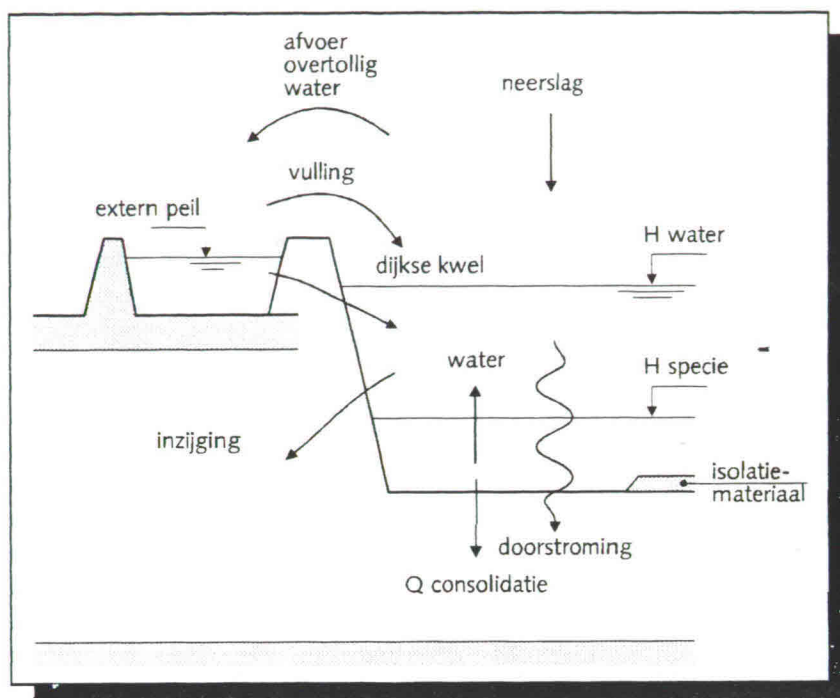


Consolidatie aspecten bij het ontwerp van bergingslocaties voor verontreinigde baggerspecie

Afstudeerverslag

Augustus 1997

L.W.A. Zwang



Afstudeerverslag

*Consolidatie aspecten bij het ontwerp van bergingslocaties
voor verontreinigde baggerspecie*

afstudeeronderzoek L.W.A. Zwang

augustus 1997

Inhoudsopgave

Voorwoord	v
Samenvatting	vi
1 Inleiding	
1.1 Probleem- en doelstelling afstudeeronderzoek	1
1.2 Rapportage	2
2 Toepassing finite strain theorie	
2.1 Algemene inleiding finite strain theorie	3
2.2 Coördinatenstelsel	3
2.2.1 Beschrijving coördinatenstelsel	3
2.2.2 Coördinatenstelsels uit andere publikaties	4
2.3 Differentiaalvergelijking consolidatie gashoudend slib	5
2.3.1 Toepassing één-dimensionale consolidatie theorie volgens Gibson	5
2.3.2 Basisvergelijkingen (volgens Wichman (1996b))	7
2.3.3 Vergelijking afleiding basisvergelijkingen voor verzadigd geval	8
2.3.4 Afleiding finite strain differentiaalvergelijking (volgens Wichman (1996a))	11
2.4 Discretisatie	11
2.4.1 Roosterverfijning	11
2.4.2 Discretisatie finite strain differentiaalvergelijking	12
2.4.3 Berekening van e_s	14
2.5 Stabiliteit	15
2.6 Randvoorwaarden	15
2.6.1 Gedraineerde rand	15
2.6.2 Bovenrand in depositieperiode	16
2.6.3 Ongedraineerde rand	17
2.6.4 Ongedraineerde onderrand	17
2.7 Inpassing randvoorwaarden in differentieschema	20
3 Parameterbepaling	
3.1 HYDCON-procedure	22
3.2 Meetopstellingen	22
3.2.1 Kolomproef	22
3.2.2 HYDCON-proef	23
3.2.3 Oedometerproef	24
3.2.4 Constant head doorlatendheidsproef	24
3.3 Interpretatie proefresultaten	24
3.3.1 Interpretatie-methoden	24
3.3.2 DIRECT-methode	25
3.3.3 Correlaties tussen parameterrelaties en classificatie eigenschappen	26
4 Gevoeligheidsanalyse	
4.1 Depôtscenario	27
4.1.1 Waterhuishouding en depôtgeometrie	27

4.1.2	Depositieperiode	28
4.1.3	Slibeigenschappen	29
4.1.4	Gas	29
4.2	Kentallen consolidatie	29
4.2.1	Consolidatiegraad $U(t)$	30
4.2.2	Consolidatiefactor F_c	30
4.2.3	Gas	31
4.3	Invloed van e_{set} op simulatie	31
4.3.1	Achtergrond gevoeligheidsanalyse e_{set}	31
4.3.2	Invoer simulaties	32
4.3.3	Verstoring top laag door keuze e_{set}	33
4.3.4	Effect op uitkomsten simulatie	35
4.3.5	Kentallen	36
4.3.6	Slibtype	37
4.4	Lineaire parameterrelaties	38
4.4.1	Nut van lineair exponentiële parameter sets	38
4.4.2	Invoer	38
4.4.3	Verstoorte zone in top laag	39
4.4.4	Effect op uitkomsten simulatie	40
4.4.5	Effect op kentallen	40
4.4.6	Vergelijking met parameter set van de DIRECT-methode	41
4.5	Effecten gasgehalte op consolidatieproces	41
4.5.1	Invoer simulaties	41
4.5.2	In situ gasgehalte	42
4.5.3	Toename van slibhoogte gerelateerd aan gasvolume	44
4.5.4	Invloed slibsoort op het gaseffect	45
4.5.5	Uitstroomdebieten	47
4.5.6	Variatie coëfficiënt van Henry	49
5	Veldmetingen Slufter	
5.1	Depôt karakteristieken	51
5.1.1	Geometrie	51
5.1.2	Vulkromme	52
5.2	Aangeleverde meetgegevens	53
5.2.1	Niveau aanvang sliblaag en bodem depôt	53
5.2.2	Profielen	55
5.3	Berekening scenario voor één-dimensionale modellering	55
5.3.1	Algemene beschrijving scenario	55
5.3.2	Materiaalparameters	56
5.3.3	Vloeistof porie getal bij start consolidatie	57
5.3.4	Depositiesnelheden	57
5.3.5	Vaste stof hoogte	60
5.3.6	Afleiding depositiesnelheden uit profielmetingen	61
5.4	Resultaten verzadigde berekening	62
5.4.1	Variatie in vaste stof hoogte ofwel depositiesnelheid	62
5.4.2	Variatie startpunt consolidatieproces: e_{set}	63
5.4.3	Lineaire parameterset Slufter Zuid	63
5.5	Resultaten berekening met gas	64
5.5.1	Gasmodus 3 zonder oplossen	64
5.5.2	Gasmodus 3 met oplosbaar gas	67

5.5.3 Gasprofiel van oplosbaar gas	69
5.6 Gelaagdheid slib meetpaal Noord/Zuid	70
6 Conclusies en aanbevelingen	
6.1 Conclusies	72
6.2 Aanbevelingen	73
Literatuurlijst	75
Symbolenlijst	77
Bijlagen	
A Parameterrelaties	
A.1 DIRECT-methode	
A.2 Lineaire fit	
B Instabiliteit simulatieprogramma	
C Voorbeeldberekening sliblaag zonder consolidatie	
D Vane-proeven Slufter meetpaal Noord oktober 1995	

Voorwoord

Dit afstudeerverslag vormt een weergave van het afstudeeronderzoek uitgevoerd door L.W.A. Zwang van januari 1997 - augustus 1997 aan de faculteit der civiele techniek (TU Delft).

De afstudeercommissie bestond uit de volgende leden:

prof.dr.ir. F.B.J. Barends	<i>hoogleraar grondwatermechanica, TU Delft</i>
prof.dr.ir. A. Verruijt	<i>hoogleraar grond-/grondwatermechanica, TU Delft</i>
drs. B.G.H.M. Wichman	<i>projectleider geotechnisch onderzoek waterbouw, DWW</i>
ir. G.L.M. van der Schrieck	<i>universitair docent baggertechniek, TU Delft</i>

Bij dit verslag hoort een supplement, waarin gedetailleerde berekeningsresultaten van de simulaties met het model "FSCONGAS" zijn opgenomen. Waar nodig wordt in de tekst van het verslag naar het supplement verwezen.

Samenvatting

In de nabije toekomst zullen grote hoeveelheden vervuild baggerslib worden geborgen in grootschalige bergingen in Nederland. In de MER-studies is een nauwkeurige voorspelling van depôtcapaciteit en uitstroom van porie water naar de omgeving benodigd. Naast de eigengewichtsconsolidatie spelen ook andere processen een rol bij de berging van slib in depôts. In dit afstudeeronderzoek zijn de andere processen niet beschouwd, omdat ze alleen in de bovenwaterfase voorkomen of een veel kortere tijdsduur hebben dan het consolidatieproces.

