coulomb gebruik gemaakt. Deze wet is algemeen aanvaard voor grond met grotere dichtheden. Voor kleinere dichtheden zoals bij slappe klei of slib is deze wet minder acceptabel omdat de vloeistofeigenschappen van de mengsels een rol gaan spelen.

Een gewone vloeistof bezit namelijk een zogenaamde Binghamse zwichtspanning die te vergelijken is met de cohesie volgens de wet van Coulomb, terwijl de hoek van inwendige wrijving nul is voor een vloeistof.

Water-slib mengsels worden ook tot de vloeistoffen met een Binghamse zwichtspanning gerekend zolang ze in beweging zijn zoals het geval is in persbuizen. Indien het water-slib mengsel stilstaat treedt er sedimentatie en consolidatie op waardoor de Binghamse eigenschappen verloren gaan.

Omtrent de overgang van de Binghamse zwichtspanning naar de cohesie van Coulomb is in de literatuur weinig bekend. Alleen de Swart (1985) heeft proeven uitgevoerd met een kantelbak en een roto-viscometer waaruit bleek dat voor dichtheden rond de 1100 kg/m^3 de optredende afschuifspanning veel lager lag dan de Binghamse zwichtspanning.

Hieruit blijkt dat een keuze voor de cohesie en hoek van inwendige wrijving een moeilijke zaak is die buiten het kader van deze deelstudie valt.

In hoofdstuk 5 wordt nog nader ingegaan op de verschijnselen die een rol spelen bij de toepassing van het model bij een vaargeul in een modderkustengebied.

3 OPZET VAN HET COMPUTERPROGRAMMA

3.1 INLEIDING

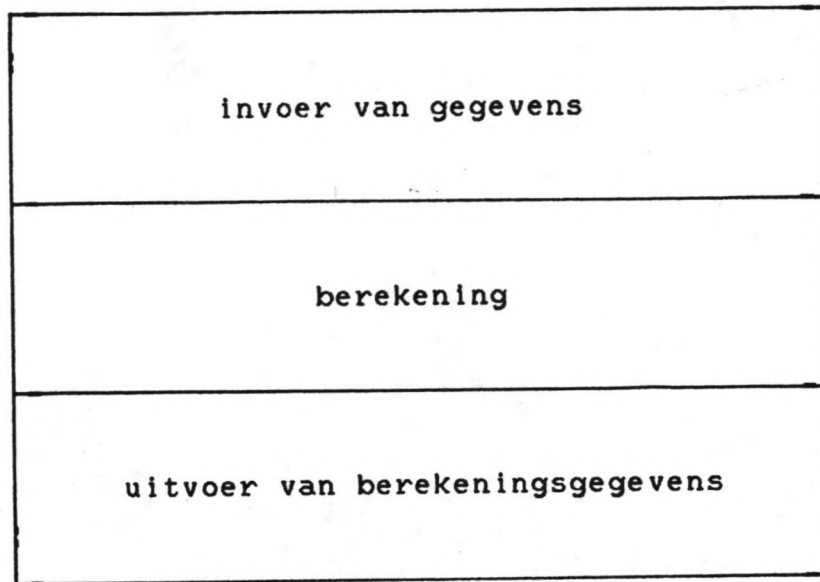
In het vorige hoofdstuk is het theoretisch kader behandeld zodat nu de uitwerking van de gevonden formules met de computer toegelicht kan worden.

Naast de in hoofdstuk 2 behandelde onderdelen bevat het computerprogramma nog een aantal andere onderdelen zoals een lus die er voor zorgt dat na het optreden van een afschuiving alle parameters aangepast worden en verschillende uitvoer en controle mogelijkheden. Verder zijn een groot aantal tellers en voorwaarden ingebouwd die ervoor zorgen dat de berekening goed verloopt.

Het programma zal volgens de methode van stapsgewijze verfijning toegelicht worden wat inhoudt dat het programma eerst in grote stappen doorlopen wordt waarna steeds meer in detail getreden wordt. In de bijlagen zijn het structuurdiagram en de computerprogramma's opgenomen terwijl in hoofdstuk 4 het gebruik van de programma's toegelicht zal worden.

3.2 BASISSTRUKTUUR

De eerste opzet van het programma is in het onderstaande structuurdiagram aangegeven.



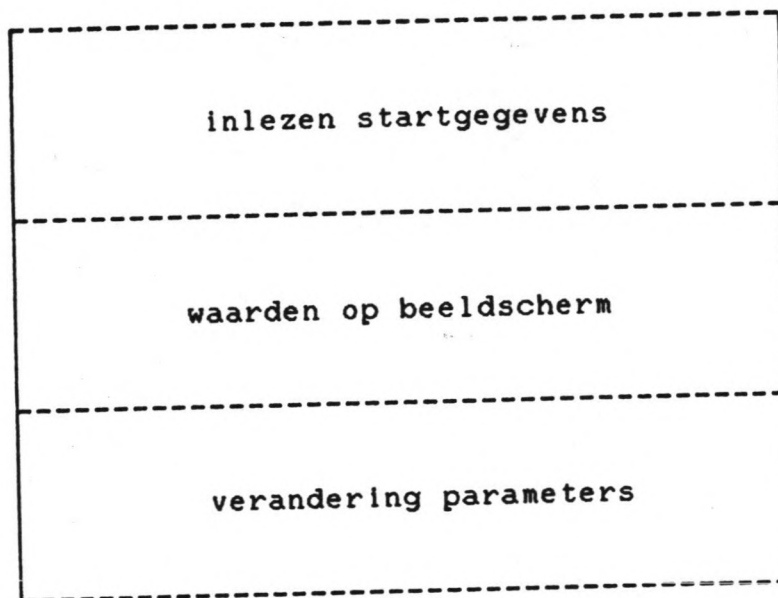
Figuur 14. Basisblokken van het structuurdiagram.

In de paragrafen 3.3, 3.4 en 3.5 zullen de drie afzonderlijke blokken van het structuurdiagram behandeld worden.

3.3 OPZET VAN DE INVOER

3.3.1 INLEIDING

Bij de invoer van gegevens voor de berekening is gekozen voor een interactieve invoer waarbij de door de programmeur gekozen startparameters kunnen worden veranderd in de door de gebruiker verlangde waarden. Hierdoor is het mogelijk om na een beperkt aantal handelingen de berekening op gang te brengen terwijl de gebruiker aan de hand van de startwaarden een indruk heeft van de grootte van de berekeningsparameters. De opzet van het structuurdiagram is in figuur 15 te zien.



Figuur 15. Basisstructuurdiagram voor de invoer

3.3.2 ONDERDELEN VAN DE INVOER

Door een interactieve programmaopzet met vastgestelde beginparameters toe te passen is er gepoogd om zoveel mogelijk berekeningsparameters variabel te houden zonder dat men eerst twintig getallen moet invullen. Daartoe begint het programma met het inlezen van startwaarden uit een datafile. De genummerde arrayelementen worden dan gekoppeld aan de variabelen die bij de berekening worden gebruikt. Met behulp van een lus en twee inputstatements is het dan mogelijk de rekenvariabelen te veranderen.

Het is echter niet gewenst dat ondeskundigen alle variabelen kunnen veranderen zodat er een splitsing is gemaakt in de variabelen die getoond worden op het beeldscherm.

Er zijn een drietal groepen van gegevens die op het beeldscherm verschijnen:

1) Grondmechanische gegevens

Op het eerste beeldscherm worden alle invoergegevens getoond die nodig zijn om de berekening uit te kunnen voeren. Voor ieder gegeven staat een regelnummer dat ingetikt moet worden om het betreffende gegeven te veranderen. Het regelnummer komt overeen met het arraynummer. Daarna moet de nieuwe waarde ofwel de inhoud van het arrayelement ingetikt worden. De nieuwe waarde van het element wordt weer aan de rekenvariabele gekoppeld door via een lus terug te gaan naar het begin van het programma. Op het beeldscherm verschijnen dan vervolgens de grondmechanische gegevens met de nieuwe waarde voor het aangepaste element.

2) Berekeningsgegevens

Deze tekst wordt alleen getoond als ter beëindiging van de eerste serie invoergegevens regelnummer 99 is ingetikt. Voor de ondeskundige gebruiker zijn deze gegevens niet interessant aangezien er gegevens over het laagdikteinterval en de controleuitvoer getoond worden.

Voor de deskundige gebruiker is deze informatie des te belangrijker want men kan door een passende waarde voor i , l_{min} en $h(0)$ te kiezen de vorm en grootte van de wateroverspanningsfiguur beïnvloeden zodat er gelijktijdig stationaire consolidatie en lineaire sedimentatie en consolidatie optreden.

3) Uitvoer van de (tussen)resultaten

Door tijdens de berekening tussentijds een aantal hulpvariabelen op het beeldscherm te tonen is het mogelijk om eventuele fouten in het programma op te sporen en het verloop van de berekening te volgen.

Daartoe zijn de volgende uitvoermogelijkheden in het programma opgenomen:

- * tussenuitvoer controleparameters: deze geeft het aantal lagen, de tijdstap, de dagteller en de factor α .

- * tussenuitvoer afschuiving: geeft de kritische helling en de eventueel afschuivende hoogte.

- * tussenuitvoer na afschuiving: geeft de hoogte van de achterblijvende laag, de hoogte van de tot dan toe afgeschoven lagen en de relatieve tijd nadat er afschuiving is opgetreden.

- * tussenuitvoer van het waterspanningsverloop: eerst wordt de verhoogde waterspanning getoond waarna de aanpassing aan de randvoorwaarde en de interpolatie getoond worden. vervolgens wordt het consolidatieverloop getoond.

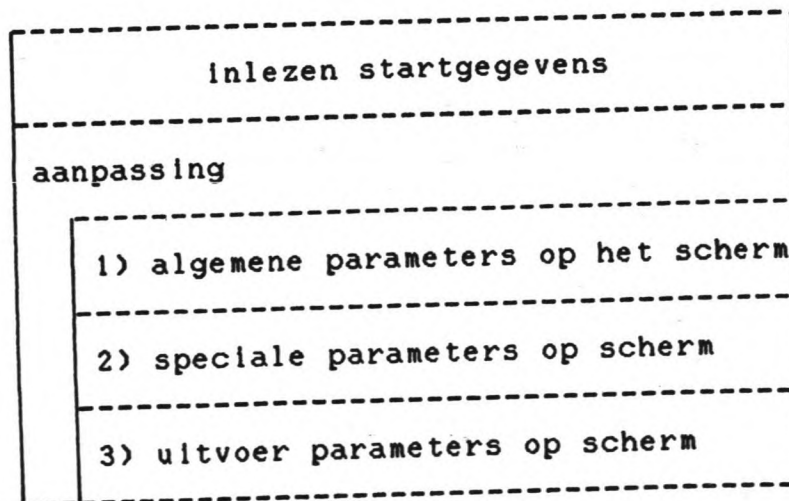
Verder kan de berekening na iedere dag dat de water-

spanningen op het scherm zijn vertoond worden onderbroken. Er bestaat dan tijd om de uitvoer beter te controleren. Het is ook mogelijk om na een afschuiving de berekening te onderbreken en alle variabelen te controleren.

Naast de direkte uitvoer van berekeningsgegevens bestaat de mogelijkheid om het verloop van de laagdikte, de kritische helling en het waterspanningsverloop gedurende een dag in een grafiek weer te geven. Daartoe worden berekeningsgegevens in een drietal aparte datafiles opgeslagen tijdens de berekening. De twee eerst genoemde grafieken worden door het programma op schijf gezet maar voor het waterspanningsverloop dient men van te voren het tijdsinterval en het aantal lijnen in de grafiek op te geven. Indien men het verloop over een langere periode wil volgen is het aan te raden de programmaschijf te verwisselen voor een dataschijf omdat de kans bestaat dat de vrije ruimte op de programmaschijf te klein is.

Door het intikken van 0 of 1 (nee/ja) of een tijdsinterval kan men de keuze opgeven.

In figuur 16 is het structuurdiagram van het invoerblok weergegeven.

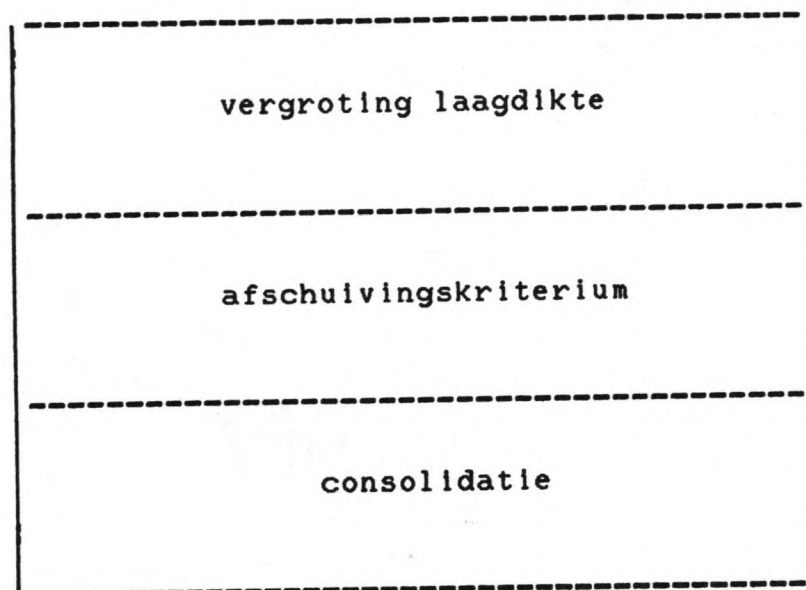


Figuur 16. Structuurdiagram invoerblok

3.4 OPZET VAN DE BEREKENING

3.4.1 STRUKTUURDIAGRAM

Het basisstructuurdiagram van de afzonderlijke berekening ziet er als volgt uit.



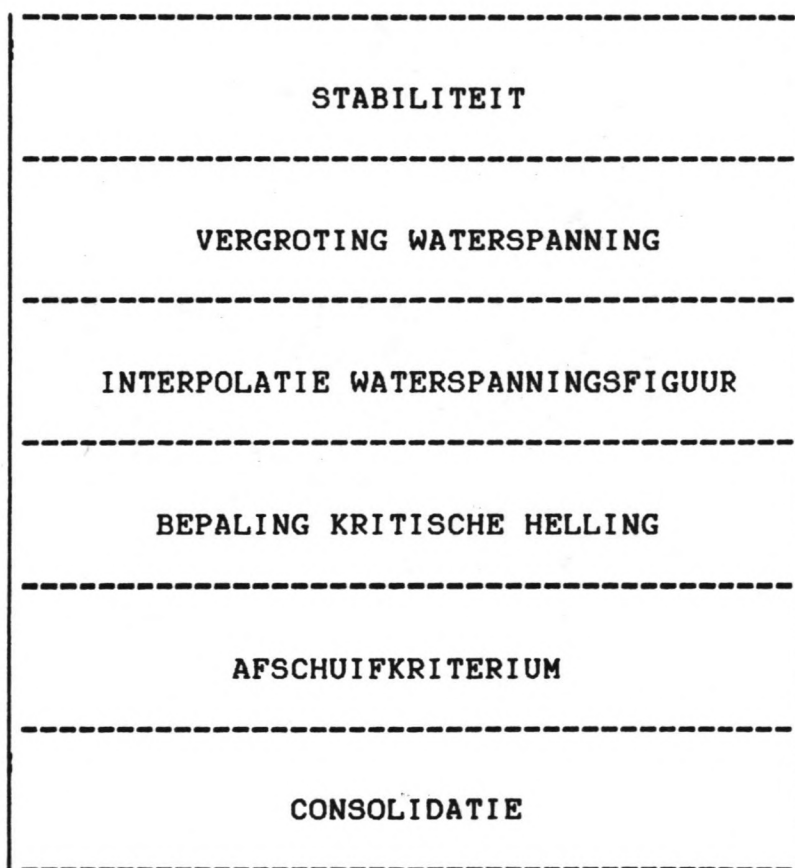
Figuur 17. Basisstructuurdiagram van de berekening.

De berekening wordt uitgevoerd door de waterspanningsfiguur weer te geven door een hele reeks waterspanningen die plaatsgebonden zijn. Tijdens het uitvoeren van de berekening neemt de laagdikte toe waardoor bij een gelijk blijvend aantal intervallen de posities van de waterspanningen veranderen. Hierdoor moet na iedere ophoging een interpolatie plaats vinden van de oude posities met bijbehorende wateroverspanning naar de nieuwe posities met de daarbij behorende spanningen. In het structuurdiagram geeft dit een extra blok.

De afschuiving is te verdelen in twee blokken waarbij in het eerste blok de kritische helling bepaald wordt. In het tweede blok wordt de kritische helling met de aanwezige

helling vergeleken waarna bij afschuiving de nieuwe parameters bepaald worden.

De numerieke consolidatie dient stabiel te verlopen zodat ten gevolge van de continue laagdikte vergroting iedere keer de tijdstap en het aantal intervallen aangepast moet worden. Uiteindelijk ontstaat het volgende berekeningsstructuurdiagram.



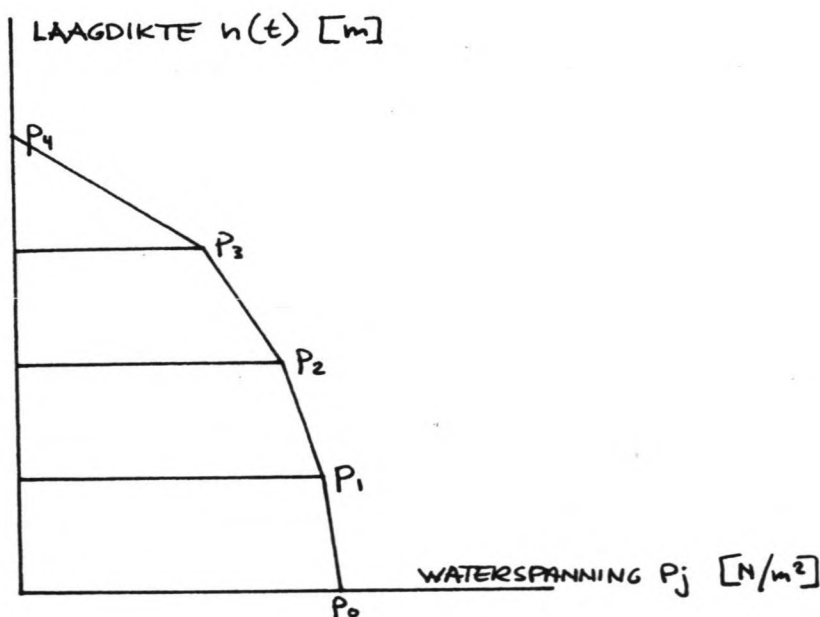
Figuur 18. Definitief structuurplan van de berekening.

3.4.2 VARIABELEN BIJ DE BEREKENING

Door de hele berekening heen lopen een aantal variabelen die van invloed zijn op alle blokken van het structuurdiagram. Een aantal van deze variabelen zijn tijd, laagdikte, aantal intervallen en waterspanningen. In deze paragraaf zullen de variabelen toegelicht worden zodat de samenhang tussen de verschillende blokken beter te begrijpen is.

Zoals al vermeld is wordt de wateroverspanningsfiguur door een reeks waterspanningen op verschillende hoogtes weergegeven. Deze waterspanningen zijn opgenomen in een array genaamd p_0 en p_1 waarbij p_0 de waterspanning is bij aanvang van een berekening en p_1 de uitkomst van de bewerking.

Het aantal spanningen waarmee de waterspanningsfiguur wordt weergegeven varieert van 4 tot maximaal 21 is afhankelijk van het aantal gekozen lagen waarmee het grondpakket geschematiseerd wordt. In figuur 19 is dit afgebeeld.



Figuur 19. Waterspanningsfiguur met 4 lagen.