Het afstudeeronderzoek valt uiteen in drie delen:

- ✓ een literatuurstudie
- ✓ een gevoeligheidsanalyse
- ✓ toetsing van berekeningen aan veldmetingen van de Slufter

Literatuurstudie

Het gebruikte computermodel voor de één-dimensionale consolidatieberekeningen "FSCONGAS" is gebaseerd op de finite strain theorie. De finite strain theorie is enigzins aangepast om het gas te implementeren. Daarbij is gebruik gemaakt van het large bubble model, waarbij het gas zich in grote bellen in de verzadigde slibmatrix bevindt. De finite strain theorie is experimenteel geverifieerd voor slib met gashoudende vacuolen (Wichman, 1996b).

Een gedraineerde bovenrandvoorwaarde is geïmplementeerd d.m.v. de definitie van een vloeistof porie getal, waarbij het consolidatieproces start. Dit getal komt overeen met een operatieve spanning, omdat gebruik wordt gemaakt van een $\sigma_{op}(e_f)$ -relatie evenals een $k(e_f)$ -relatie. Deze relaties zijn bepaald met behulp van de HYDCON-procedure. ?

Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van een enkellaags model, ofwel homogeen slib, waarvoor de parameterrelaties afgeleid zijn uit proefresultaten op mengmonsters. Het afstudeeronderzoek heeft betrekking op berekeningen, waarbij het slibniveau zich nog onder het waterpeil bevindt. In het gebruikte model ("FSCONGAS") is geen hydraulische gradiënt geïmplementeerd en is het waterpeil zowel binnen als buiten het depôt gelijk. De berekeningen zijn zowel verzadigd als met gas uitgevoerd. Hierbij is in het algemeen gasmodus 3 gebruikt, d.w.z. compressie en oplossen is mogelijk (evenals advectie). Aangenomen is, dat het gas vlak na depositie instantaan aanwezig is en geen productie plaatsvindt.

Gevoeligheidsanalyse

De gevoeligheidsanalyse richt zich op invoerparameters, die grote invloed hebben op een nauwkeurige voorspelling van de depôtcapaciteit (ofwel voorspelling van de slibhoogte in de tijd) en de uitstroom van verontreinigd poriewater naar de omgeving. In het model is aangenomen, dat water alleen naar de

bovenrand (gedraineerd) of de onderrand (gedraineerd) kan stromen. Bovendien zijn er geen taluds in het model aanwezig, maar ondoorlatende rechte wanden.

Voor één type slib kunnen meerdere parameterrelaties gefit worden, die vooral in het lage spanningsgebied veel van elkaar afwijken. Dit komt, omdat in het lage spanningsgebied (< 2 kPa) slechts één meting uit een kolomproef aanwezig is. Daarom is met twee parameterrelaties per slibsoort gerekend: de set volgens de direct-methode, een polynome exponentiële parameterrelatie en een lineaire set, die door lineaire regressie is afgeleid, d.w.z. een lineair exponentiële parameterrelatie. Drie slibsoorten zijn doorgerekend, waarbij de volgende monsters zijn gebruikt: een mengmonster van Slufter Zuid (SS, meetpaal Zuid), een mengmonster uit 20 monsternames van het Ketelmeer (KM) en een zandig monster uit het Ketelmeer (K16, coördinaat x: 180004 en y: 510903).

Omdat de gedraineerde bovenrandvoorwaarde, e_{set} (het vloeistof porie getal waarbij de consolidatie start), voor hoge waarden in het computermodel instabiliteit geeft, is de gevoeligheid van het model voor deze invoerwaarde bepaald. Daaruit bleek, dat binnen een operatieve spanningsrange van 0.1 tot 0.5 kPa de slibhoogte bepaling weinig beïnvloed wordt, maar de invloed op de uitstroming, met name aan de bovenrand, is groot. Een andere waarde voor e_{set} geeft een profiel van het vloeistof porie getal, dat aan de bovenrand enigszins afwijkt. Deze storingszone is voor berekeningen met gas groter en verschilt sterk per parameter set.

De invloed van gas op de simulatie is bepaald door het in situ gasgehalte te variëren. Dit bleek veel invloed te hebben op de uitstroming, maar in mindere mate op de slibhoogte. De invloed op het consolidatieproces is drieledig: de gashoogte, vertragend effect van gas en lagere operatieve spanningen, ook aan het einde van de consolidatie. Tevens is de invloed van het gas (slibhoogte toename) gekoppeld aan de classificatie eigenschappen van slib. Zo blijkt voor fijner slib (groter fractie $< 16\mu m$) de vertraging en afname van de drijvende kracht een groter percentage van de slibhoogtetoe name in te nemen dan voor grover slib.

?
overbelasting?

Toetsing aan veldmetingen Slufter

Het model is, uitgaande van het vereenvoudigde scenario dat in de gevoeligheidsanalyse is gebruikt, aangepast om de invloed van de taluds van de Slufter te verdisconteren. Daarom is de depositieperiode opgedeeld in meerdere perioden en het volume gestort slib (uit de vulkromme) is m.b.v. het depôttopervlak als functie van de hoogte omgerekend in een storthoogte van het slib. Deze bepaling van de depositiesnelheid bleek een goede benadering van de meetwaarden te geven voor meetpaal Noord en meetpaal Zuid. Alleen voor november 1992 en 1994 waren meetprofielen van GWR beschikbaar.

Toetsing aan meer recente metingen is daarom noodzakelijk.

Het model is in stappen uitgebreid: in de verzadigde berekening is gekozen voor één materiaal parameterrelatie voor beide meetpalen, namelijk een lineair exponentiële parameter set VP5, omdat de direct relaties veel van elkaar afweken. Vervolgens is gas aan het model toegevoegd (gasmodus 3 zonder oplossen). Uiteindelijk is het model in gasmodus 3 (met oplosbaar gas, $H=0.0333$) als optimale simulatie gekozen.

?

Uit classificatie eigenschappen is gebleken, dat het slibprofiel bij meetpaal Zuid redelijk homogeen

was, maar bij meetpaal Noord heterogeen. Dit verklaart ook dat de meetprofielen van Noord minder goed benaderd kunnen worden door een enkellaags model.

De belangrijkste **conclusies** uit dit onderzoek zijn:

- Een één-dimensionaal consolidatiemodel is nuttig voor monitoringsprogramma's. Ondanks de vereenvoudigingen t.o.v. de werkelijkheid zijn de resultaten voor redelijk homogeen slib bruikbaar.
- Het effect van de slibsoort op debieten en kentallen is belangrijker dan het effect van gas op het consolidatieproces mits het gemiddeld gasgehalte laag is ($e_g^{atm} < 0.5$). Dit geldt ook voor de slibhoogte mits deze verhoogd wordt met een volumevergrotingsfactor voor gas. Dit betekent, dat voor gelaagd slib met weinig gas een verzadigd meerlagenmodel betere resultaten zal geven dan een enkellaagsmodel, waarin gas is geïmplementeerd.

De belangrijkste **aanbevelingen** zijn:

- Uit de simulaties is gebleken, dat vooral het lage spanningsgebied van de parameter relaties van belang is voor het consolidatieproces. In dit gebied zouden nog meer metingen gedaan moeten worden, om betere parameter sets te kunnen samenstellen.
- Daar er een correlatie lijkt te bestaan tussen afwijkende e_r - waarden en het gasprofiel, is het nuttig te onderzoeken of er een verband bestaat tussen classificatie eigenschappen (de gelaagdheid van het slib) en het gasgehalte. Tevens moet hierbij de gasproductie worden betrokken.
- De invloed van een gasproductiekromme (gasmodus 4) op het consolidatieproces is een interessant onderwerp voor toekomstig onderzoek. Daarvoor is het nodig een gasproductiekromme te implementeren in het computermodel.
- Daar er een correlatie lijkt te bestaan tussen afwijkende e_r - waarden en het gasprofiel, is het nuttig te onderzoeken of er een verband bestaat tussen classificatie eigenschappen (de gelaagdheid van het slib) en het gasgehalte. Tevens moet hierbij de gasproductie worden betrokken.

1 Inleiding

Grote hoeveelheden vervuild baggerslib (klasse 3 en 4) zullen in de nabije toekomst geborgen worden in grootschalige bergingslocaties in Nederland. De hoeveelheden liggen in de orde van tientallen miljoenen kuub slib vrijgekomen door sanering en onderhoudsbaggerwerk. Naast praktische zaken als efficiënt baggeren, ontwerp ringdijk en isolerende voorzieningen is een nauwkeurige voorspelling van de depôtcapaciteit en de uitstroom van verontreinigd poriewater naar de omgeving van belang voor de MER-studies.

Om de hoeveelheid benodigde ruimte te kunnen beperken moeten de depôts diep zijn. Het ingebrachte slib (met relatief lage dichtheid) zal in deze depôts onder eigen gewicht consolideren. Naast het consolidatieproces spelen ook andere processen een rol bij de berging van slib in depôts zoals rijping en sedimentatie. In dit afstudeeronderzoek wordt alleen de eigengewichtsconsolidatie beschouwd. Omdat vervuild slib vaak een aanzienlijke gasproductie heeft is gas geïmplementeerd in een finite strain consolidatieprogramma (een één-dimensionaal model).

1.1 Probleem- en doelstelling afstudeeronderzoek

T.b.v. MER-studies naar bergingslocaties voor verontreinigde baggerspecie zijn consolidatieberekeningen met gekoppelde waterbalans benodigd. Deze consolidatieberekeningen moeten gevoed worden met een range van realistische parameter sets, waarbij uiteenlopende depôt ontwerpen met isolerende voorzieningen kunnen worden doorgerekend.

De doelstelling van het afstudeeronderzoek valt uiteen in de volgende drie punten:

① een literatuuronderzoek met als doel:

- ✓ de achtergrond achter de computerprogramma's "FSCONGAS" (versie B. Wichman) en "FSCGAS" (met gebruikersvriendelijke schil, GD) te beschrijven. Beide programma's zijn in zekere zin afgeleid van het rekenhart van "FSCONBAG", een programma, dat was geschreven voor volledig verzadigd slib door GD.

- ✓ toepassing van relevante informatie over parameter sets uit vorige onderzoeken.

② een gevoeligheidsanalyse van de invoerparameters zal aangeven welke invoerparameters het belangrijkste zijn voor een nauwkeurige voorspelling van de depôtcapaciteit en uitstroom van verontreinigd poriewater naar de omgeving.

③ toetsing van de uitkomsten van de simulaties aan de veldmetingen van de Slufter geeft aan in hoeverre het model het consolidatieproces in de Slufter benadert. Bij dit afstudeeronderzoek is nieuwe kennis over parameters van slib en gasvorming in slib toegepast voor deze praktijk-case.

1.2 Rapportage

De punten, waarin het afstudeeronderzoek is verdeeld zijn terug te vinden in afzonderlijke hoofdstukken van het afstudeerverslag. Bovendien is een supplement samengesteld met meer uitgebreide informatie over de uitgevoerde berekeningen, waarnaar in het verslag wordt verwezen.

In hoofdstuk 2, de literatuurstudie, zijn de afleidingen van de finite strain differentiaalvergelijking vergeleken met twee publikaties van Gibson et al. (1967, 1981), betreffende dunne en dikke sliblagen, en daarnaast ook met het hoofdstuk "finite strain" uit het collegedictaat b26 (Barends, 1992). Ook bevat dit hoofdstuk de discretisatie van de finite strain differentiaalvergelijking, de implementatie van gas en de randvoorwaarden. De finite strain theorie is experimenteel geverifieerd voor slib met gashoudende vacuolen (Wichman, 1996b). Hoofdstuk 3 beschrijft de bepaling van de parameter sets voor verschillende slibsoorten.

In hoofdstuk 4 wordt de gevoeligheidsanalyse van invoerparameters behandeld en worden de resultaten kort weergegeven. Hierbij is o.a. gekeken naar de invloed van een gedraineerde bovenrand op het consolidatieproces. Deze rand wordt gedefinieerd door een vloeistof porie getal. Het effect van variatie van deze waarde (wat soms nodig i.v.m. stabiliteit van de berekening) is beschreven aan de hand van een storingszône en de berekende profielen. Daarnaast is ook aandacht besteed aan het effect van de slibsoort en de parameter set (afgeleid met de DIRECT-methode en een lineair exponentiële relatie afgeleid m.b.v. lineaire regressie) op het consolidatieproces. Achtergrondinformatie is in supplement A te vinden. Als laatste is aandacht besteed aan het effect van gas op het consolidatieproces. De berekeningen zijn uitgevoerd in gasmodus 3 (aangenomen is dat het gas instantaan aanwezig is), waarbij compressie plaats vindt. Uitgebreide berekeningsresultaten staan in supplement B. De gevoeligheidsanalyse is uitgevoerd met een vereenvoudigd scenario.

Hoofdstuk 5 beschrijft de toetsing van de simulaties aan de veldmetingen. Hier is geprobeerd de werkelijkheid zo goed mogelijk te benaderen met een enkellaags model, dat steeds verder verfijnd is. Supplement C bevat uitgebreide informatie betreffende de simulaties en gebruikte metingen. Ook is een beschrijving van de classificatie eigenschappen van slib opgenomen, waarmee heterogeniteiten in het slib kunnen worden herkend.

Tot slot bevat hoofdstuk 6 de conclusies en aanbevelingen van de gevoeligheidsanalyse en van de toetsing van de berekeningen aan de veldmetingen van de grootschalige berging de Slufter.

2 Toepassing finite strain theorie

2.1 Algemene inleiding finite strain theorie

De basis van het computermodel "FSCONBAG" is de één-dimensionale consolidatie theorie (met finite strain theorie), maar deze is opnieuw geïnterpreteerd voor niet volledig verzadigde porieruimtes (dus met gasvacuolen). Met deze één-dimensionale consolidatietheorie voor verzadigd slib kan de niet lineaire consolidatie van dikke kleilagen (Gibson et al., 1981) beschreven worden. Dikke kleilagen consolideren onder eigen gewicht en dit is dus ook het geval in de diepe depôts. Het feit dat hier voor een één-dimensionale theorie is gekozen vormt geen probleem vanwege de grote oppervlakte van de depôts t.o.v. de diepte. Het slib wordt met een relatief lage dichtheid gestort en consolideert onder eigen gewicht. Daar dit een aanzienlijke zetting geeft is het belangrijk dat een meebewegend assenstelsel wordt gebruikt (zoals in de finite strain theorie) en dat bovendien de doorlatendheid, porositeit en compressibiliteit niet constant zijn.⁽¹⁾

2.2 Coördinatenstelsel

2.2.1 Beschrijving coördinatenstelsel

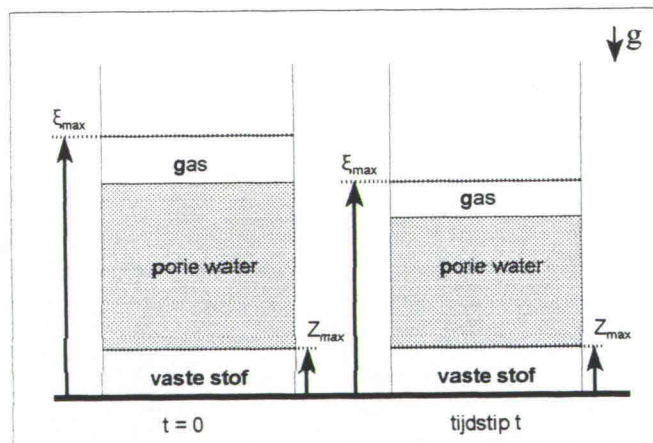
Omdat de finite strain theorie gebruikt wordt bij grote vervormingen, is het nuttig materiaalcoördinaten te introduceren.

De in dit rapport gebruikte coördinatenstelsels zijn die volgens de definities van Geotechnisch rapport nr. 411 (Wichman, 1996a).

Twee coördinatenstelsels worden gebruikt:

- ✓ een Lagrange coördinaat (z)
- ✓ een ruimtelijke Euler coördinaat (ξ).

De materiaal (of Lagrange) coördinaat " z " kan worden gedefinieerd als de massa vaste stof met als referentievlak de bodem van het depot. Voor het geval dat het specifiek gewicht γ_s constant is, kan deze coördinaat gedefinieerd



Afbeelding 2.1

⁽¹⁾ In het computermodel is uitgegaan van niet-samendrukbare vaste stof en vloeistof. Dit is een vereenvoudiging op de algemene consolidatietheorie afgeleid door Gibson et al. (zie ook paragraaf 2.3.4).

worden als het volume vaste stof met referentievlak de bodem van het depot. De relatie tussen de materiaalcoördinaat z en de Euler coördinaat ξ wordt beschreven door formule (1) en de inverse relatie door formule (1a). γ_f wordt als constante beschouwd. Zoals ook uit de formule blijkt kan voor een bepaalde coördinaat z , dus voor een constant volume vaste stof, $\xi(z,t)$ in de tijd veranderen, omdat t.g.v. consolidatie en compressie van de gasvacuolen het gasvolume en volume aan porie vloeistof afnemen.

$$z(\xi, t) = \int_0^\xi \frac{d\xi'}{(1+e_f(\xi', t) + e_g(\xi', t))} \quad (1)$$

$$\xi(z, t) = \int_0^z (1 + e_f(z', t) + e_g(z', t)) dz' \quad (1a)$$

De definitie is geschreven voor een eenheidsoppervlak loodrecht op de z - en ξ -richtingen. Differentiëren naar z van formule (1a) levert de volgende uitdrukking:

$$\frac{\partial \xi(z, t)}{\partial z} = (1 + e_f(z, t) + e_g(z, t)) \quad \left. \frac{\partial z}{\partial \xi} \right|_{t=0} = \frac{1}{(1 + e_f(z, 0) + e_g(z, 0))} \quad (2)$$

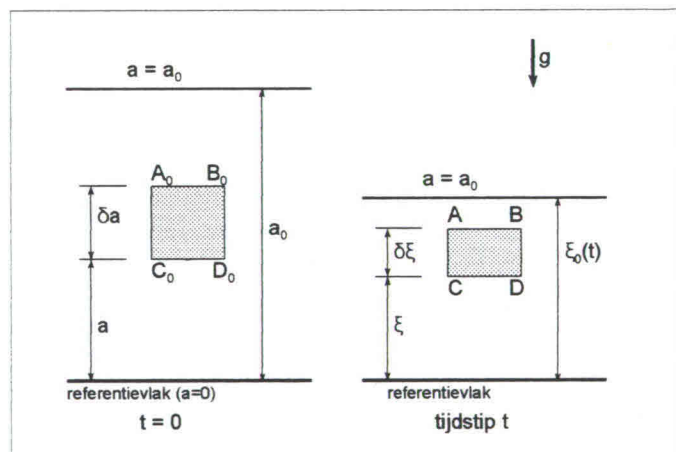
In dit rapport zal de positieve richting van de z - en ξ -coördinaat tegengesteld zijn aan de richting van de zwaartekrachtsversnelling. Het referentievlak is de bodem van het depôt.