Het aantal lagen wordt weergegeven door de letter i waarbij j de teller van het aantal lagen is ofwel er ontstaat een reeks $0,1,2,\dots,j,\dots,i$ waarbij i maximaal 20 is. Het hoogteinterval dz wordt dan:

$$dz = h(t)/i \quad (41)$$

In paragraaf 2.4.4 is de beginvoorwaarde behandeld die tot gevolg heeft dat de computerberekening niet bij de tijdsdoorsprong begint maar een aantal dagen later. Aangezien de sedimentatie per jaar ingevoerd moet worden kan de begintijd uitgerekend worden:

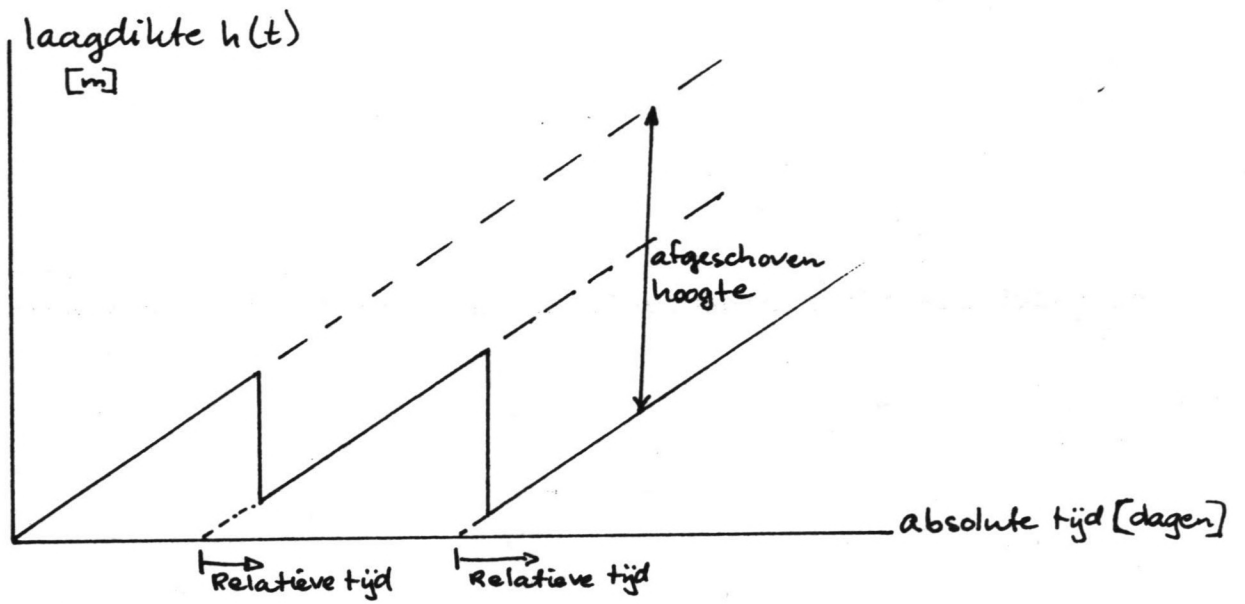
$$\text{begintijd} = \frac{\text{beginlaagdikte } h_0}{\text{sedimentatie per jaar}} \times 365 \text{ [dagen]} \quad (42)$$

Iedere keer dat de consolidatie wordt doorlopen wordt ook de tijd met een tijdstap dt vermeerderd. Indien de tijd een geheel aantal dagen passeert wordt eerst de laagdikte vergroot en de afschuiving gecontroleerd voordat de consolidatie weer verder gaat.

De laagdikte wordt op iedere nieuwe dag berekend met een variant op vergelijking (42):

$$\text{laagdikte } h(t) = \text{tijd} \times \text{sedimentatie per dag} \quad (43)$$

Door de laagdikte te relateren aan de tijd kan op ieder moment de dikte bepaald worden. Indien echter afschuiving van een deel van de sliblaag heeft plaatsgevonden en er nog een deel van de laag aanwezig is dient opnieuw de begintijd bepaald te worden met vergelijking (42) voor het vervolg van de berekening. Deze begintijd is een relatieve tijd die nodig is voor het bepalen van de laagdikte met vergelijking (43) zodat naast de variabele tijd een extra variabele ontstaat, namelijk de relatieve tijd. In figuur 20 is de tijdschaal weergegeven.



Figuur 20. Absolute en relatieve tijdschaal.

3.4.3 STABILITEIT NUMERIEKE OPLOSSING

In consolidatievergelijking (28) komt de factor α voor die een funktie is van de consolidatiefactor C_v , de tijdstap dt en het hoogteinterval dz :

$$\alpha = -\frac{C_v dt}{(dz)^2} \quad (44)$$

De berekening verloopt het snelste door α ofwel dt zo groot mogelijk of dz zo klein mogelijk te kiezen. Hierdoor ontstaat echter de mogelijkheid dat de berekening onnauwkeurig wordt en de uitkomsten gaan slingeren om hun werkelijke waarde. De uitkomsten worden onnauwkeurig en onbetrouwbaar: dit noemt men instabiliteit van de numerieke berekening. Het is daarom noodzakelijk een waarde voor α te vinden waarbij de numerieke berekening stabiel blijft.

Door aan te nemen dat er in een waterspanning $p_i(t)$ een fout ϵ aanwezig is en in $p_{i+1}(t)$ en $p_{i-1}(t)$ een fout $-\epsilon$ dan ontstaat er volgens consolidatievergelijking (28):

$$\begin{aligned} p_i(t+dt) &= p_i(t) + \alpha (p_{i+1}(t) - 2p_i(t) + p_{i-1}(t)) \\ &= \epsilon - 4\alpha\epsilon = \epsilon(1 - 4\alpha) \end{aligned} \quad (45)$$

Indien $1 - 4\alpha$ kleiner is dan 1 dan wordt met iedere stap van de consolidatie ook de fout ϵ kleiner zodat er demping van de fout optreedt. Hieruit volgt dat er numerieke stabiliteit optreedt als:

$$|1 - 4\alpha| < 1 \quad (46)$$

ofwel

$$0 < \alpha < 0.5 \quad (47)$$

De maximale waarde van α wordt meestal niet gekozen omdat door een andere verdeling van de fouten de berekening alsnog instabiel kan worden. Een veelgebruikte waarde is $1/4$ of $1/3$. In dit geval is gekozen voor $1/3$.

Uit de definitie van α volgt dat de tijdstap dt evenredig is met het kwadraat van het hoogteinterval:

$$dt < \alpha \frac{(dz)^2}{C_v} \quad (48)$$

Het is af te raden om dz zeer groot te kiezen omdat dan de schematisatie van de waterspanningen niet reeel meer is. In plaats van een vloeiende kromme worden dan hoekige lijnen verkregen.

Om de berekening niet oneindig lang te laten duren voor kleine laagdikten is het hoogteinterval dz indirekt afhankelijk gemaakt van de laagdikte van het slib. Er wordt begonnen met een verdeling in vijf lagen zodat dz relatief groot is en dt zo groot mogelijk. Zodra de tijdstap dt groter is dan $1/20$ dag wordt het aantal lagen met een vermeerderd totdat het maximum van 20 lagen is bereikt.

Het maximum tijdsinterval is beperkt tot $1/5$ dag om een fout die ontstaan is bij het ophogen van de sliblaag weer uit te laten dempen tijdens de consolidatie.

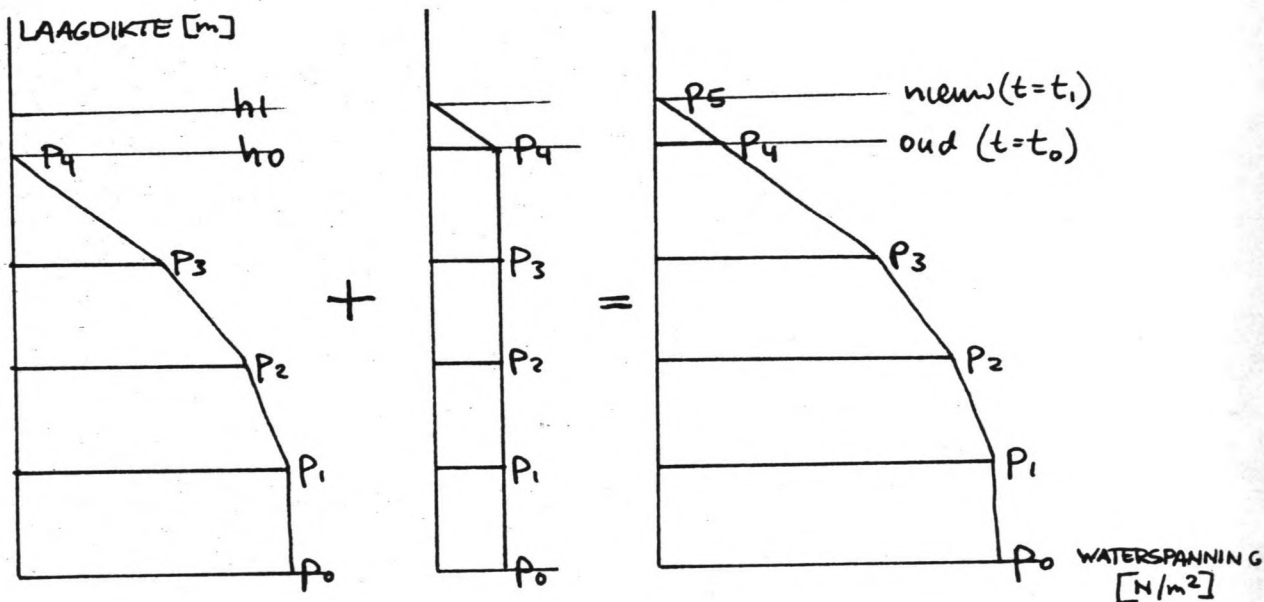
Na de beperkingen voor dt en dz wordt α opnieuw berekend met de aangepaste waarden.

3.4.4 VERHOGING WATERSPANNINGEN

Het toenemen van de laagdikte van het slib veroorzaakt een verhoging van de grondspanning die evenredig is met de laagdiktetoename van het slib en het soortelijk gewicht van het neergeslagen slib. De wateroverspanning neemt toe met:

$$p = (h_1 - h_0) * (s.g.nat\ slib - s.g.water) \quad (49)$$

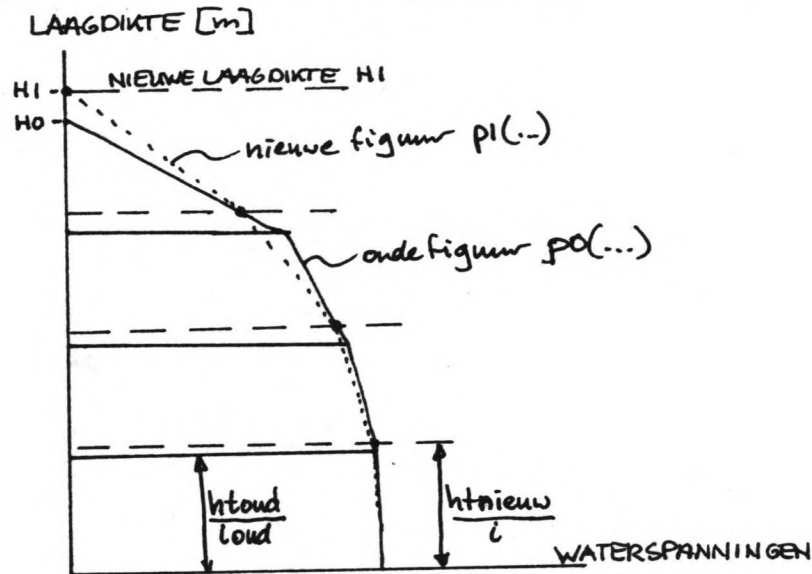
Deze extra waterspanning wordt bij alle waterspanningen van de array opgeteld zoals in figuur 21 te zien is.



Figuur 21. Verhoging waterspanningen in array.

3.4.5 INTERPOLATIE VAN DE WATEROVERSPANNINGEN

De waterspanningen en de laagdikte zijn nu vergroot zodat de posities van de spanningen veranderd zijn waardoor interpolatie nodig is. In figuur 22 is de interpolatie weergegeven voor een gelijkblijvend aantal intervallen maar het aantal intervallen kan ook toenemen zoals in paragraaf 3.4.3 bij de stabiliteit behandeld is.



Figuur 22. Interpolatie van de waterspanningen.

De interpolatie verloopt volgens:

$$p_1(\text{nieuw}) = p_1(\text{oud}) + \text{richtingscoefficient} \times \text{laagdikteverschil}$$

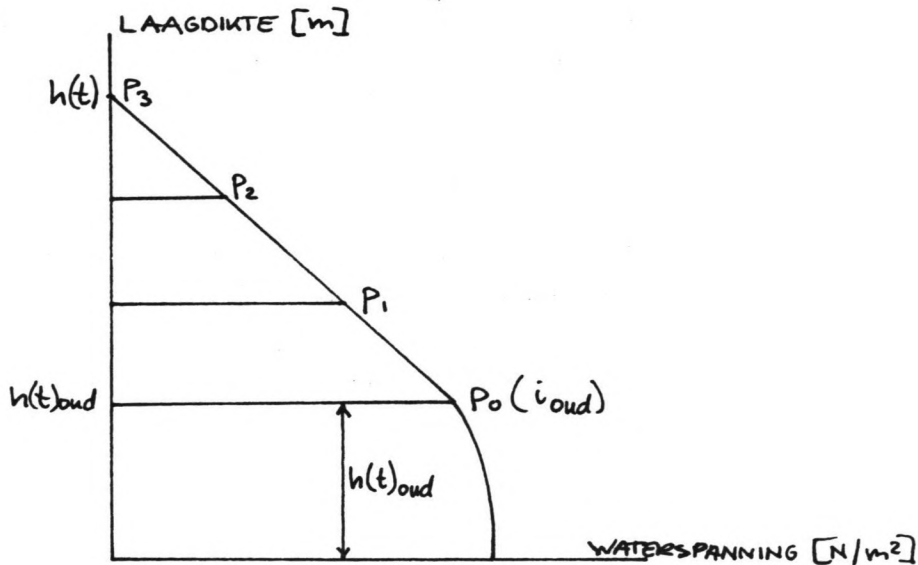
ofwel

$$p_1(j) = p_0(h-1) + \left(\frac{j \cdot h(t)}{l} - \frac{(h-1) \cdot htoud}{loud} \right) \times \frac{p_0(h) - p_0(h-1)}{htoud / loud} \quad (50)$$

waarbij j = teller intervallen
 i = aantal intervallen
 $h(t)$ = nieuwe laagdikte
 h = teller oude intervallen
 i_{oud} = aantal oude intervallen voor de ophoging
 h_{toud} = oude laagdikte

Deze interpolatie loopt door totdat de laagdikte $j \cdot h(t) / i$ groter is dan $h(t)_{oud}$.

Bij de start van het programma of na een afschuiving heeft de waterspanningsfiguur een driehoeksvorm die rechtlijnig naar nul loopt.



Figuur 23. Interpolatie van driehoekige waterspanning.

Voor de driehoeksvorm geldt de volgende interpolatie:

$$p_1(j) = \frac{(i-j) \cdot h(t) / i}{h(t) - h_{toud}} * p_0(i_{oud}) \quad (51)$$

3.4.6 BEPALING KRITISCHE HELLING

De kritische helling wordt meteen na de ophoging bepaald aangezien dan de kleinste opneembare spanning optreedt. Zodra het slib kan consolideren neemt de korrelspanning toe waardoor ook de opneembare schuifspanning toeneemt.

De korrelspanning volgt uit:

$$\sigma_{\text{korrel}} = \sigma_{\text{grond}} - \sigma_{\text{water}} - \sigma_{\text{oversp}} \quad (52)$$

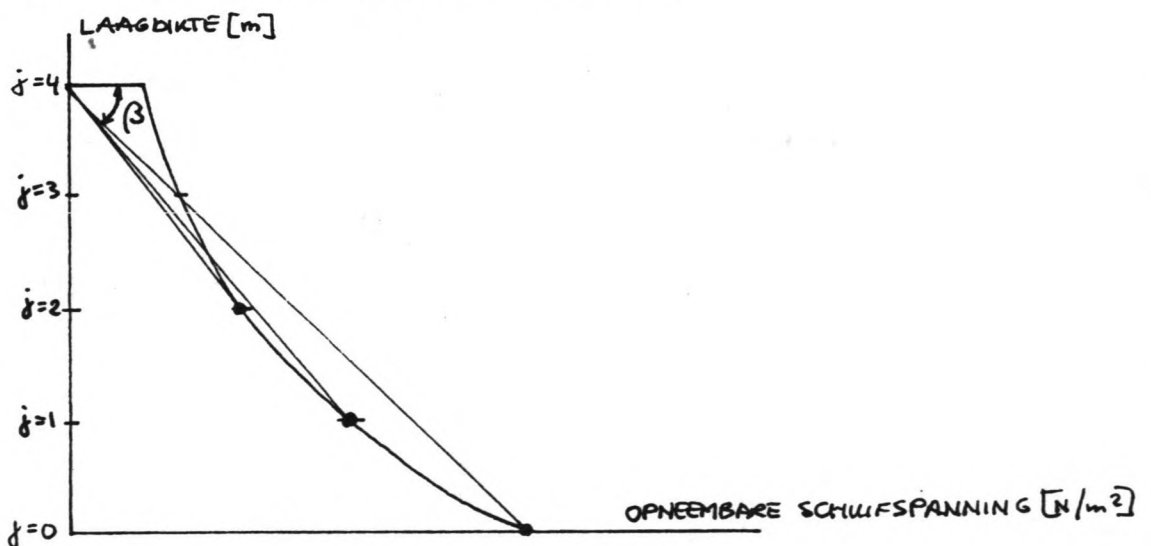
waarna de opneembare schuifspanning met Coulomb berekend kan worden:

$$\tau_{\text{opn}} = c + \sigma_{\text{korrel}} \cdot \tan \phi \quad (53)$$

Voor ieder punt op de schuifspanningsfiguur wordt de kritische helling bepaald met:

$$\beta = \frac{\tau_{\phi}}{(1-j) \cdot h(t)/l} \quad (54)$$

De grootste β is dan de kritische helling voor die betreffende dag. In figuur 24 is het bepalen van de kritische helling en hoogte aangegeven.



Figuur 24. Bepaling kritische helling en afschuivende hoogte

De grootste hoek β geeft de flauwste helling met de kritische schuifspanning en kritische hoogte waarna de kritische helling met vergelijking (40) berekend wordt:

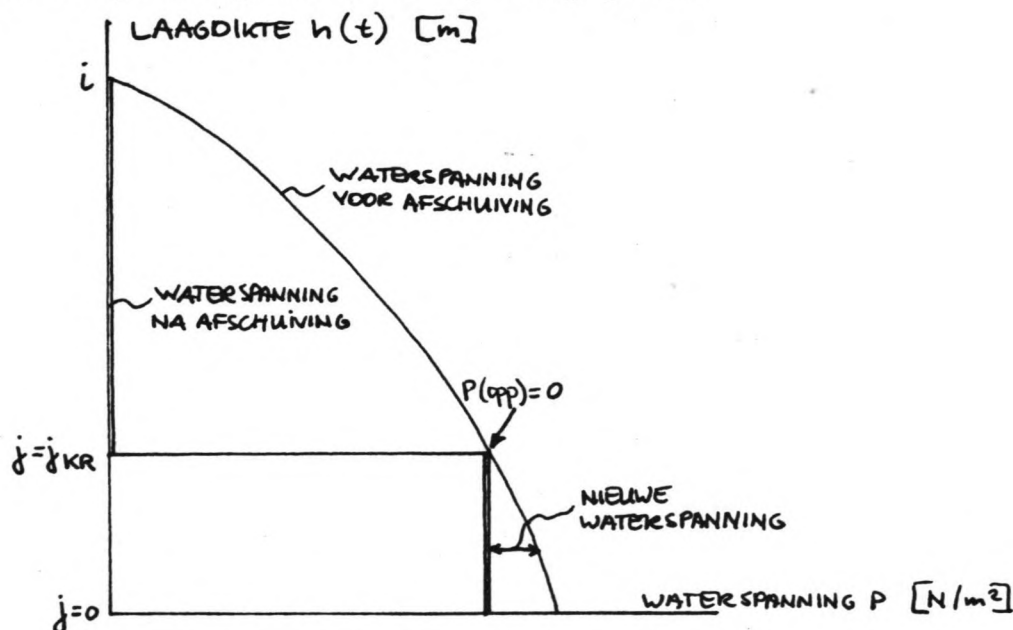
$$i_{kr} = \frac{\tau_{kr}}{\rho \cdot g \cdot h_{kr}} \quad (55)$$

Zolang i_{kr} groter is dan de aanwezige helling zal er geen afschuiving plaats vinden. Indien wel afschuiving optreedt dan zal niet heel de laag afschuiven maar alleen de kritische hoogte.