2.2.2 Coördinatenstelsels uit andere publikaties

In de publikaties van Gibson et al. (1967 en 1981) is echter een andere definitie voor het coördinatenstelsel gekozen. Dit stelsel is ook in het collegedictaat b26 (Barends, 1992) aangehouden. In deze publikaties worden drie coördinatenstelsels toegepast en gerelateerd aan elkaar:

- ✓ een Lagrange coördinaten stelsel (a, t); deze refereert alle gebeurtenissen aan de positie van de vaste stof deeltjes in de vloeistof/gasmatrix op de $t=0$ situatie. Coördinaat a is dus tijdsafhankelijk.
- ✓ een convectief coördinaten stelsel (ξ, t); ξ is zelf een functie van a en t , dus een afhankelijke coördinaat.
- ✓ een gereduceerd coördinaten stelsel (z, t); dit is gebaseerd op het volume van de droge stof liggend tussen het referentievlak en het te analyseren punt.

De relatie tussen deze verschillende stelsels wordt beschreven in formules (3a) en (3b) voor het verzadigde slib, waarbij e_0 het poriegetal is op tijdstip $t=0$.



Afbeelding 2.2

$$z(a) = \int_0^a \frac{da'}{(1+e(a',0))} \quad \frac{dz}{da} = \left. \frac{\partial z}{\partial \xi} \right|_{t=0} = \frac{1}{(1+e_0)} \quad (3a)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial z} = 1+e \quad \frac{\partial \xi}{\partial a} = \frac{\partial \xi}{\partial z} \cdot \frac{\partial z}{\partial a} = \frac{\partial \xi}{\partial z} \cdot \left. \frac{\partial z}{\partial \xi} \right|_{t=0} = (1+e) \cdot \frac{1}{(1+e_0)} \quad (3b)$$

Als de definitie van de gereduceerde z-coördinaat van Gibson wordt vergeleken met die van de Lagrange-coördinaat z uit rapport 411, blijkt deze toch dezelfde te zijn, ondanks de verschillende benaming. Ook de definitie van de convectieve coördinaat ξ van Gibson blijkt identiek te zijn aan de definitie van de Euler-coördinaat ξ uit rapport 411 (Wichman, 1996a).

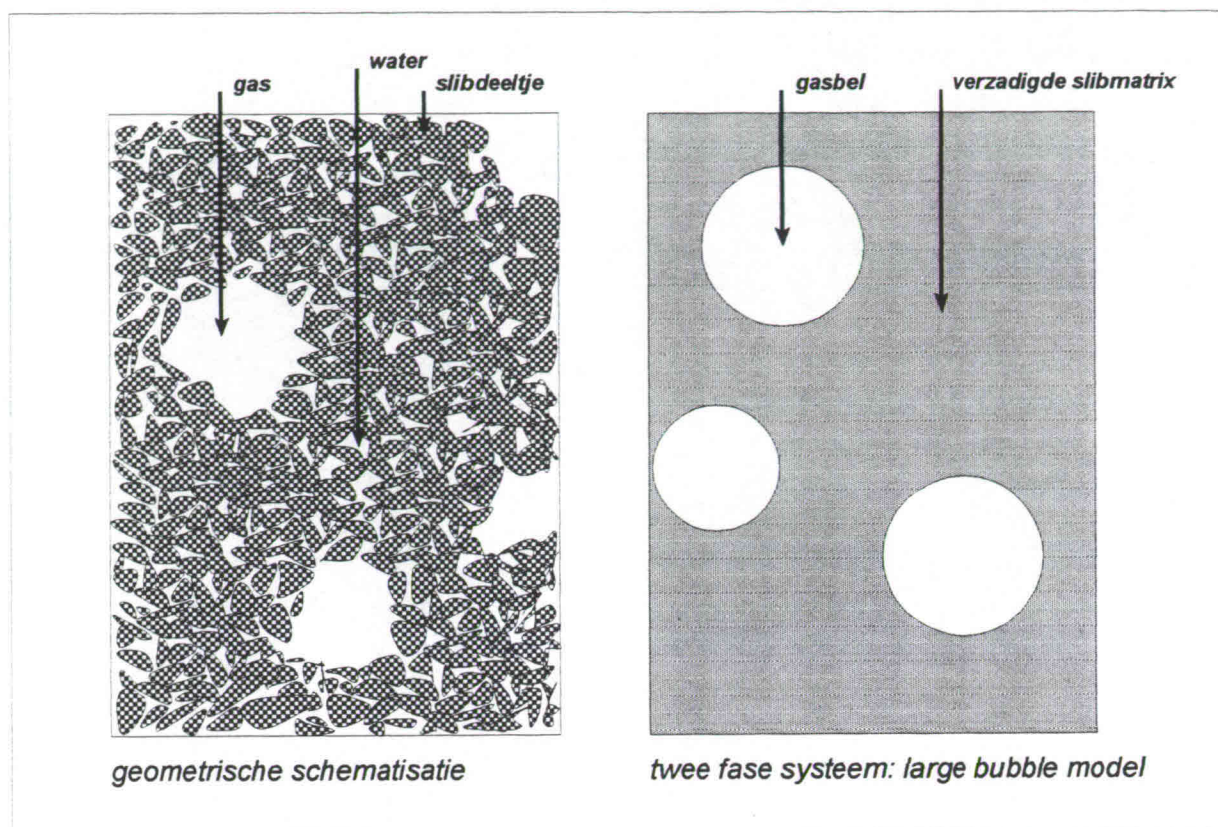
2.3 Differentiaalvergelijking consolidatie gashoudend slib

2.3.1 Toepassing één-dimensionale consolidatie theorie volgens Gibson

Uit experimenten (Sills, 1994) bleek de grootte van de invloed van het gas. Er werden kolomproeven uitgevoerd met slib uit het Ketelmeer, waarbij kunstmatig gas werd ingebracht. Door twee vrijwel identieke kolomproeven te vergelijken, waarbij de één volledig verzadigd slib bevatte en de ander gashoudend slib, volgt dat het gas het consolidatieproces vertraagt en dat de verschillen in slibhoogte veel groter zijn dan de verschillen in waterhoogte. Dit hoogteverschil bleef tot op het eind van de proeven behouden, wat inhoudt, dat het verschil in slibhoogte niet enkel en alleen het gevolg is van het gasvolume. Het gasvolume kan dus niet als een gashoogte bij de berekende slibhoogte voor verzadigd slib worden opgeteld om de slibhoogte van gashoudend slib te berekenen. Om het gedrag van gashoudend slib te voorspellen moet de finite strain theorie, ontwikkeld door Mikasa (1965) en Gibson et al. (1967, 1981) uitgebreid worden, omdat de oorspronkelijke finite strain theorie is ontwikkeld voor volledig verzadigd slib.

Gashoudend slib kan worden geschematiseerd als een twee fasen systeem, bestaande uit samendrukbare gasbellen, die omringd zijn door een verzadigd korrelskelet. Dit wordt het "large bubble model" genoemd (Wheeler 1988a). In dit twee fasen systeem kunnen de mechanische concepten van het één-dimensionale consolidatieproces van een volledig verzadigde korrelskelet op vergelijkbare wijze gebruikt worden voor het verzadigde korrelskelet van gashoudend slib.

Gas kan ook op een andere manier worden geïmplementeerd in de finite strain theorie. In het verleden is vaak aangenomen, dat kleine gasbelletjes zich in het poriewater bevonden (gas-water mengsel). Dit beïnvloedt de samendrukbaarheid van het poriewater ($\rho_f(p)$) in sterke mate. Deze implementatie is hier niet toegepast. Uit veldmetingen en laboratoriumtesten volgt namelijk dat in zachte bodems methaangas vooral opgehoopt zit in grote gasbellen, die veel groter zijn dan de gemiddelde poriegrootte van de omringende grond. Daarom is gekozen voor het "large bubble model" (zie afbeelding 2.3).



Afbeelding 2.3 Large bubble model

Voor gashoudende bodems is het principe van Terzaghi voor verzadigde bodems (Terzaghi, 1936), dat de effectieve spanning ($\sigma' = \sigma - p$) de enige oorzaak is van alle meetbare effecten van verandering in spanning niet juist. Uit experimenten met gashoudend slib (Thomas, 1987, Sills et al. 1991) blijkt echter wel dat het verschil tussen totaalspanning en poriewater druk het consolidatiegedrag bepaalt van de verzadigde grond matrix. Dit aspect van het principe van Terzaghi is dus nog wel van toepassing. In Sills et al. (1991) wordt het verschil tussen totaalspanning en de poriewater druk de operationele spanning (σ_{op}) genoemd. Uit experimenten op monsters met verschillende gasgehalten volgt, dat σ_{op} afhankelijk is van het water poriegetal (e_f). e_f is gedefinieerd in termen van porositeit n en de verzadigingsgraad S_r . Het overeenkomstige gas poriegetal (e_g) wordt op dezelfde wijze gedefinieerd.

$$e_f = \frac{S_r \cdot n}{(1-n)} \quad e_g = \frac{(1-S_r) \cdot n}{(1-n)} \quad n = \frac{V_p}{V_g} \quad S_r = \frac{V_w}{V_p} \quad (4)$$

Daarbij volgt dat de permeabiliteit van gashoudende bodems als functie van e_f de snelheid van consolidatie op dezelfde manier beïnvloedt als $k(e)$ voor de verzadigde bodem. In het model is aangehouden dat de gasdruk lineair afhankelijk is van de totale verticale spanning, ofwel $p_g = \beta \cdot \sigma + u_{atm}$ (Thomas 1987, Sills et al. 1991). Uit experimenten bleek dat $\beta=1$ een redelijke bovengrens is voor de gasdruk, indien geen ontlasting optreedt (Wichman, 1996b). Tevens is de finite strain theorie

experimenteel geverifieerd voor slib met gashoudende vacuolen (Wichman, 1996b).

2.3.2 Basisvergelijkingen (volgens Wichman (1996b))

Het één-dimensionale consolidatie proces wordt beschreven door de volgende basisvergelijkingen:

behoud van massa droge stof

Deze vergelijking geeft de relatie aan tussen de Lagrange coördinaat z en ruimtelijke Euler coördinaat ξ . Afbeelding 2.1 visualiseert de relatie tussen ξ en z , waarin het slib wordt onderverdeeld in vaste stof, porie water en een gasvolume. Na enige tijd is het porie water volume gereduceerd door consolidatie. Daar de gasbellen verondersteld worden verbonden te zijn aan de slibkorrels (large bubble model), veroorzaakt consolidatie compressie van het gasvolume, omdat de slibkorrels naar een lagere positie in de waterkolom bewegen, waar de totaalspanning hoger is. Daarom verandert $\xi(z,t)$ in de tijd voor een vast volume vaste stof, i.e. een vaste materiaalcoördinaat z , t.g.v. consolidatie en compressie van de gasporiën. Behoud van massa van vaste stof levert dan vergelijking (1). In een differentiële vorm is het vergelijking (2).

$$z(\xi, t) = \int_0^\xi \frac{d\xi'}{(1 + e_f(\xi', t) + e_g(\xi', t))} \quad (1)$$

behoud van massa vloeistof

Het specifiek debiet van de vloeistof, q , kan afgeleid worden van de verandering in hoogte $\xi(z,t)$ van de droge stof met vaste z t.o.v. het referentievlak. Deze hoogteverandering wordt deels veroorzaakt door de uitstroming van poriewater, maar ook door de gascompressie.

$$q = - \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)_{z=const} + \int_0^z \frac{\partial}{\partial t} e_g(z', t) dz' + q_{\xi=0} \quad (5)$$

De term $q_{\xi=0}$ is toegevoegd voor het geval van een gedraineerde onderrand. Substitutie van vergelijking (1a) geeft:

$$q = \int_0^z \frac{\partial}{\partial t} e_f(z', t) dz' + q_{\xi=0} \quad (6)$$

Uit vergelijking (6) kan vergelijking (7) worden afgeleid als differentiële vorm, de bergingsvergelijking voor gashoudend slib.

$$\frac{\partial e_f(z, t)}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \bigg|_{t=constant} \quad (7)$$

verticaal evenwicht totaalspanning

De totaalspanning σ op hoogte ξ wordt afgeleid van het gewicht van de lagen boven dit punt en een mogelijke bovenbelasting. h^{water} is de hoogte van de vrije waterspiegel en ξ_{max} is de hoogte van de sliblaag:

$$\sigma = \int_{\xi}^{\xi_{\max}} \left(\frac{\gamma_s + \gamma_f^* e_f(\xi', t)}{(1 + e_f(\xi', t) + e_g(\xi', t))} \right) d\xi' + \gamma_f^* (h^{\text{water}} - \xi_{\max}(z_{\max}, t)) + \text{load} \quad (8)$$

Invoering van de z-coördinaat levert:

$$\sigma = \int_z^{z_{\max}} (\gamma_s + \gamma_f^* e_f(z', t)) dz' + \gamma_f^* (h^{\text{water}} - \xi_{\max}(z_{\max}, t)) + \text{load} \quad (8a)$$

verticaal evenwicht voor porievloeistofspanning

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial \xi} (p - \gamma_f (\xi_{\max} - \xi)) \quad (9)$$

wet van Darcy

De meer bekende vorm van de wet van Darcy ziet er als volgt uit: $q = -\frac{k}{\gamma_f} \frac{\partial u}{\partial \xi}$.

D.m.v. substitutie van formule (2) en vergelijking (9) in deze vorm volgt vergelijking (10).

$$q = -\frac{k}{\gamma_f} \frac{1}{(1 + e_f(z, t) + e_g(z, t))} \frac{\partial p}{\partial z} - k \quad (10)$$

2.3.3 Vergelijking afleiding basisvergelijkingen voor verzadigd geval

Om de afleiding van Gibson en Wichman te vergelijken worden ze op de volgende pagina's naast elkaar gepresenteerd. De afleiding in het collegedictaat b26 (Barends, 1992) volgt volledig de theorie van Gibson et al. (1967, 1981).

Basisvergelijkingen [Gibson et al.1967, 1981]

De basisvergelijkingen worden door Gibson et al. algemeen geformuleerd. Zo zijn ze ook geschikt voor niet-homogeniteit en intrinsieke tijdseffecten van het korrelskelet. Daarnaast is samendrukbaarheid van de porievloeistof en vaste stof ook meegenomen. De volgende relaties (Gibson et al. 1967) worden gebruikt:

$$\begin{aligned} -k &= k(n, a) \\ -\sigma' &= \sigma - \eta p \\ -n &= \mathcal{F}(\sigma', a, t) \\ -\gamma_r &= \gamma_r(p) \end{aligned}$$

① behoud van massa droge stof

$$\frac{\partial \xi}{\partial z} - (1+e) \frac{\gamma_s(a, 0)}{\gamma_s(a, t)} = 0$$

② behoud van massa vloeistof

$$\frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{e \gamma_f}{(1+e)} (v_f - v_s) \right] + \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{e \gamma_f}{(1+e)} \frac{\partial \xi}{\partial z} \right] = 0$$

$$\begin{aligned} v_f &= \text{snelheid porievloeistof} \\ v_s &= \frac{\partial \xi}{\partial t} = \text{snelheid korrelskelet} \\ q &\equiv n(v_f - v_s) = \text{hoeveelheid instroom van onder door eenheidsvlak in elementje ABCD (zie afbeelding 2.2)} \\ \frac{\partial}{\partial z} [n \gamma_f (v_f - v_s)] \cdot \partial z &= \text{netto instroming in elementje ABCD} \end{aligned}$$

Basisvergelijkingen [Wichman, 1996]

Voor de afleiding wordt gebruik gemaakt van de volgende aannames:
 ✓ het korrelskelet is homogeen en bevat geen intrinsieke tijdseffecten
 ✓ zowel de porievloeistof als de vaste stof zijn niet samendrukbaar.

$$\begin{aligned} \text{Dus: } -k &= k(e) \\ -\sigma' &= \sigma - p \\ -\sigma' &= \sigma'(e) \end{aligned}$$

① behoud van massa droge stof (= definitie Lagrange coördinatenstelsel)

$$\frac{\partial \xi(z, t)}{\partial z} = (1+e(z, t)) \quad \xi(z, t) = \int_0^z (1+e(z', t)) dz'$$

② behoud van massa vloeistof

Het specifiek debiet van de vloeistof, q wordt afgeleid van de verandering in hoogte $\xi(z, t)$ van de droge stof voor $z=\text{constant}$. Deze hoogteverandering wordt veroorzaakt door de uitstroming van poriewater:

$$q = - \left(\frac{\partial \xi}{\partial t} \right)_{z=\text{const}} + q_{\xi=0}$$

De term $q_{\xi=0}$ is toegevoegd voor het geval van een gedraineerde onderrand.

$$\text{Substitutie van ① geeft: } q = \int_0^z \frac{\partial}{\partial t} e(z', t) dz' + q_{\xi=0}$$

$$\text{Differentie naar } z \text{ geeft de bergingsvgl.: } \frac{\partial e(z, t)}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z} \Big|_{t=\text{constant}}$$

③ verticaal evenwicht totaalspanning

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} + \frac{e\gamma_f + \gamma_s}{1+e} \frac{\partial \xi}{\partial z} = 0$$

④ verticaal evenwicht porievloeistof druk

$$\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\partial u}{\partial z} + \gamma_f \frac{\partial \xi}{\partial z} = 0 \quad \text{of} \quad \frac{\partial u}{\partial \xi} = \frac{\partial p}{\partial \xi} + \gamma_f$$

⑤ wet van Darcy

Substitutie van ④ in $n(v_f - v_s) = -\frac{k}{\gamma_f} \frac{\partial u}{\partial \xi}$ [$q \equiv n(v_f - v_s)$, zie ②]:

$$\left[\frac{e(v_f - v_s)}{k(1+e)} + 1 \right] \frac{\partial \xi}{\partial z} + \frac{1}{\gamma_f} \frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

Voor de afleiding van de algemene differentiaalvergelijking wordt het model vereenvoudigd. Dit houdt de volgende aannames in:

- ✓ het korrelskelet is homogeen en bevat geen intrinsieke tijdseffecten
- ✓ zowel de porievloeistof als de vaste stof zijn niet samendrukbaar.