3.4.7 VARIABELEN NA AFSCHUIVING

Na het afschuiven van de kritische hoogte dienen er een aantal variabelen te worden aangepast.

Ten eerste moeten de waterspanningen van de afgeschoven sliblaag tot nul gereduceerd worden waarna van de overgebleven waterspanningen de waarde van het nieuwe oppervlakteelement afgetrokken moet worden zodat de oppervlakterandvoorwaarde met $p_0(\text{oppervlakte})=0$ weer van toepassing is. Verder moet de waarde van i aangepast worden waardoor ook de tijdstap dt en de stabiliteitsfactor opnieuw berekend moeten worden. In figuur 25 is schematisch de waterspanningsverandering aangegeven



Figuur 25. Aanpassing waterspanningen na afschuiving.

Tevens wordt de relatieve tijdschaal aangepast aan de overgebleven hoogte aangezien de relatieve tijd een belangrijke variabele is voor de gehele berekening. Indien de totale sliblaag is afgeschoven begint de berekening in feite opnieuw met een beginlaagdikte $h(0)$ die weer een maat is voor de relatieve tijd. In het computerprogramma worden de

voorgaande bewerkingen uitgevoerd door de dagteller,
relatieve tijd en werkelijke tijd aan te passen zodat er
geen discontinuïteiten optreden.

3.4.8 CONSOLIDATIE

De consolidatieberekening wordt over een dubbele laagdikte uitgevoerd als gevolg van de randvoorwaarden die in paragraaf 2.4.4 behandeld zijn. Omdat de spanning aan het oppervlak nul is verloopt de consolidatie over een traject van $j=-i+1$ tot $j=i-1$

Verder zijn er weinig aanpassingen nodig aan vergelijking (28) die als volgt wordt toegepast:

$$p_1(j) = p_0(j) + \alpha \{p_0(j-1) - 2p_0(j) + p_0(j+1)\} \quad (56)$$

waarbij α door de stabiliteit bepaald wordt. Na de consolidatie worden alle p_1 -spanningen omgezet naar p_0 spanningen.

3.5 OPZET VAN DE UITVOER

Het computerprogramma voorziet in de uitvoer van een grote hoeveelheid berekeningsgegevens die voor verschillende doeleinden gebruikt kunnen worden zoals in paragraaf 3.3 over de invoer reeds aangegeven is. Voor de ontwerper van het programma dient de uitvoer in de vorm van tabellen en grafieken als een controle van heel het numerieke model en het daaruit ontstane computerprogramma. De gebruiker van het programma verlangt echter alleen een kritieke helling of het afgeschoven slibvolume gedurende de berekeningsperiode.

Om aan ieders eisen te voldoen zijn er een aantal uitvoermogelijkheden in het programma opgenomen die in de volgende paragrafen beschreven zullen worden.

3.5.1 UITVOER IN TABELVORM

Op het beeldscherm kan het verloop van de waterspanning met een van te voren opgegeven interval bekeken worden. Er worden dan zes representatieve waterspanningen op een regel afgebeeld zodat een tabel ontstaat met waterspanningen voor verschillende tijdstippen. De eerste twee regels tonen het ophogen en interpoleren van de waterspanningen waarna in de volgende regels het consolidatieverloop gedurende een dag getoond worden. Voordat een (reken)dag voorbij is en de ophoging weer begint wordt de laatste consolidatiestap nog afgedrukt en als het van te voren is opgegeven wordt de berekening gestopt totdat een willekeurige toets wordt aangeraakt. Hierdoor is het mogelijk het verloop van de berekening rustig te overzien. Wanneer het juiste tijdsinterval is opgegeven wordt het mogelijk het volledige verloop van de consolidatie te volgen. Door controlevariabelen af te laten drukken is het zelfs mogelijk het verloop van het computerprogramma voor het grootste deel te volgen.

Aangezien de opdracht om de waterspanningen af te drukken

op verschillende plaatsen in het computerprogramma voorkomt is voor het afdrukken hiervan gebruik gemaakt van een zogenaamde subroutine die aan het einde van het programma staat. De andere uitvoeropdrachten staan gewoon in het programma zelf.

3.5.2 UITVOER IN GRAFISCHE VORM

Het grafisch weergeven van een aantal rekenvariabelen vergroot het inzicht in de invloed van de materiaalconstanten op het verloop van de rekenvariabelen zoals de kritische helling en de afschuifhoogte.

Er kan gekozen worden uit drie grafieken:

1) Verloop van de laagdikte gedurende de berekening.

Deze grafiek toont twee lijnen: de bovenste lineair verlopende lijn geeft de sedimentatiedikte aan terwijl de tweede getande lijn de werkelijk aanwezige laagdikte aangeeft. Het verschil tussen de twee lijnen geeft de afgeschoven hoogte aan.

2) Verloop van de waterspanningen gedurende een dag.

Voor de aan het begin van het programma opgegeven daginterval wordt het afnemen van de waterspanning gedurende een dag in een aantal stappen getoond. Na het intikken van een willekeurige toets (behalve het getal 7) wordt de volgende dag getoond. Het is mogelijk het programma te onderbreken door het getal 7 in te tikken zodat men niet verplicht is alle informatie te doorlopen.

3) Verloop van de opneembare en aanwezige helling.

In deze grafiek is het verloop van de kritische helling weergegeven waaruit kan worden afgeleid wat de invloed is van het veranderen van de aanwezige helling.

4. GEBRUIK VAN HET COMPUTERPROGRAMMA

In dit hoofdstuk wordt het gebruik van de verschillende hulpprogramma's toegelicht waarna een aantal voorbeeldberekeningen worden uitgevoerd en toegelicht.

4.1 HULPPROGRAMMA'S

Alle programma's zijn in GW-BASIC opgesteld aangezien er met deze taal snel op een personal computer kan worden gewerkt. De voor deze programma's gebruikte computer is een Olivetti M24 zodat de programma's ook op een IBM-PC met grafische mogelijkheid gebruikt kunnen worden.

Naast het hoofdrekenprogramma is er een programma opgesteld dat de berekeningsuitkomsten in een grafiek omzet waarna er nog drie hulpprogrammatjes zijn opgesteld die in een snel tempo alle getallen die op schijf zijn geschreven op het beeldscherm weergeven.

De computerprogramma's zijn in drie groepen in te delen:

1) Het hoofdrekenprogramma CONSOLI dat zijn naam aan het consolideren van het slibpakket ontleend. Dit programma kan op GW-BASIC gedraaid worden maar dan is de rekensnelheid vrij klein zodat er ook een gecompileerde versie gemaakt is die de gemiddelde rekentijd terugbrengt van dertig tot tien minuten. De gecompileerde versie wordt in de "system-mode" gebruikt.

2) Het grafische programmadeel is CONGRAF genoemd. Na het laden onder GW-BASIC kan men kiezen uit drie subroutines die de van een schijf afkomstige berekeningsgegevens omzetten in een grafiek. De op het beeldscherm getoonde grafiek kan door een screen-dump door een printer worden weergegeven indien

voor het laden van GW-BASIC het GRAPHICS-programma is geladen. De grafiek verschijnt dan negentig graden gedraaid op de printer.

3) De hulpprogrammatjes voor het uitlezen van de berekeningsgegevens die op schijf zijn geschreven zijn genummerd overeenkomstig de grafieknummers en zijn op te roepen met Z1, Z2 en Z3 in de basic-mode.

Verder is in de system-mode een HELP-programma opgenomen waar in het kort het gebruik van de diverse programma's te lezen is.

In de volgende paragraaf zijn voorbeelden van het CONSOLI en CONGRAF-programma opgenomen terwijl in de bijlagen alle programma's zijn opgenomen.

4.2 BEREKENINGSVOORBEELDEN

4.2.1 VERWACHTING

In het programma kunnen acht verschillende grondmechanische constanten ingevoerd worden die ieder hun eigen invloed hebben op het consolideren en afschuiven van de gesedimenteerd laag slib. Er is daarom gekozen voor een "standaard" situatie waarbij een aantal keren een constante wordt veranderd zodat het aantal berekeningen beperkt blijft. Het aannemen van constanten voor slib of slappe klei is een arbitraire aangelegenheid zodat voor deze voorbeeldberekeningen een "redelijke" aanname is gedaan.

Welke verschillen zijn er nu te verwachten door het varieren van de parameters ?

Ten eerste varieert het moment van afschuiven waarbij ook de dikte van de afschuivende laag sterk kan verschillen per variërende constante.

Ten tweede is het van belang hoe groot de achterblijvende laagdikte is na afschuiving aangezien het in principe kan voorkomen dat deze laag steeds dikker wordt doordat deze als ondoorlatende ondergrond gaat fungeren.

4.2.2 RESULTATEN

Op de volgende bladzijden zijn eerst de invoergegevens en een aantal tussenresultaten van het programma CONSOLI met de "standaard" constanten afgebeeld waarna ook de grafieken 1,2 en 3 van het programma CONGRAF worden afgebeeld.

Van de berekeningen met de gevarieerde parameters zijn alleen de grafieken 1 en 3 opgenomen die genoeg informatie bieden om de resultaten met elkaar te vergelijken. In paragraaf 4.2.3 worden de resultaten kort besproken.

programmanaam: CONSOLI

betreft: sedimentatie en consolidatie van slib waarbij afschuiving
vanaf een onderwatertalud optreedt

gemaakt door: P.F. de Swart
februari 1986
Technische Hogeschool te Delft
vakgroep Waterbouwkunde
sectie Geotechniek

Wilt u een aparte DATA-schijf gebruiken, wissel dan nu de PROGRAMMA-schijf
voor een DATA-schijf.

Raak een willekeurige toets aan om het programma te vervolgen

Figuur 26. Begintekst van het CONSOLI-programma

Grondmechanische gegevens

1. Berekeningsperiode	=	1.000	jaar
2. Sedimentatiesnelheid	=	2.000	meter/jaar
3. Helling van het talud	=	1 op 7.0	
4. Soortelijk gewicht nat monster	=	12.000	kN/m ³
5. Soortelijk gewicht droog monster	=	26.500	kN/m ³
6. Soortelijk gewicht water	=	10.000	kN/m ³
7. Consolidatiefactor C _v	=	0.00100	m ² /dag
8. Hoek van inwendige wrijving	=	20	graden
9. Cohesie	=	0.0400	kN/m ²

Zijn alle invoergegevens naar uw zin, geef dan return.
 Wilt u een gegeven veranderen, tik dan het betreffende regelnummer in.
 Per keer kan slechts 1 gegeven veranderd worden.
 ?

Berekenings variabelen

21. Aantal beginlagen berekening (i)	=	0
22. Aantal lagen na afschuiving (min i)	=	5
23. Laagdikte aanvang berekening h(0)	=	0.010 meters

Geef het nummer van de regel als u een gegeven wilt veranderen
 Geef return als u niets wilt veranderen
 ?

Uitvoer van de berekeningsgegevens

30. Tussenuitvoer controle parameters	=	1	0=nee 1=ja
31. Tussenuitvoer afschuif gegevens	=	1	0=nee 1=ja
32. Tussenuitvoer na afschuiving	=	1	0=nee 1=ja
33. Tijdsinterval uitvoer op scherm	=	1	dagen
34. Aantal regels per dag op scherm	=	5	
35. Na iedere dag willekeurige toets	=	0	0=nee 1=ja
36. Na iedere afschuiving will. toets	=	0	0=nee 1=ja
37. Tijdsinterval uitvoer grafiek 2	=	10	dagen
38. Aantal lijnen in grafiek 2	=	5	

Tik de door u te veranderen regel in.
 Geef return als u niets wilt veranderen.
 ?

Figuur 27. Interaktieve invoer

aantal stappen	tijd [dagen]	relatieve tijd [dagen]	hoogte sliblaag [m]	waterspanningen						bovenkant	
				onderkant		0.4Ht	0.6Ht	0.8Ht	1.0Ht		
2939	138.12	138.12	0.757	0.794	0.757	0.650	0.482	0.264	0.011		
	e= 138		i=20	dt=0.2000		alpha=0.13968		j= 20			
2939	138.12	138.12	0.757	0.794	0.757	0.648	0.477	0.257	0.000		
De aanwezige helling = 0.143				dat is 1 op 7.000							
De kritische helling = 0.142				dat is 1 op 7.040							
De afschuivende hoogte = 0.341 meters											

AFSCHUIVING

ht na afschuiving= 0.416

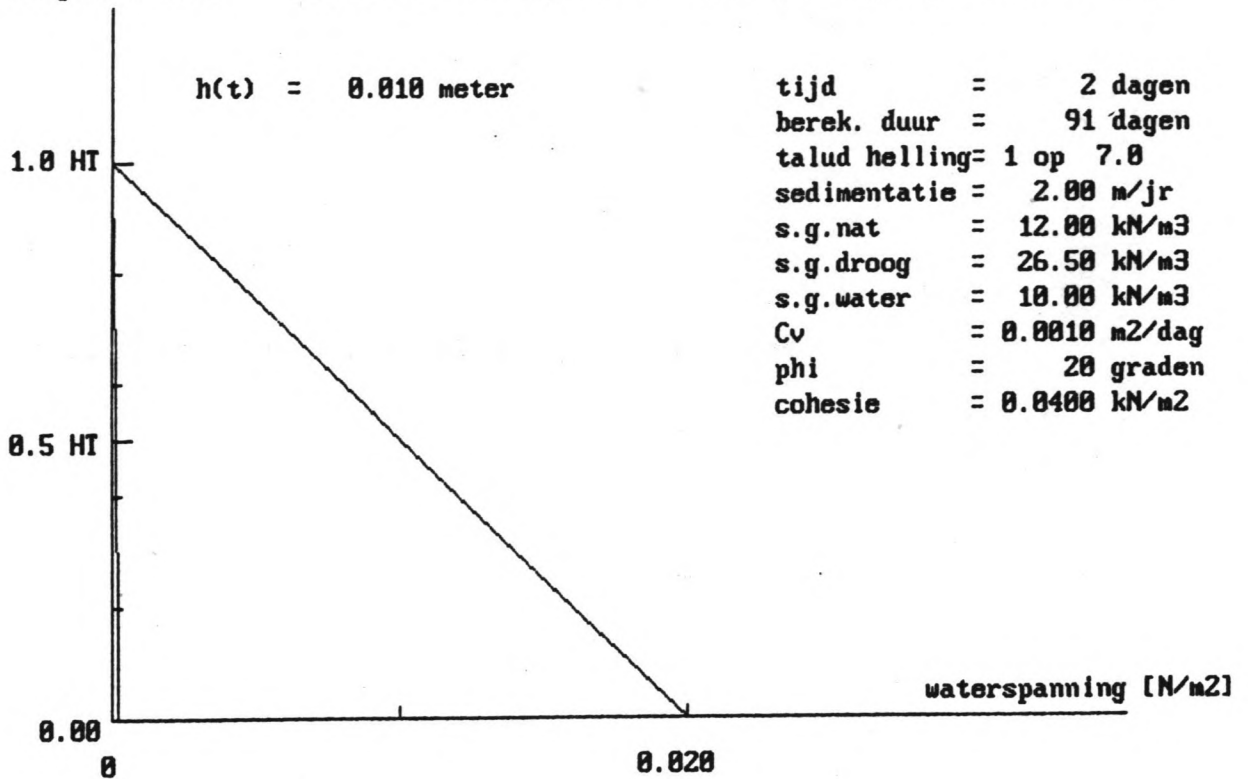
Afgeschoven laagdikte tot nu toe= 0.341

reltijd= 75.96

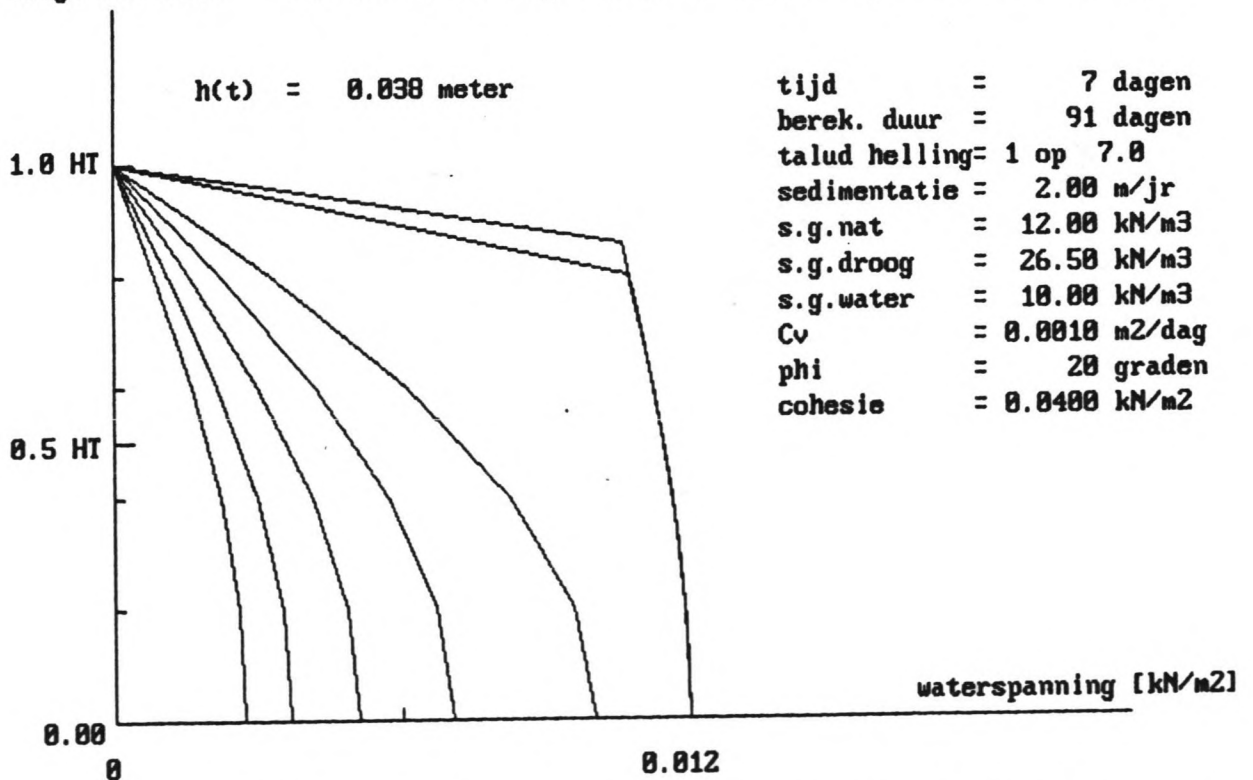
aantal stappen	tijd [dagen]	relatieve tijd [dagen]	hoogte sliblaag [m]	waterspanningen						bovenkant	
				onderkant		0.4Ht	0.6Ht	0.8Ht	1.0Ht		
3043	156.14	93.99	0.515	0.408	0.392	0.343	0.262	0.151	0.011		
	e= 156		i=20	dt=0.2000		alpha=0.30163		j= 20			
3043	156.14	93.99	0.515	0.408	0.391	0.341	0.259	0.145	0.000		
De aanwezige helling = 0.143				dat is 1 op 7.000							
De kritische helling = 0.227				dat is 1 op 4.414							
De afschuivende hoogte = 0.283 meters											
3043	156.14	93.99	0.515	0.407	0.391	0.341	0.258	0.144	0.000		
3044	156.34	94.19	0.515	0.407	0.390	0.340	0.258	0.144	0.000		
3045	156.54	94.39	0.515	0.406	0.389	0.340	0.257	0.143	0.000		
3046	156.74	94.59	0.515	0.405	0.389	0.339	0.257	0.143	0.000		
3047	156.94	94.79	0.515	0.405	0.388	0.338	0.256	0.142	0.000		