Dit resulteert in:

- $k = k(e)$
- $\sigma' = \sigma - p$ ($\eta=1$ voor $\gamma_s = \text{constant}$)
- $\sigma' = \sigma'(e)$

③ verticaal evenwicht totaalspanning

$$\sigma = \int_z^{z_{\max}} (\gamma_s + \gamma_f * e(z', t)) dz' + \gamma_f * (h^{\text{water}} - \xi_{\max}(z_{\max}, t)) + \text{load}$$

④ verticaal evenwicht porievloeistof druk

$$\frac{\partial u}{\partial \xi} = \frac{\partial}{\partial \xi} (p - \gamma_f (\xi_{\max} - \xi))$$

⑤ wet van Darcy

Substitutie van ① en ④ in $q = -\frac{k}{\gamma_f} \frac{\partial u}{\partial \xi}$ geeft:

$$q = -\frac{k}{\gamma_f} \frac{1}{(1+e(z, t))} \frac{\partial p}{\partial z} - k$$

In geotechnisch rapport nr. 411 zijn de aannames, die Gibson doet na afleiding van de basisvergelijkingen al meteen gedaan bij de afleiding van de basisvergelijkingen en ze zijn ook gebruikt t.b.v. de definitie van het Lagrange coördinatenstelsel..

Gibson leidt de basisvergelijkingen algemener af, maar het resultaat is hetzelfde na verdere vereenvoudiging.

2.3.4 Afleiding finite strain differentiaalvergelijking (volgens Wichman (1996a))

De algemene finite strain differentiaalvergelijking voor één-dimensionale consolidatie van gashoudend slib kan worden afgeleid uit de voorgaande 5 basisvergelijkingen zie (vergelijking (1), (5), (6), (7), (8a), (9), (10)).

$$\frac{\partial e_f}{\partial t} = - \frac{\partial e_f}{\partial z} \frac{\partial}{\partial e_f} \left[\frac{k(e_f)}{\gamma_f(1+e_f+e_g)} \left((\gamma_s - \gamma_f(1+e_g)) + \frac{\partial \sigma_{op}(e_f)}{\partial z} \right) \right] + \frac{\frac{\partial e_g}{\partial z}}{(1+e_f+e_g)^2} \cdot \frac{k(e_f)}{\gamma_f} \left[(\gamma_s + e_f \gamma_f) + \frac{\partial \sigma_{op}(e_f)}{\partial z} \right] \quad (11)$$

RHSGAS ←

Als $e_g = \text{constant}$ (gasmodus 1), betekent dit dat de tweede rechter term in vergelijking (11) nul wordt, want $\frac{\partial e_g}{\partial z} = 0$. Vergelijking (11) kan dan worden vereenvoudigd tot vergelijking (12). Als dan bovendien $e_g = 0$ wordt aangehouden in vergelijking (12) is de uitdrukking identiek aan de algemene differentiaalvergelijking volgens Gibson et al. (1967).

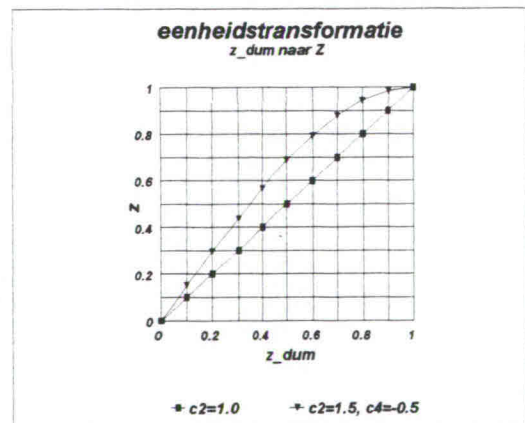
$$\frac{\partial e_f}{\partial t} = - \left(\frac{\gamma_s - \gamma_f(1+e_g)}{\gamma_f} \right) \cdot \frac{\partial e_f}{\partial z} \cdot \frac{\partial}{\partial e_f} \left[\frac{k(e_f)}{(1+e_f+e_g)} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e_f)}{\gamma_f(1+e_f+e_g)} \cdot \frac{\partial e_f}{\partial z} \cdot \frac{d\sigma_{op}(e_f)}{de_f} \right] \quad (12)$$

De differentiaalvergelijking houdt rekening met het effect van eigen gewicht op de consolidatie, dit is conform de finite non-linear consolidatie van dikke homogene lagen volgens Gibson et al. (1981). Voor dunne lagen had Gibson dit effect uitgeschakeld door $\rho_f = \rho_s$ te nemen ($e_g = 0$). Dit kan ook in vergelijking (12) door $\gamma_f(1+e_g) = \gamma_s$.

2.4 Discretisatie

2.4.1 Roosterverfijning

De discretisatie, die hier uitgevoerd wordt gaat uit van een equidistant rooster, zo zijn de tijdstap τ en de knoofafstand Δz constant. De z -coördinaat is dus gedefinieerd t.o.v. van een vast rooster. In de computermodellen "FSCONBAG" en "FSCONGAS" kan door middel van roosterverfijning de stabiliteit verbeterd worden (GD, documentatie rekenprogramma FSConbag 1988). Dan zijn Δz en τ dus niet constant! Voor de beschrijving van de roosterverfijning gebruikt men een dummy-variabele z_{dum} (met equidistant rooster). z_{dum} heeft een bereik van 0 tot 1. De materiaal of Lagrange coördinaat z hangt met de dummy-variabele z_{dum} samen volgens: $\check{Z} = z/z_{\text{max}} = \check{Z}(z_{\text{dum}})$.



Afbeelding 2.4

Deze verfijningsfunctie wordt beschreven door een vierde graads polynoom, die een eenheidstransformatie vormt van z_{dum} in $[0,1]$ naar $\tilde{z}$ in $[0,1]$:

$$\tilde{z} = c_5 (z_{\text{dum}})^4 + c_4 (z_{\text{dum}})^3 + c_3 (z_{\text{dum}})^2 + c_2 z_{\text{dum}} + c_1.$$

Dit geeft voor (niet genoemde coëfficiënten zijn gelijk aan nul):

- ✓ een equidistant rooster: $c_2 = 1.0$
- ✓ verfijning van bovenrand: $c_2 = 1.5, c_4 = -0.5$.

2.4.2 Discretisatie finite strain differentiaalvergelijking

De algemene differentiaalvergelijking (11) wordt gediscrètiseerd volgens een eindig differentieschema, wat deels ook in "FSCONBAG" (Greeuw et al. 1992) gebruikt is. De j -waarde geeft de tijdstap aan, de n -waarde het knooppuntnummer, τ de grootte van de tijdstap en Δz de knoopafstand.

$$\begin{aligned} \frac{e_{fn}^{j+1} - e_{fn}^j}{\tau} = & \frac{-(\gamma_s - \gamma_f(1 + e_{gn}^j))}{\gamma_f} \cdot \beta(e_{fn}^j) \frac{(e_{fn+1}^{j+1} - e_{fn-1}^{j+1})}{2\Delta z} + \frac{1}{\gamma_f} \cdot \frac{(\alpha(e_{fn+1}^j) - \alpha(e_{fn-1}^j))}{2\Delta z} \cdot \frac{e_{fn+1}^{j+1} - e_{fn-1}^{j+1}}{2\Delta z} \\ & + \frac{1}{\gamma_f} \cdot \alpha(e_{fn}^j) \cdot \frac{(e_{fn+1}^{j+1} - 2e_{fn}^{j+1} + e_{fn-1}^{j+1})}{(\Delta z)^2} + RHSGAS \end{aligned} \quad (13)$$

Vergelijking (13) is deels impliciet vanwege de stabiliteit van deze discretisatie.

$$\begin{aligned} \beta(e_f) &= \frac{d}{de_f} \left(\frac{k(e_f)}{1 + e_f + e_g} \right) & \alpha(e_f) &= \frac{k(e_f)}{(1 + e_f + e_g)} \cdot \frac{d\sigma_{op}(e_f)}{de_f} \\ \frac{\partial e_f}{\partial z} &= \frac{e_{fn+1} - e_{fn-1}}{2\Delta z} & \frac{\partial^2 e_f}{\partial z^2} &= \frac{e_{fn+1} - 2e_{fn} + e_{fn-1}}{(\Delta z)^2} \end{aligned} \quad (13a)$$

Vergelijking (13) kan als volgt in een matrixvorm worden geschreven:

$$(I - \tau M) e_f^{j+1} = e_f^j + \tau \cdot r \quad (14)$$

In uitgewerkte vorm ziet vergelijking (14) zonder randvoorwaarden voor de bulk er als volgt uit:

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \cdot & & & & \\ & \cdot & & & \\ & & 1 & & \\ & & & 1 & \\ & & & & 1 & \\ & & & & & \cdot \\ & & & & & & \cdot \end{bmatrix} & -\tau \begin{bmatrix} \cdot & & & & \\ & \cdot & & & \\ & & A_{n+2}^j & B_{n+1}^j & C_n^j \\ & & A_{n+1}^j & B_n^j & C_{n-1}^j \\ & & & A_n^j & B_{n-1}^j & C_{n-2}^j \\ & & & & \cdot & \\ & & & & & \cdot & \\ & & & & & & \cdot \end{bmatrix} \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ e_{fn+1}^{j+1} \\ e_{fn}^{j+1} \\ e_{fn-1}^{j+1} \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ e_{fn+1}^j \\ e_{fn}^j \\ e_{fn-1}^j \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} + \tau \cdot r$$

$$A_{n-1}^j = - \frac{\gamma_s - \gamma_f(1+e_{gn}^j)}{\gamma_f} \cdot \beta(e_{fn}^j) \cdot \frac{1}{2\Delta z} - \frac{1}{\gamma_f} \frac{(\alpha(e_{fn-1}^j) - \alpha(e_{fn}^j))}{(2\Delta z)^2} - \frac{1}{\gamma_f} \alpha(e_{fn}^j) \cdot \frac{1}{(\Delta z)^2} \quad (15a)$$

$$B_n^j = + \frac{1}{\gamma_f} \alpha(e_{fn}^j) \cdot \frac{2}{(\Delta z)^2} \quad (15b)$$

$$C_{n-1}^j = + \frac{\gamma_s - \gamma_f(1+e_{gn}^j)}{\gamma_f} \cdot \beta(e_{fn}^j) \cdot \frac{1}{2\Delta z} + \frac{1}{\gamma_f} \frac{(\alpha(e_{fn-1}^j) - \alpha(e_{fn}^j))}{(2\Delta z)^2} - \frac{1}{\gamma_f} \alpha(e_{fn}^j) \cdot \frac{1}{(\Delta z)^2} \quad (15c)$$

De matrix bevat: ✓ in de diagonaal (termen met e_{fn}^{j+1}): B_n^j
 ✓ in de bovendiaagonaal (termen met e_{fn-1}^{j+1}): C_{n-1}^j
 ✓ in de onderdiaagonaal (termen met e_{fn+1}^{j+1}): A_{n+1}^j

Hierbij geeft τ de grootte van de tijdstap aan en is r de inhomogene rechter term, die volgt uit de discretisatie van RHSGAS (de tweede rechterterm uit vergelijking (11)):

$$RHSGAS = \frac{\frac{\partial e_g}{\partial z}}{(1+e_f+e_g)^2} \cdot \frac{k(e_f)}{\gamma_f} \left[(\gamma_s + e_f \gamma_f) + \frac{\partial \sigma_{op}(e_f)}{\partial z} \right] \quad (16)$$

Discretisatie van RHSGAS kan zowel expliciet (17a)⁽²⁾ als deels impliciet (17b)

$$r = \frac{1}{\gamma_f} \cdot \frac{(e_{gn+1}^j - e_{gn-1}^j)}{2\Delta z} \cdot \frac{k(e_{fn}^j)}{(1+e_{fn}^j+e_{gn}^j)^2} \cdot \left[(\gamma_s + e_{fn}^j \gamma_f) + \frac{\sigma_{op}(e_{fn+1}^j) - \sigma_{op}(e_{fn-1}^j)}{2\Delta z} \right] \quad (17a)$$

De expliciete discretisatie van RHSGAS heeft geen gevolgen voor matrix M.

Om delen van RHSGAS toe te kunnen voegen aan matrix M wordt RHSGAS herschreven als volgt

$$\text{herschreven: } \frac{\partial \sigma_{op}(e_f)}{\partial z} = \frac{d\sigma_{op}(e_f)}{de_f} \cdot \frac{\partial e_f}{\partial z}$$

Zo wordt vergelijking (17b) verkregen, een deels impliciete discretisatie van RHSGAS.

$$r = \frac{1}{\gamma_f} \cdot \frac{(e_{gn+1}^j - e_{gn-1}^j)}{2\Delta z} \cdot \frac{k(e_{fn}^j)}{(1+e_{fn}^j+e_{gn}^j)^2} \cdot \left[(\gamma_s + \gamma_f e_{fn}^j) + \frac{\alpha(e_{fn}^j)}{\gamma_f(1+e_{fn}^j+e_{gn}^j)} \cdot \frac{(e_{gn+1}^j - e_{gn-1}^j)}{2\Delta z} \cdot \frac{(e_{fn+1}^{j+1} - e_{fn-1}^{j+1})}{2\Delta z} \right] \quad (17b)$$

⁽²⁾ Alleen het expliciete schema wordt in "FSCGAS" en "FSCONGAS" toegepast.

Vergelijking (17a) en (17b) kunnen gebruikt worden voor alle vier de gasmodi (zoals beschreven in de volgende alinea). Uit vergelijkende simulaties blijkt dat de resultaten voor beide discretisaties vrijwel gelijk zijn. Vandaar dat gekozen is voor de eenvoudigste, namelijk de expliciete discretisatie.

2.4.3 Berekening van e_g

Voor de berekeningen worden vier gasmodi onderscheiden:

Modus 1: $e_g = \text{constant}$, dus de waarden $e_{g,n}^j$ zijn constant en omdat $\frac{\partial e_g}{\partial z} = 0$, is RHSGAS, ofwel de tweede rechter term in de finite strain differentiaal vergelijking (11) gelijk aan nul.

Modus 2: $e_g = \text{lineair}$ in de tijd gedurende een bepaalde periode worden de $e_{g,n}^j$ waarden berekend uit vergelijking (18).

$$e_{g,n}^j = e_g^{\max} + e_g^{\max} \cdot \frac{(j \cdot \Delta t - t_n^{\text{ini}} - t^{\text{prod}})}{t^{\text{prod}}} \quad (18)$$

In deze vergelijking is t^{prod} de periode waarin de gasproductie plaatsvindt na depositie van de knopen op de tijden t_n^{ini} . $e_g^{\max}$ is het maximum gasporiegetal op het tijdstip $t_n^{\text{ini}} + t^{\text{prod}}$. Δt is de grootte van de tijdstap. Hieruit volgt dat gedurende de depositie de knopen verschillende $e_{g,n}^j$ waarden hebben en daarom is RHSGAS ongelijk aan nul. Waarden voor $e_{g,n}^j$ kunnen ingevuld worden in RHSGAS en zodoende kan uiteindelijk de finite strain differentiaalvergelijking worden opgelost voor e_f^{j+1} .

Modus 3: Samendrukbaar en oplosbaar gas. De wet van Boyle en de wet van Henry en de aanname $p_g = \sigma + u_{\text{atm}}$ (met $\sigma = \text{vert. totaalspanning}$) zijn hiervoor gebruikt in vergelijking (19). Verondersteld is, dat het gas voor 100% bestaat uit methaan. In de praktijk bestaat het gas voor 82% tot 90% uit methaan (Martens, 1980).

$$(e_g(z,t) + H \cdot e_f(z,t)) \cdot p_g(z,t) = (e_g(z,t_0) + H \cdot e_f(z,t_0)) \cdot p_g(z,t_0) - \Delta_{\text{gas}} \quad (19)$$

$$\Delta_{\text{gas}} = - \frac{RT}{V_s} \int_{t_0}^t \frac{d}{dt'} n(z,t') dt' \quad (20)$$

Discretisatie levert de volgende uitdrukking op:

$$(e_{g,n}^j + H \cdot e_{f,n}^j) \cdot p_{g,n}^j = (e_{g,n}^{j-1} + H \cdot e_{f,n}^{j-1}) \cdot p_{g,n}^{j-1} - \Delta_{\text{gas}} \quad (21)$$

$$\text{verliesterm (advectie)} \quad \Delta_{\text{gas}} = H \cdot (e_{f,n}^{j-1} - e_{f,n}^j) \cdot \frac{(p_{g,n}^{j-1} + p_{g,n}^j)}{2} \neq 0$$

De tweede term in de rechter zijde van vergelijking (21), de zogenaamde verliesterm, is de contributie ten gevolge van de uitstroming van opgelost methaangas. De initiële gasmassa is op het tijdstip dan de knopen worden gedeponeerd voor alle knopen identiek. Echter door de consolidatie stroomt er poriewater weg, waar methaangas in opgelost is (advectie). Met diffusie is geen rekening gehouden.