Figuur 28. Berekeningsgegevens in tabelvorm

laagdikte $h(t)$ Grafiek 2. Verloop van de waterspanningen gedurende 1 dag



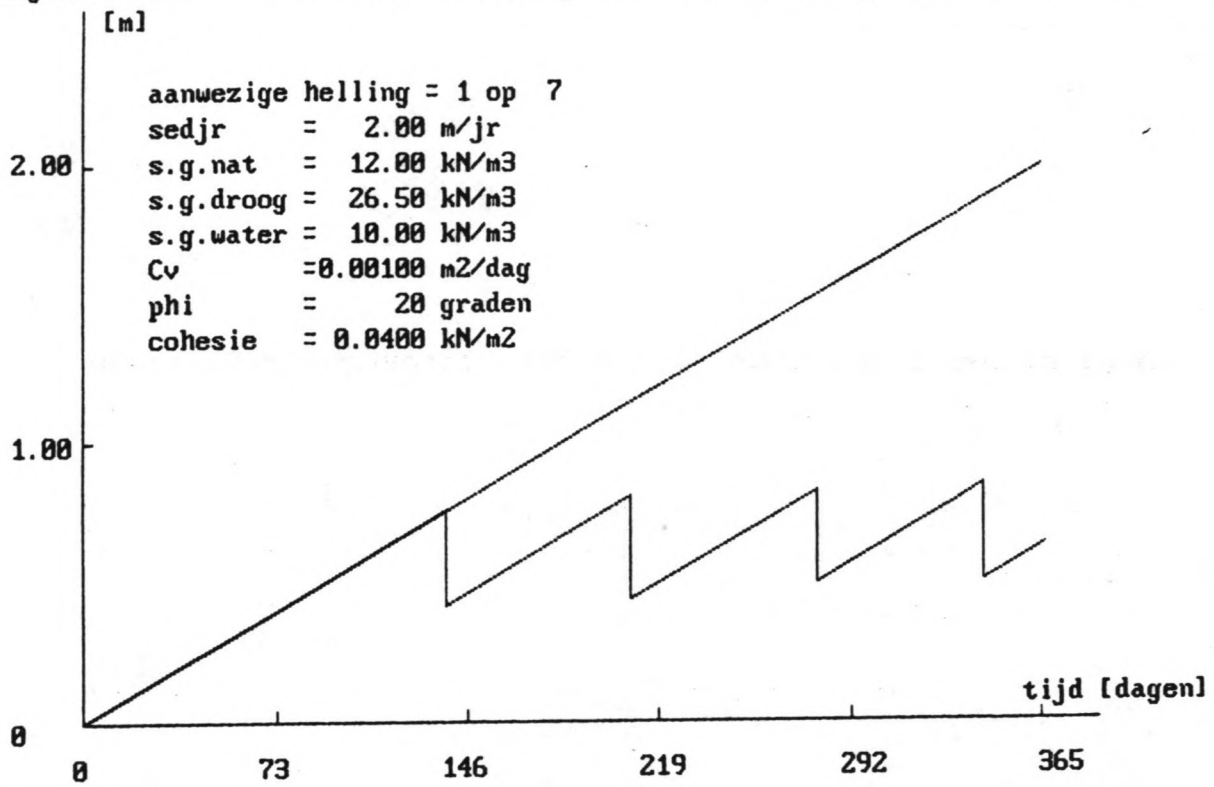
laagdikte $h(t)$ Grafiek 2. Verloop van de waterspanningen gedurende 1 dag



Figuur 29. Voorbeeld van het verloop van de waterspanningen

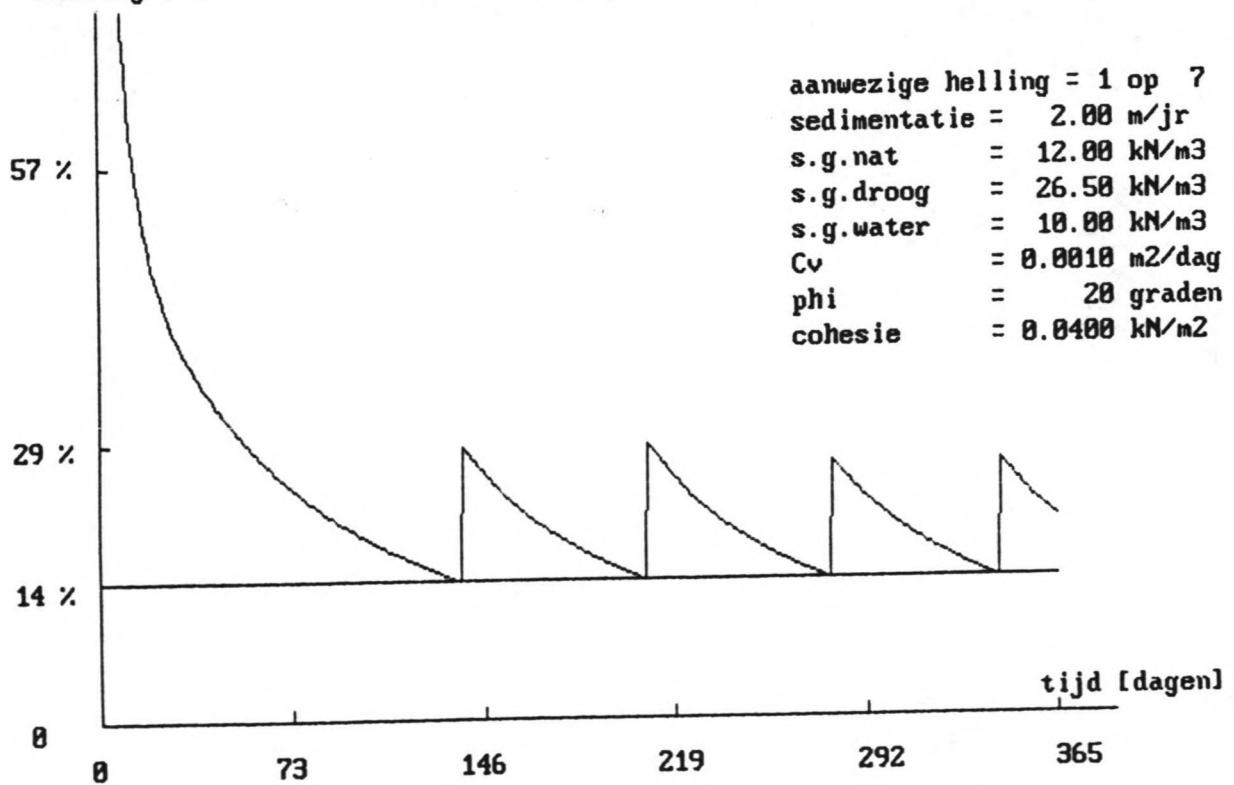
laagdikte $h(t)$

Grafiek 1. Verloop van de laagdikte gedurende de berekening



helling [-]

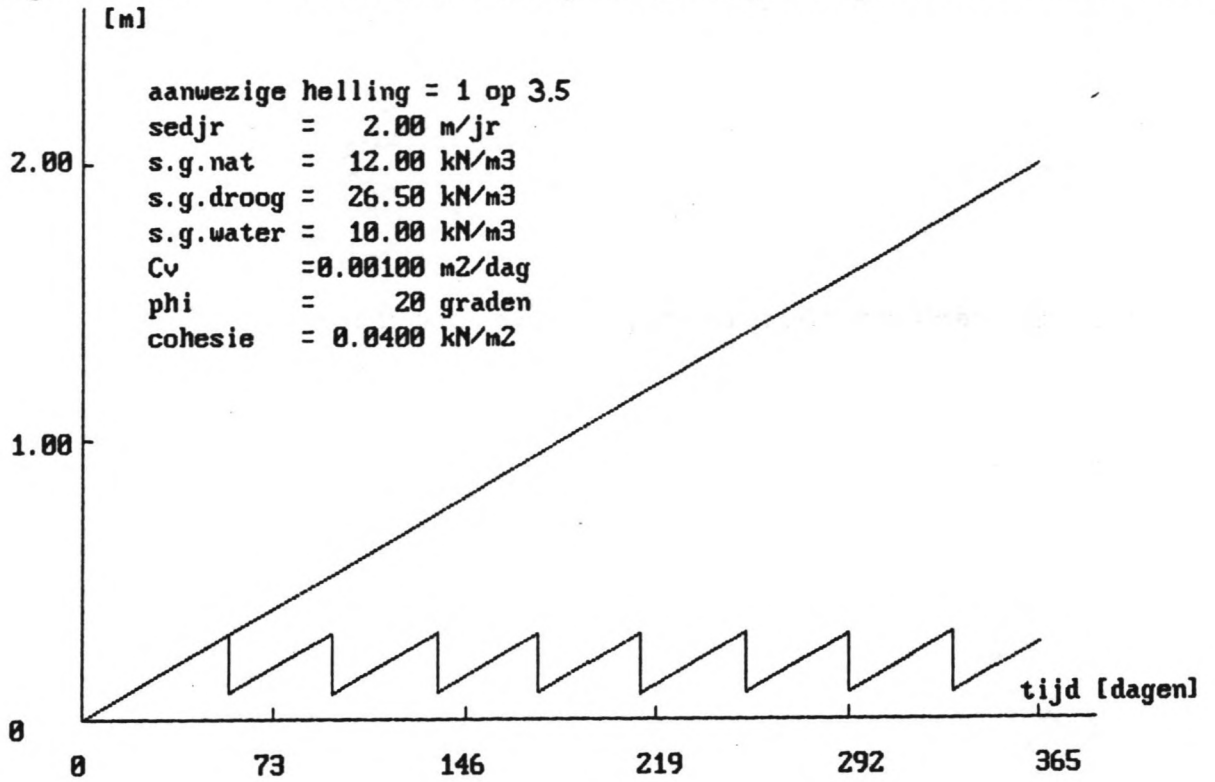
Grafiek 3. Verloop van de opneembare en aanwezige helling



Figuur 30. Berekeningsresultaat van de standaard gegevens

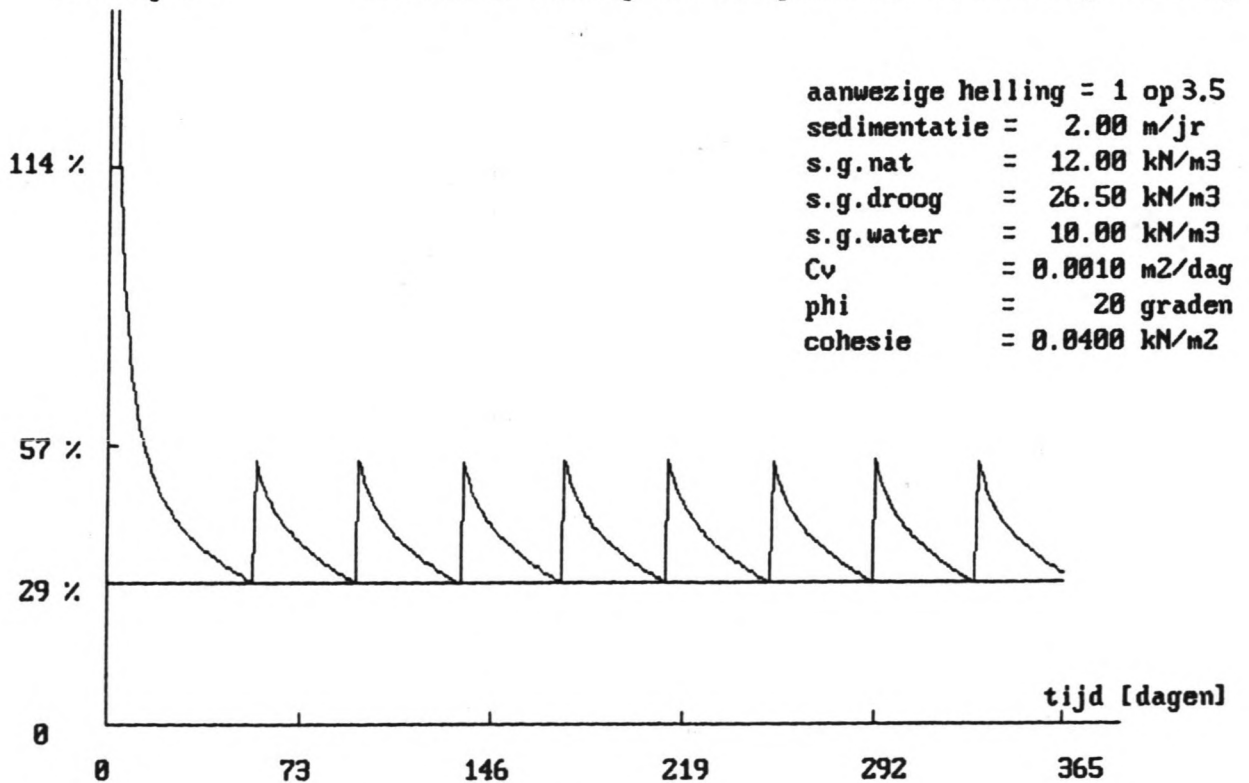
laagdikte $h(t)$

Grafiek 1. Verloop van de laagdikte gedurende de berekening



helling [-]

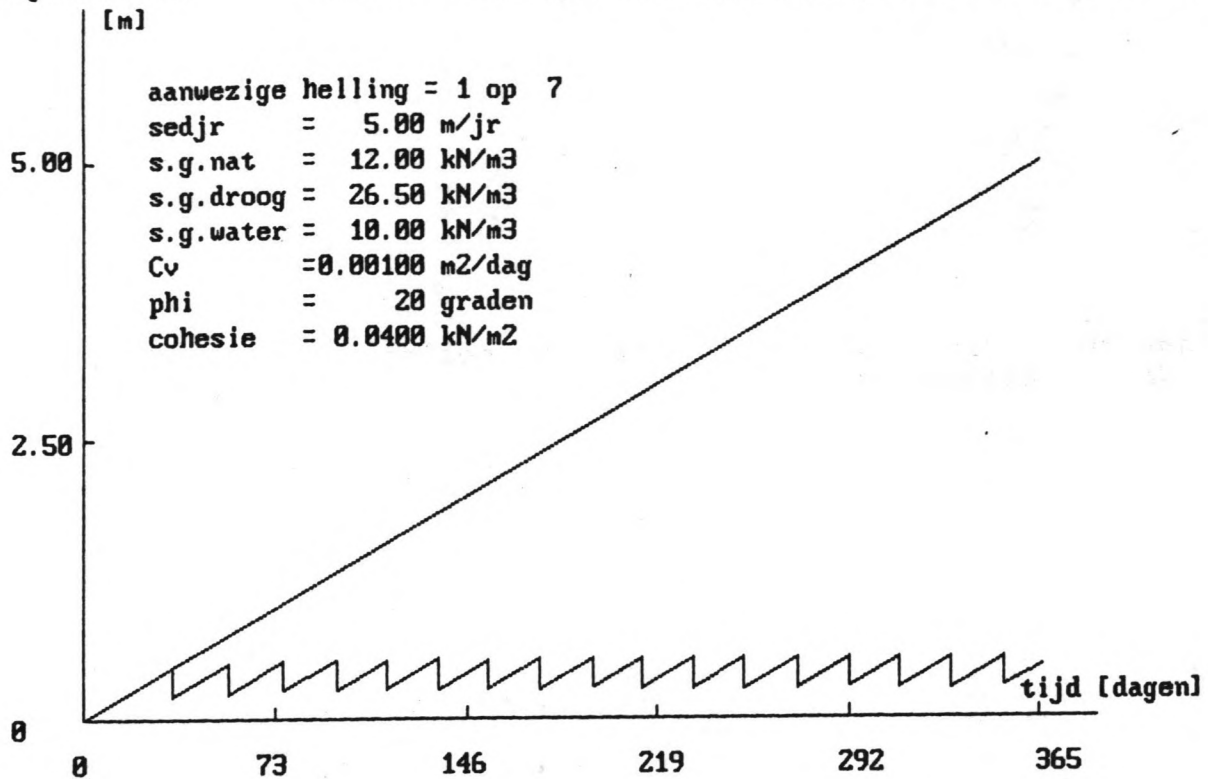
Grafiek 3. Verloop van de opneembare en aanwezige helling



Figuur 31. Berekeningsresultaat met steilere helling

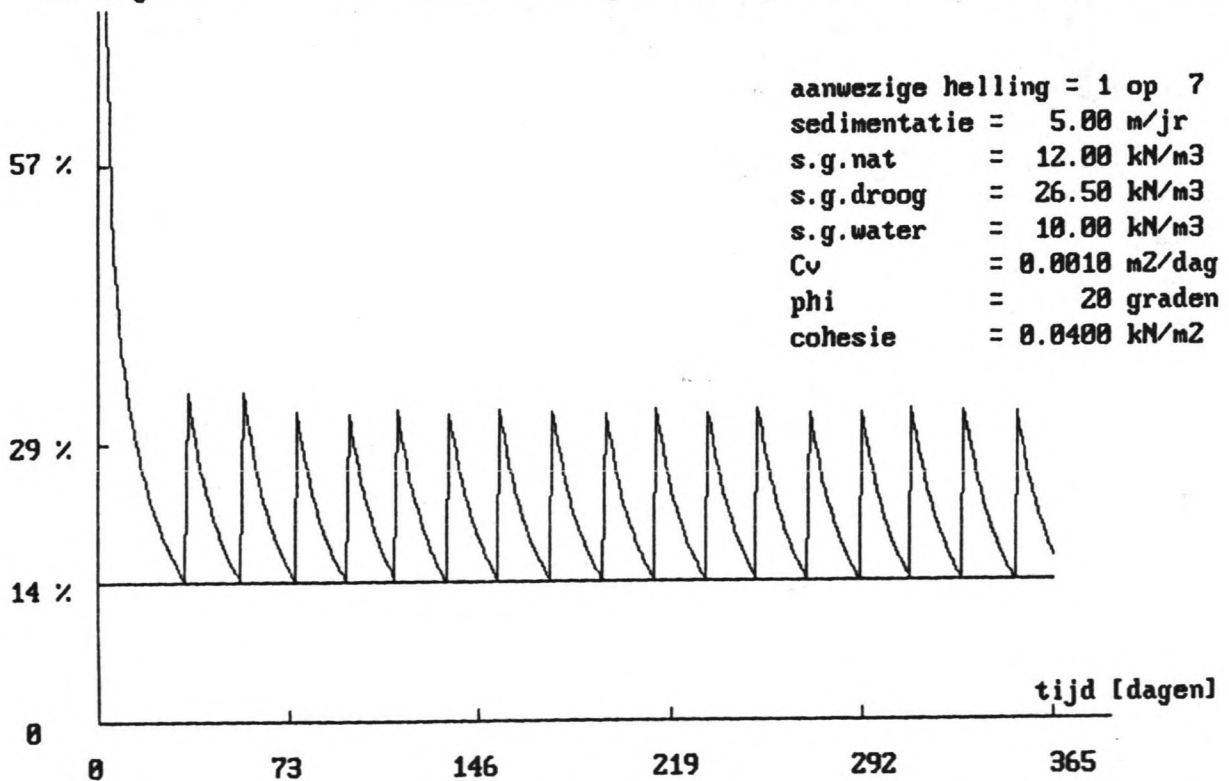
laagdikte $h(t)$

Grafiek 1. Verloop van de laagdikte gedurende de berekening



helling [-]

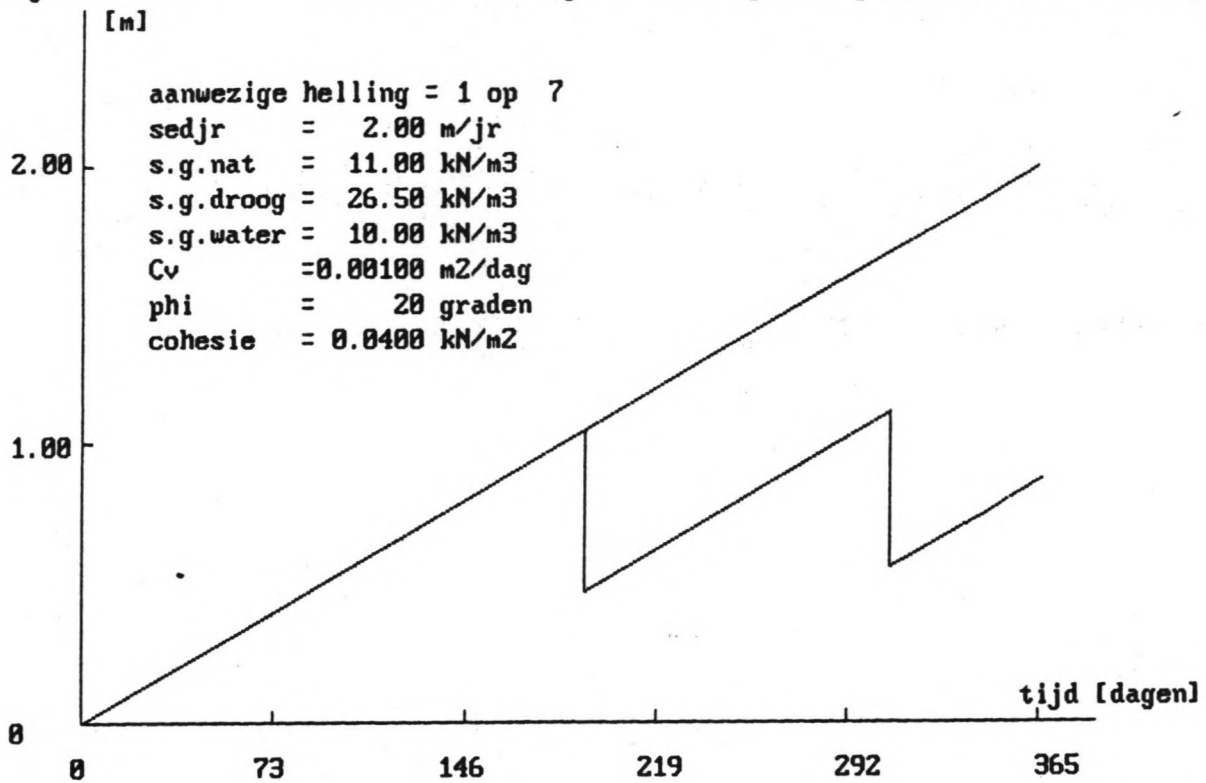
Grafiek 3. Verloop van de opneembare en aanwezige helling



Figuur 32. Berekeningsresultaat met grotere sedimentatiesnelheid

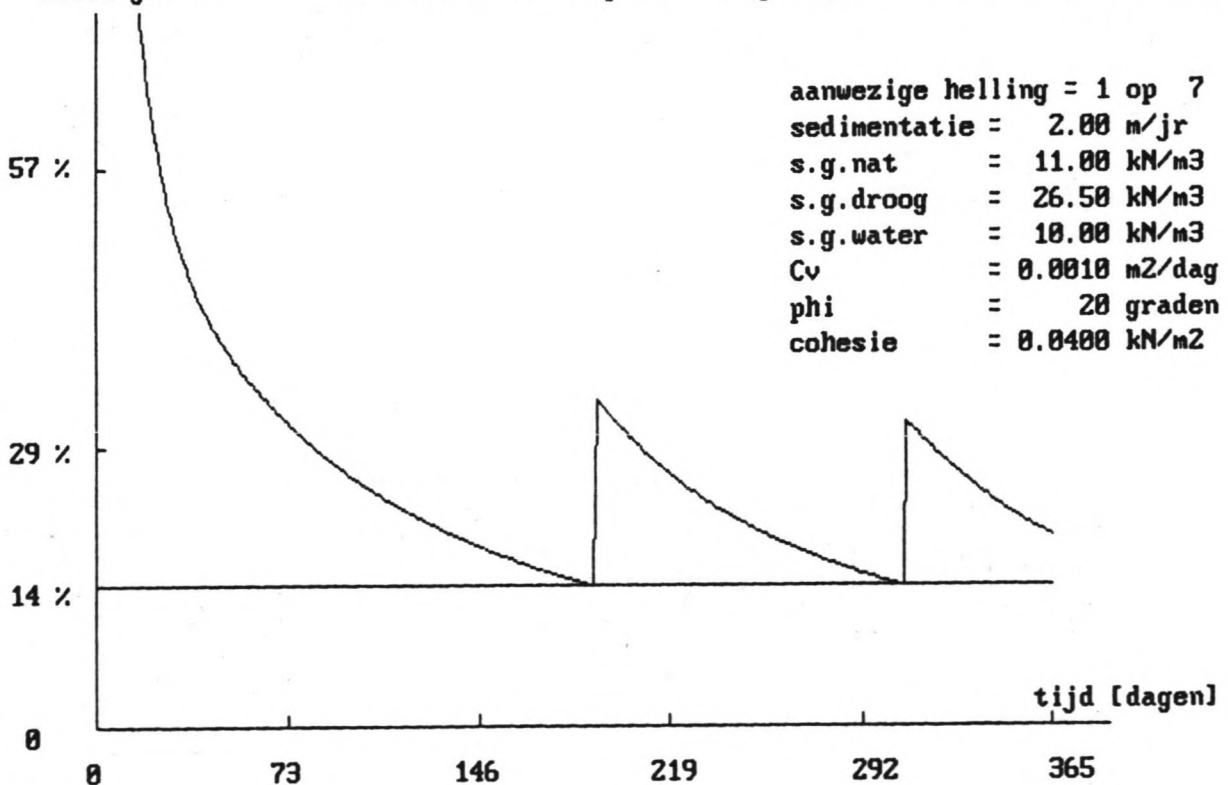
laagdikte $h(t)$

Grafiek 1. Verloop van de laagdikte gedurende de berekening



helling [-]

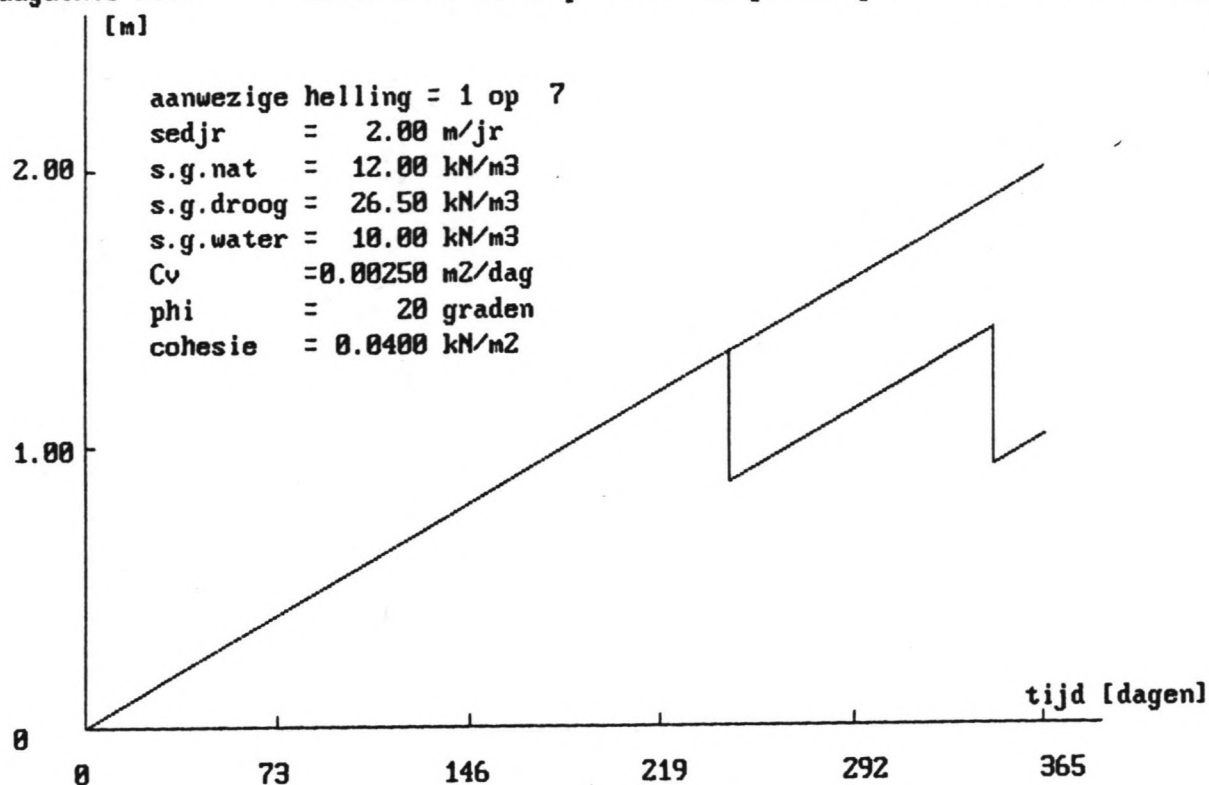
Grafiek 3. Verloop van de opneembare en aanwezige helling



Figuur 33. Berekeningsresultaat met lagere slijdichtheid

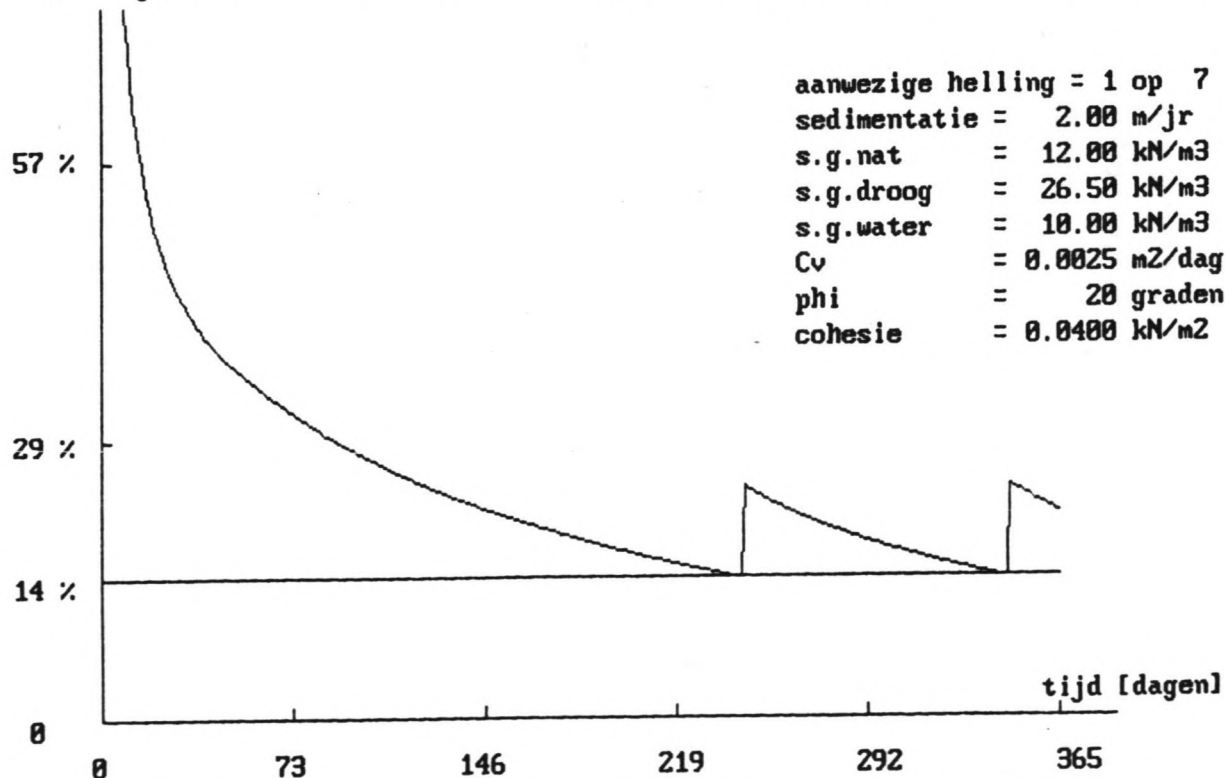
laagdikte $h(t)$

Grafiek 1. Verloop van de laagdikte gedurende de berekening



helling [-]

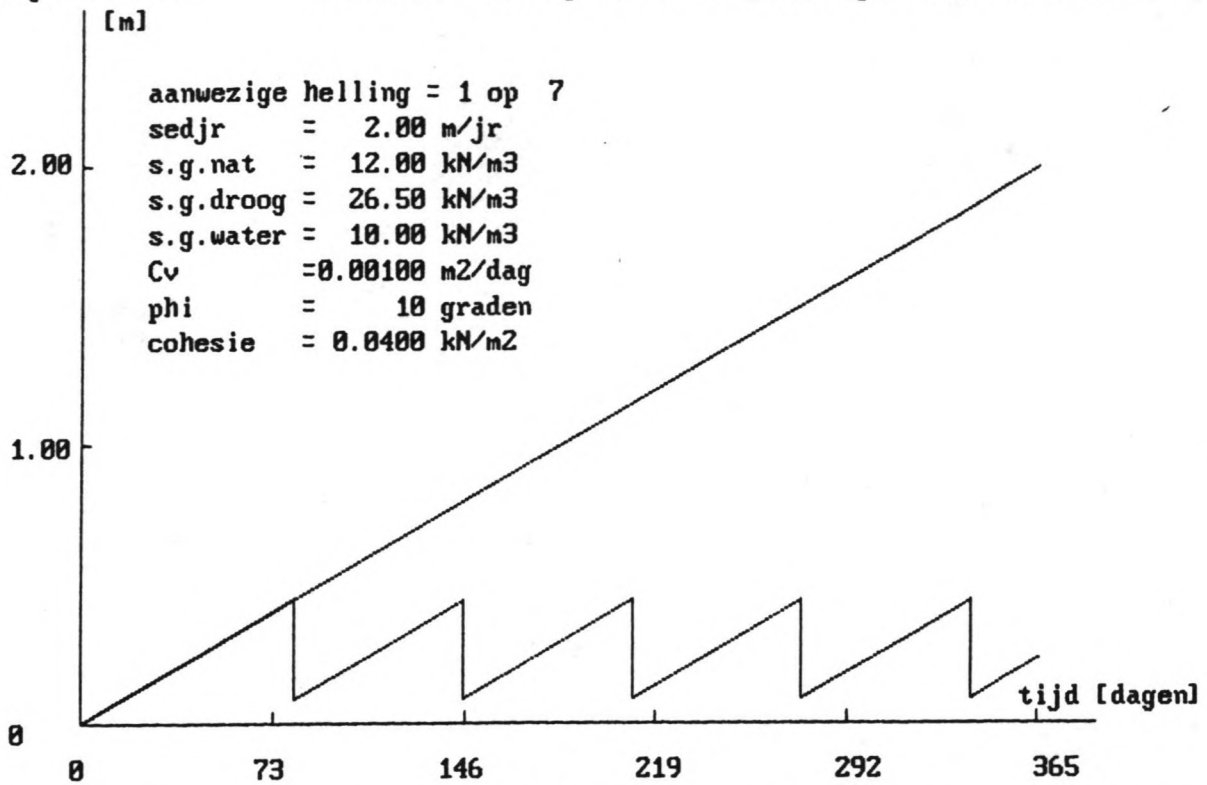
Grafiek 3. Verloop van de opneembare en aanwezige helling



Figuur 34. Berekeningsresultaat met grotere consolidatie-factor

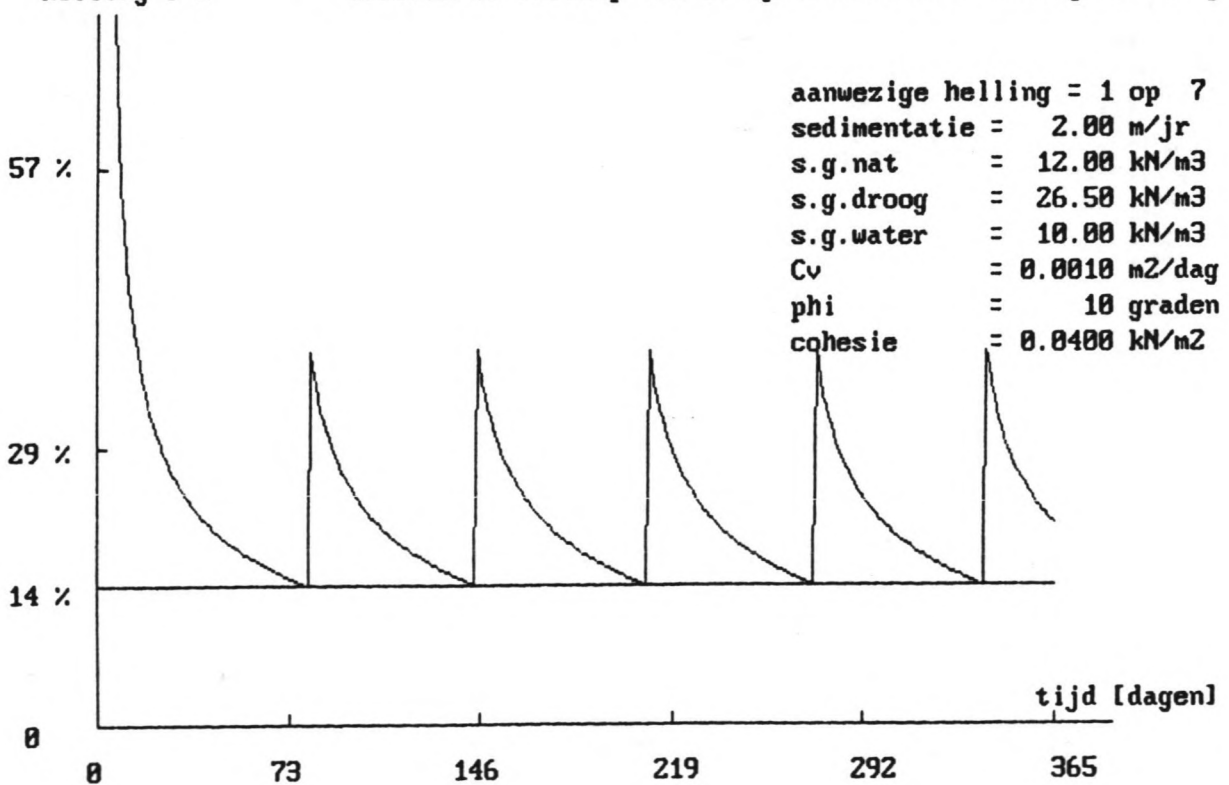
laagdikte $h(t)$

Grafiek 1. Verloop van de laagdikte gedurende de berekening



helling [-]

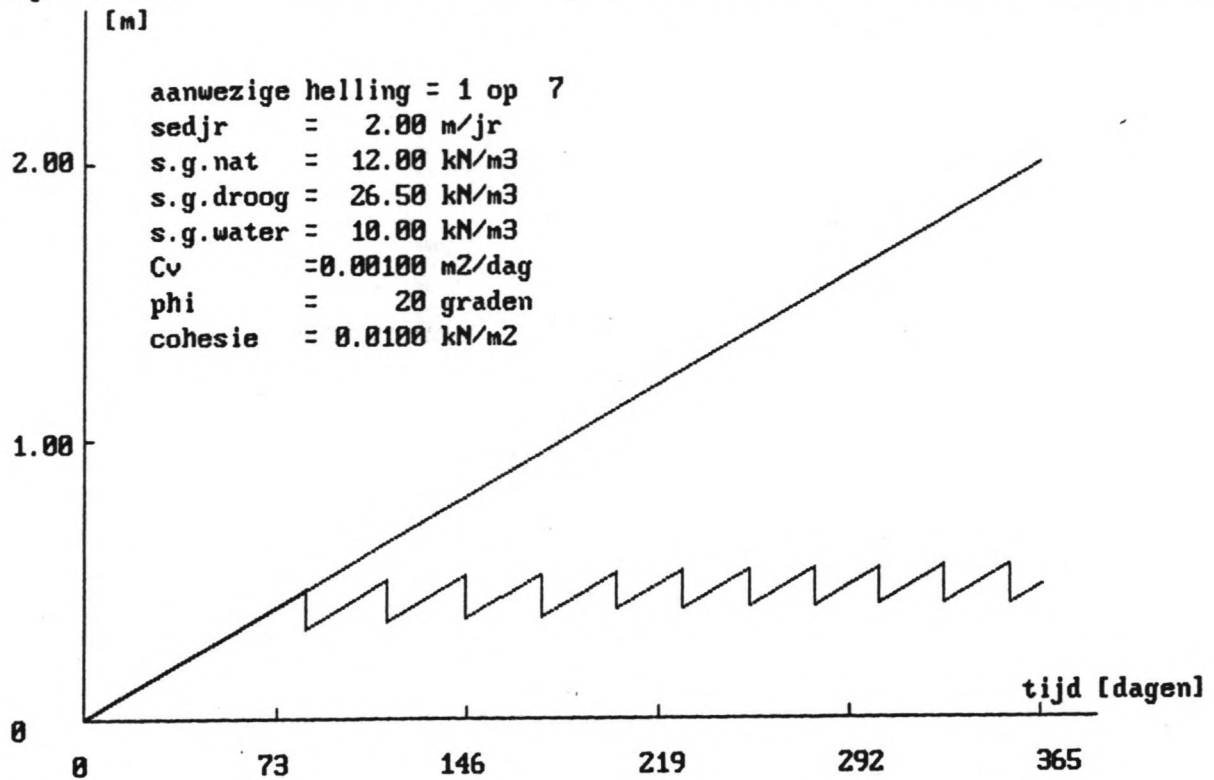
Grafiek 3. Verloop van de opneembare en aanwezige helling



Figuur 35. Berekeningsresultaat met kleinere hoek van inwendige wrijving

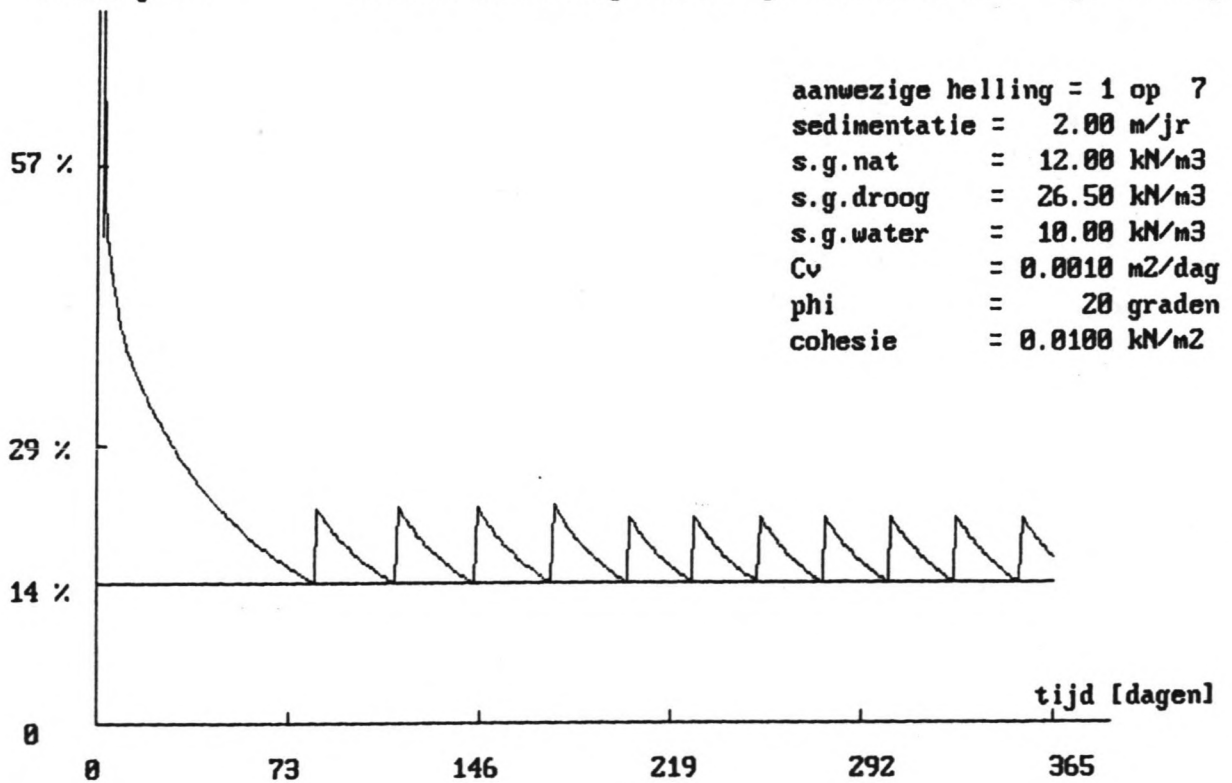
laagdikte $h(t)$

Grafiek 1. Verloop van de laagdikte gedurende de berekening



helling [-]

Grafiek 3. Verloop van de opneembare en aanwezige helling



Figuur 36. Berekeningsresultaat met kleinere cohesie

4.2.3 CONCLUSIE

Uit de grafieken blijkt vooral dat de afschuifrequentie en het tijdstip van de eerste afschulving toenemen door: toename van de hellingshoek en sedimentatiesnelheid en door afname van de cohesie en hoek van inwendige wrijving.

Een steile helling en lage ϕ waarde geven een kleine achterblijvende laagdikte terwijl een grotere consolidatie-coëfficiënt een grotere achterblijvende laag geeft.

Het eerder in paragraaf 4.2.1 genoemde effect van het geleidelijk groter worden van de achterblijvende laag blijkt inderdaad op beperkte schaal waarneembaar bij de figuren 30, 33 en 36. Dit is waar te nemen door de "dalen" van grafiek 1 met de naastliggende dalen te vergelijken. Het blijkt dan dat de afstand tussen de horizontale-as en de dalen toeneemt. Dit verschijnsel zal door het meenemen van tweede en hogere-orde effecten in het programma versterkt waarneembaar worden.

5. ADVIEZEN VOOR EEN VERVOLGSTUDIE

Dit rapport en het bijbehorende computerprogramma vormen de basis voor een uitgebreid grond- en vloeistofmechanisch model dat het bezwijken en afglijden van slib van het talud van een vaargeul in een modderkustengebied beschrijft.

Uiteindelijk kan dan een vaargeulvorm bepaald worden die zo economisch mogelijk te onderhouden is door baggermaterieel.

Een vervolgstudie kan zich op twee aspecten richten: ten eerste op de tweede en hogere-orde effecten van de in dit rapport beschreven mechanismen en ten tweede kan het aantal van invloed zijnde factoren sterk worden uitgebreid.

5.1 TWEEDE-ORDE EFFEKTEN.

Door het consolideren van de laag gesedimenteerd slib neemt de dichtheid toe waardoor een groot aantal grondmechanische constanten een andere waarde krijgen. Het constant veranderen van de dichtheid vereist een continue aanpassing van de constanten zodat er voor iedere van invloed zijnde grootheid een functie gevonden dient te worden die gerelateerd is aan de dichtheid of de porositeit.

Te verwachten is dat naast de cohesie en hoek van inwendige wrijving ook de consolidatieconstanten k_v en C_v veranderen met de dichtheid en rek van het slibpakket.

Tot nu toe is alleen voor de cohesie een vergelijking opgesteld (zie o.a. de Swart (1985)) die een functie is van de dichtheid zodat voor de andere constanten nog literatuurstudies of experimenteel onderzoek moet worden verricht.

Een extra aspect dat de consolidatie beïnvloed is dat in de praktijk de dichtheid van het slib-watermengsel dat boven het slibpakket aanwezig is, groter is dan de dichtheid van zeewater waardoor het ontwijken van water uit de sliblaag

wordt vertraagd zodat ook de consolidatiesnelheid vermindert. Verder vindt er aan het sliboppervlak oppervlakteverdichting plaats waardoor er een fictieve overhoogte aangebracht moet worden zoals in paragraaf 2.6.4 is beschreven.

5.2 EXTRA FACTOREN DIE HET AFSCHUIVEN BEINVLOEDEN.

In dit rapport is het afschuiven van slib vanaf een onderwartertalud onder invloed van het eigengewicht opgenomen. In de praktijk blijkt echter dat er meerdere krachten op het slibpakket werken terwijl het talud waar het slib op ligt meestal geen met de tijd konstante helling bezit.

Naast de schuifspanning die wordt opgewekt door het eigengewicht worden er door de golven, getijstroming en straalstromen van scheepsschroeven extra schuifspanningen op het slibpakket uitgeoefend die het evenwicht beïnvloeden. Eveneens wordt het evenwicht beïnvloed door randverschijnselen zoals knikken in het talud, scheuren in de sliblaag als er afschuiving optreedt en instroming van slib van buiten de vaargeul.

Door de kruipeigenschappen van modder en slib wordt de hellingshoek van het vaargeultalud steeds kleiner zodat de afschuivende kracht die door het eigengewicht van het slib optreedt met het toenemen van de tijd vermindert terwijl altijd de kans aanwezig blijft van volledige afschuiving tengevolge van instabiliteit die door baggerwerkzaamheden wordt veroorzaakt.

Verder heeft het discontinu uitvoeren van onderhoudsbaggerwerk tot gevolg dat zich aan de voet van het talud een bank van afgeschoven slib vormt waardoor er minder vlug afschuiving zal plaats vinden.

Tenslotte beïnvloedt de vaargeulvorm het sedimentatie-

patroon waardoor de twee taluds van de vaargeul ieder hun eigen natuurlijke helling krijgen.

Uit het voorgaande blijkt dat het berekenen van een economische vaargeulvorm nog een grote inspanning vereist op experimenteel en theoretisch gebied.

6. NABESCHOUWING OVER HET AFSCHUIVEN VAN SLIB

Na het doen van experimenten met slib en het uitvoeren van berekeningen met het in dit rapport vermelde computermodel is duidelijk geworden dat met behulp van de Binghamse schuifspanning en de "kantelbak" niet direkt de afschuifhellingshoek en de afschuifspanning bepaald kunnen worden. Het blijkt namelijk dat bepaalde factoren niet constant zijn tijdens het uitvoeren van experimenten zoals hierna kort zal worden toegelicht.

De Binghamse zwichtspanning van een water-slib mengsel wordt bepaald met behulp van een roto-visco meter. Na het vullen van de apparatuur met het mengsel wordt meteen de meting uitgevoerd waardoor de vloeistofeigenschappen nog volledig aanwezig zijn.

De experimenten met de kantelbak echter nemen gemiddeld zestig minuten in beslag zodat de dunne sliblaag al gedeeltelijk kan consolideren. Door het consolideren neemt de opneembare schuifspanning met de tijd toe waardoor de afschuifhelling in de kantelbak tijdsafhankelijk wordt.

Verder wordt de consolidatiegraad beïnvloed door de laagdikte van het slib zodat ook hiermee rekening gehouden moet worden tijdens het uitvoeren van experimenten.

Uit het voorgaande volgt dat tijdens het uitvoeren van proeven met slib ernstig rekening gehouden moet worden met consolidatieverschijnselen zoals het opbouwen van een korrelskelet en toename van de schuifspanning.

7. LITERATUUR

Been, K. and Sills, G.C. (1981)

Self-weight consolidation of soft clays: an experimental and theoretical study.

Geotechnique (31) No.4, 519-535

Gibson, R.E., England, G.L., Hussey, M.J.L. (1967)

The theory of one dimensional consolidation of saturated clays.

Geotechnique (17), 261-273

Gibson, R.E. (1958)

The progress of consolidation in a clay layer increasing in thickness with time.

Geotechnique, blz.171-182

Lee, K. and Sills, G.C. (1981)

The consolidation of a soil stratum, including self-weight effects and large strains.

Numer. and Analyt. Meth. Geomech

Swart, P.F. de (1985)

Stabiliteit van slob op een helling, een onderzoek met slob uit Rotterdam en Guyana.

Delft, afstudeerrapport sectie Kustwaterbouwkunde
afdeling der Civiele Techniek T.H.Delft

Tol, A.F. van, (1985)

Consolidatie en rieping van baggerspecie.

Bouwkunde en Civiele Techniek No.6, 35-42

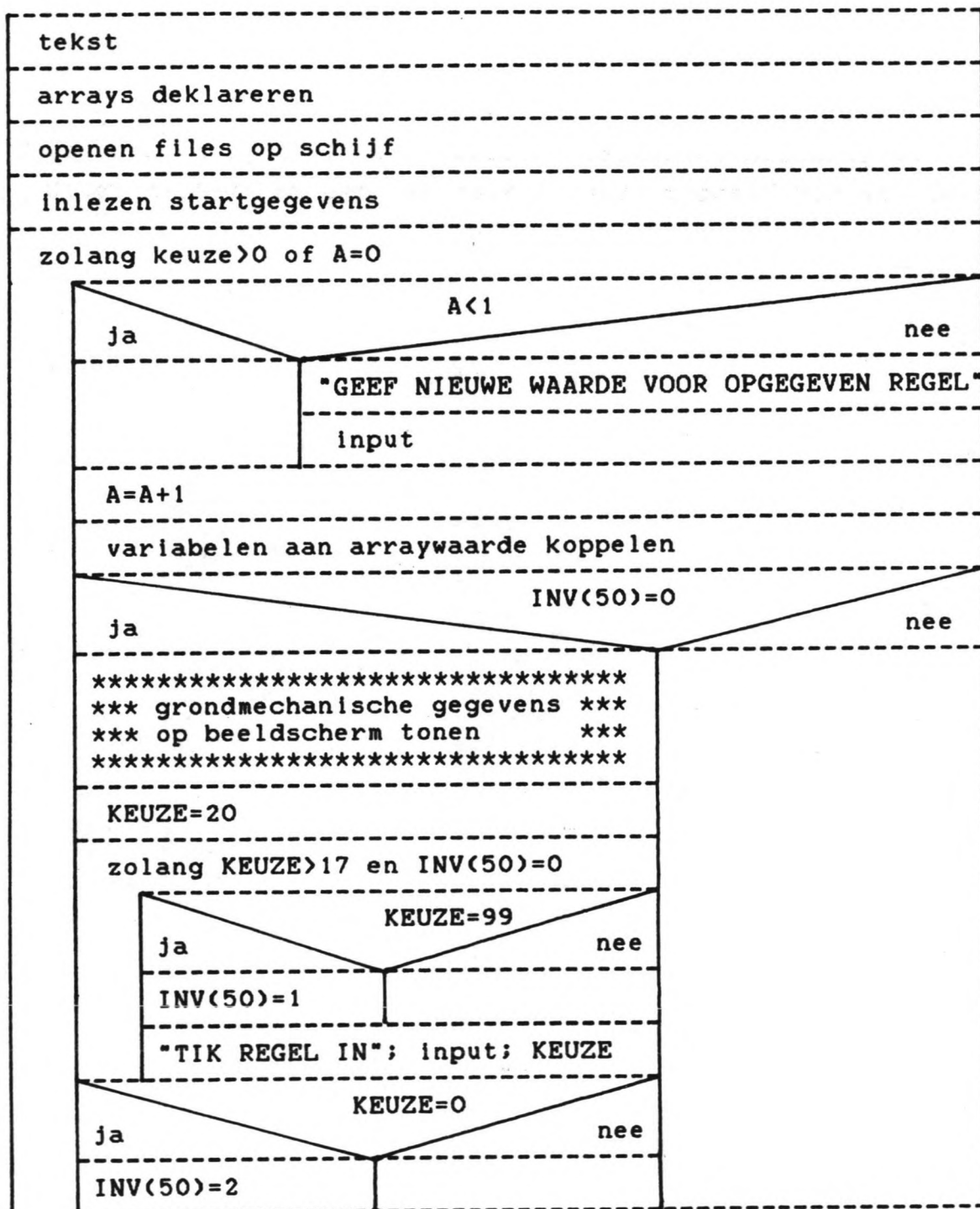
Verruijt, A. (1983)

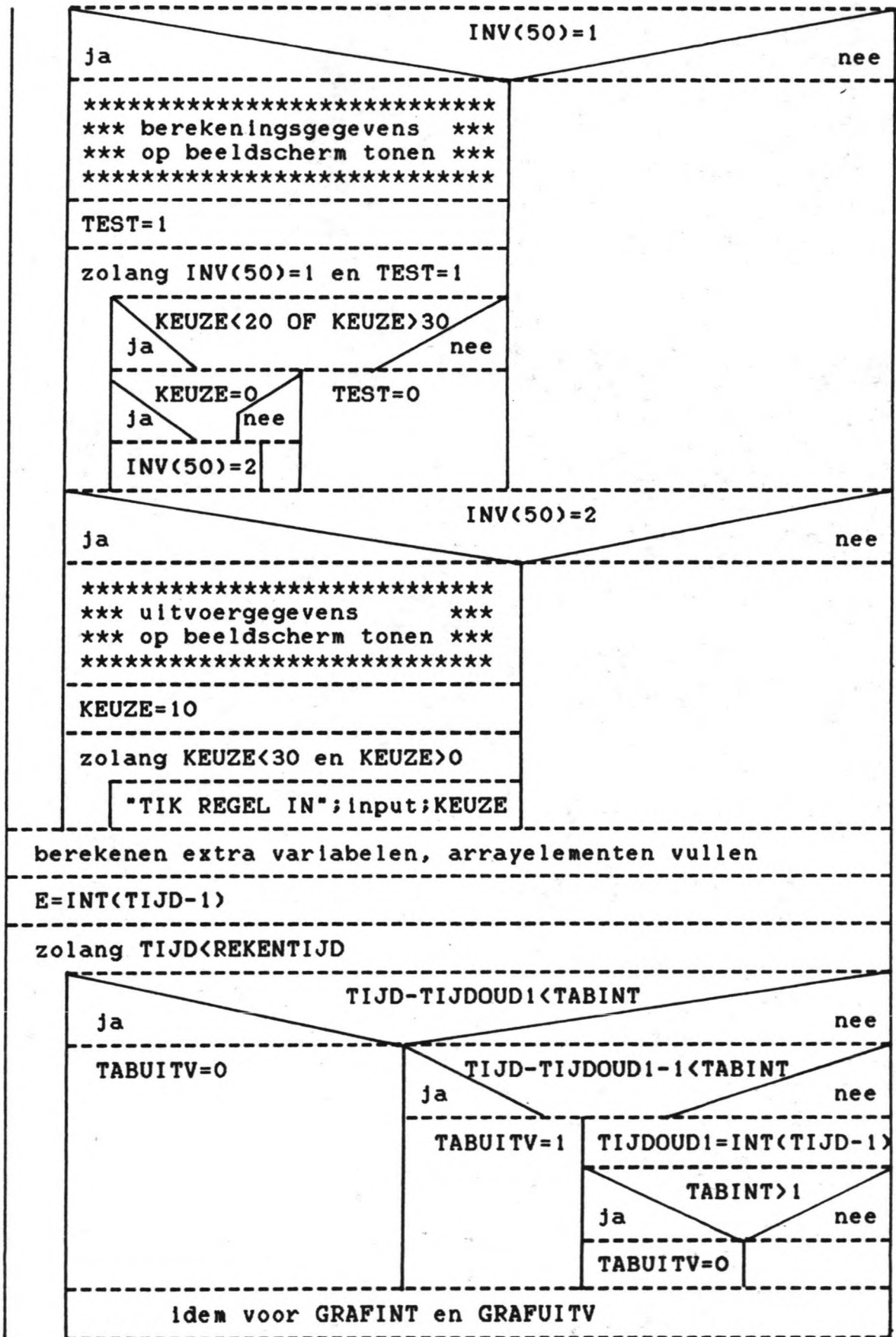
Grondmechanica

Delftse Uitgevers Maatschappij

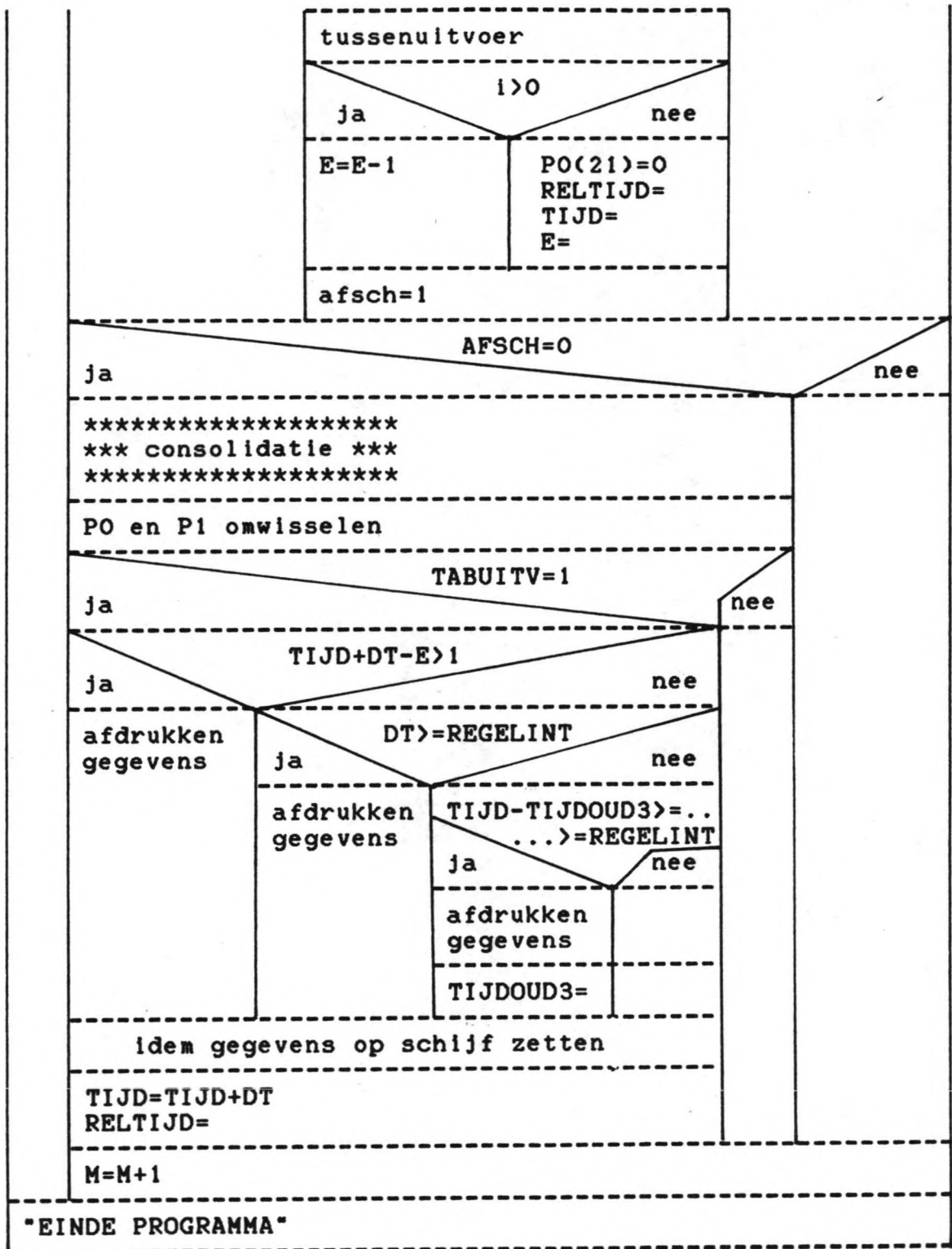
BIJLAGEN: I Struktuurdiagram
 II Computerprogramma CONSOLI
 III Computerprogramma CONGRAF
 IV Computerprogramma's Z1, Z2, Z3

STRUKTUURDIAGRAM: CONSOLI





TIJD-E>=1 (nieuwe dag)	
ja	nee
tussenuitvoer indien gewenst	
E=E+1	
TIJDOUD3=INT(TIJD*REGELS)/REGELS TIJDOUD4=	
LOUD=1 HTOUD=HT	
***** *** stabiliteit *** *****	
***** *** ophogen waterspanningen *** *****	
*** printopdrachten *** *** gegevens op schijf zetten ***	
***** *** interpolatie *** *****	
*** tussenuitvoer ***	
***** *** vervolg interpolatie *** *****	
*** gegevens op beeldscherm ***	
***** *** bepaling kritische helling *** *****	
*** tussenuitvoer ***	
KRHELLING>=HELLING	
ja	nee
WRITE#3 AFSCH=0	variabelen na afschulving nul stellen verminderen spanning
	PO en P1 omwisselen HT= HAFSCH= i=JKR RELTijd=



BIJLAGE II

Computerprogramma CONSOLI

```
1000 CLS
1010 PRINT"*****
****
1020 PRINT"
1030 PRINT"      programmaam: CONSOLI
1040 PRINT"
1050 PRINT"      betreft: sedimentatie en consolidatie van slib waarbij afschuivin
g      vanaf een onderwatertalud optreedt
1060 PRINT"
1070 PRINT"      gemaakt door: P.F. de Swart
1080 PRINT"      februari 1986
1090 PRINT"      Technische Hogeschool te Delft
1100 PRINT"      vakgroep Waterbouwkunde
1110 PRINT"      sectie Geotechniek
1120 PRINT"
1130 PRINT"*****
****
1140 PRINT"
1150 PRINT"Wilt u een aparte DATA-schijf gebruiken, wissel dan nu de PROGRAMMA-s
chijf      voor een DATA-schijf.
1160 PRINT"
1170 PRINT"
1180 PRINT"Raak een willekeurige toets aan om het programma te vervolgen
1190 AS=INPUT$(1)
1200 CLS
1210 DIM P1(100):DIM P0(100):DIM INV(50)
1220 OPEN"O",#1,"consdat1"
1230 OPEN"O",#2,"consdat2"
1240 OPEN"O",#3,"consdat3"
1250 '*****invoeren startgegevens *****
1260 FOR B=1 TO 20
1270   READ INV(B)
1280 NEXT B
1290 DATA 1,2.00,7, 12, 26.5, 10, 0.001, 20, 0.040, 0
1300 DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
1310 DATA 0,5,0.01,0,0,0,0,0,0,1
1320 DATA 1,1,1,5,0,0,10,5,0,0
1330 '***** invoeren van de gegevens *****
1340 A=0
1350 WHILE KEUZE>0 OR A=0
1360   IF A<1 THEN GOTO 1390
1370   PRINT"Geef nieuwe waarde voor gegeven regel (denk om eenheid)"
1380   INPUT;INV(KEUZE)
1390   A=A+1
1400   REKENJAAR=INV(1)
1410   SEDJR      =INV(2)
1420   TALUDHELL=INV(3)
1430   SGNAT     =INV(4)
1440   SGD       =INV(5)
1450   SGW       =INV(6)
1460   CV        =INV(7)
1470   PHI       =INV(8)
```

BIJLAGE II

CONSOLI

```

1480    COHESIE    =INV(9)
1490    I          =INV(21)
1500    MINI      =INV(22)
1510    HO        =INV(23)
1520    TUSUITV1  =INV(30)
1530    TUSUITV2  =INV(31)
1540    TUSUITV3  =INV(32)
1550    TOETS1    =INV(35)
1560    TOETS2    =INV(36)
1570    TABINT    =INV(33)
1580    REGELS    =INV(34)
1590    GRAFINT   =INV(37)
1600    LIJNEN    =INV(38)
1610    IF INV(50)>0 THEN GOTO 1850
1620    CLS
1630    PRINT
1640    PRINT"Grondmechanische gegevens"
1650    PRINT
1660    PRINT"1. Berekeningsperiode                =";USING"#####.### ";REKE
NJAAR;;PRINT"jaar"
1670    PRINT"2. Sedimentatiesnelheid            =";USING"#####.### ";SEDJ
R;;PRINT"meter/jaar"
1680    PRINT"3. Helling van het talud            = 1 op";USING"###.# ";TALU
DHELL
1690    PRINT"4. Soortelijk gewicht nat monster   =";USING"#####.### ";SGNA
T;;PRINT"kN/m3"
1700    PRINT"5. Soortelijk gewicht droog monster =";USING"#####.### ";SGD;
:PRINT"kN/m3"
1710    PRINT"6. Soortelijk gewicht water        =";USING"#####.### ";SGW;
:PRINT"kN/m3"
1720    PRINT"7. Consolidatiefactor Cv           =";USING"####.##### ";CV;;
PRINT"m2/dag"
1730    PRINT"8. Hoek van inwendige wrijving     =";USING"##### ";PHI;
:PRINT"graden"
1740    PRINT"9. Cohesie                          =";USING"#####.### ";COHE
SIE;;PRINT"kN/m2"
1750    KEUZE=20
1760    WHILE KEUZE>17 AND INV(50)=0
1770    PRINT
1780    PRINT"Zijn alle invoergegevens naar uw zin, geef dan return.
        Wilt u een gegeven veranderen, tik dan het betreffende regelnum
mer in."
1790    PRINT"Per keer kan slechts 1 gegeven veranderd worden."
1800    INPUT;KEUZE:PRINT
1810    IF KEUZE=99 THEN INV(50)=1
1820    WEND
1830    IF KEUZE=0 THEN INV(50)=2
1840    IF INV(50)<>1 THEN GOTO 1990
1850    CLS
1860    PRINT
1870    PRINT"Berekenings variabelen"
1880    PRINT

```

BIJLAGE II

CONSOLI

```

1890 PRINT"21. Aantal beginlagen berekening (i) =";USING"##### ";I
1900 PRINT"22. Aantal lagen na afschuiving (min i)=";USING"##### ";MINI
1910 PRINT"23. Laagdikte aanvang berekening h(0) =";USING"##### ";HO;;P
RINT"meters"
1920 TEST=1
1930 WHILE TEST =1 AND INV(50)=1
1940 PRINT
1950 PRINT"Geef het nummer van de regel als u een gegeven wilt veranderen
      Geef return als u niets wilt veranderen
1960 INPUT;KEUZE:PRINT
1970 IF KEUZE>20 AND KEUZE<29 THEN TEST=0 ELSE IF KEUZE=0 THEN INV(50)=
2
1980 WEND
1990 IF INV(50)<2 THEN GOTO 2190
2000 CLS
2010 PRINT
2020 PRINT"Uitvoer van de berekeningsgegevens"
2030 PRINT
2040 PRINT"30. Tussenuitvoer controle parameters =";USING" ##### ";TUS
UITV1;:PRINT" 0=nee 1=ja"
2050 PRINT"31. Tussenuitvoer afschuif gegevens =";USING" ##### ";TUS
UITV2;:PRINT" 0=nee 1=ja"
2060 PRINT"32. Tussenuitvoer na afschuiving =";USING" ##### ";TUS
UITV3;:PRINT" 0=nee 1=ja"
2070 PRINT"33. Tijdsinterval uitvoer op scherm =";USING" ##### ";TABINT
;:PRINT"dagen"
2080 PRINT"34. Aantal regels per dag op scherm =";USING" ##### ";REGELS
2090 PRINT"35. Na iedere dag willekeurige toets =";USING" ##### ";TOE
TS1;:PRINT" 0=nee 1=ja"
2100 PRINT"36. Na iedere afschuiving will. toets =";USING" ##### ";TOE
TS2;:PRINT" 0=nee 1=ja"
2110 PRINT"37. Tijdsinterval uitvoer grafiek 2 =";USING" ##### ";GRAFI
NT;:PRINT"dagen"
2120 PRINT"38. Aantal lijnen in grafiek 2 =";USING" ##### ";LIJNEN
2130 KEUZE=10
2140 WHILE KEUZE<30 AND KEUZE>0
2150 PRINT
2160 PRINT"Tik de door u te veranderen regel in.
      Geef return als u niets wilt veranderen."
2170 INPUT;KEUZE:PRINT
2180 WEND
2190 WEND
2200
2210 /*****berekening extra variabelen*****/
2220 REKENTIJD=REKENJAAR*365
2230 REGELINT=1/REGELS
2240 LIJNINT=1/LIJNEN
2250 HOO=SEDJR*REKENJAAR
2260 HELLING=1/TALUDHELL
2270 PHIRAD=PHI*6.2832/360
2280 TANPHI=PHIRAD+.33333*(PHIRAD)^3+2/15*(PHIRAD)^5
2290 TIJD=HO*REKENTIJD/HOO

```

BIJLAGE II

CONSOLI

```

2300 RELTIJD=TIJD
2310 INV(41)=REKENTIJ
2320 INV(42)=HOO
2330 INV(43)=HELLING
2340 E=(INT(TIJD)-1)
2350 FOR A=1 TO 3
2360     FOR B=1 TO 50
2370         WRITE#A,INV(B)
2380     NEXT B
2390 NEXT A
2400 CLS
2410
2420 ***** rekenlus *****
2430 WHILE TIJD<INT(REKENTIJ+1)
2440
2450 ***** bepaling variabelen t.b.v. de uitvoer *****
2460     IF TIJD-TIJDOUD1<TABINT THEN TABUITV=0 ELSE IF TIJD-TIJDOUD1-1<TABINT TH
EN TABUITV=1 ELSE TIJDOUD1=INT(TIJD-1):IF TABINT>1 THEN TABUITV=0
2470     IF TIJD-TIJDOUD2<GRAFINT THEN GRAFUITV=0 ELSE IF TIJD-TIJDOUD2-1<GRAFINT
THEN GRAFUITV=1 ELSE TIJDOUD2=INT(TIJD-1):IF GRAFINT>1 THEN GRAFUITV=0
2480     IF TABUITV=0 AND INT(M/5)-MM>=1 THEN MM=MM+1:PRINT"";
2490
2500 ***** aanvang nieuwe dag: vergroting laagdikte slib *****
2510     IF TIJD-E<1 THEN GOTO 3950
2520     PRINT
2530     IF TOETS1=1 THEN PRINT"raad een willekeurige toets aan om de berekeni
ng te vervolgen" ELSE GOTO 2550
2540     AS=INPUT$(1)
2550     CLS
2560     IF TABUITV=0 THEN PRINT:PRINT:PRINT"          dag=";INT(TIJD)
2570     E=E+1
2580     TIJDOUD3=INT(TIJD*REGELS)/REGELS
2590     TIJDOUD4=INT(TIJD*LIJNEN)/LIJNEN
2600     IOUD=I: HTOUD=HT:
2610
2620 ***** stabiliteit numerieke berekening *****
2630     HT=RELTIJ*SEDJR/365
2640     IF I<MINI THEN I=MINI
2650     DT=HT*HT/(3*CV*I*I)
2660     WHILE DT>.05 AND I<20
2670         I=I+1
2680         DT=HT*HT/(3*CV*I*I)
2690     WEND
2700     IF DT>.2 THEN DT=.2
2710     ALPHA=CV*DT*I*I/(HT*HT)
2720
2730 ***** ophogen waterspanning *****
2740     FOR J=21-IOUD TO 21+IOUD
2750         P0(J)=P0(J)+((SGNAT-SGW)*(HT-HTOUD))
2760     NEXT J
2770

```

BIJLAGE II

CONSOLI

```

2780 /***** gegevensafdrukken na ophoging *****/
2790 IF TABUITV=0 THEN GOTO 2870
2800 PRINT
2810 PRINT "aantal    tijd relatieve hoogte    waterspanningen"
2820 PRINT "stappen    tijd    sliblaag    onderkant
      bovenkant"
2830 PRINT "          [dagen] [dagen]    [m]          0 Ht  0.2Ht  0.4Ht  0.6
Ht  0.8Ht  1.0Ht"
2840 PRINT "-----"
2850 GOSUB 4230
2860 /
2870 /***** gegevens op schijf zetten na ophoging *****/
2880 IF GRAFUITV=0 THEN GOTO 2920
2890 WRITE#2,P0(21);TIJD;RELTijd;HT;HTOUD;I;IOUD
2900 GOSUB 4350
2910 /
2920 /***** tussenuitvoer *****/
2930 IF TUSUITV1<1 GOTO 2970
2940 PRINT
2950 PRINT "          e=";USING"#### ";E;:PRINT "          i=";USING"## ";I;:
PRINT "          dt=";USING"#.#### ";DT;:PRINT "          alpha=";USING"#.#### ";ALPHA;
2960 /
2970 /***** interpolatie van waterspanningen voor nieuwe laagdikte *****/
2980 /***** oude waterspanningsfiguur *****/
2990 J=0
3000 FOR H=1 TO IOUD
3010 WHILE (J*HT/I)<(H*HTOUD/IOUD)
3020 JJ=J+21: H0=H+21: Hm1=H+20
3030 P1(JJ)=P0(Hm1)+((J*HT/I)-((H-1)*HTOUD/IOUD))*(P0(H0)-P0(Hm1))/(
HTOUD/IOUD)
3040 JJJ=21-J: P1(JJJ)=P1(JJ)
3050 J=J+1
3060 WEND
3070 NEXT H
3080 /
3090 /***** controle interpolatie *****/
3100 IF TUSUITV1=1 THEN PRINT "          j= ";J:PRINT
3110 /***** extra driehoeks interpolatie *****/
3120 JOUD=IOUD+21
3130 WHILE J<I
3140 JJ=21+J
3150 JJJ=21-J
3160 P1(JJ)=((I-J)*HT/I)*P0(JOUD)/(HT-HTOUD)
3170 P1(JJJ)=P1(JJ)
3180 J=J+1
3190 WEND
3200 FOR J=21-I TO 21+I
3210 P0(J)=P1(J)
3220 NEXT J
3230 /

```

BIJLAGE II

CONSOLI

```
3240 /***** gegevens op beeldscherm na interpolatie *****/
3250 IF TABUITV=1 THEN GOSUB 4240 ELSE GOTO 3270
3260 /
3270 /***** gegevens op schijf zetten na interpolatie *****/
3280 IF GRAFUITV=1 THEN GOSUB 4350 ELSE GOTO 3290
3290 /
3300 /***** bepaling kritische helling *****/
3310 KRRAAKLIJN=1000
3320 FOR J=0 TO I-1
3330 JJP=21+J
3340 KORRELSP=((I-J)*HT*(SGNAT-SGW)/I)-P0(JJP)
3350 TAUOPN=COHESIE+KORRELSP*TANPHI
3360 RAAKLIJN=(TAUOPN*I)/((I-J)*HT)
3370 IF RAAKLIJN>KRRAAKLIJN THEN GOTO 3440
3380 KRRAAKLIJN=RAAKLIJN
3390 KRTAUOPN=TAUOPN
3400 HTKR=HT
3410 JKR=J
3420 HKR=((I-JKR)/I)*HTKR
3430 KRHELLING=KRTAUOPN/((SGNAT-SGW)*HKR)
3440 NEXT J
3450 /
3460 /***** tussenuitvoer afschuiving *****/
3470 IF TUSUITV2<1 THEN GOTO 3530
3480 PRINT
3490 PRINT" De aanwezige helling =";USING"###.### ";HELLING ;:PRINT" d
at is 1 op";USING"###.###";1/HELLING
3500 PRINT" De kritische helling =";USING"###.### ";KRHELLING;:PRINT" d
at is 1 op";USING"###.###";1/KRHELLING:PRINT" De afschuivende hoogte = ";USING"
###.###";HKR;:PRINT" meters
3510 PRINT
3520 /
3530 /***** afschuivingskriterium *****/
3540 IF KRHELLING>=HELLING THEN AFSCH=0:WRITE#3,TIJD;I;KRHELLING:GOTO 3950
3550 /
3560 /***** bepaling variabelen na afschuiving *****/
3570 WRITE#1,TIJD;HT
3580 FOR J=0 TO I+1
3590 JJP=21+J
3600 JJM=21-J
3610 JJKR=JKR+21
3620 IF J>JKR THEN GOTO 3660
3630 P1(JJP)=P0(JJP)-P0(JJKR)
3640 P1(JJM)=P0(JJM)-P0(JJKR)
3650 GOTO 3680
3660 P1(JJP)=0
3670 P1(JJM)=0
3680 NEXT J
3690 FOR J=21-I TO 21+I
3700 P0(J)=P1(J)
3710 NEXT J
3720 IF GRAFUITV=1 THEN WRITE#2,1000
```

BIJLAGE II

CONSOLI

```

3730      HT=HT-HKR
3740      HAFSCH=HAFSCH+HKR
3750      I=JKR
3760      RELTIJD=HT*REKENTIJD/HOO
3770      WRITE#1,TIJD;HT
3780
3790 /***** tussenuitvoer na afschuiving *****/
3800      IF TUSUITV3<1 THEN GOTO 3870
3810      PRINT "AFSCHUIVING":PRINT"ht na afschuiving=";USING"###.###  "
;HT:PRINT"Afgeschoven laagdikte tot nu toe=";USING"###.###  ";HAFSCH:PRINT"reldi
jd=";USING"###.###";RELTIJ
3820
3830      IF TOETS2=1 THEN PRINT"raak een willekeurige toets aan om de berek
ening te vervolgen" ELSE GOTO 3870
3840      AS=INPUT$(1)
3850
3860 /***** variabelen als totale laag afgeschoven is *****/
3870      IF I>0 THEN E=E-1:GOTO 3920
3880      P0(21)=0
3890      RELTIJD=HO*REKENTIJD/HOO
3900      TIJD=TIJD+RELTIJ
3910      E=INT(TIJD-1)
3920      AANTAFSCH=AANTAFSCH+1
3930      AFSCH=1
3940
3950 /***** consolidatie *****/
3960      IF AFSCH=1 THEN GOTO 4160
3970      FOR J=-I+1 TO I-1
3980          JJ=J+21: JJM1=J+20: JJP1=J+22
3990          P1(JJ)=P0(JJ)+ALPHA*(P0(JJM1)-2*P0(JJ)+P0(JJP1))
4000      NEXT J
4010      FOR J=21-I TO 21+I
4020          P0(J)=P1(J)
4030      NEXT J
4040
4050 /***** gegevens op beeldscherm na consolidatie *****/
4060      IF TABUITV=0 THEN GOTO 4090
4070      IF TIJD+DT-E>1 THEN GOSUB 4230 ELSE IF DT>=REGELINT THEN GOSUB 423
0 ELSE IF TIJD-TIJDOUD3>=REGELINT THEN GOSUB 4230:TIJDOUD3=TIJDOUD3+REGELINT
4080
4090 /***** waterspanningen op schijf zetten na consolidatie *****/
4100      IF GRAFUITV=0 THEN GOTO 4130
4110      IF TIJD+DT-E>1 THEN GOSUB 4350:WRITE#2,1000 ELSE IF DT>=LIJNINT TH
EN GOSUB 4350 ELSE IF TIJD-TIJDOUD4>=LIJNINT THEN GOSUB 4350:TIJDOUD4=TIJDOUD4+L
IJNINT
4120
4130 /***** vergroting tijdsvariabelen *****/
4140      TIJD=TIJD+DT
4150      RELTIJD=RELTIJ+DT
4160      M=M+1
4170 WEND

```

CONSOLI

BIJLAGE II

```
4180 WRITE#1,TIJD;HT
4190 WRITE#2,1000,0,0,0,0,0,0,1000
4200 PRINT:PRINT"EINDE PROGRAMMA"
4210 END
4220 /
4230 /***** SUBROUTINE: waterspanningen weergeven op beeldscherm *****/
4240 PRINT USING"####";M;:PRINT USING"#####.##";TIJD;:PRINT USING"#####.##"
;RELTijd;:
4250 PRINT USING"#####.##";HT;
4260 PRINT" ";
4270 FOR G=0 TO 5
4280 K=INT((G/5)*I+.5)+21
4290 PRINT USING"#####.##";P0(K);:
4300 NEXT G
4310 PRINT" ";
4320 RETURN
4330 /***** einde subroutine *****/
4340 /
4350 /***** SUBROUTINE: waterspanningen op schijf zetten *****/
4360 FOR L=21 TO I+21
4370 WRITE#2,P0(L)
4380 NEXT L
4390 RETURN
4400 /***** einde subroutine *****/
```

BIJLAGE III

Computerprogramma CONGRAF

```
1000 DIM INV(50),PO(50)
1010 CLS
1020 PRINT"*****"
****
1030 PRINT"    programmaam: CONGRAF"
1040 PRINT"
1050 PRINT"    betreft: Drie grafieken die het berekeningsverloop van het
        CONSOLI-programma weergeven.
1060 PRINT"*****"
****
1070 PRINT
1080 PRINT"    Heeft u een DATA-schijf gebruikt ?  Verwissel de schijf nu.
        Voor het CONSOLI-programma moet de oude schijf weer gebruikt worden
.
1090 PRINT
1100 PRINT"    Indien u een afdruk van een van de grafieken wilt maken dan moet u
voordat      u GWBASIC intikt eerst GRAPHICS intikken waarna u met een Olivetti
of IBM       een screen print maakt.
1110 PRINT
1120 PRINT
1130 PRINT"    Welke grafiek wilt u zien ?"
1140 PRINT"        1) Verloop van de laagdikte
1150 PRINT"        2) Verloop van de waterspanningen
1160 PRINT"        3) Verloop van de kritische hellingen
1170 PRINT"        4) einde programma
1180 PRINT"
1190 PRINT"    Tik het door u gewenste getal in en geef RETURN
1200 INPUT;DUMMY
1210 OPEN"i",#1,"consdat1"
1220 FOR A=1 TO 50
1230     INPUT#1,INV(A)
1240 NEXT A
1250 CLOSE#1
1260 REKENJAAR=INV(1)
1270 SEDJR     =INV(2)
1280 TALUDHELL=INV(3)
1290 SGNAT     =INV(4)
1300 SGD       =INV(5)
1310 SGW       =INV(6)
1320 CV        =INV(7)
1330 PHI       =INV(8)
1340 COHESIE   =INV(9)
1350 I         =INV(21)
1360 MINI      =INV(22)
1370 HO        =INV(23)
1380 TUSUITV1  =INV(30)
1390 TUSUITV2  =INV(31)
1400 TUSUITV3  =INV(32)
1410 TOETS1    =INV(35)
1420 TOETS2    =INV(36)
1430 TABINT    =INV(33)
1440 REGELS    =INV(34)
```

BIJLAGE III

CONGRAF

```
1450 GRAFINT =INV(37)
1460 LIJNEN =INV(38)
1470 REKENTIJD=INV(41)
1480 HOO =INV(42)
1490 HELLING =INV(43)
1500 IF DUMMY=1 THEN GOSUB 1550
1510 IF DUMMY=2 THEN GOSUB 2340
1520 IF DUMMY=3 THEN GOSUB 3290
1530 IF DUMMY=4 THEN CLS:PRINT:PRINT:PRINT"Bedankt voor uw aandacht.":END
1540 IF DUMMY<1 OR DUMMY>4 THEN GOTO 1010
1550 CLS
1560 VIEW PRINT
1570 PRINT"*****
****
1580 PRINT"
1590 PRINT"      programmadeel: CONHT
1600 PRINT"
1610 PRINT"      betreft: grafiek van het verloop van de laagdikte gedurende de
      berekeningsperiode, inclusief afschuivingen
1620 PRINT"
1630 PRINT"      gemaakt door: P.F. de Swart
1640 PRINT"                      februari 1986
1650 PRINT"                      Technische Hogeschool te Delft
1660 PRINT"                      vakgroep Waterbouwkunde
1670 PRINT"                      sectie Geotechniek
1680 PRINT"
1690 PRINT"*****
****
1700 PRINT"
1710 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
1720 PRINT"Raak een willekeurige toets om de grafiek te zien.
1730 XXS=INPUT$(1)
1740 VIEW PRINT
1750 CLS
1760 OPEN"i",#1,"consdat1"
1770 FOR A=1 TO 50
1780     INPUT#1,INV(A)
1790 NEXT A
1800 '
1810 '***** afdrukken laagdiktes *****
1820 XAS=500
1830 ZAS=250
1840 DSTREEP=REKENTIJD/5
1850 CLS
1860 SCREEN 3
1870 VIEW(54,18)-(630,340)
1880 PRINT"laagdikte h(t)          Grafiek 1. Verloop van de laagdikte gedurende de
      berekening"
1890 PRINT"                      [m]"
1900 PRINT SPC(40)" "
1910 PRINT SPC(11)"aanwezige helling = 1 op";:PRINT USING"###";TALUDHELL
1920 PRINT SPC(11)"sedjr          = ";USING"###.##";SEDJR;:PRINT" m/jr"
```

CONGRAF

BIJLAGE III

```

1930 PRINT USING"###.##";HOO;:PRINT"      s.g.nat  = ";USING"###.##";SGNAT;:PRIN
T" kN/m3"
1940 PRINT SPC(11)"s.g.droog =" ;USING" ###.##";SGD  ;:PRINT" kN/m3
1950 PRINT SPC(11)"s.g.water =" ;USING" ###.##";SGW  ;:PRINT" kN/m3
1960 PRINT SPC(11)"Cv      =" ;USING"###.#####";CV   ;:PRINT" m2/dag
1970 PRINT SPC(11)"phi      =" ;USING"#####";PHI   ;:PRINT" graden
1980 PRINT SPC(11)"cohesie  =" ;USING"###.#####";COHESIE;:PRINT" kN/m2
1990 PRINT:PRINT:PRINT USING"###.##";.5*HOO
2000 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
2010 PRINT SPC(68)"tijd [dagen]"
2020 PRINT" 0"
2030 PRINT SPC(6)"0";
2040 FOR C=1 TO 5
2050     STAP=C*DSTREEP
2060     PRINT USING"#####";STAP;:
2070 NEXT C
2080 LINE(0,0)-(0,320)
2090 LINE(0,320)-(530,320)
2100 FOR B=1 TO 5
2110     X2=B*XAS/5
2120     LINE(X2,320)-(X2,315)
2130 NEXT B
2140 LINE(0,70)-(5,70)
2150 LINE(0,195)-(5,195)
2160 LINE(XAS,70)-(0,320)
2170 X10=0
2180 Z10=320
2190 FOR A=1 TO 100000!
2200     IF EOF(1) THEN A=100000!:GOTO 2270
2210     INPUT#1,TIJD,HT
2220     X1=INT(TIJD*XAS/REKENTIJD+.5)
2230     Z1=320-INT(HT*ZAS/HOO+.5)
2240     LINE (X10,Z10)-(X1,Z1)
2250     X10=X1
2260     Z10=Z1
2270 NEXT A
2280 AS=INPUT$(1)
2290 VIEW(0,0)-(639,399)
2300 VIEW PRINT
2310 DUMMY=0
2320 CLOSE#1
2330 RETURN
2340 CLS
2350 VIEW PRINT
2360 PRINT"*****
****
2370 PRINT"
2380 PRINT"      programmadeel: CONWSP
2390 PRINT"
2400 PRINT"      betreft: grafiek van het verloop van de waterspanningen gedurende
      een dag nadat de laagdikte vergroot is
2410 PRINT"

```

BIJLAGE III

CONGRAF

```

2420 PRINT"          gemaakt door: P.F. de Swart
2430 PRINT"          februari 1986
2440 PRINT"          Technische Hogeschool te Delft
2450 PRINT"          vakgroep Waterbouwkunde
2460 PRINT"          sectie Geotechniek
2470 PRINT"
2480 PRINT"*****
****
2490 PRINT"
2500 PRINT"U kunt alle waterspanningen bekijken door na iedere voltooide grafiek
2510 PRINT"een willekeurige letter of de spatie toets aan te raken.
2520 PRINT:PRINT
2530 PRINT"U kunt het programma onderbreken door het getal 7 in te tikken.
2540 PRINT
2550 PRINT"Raak een willekeurige toets aan
2560 X$=INPUT$(1)
2570 VIEW PRINT
2580 CLS
2590 OPEN"i",#2,"consdat2"
2600 FOR A=1 TO 50
2610     INPUT#2,INV(A)
2620 NEXT A
2630 '
2640 '***** afdrukken verloop waterspanningen gedurende 1 dag *****
2650 BEGINTIJD=HO*REKENTIJD/HOO
2660 XAS=300
2670 ZAS=250
2680 FOR D=1 TO 100000!
2690     CLS
2700     SCREEN 3
2710     VIEW(54,18)-(630,340)
2720     IF EOF(2) THEN D=100000!:GOTO 3230
2730     INPUT#2,PAS,TIJD,RELTijd,HT,HTOUD,I,IOUD
2740     PRINT"laagdikte h(t)      Grafiek 2. Verloop van de waterspanningen gedure
nde 1 dag"
2750     PRINT:PRINT
2760     PRINT SPC(12)"h(t)  = ";USING"###.###";HT;:PRINT" meter";:PRINT SPC(17)"
tijd
        =";USING"#####";TIJD;:PRINT" dagen
2770     PRINT SPC(50)"berek. duur  =";USING"#####";REKENTIJD;:PRINT" dagen
2780     PRINT"1.0 HT";:PRINT SPC(44)"talud helling= 1 op";USING"###.##";TALUDHELL
2790     PRINT SPC(50)"sedimentatie = ";USING"###.## ";SEDJR;:PRINT"m/jr
2800     PRINT SPC(50)"s.g.nat      = ";USING"###.## ";SGNAT;:PRINT"kn/m3
2810     PRINT SPC(50)"s.g.droog    = ";USING"###.## ";SGD ;:PRINT"kn/m3
2820     PRINT SPC(50)"s.g.water    = ";USING"###.## ";SGW ;:PRINT"kn/m3
2830     PRINT SPC(50)"Cv           = ";USING"#.##### ";CV ;:PRINT"m2/dag
2840     PRINT SPC(50)"phi          = ";USING"##### ";PHI ;:PRINT"graden
2850     PRINT SPC(50)"cohesie      = ";USING"#.##### ";COHESIE;:PRINT"kn/m2
2860     PRINT"0.5 HT"
2870     PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:
2880     PRINT SPC(59)"waterspanning [kn/m2]"
2890     PRINT" 0.00"
2900     PRINT SPC(6)"0";

```

BIJLAGE III

CONGRAF

```
2910 PRINT USING"                *****.***";PAS
2920 PRINT
2930 LINE(0,0)-(0,320)
2940 LINE(0,320)-(530,320)
2950 FOR B=1 TO 2
2960     X2=B*XAS/2
2970     LINE(X2,320)-(X2,315)
2980 NEXT B
2990 FOR C=1 TO I
3000     Z2=320-INT(C*ZAS/I+.5)
3010     LINE(0,Z2)-(5,Z2)
3020 NEXT C
3030 LINE(0,70)-(10,70)
3040 LINE(0,195)-(10,195)
3050 FOR A=0 TO 100000!
3060     IF A>0 THEN ZAS2=ZAS ELSE IF IOUD>0 THEN ZAS2=I*HTOUD*ZAS/(HT*IOUD) E
LSE ZAS2=0
3070     FOR P=0 TO I
3080         INPUT#2,P0(P)
3090         IF P=I AND I>IOUD THEN IF A=0 GOTO 3170
3100         IF P0(P)>999 THEN P=I+1:A=100001!:GOTO 3170
3110         X1=INT(P0(P)/PAS*XAS+.5)
3120         Z1=320-INT(P*ZAS2/I+.5)
3130         IF P=0 THEN GOTO 3150
3140         LINE(X10,Z10)-(X1,Z1)
3150         X10=X1
3160         Z10=Z1
3170     NEXT P
3180     IF A=0 THEN LINE(X10,Z10)-(0,70)
3190 NEXT A
3200 AS=INPUT$(1)
3210 AAA=VAL(AS)
3220 IF AAA=7 THEN A=100000!:D=100000!
3230 VIEW(0,0)-(639,399)
3240 NEXT D
3250 VIEW PRINT
3260 DUMMY=0
3270 CLOSE#2
3280 RETURN
3290 CLS
3300 VIEW PRINT
3310 PRINT"*****
****
3320 PRINT"
3330 PRINT"    programmadeel: CONHELL
3340 PRINT"
3350 PRINT"    betreft: grafiek van de opneembare en de aanwezige helling voor e
en
3360 PRINT"
3370 PRINT"    gemaakt door: P.F. de Swart
3380 PRINT"    februari 1986
3390 PRINT"    Technische Hogeschool te Delft
```

BIJLAGE III

CONGRAF

```
3400 PRINT"                                vakgroep Waterbouwkunde
3410 PRINT"                                sectie Geotechniek
3420 PRINT"
3430 PRINT"*****
****
3440 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
3450 PRINT"Raak een willekeurige toets aan om de grafiek te zien
3460 AS=INPUT$(1)
3470 VIEW PRINT
3480 CLS
3490 OPEN"i",#3,"consdat3"
3500 FOR A=1 TO 50
3510     INPUT#3,INV(A)
3520 NEXT A
3530 '
3540 '***** afdrukken opneembare en aanwezige helling *****
3550 BEGINTIJD=HO*REKENTIJD/HOO
3560 XAS=500
3570 ZAS=250/(4*HELLING)
3580 DSTREEP=REKENTIJD/5
3590 CLS
3600 SCREEN 3
3610 VIEW(54,18)-(630,340)
3620 PRINT"    helling [-]                Grafiek 3. Verloop van de opneembare en aanwez
ige helling"
3630 PRINT:PRINT:PRINT SPC(52)"aanwezige helling = 1 op";:PRINT USING"###";TALUD
HELL
3640 PRINT SPC(52)"sedimentatie = ";USING"###.## ";SEDJR;:PRINT"m/jr
3650 PRINT USING"###";4*HELLING*100;:PRINT" %";:PRINT SPC(47)"s.g.nat      = ";U
SING"###.## ";SGNAT;:PRINT"kn/m3
3660 PRINT SPC(52)"s.g.droog      = ";USING"###.## ";SGD ;:PRINT"kn/m3
3670 PRINT SPC(52)"s.g.water      = ";USING"###.## ";SGW ;:PRINT"kn/m3
3680 PRINT SPC(52)"Cv              = ";USING"##### ";CV ;:PRINT"m2/dag
3690 PRINT SPC(52)"phi             = ";USING"##### ";PHI ;:PRINT"graden
3700 PRINT SPC(52)"cohesie         = ";USING"##### ";COHESIE ;:PRINT"kn/m2
3710 PRINT:PRINT:PRINT USING"###";2*HELLING*100;:PRINT" %"
3720 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT USING"###";HELLING*100;:PRINT" %"
3730 PRINT:PRINT
3740 PRINT SPC(68)"tijd [dagen]"
3750 PRINT"    0"
3760 PRINT SPC(6)"0";
3770 FOR C=1 TO 5
3780     STAP=C*DSTREEP
3790     PRINT USING"#####";STAP;:
3800 NEXT C
3810 LINE(0,0)-(0,320)
3820 LINE(0,320)-(530,320)
3830 FOR B=1 TO 5
3840     X2=B*XAS/5
3850     LINE(X2,320)-(X2,315)
3860 NEXT B
3870 LINE(0,70)-(5,70)
```

CONGRAF

BIJLAGE III

```
3880 LINE(0,195)-(5,195)
3890 LINE(0,257)-(XAS,257)
3900 PRINT
3910 FOR A=1 TO 100000!
3920     IF EOF(3) THEN A=100000!::GOTO 4000
3930     INPUT#3, TIJD, I, KRHELLING
3940     X1=INT(TIJD*XAS/REKENTIJD+.5)
3950     Z1=320-INT(KRHELLING*ZAS+.5)
3960     IF TIJD<INT(BEGINTIJD+1) THEN GOTO 3980
3970     LINE (X10,Z10)-(X1,Z1)
3980     X10=X1
3990     Z10=Z1
4000 NEXT A
4010 AS=INPUT$(1)
4020 VIEW(0,0)-(639,399)
4030 VIEW PRINT
4040 DUMMY=0
4050 CLOSE#3
4060 RETURN
```

BIJLAGE IV

Computerprogramma Z1

```
100 PRINT" Dit is het Z1 programma.
110 PRINT" Hiermee kunt u alle schijfgegevens die voor grafiek 1 gebruikt zijn
    aflezen.
120 PRINT:PRINT:PRINT
130 DIM INV(50)
140 OPEN"I",#1,"consdat1"
150 FOR A=1 TO 50
160 INPUT#1,INV(A)
170 NEXT A
180 FOR A=0 TO 40 STEP 10
190     FOR B=1 TO 10
200         PRINT INV(A+B);
210     NEXT B
220 PRINT
230 NEXT A
240 FOR A=1 TO 10000
250     INPUT#1,TIJD,I
260     PRINT USING"####.##  ";TIJD;:PRINT USING"####.### ";I
270 NEXT A
```

Computerprogramma Z3

```
100 PRINT"Dit is het Z3-programma waarmee u alle schijfgegevens kunt uitlezen di
e      voor grafiek 3 gebruikt zijn
110 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
120 DIM INV(50)
130 OPEN"I",#3,"consdat3"
140 FOR A=1 TO 50
150 INPUT#3,INV(A)
160 NEXT A
170 FOR A=0 TO 40 STEP 10
180     FOR B=1 TO 10
190         PRINT INV(A+B);
200     NEXT B
210 PRINT
220 NEXT A
230 FOR A=1 TO 10000
240     INPUT#3,TIJD,I,XX
250     PRINT USING"####.##  ";TIJD;:PRINT USING"####  ";I;
260     PRINT USING"###.####  ";XX
270 NEXT A
```

Computerprogramma Z2

```
1000 PRINT" Dit is het Z2-programma waarmee u alle schijfgegevens kunt uitlezen
die      voor grafiek 2 gebruikt zijn.
1010 PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
1020 DIM INV(50)
1030 OPEN"I",#2,"consd2"
1040 FOR A=1 TO 50
1050     INPUT#2,INV(A)
1060 NEXT A
1070 FOR A=0 TO 40 STEP 10
1080     FOR B=1 TO 10
1090         PRINT INV(A+B);
1100     NEXT B
1110 PRINT
1120 NEXT A
1130 FOR A=1 TO 10000
1140 AS=INPUT$(1)
1150     INPUT#2,P0(0),TIJD,RELTijd,HT,HTOUD,I,IOUD
1160     PRINT:PRINT"lus A";
1170     PRINT USING"#####.## " ;TIJD;;PRINT USING"#####.## " ;RELTijd;;
1180     PRINT USING"###.### " ;HT;;PRINT USING"###.### " ;HTOUD;
1190     PRINT USING"##### " ;I;;PRINT USING"### " ;IOUD;;PRINT INV(38)
1200     FOR B=1 TO 10000
1210         PRINT
1220         FOR C=0 TO I
1230             INPUT#2,P0(C)
1240             IF P0(C)=1000 THEN C=I:B=10000:GOTO 1260
1250             PRINT USING"###.### " ;P0(C);
1260         NEXT C
1270     NEXT B
1280 NEXT A
```