De totaalspanning kan nu voor de tijdstippen j en $j-1$ berekend worden met vergelijking (8a), en vervolgens kan de gasdruk berekend worden. Door middel van vergelijking (21) kan e_g^j bepaald worden uit e_g^{j-1} . Deze kunnen dan gesubstitueerd worden in RHSGAS (zie

vergelijking (17a)). Uiteindelijk kan de finite strain differentiaalvergelijking worden opgelost voor e_f^{j+1} .

Modus 4: In deze modus is er zowel sprake van gasproductie als van compressie en oplossen van gas. Er wordt momenteel gestudeerd op de implementatie van een advectionsterm. Een mogelijkheid is gebruik te maken van gasproductiekrommes. Daaruit zou het aantal mol gas per massa vaste stof kunnen worden berekend voor een bepaald tijdstip. Zo zou voor iedere knoop een gemiddelde hoeveelheid gasproductie per periode kunnen worden bepaald. Daar moet nog wel de advection van worden afgetrokken. Gedacht kan worden aan een modificatie van vergelijking (19) om dit te bereiken.

2.5 Stabiliteit

De discretisatie is empirisch getest voor stabiliteit. Daaruit volgt dat e_g niet groter mag worden dan $\gamma_s/\gamma_f - 1$. Dit betekent dat de drijvende kracht achter de consolidatie groter moet zijn dan nul. Voor gasmodi 2 t/m 4 zou zwel van het verzadigde korrelskelet kunnen optreden tengevolge van de grotere gradienten in e_g . Hierdoor wordt RHSGAS relatief groot ten opzichte van de absolute waarde van de eerste term uit de algemene differentiaalvergelijking. Als gevolg zal dan $\partial e_f / \partial t$ groter zijn dan nul. Dit gebeurt als e_g een bepaalde kritische waarde bereikt, afhankelijk van het depôtscenario en de materiaalkarakteristieken. Omdat deze zwel niet in de relatie van de operationele spanning en het porievloeistofgetal geïmplementeerd is, is zwel niet toegestaan. In het consolidatieprogramma is de zwel geblokkeerd en blijven in dit geval de poriegetallen gelijk aan de waarden op de vorige tijdstap. De meest eenvoudige discretisatie, namelijk de expliciete vorm van RHSGAS (vgl. 17a) blijkt de beste resultaten te geven. De deels impliciete discretisaties bleken minder stabiel te zijn voor hogere waarden van e_g .

2.6 Randvoorwaarden

Voor de inwendige knopen kunnen vergelijkingen (13) en (17a) of (17b) gebruikt worden. Echter voor de randknopen moeten aparte randvoorwaarden worden gedefinieerd.

2.6.1 Gedraineerde rand

Dit geval is op dezelfde wijze geïmplementeerd als voor het volledig verzadigde model. Op de gedraineerde rand is de porie waterdruk (p) gelijk aan de hydrostatische druk ($p_{\text{hydrostatisch}}$), waarbij de porie waterdruk een afgeleide grootheid is. De operationele spanning wordt berekend uit $\sigma_{\text{op}} = \sigma - p = \sigma - p_{\text{hydrostatisch}}$. Het poriegetal van de vloeistof e_f volgt uit de inverse van de materiaalbetrekking $\sigma_{\text{op}}(e_f)$. In feite wordt het poriegetal e_f aan een rand voorgeschreven, omdat dit gemakkelijk in te passen is in

het differentieschema. Theoretisch geldt dat aan de bovenrand de operatieve spanning gelijk is aan nul (indien geen bovenbelasting aanwezig is). In de praktijk wordt deze gelijk genomen aan een kleine waarde en constant verondersteld. De reden hiervoor is, dat voordat het consolidatieproces "start" andere processen plaats vinden: na sedimentatie beweegt het thixotrope slib zich als een slibstroom. Bij een bepaalde operatieve spanning (wat inhoudt, dat een bepaalde schuifsterkte bereikt is) stoppen deze processen voor de desbetreffende sliblaag en start de consolidatie. Voor een bovenrand betekent dit in het model, dat e_f gelijk is aan e_{set} (dus constant in de tijd) op deze rand. Er moet dus een waarde voor e_{set} worden gekozen, waarbij het consolidatieproces start. Omdat deze keuze ook de stabiliteit van de berekening beïnvloedt, moet men vaak een andere startwaarde voor de consolidatie (horend bij een hogere operatieve spanning) kiezen. Om de invloed hiervan op het consolidatieproces te kunnen afschatten wordt in hoofdstuk 4 een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd.

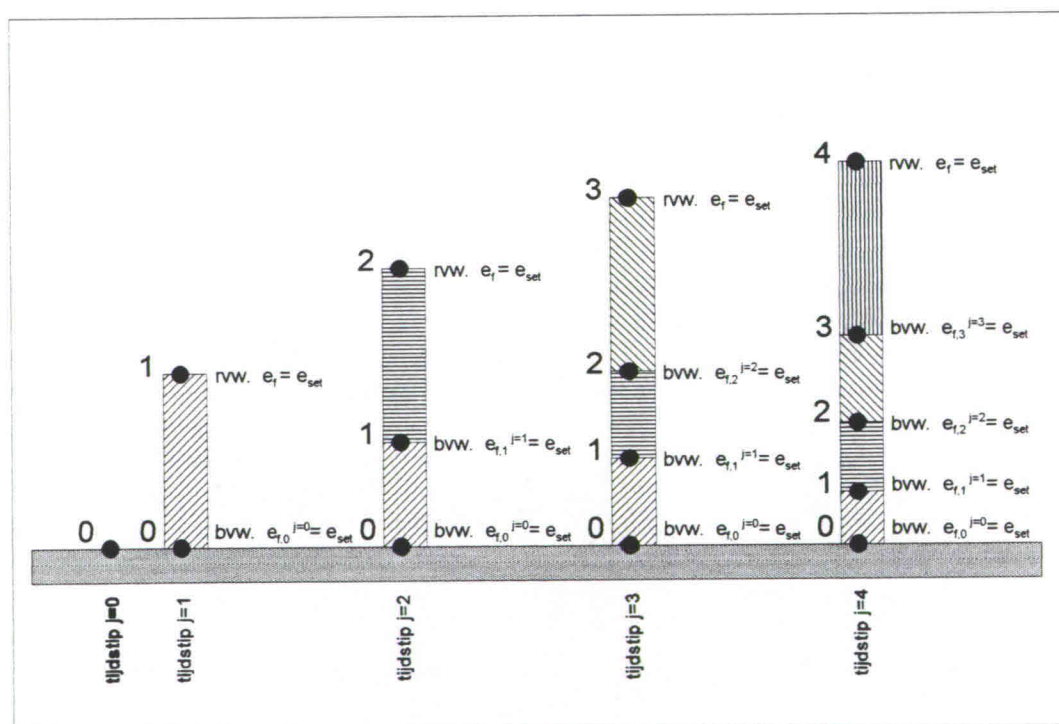
Als er echter een bovenbelasting aanwezig is is $e_f \neq e_{set}$, dan geldt voor de bovenrand:

$$u(z,t) + \sigma_{op}(e_f(z,t)) = \text{bovenbelasting} \quad (22)$$

Het aanbrengen van een bovenbelasting is alleen mogelijk in het computerprogramma "FSCGAS".

2.6.2 Bovenrand in depositieperiode

Gedurende de vulperiode van het depôt wordt per tijdstap een laag slib gedeponeerd. In het model wordt dan een knoop gedefinieerd. Deze nieuwe knoop vormt de nieuwe bovenrand. Schematisch wordt dit in afbeelding 2.5 weergegeven voor tijdstip $j=0$ t/m 4. Op tijdstip $j=4$ wordt het differentieschema beschreven door formulevak (35) (zie paragraaf 2.7, toplaag vormt vierde laag $n=4$).



Afbeelding 2.5 Depositie van knopen (gedraineerde bovenrand) in model

Deze bovenrand is gedurende de depositieperiode altijd gedraineerd en wordt dus door e_f beschreven. Na depositie van een knoop vormen de eerder deponeerde knopen geen randvoorwaarde meer. De randvoorwaarde verandert dan in een beginvoorwaarde.

2.6.3 Ongedraineerde rand

In feite is dit een speciaal geval van een specificatie van een debiet aan een rand. De randvoorwaarde wordt dus uitgedrukt in een voorgeschreven debiet op een rand. Vergelijking (6) laat zien, dat q slechts afhankelijk is van veranderingen in e_f . Daarom kan de ongedraineerde randvoorwaarde op dezelfde wijze geïmplementeerd worden als voor het verzadigde slib (geotechnisch rapport nr.411), het gasporiegetal heeft geen invloed op de discretisaties. Dit is logisch, want als het gasvolume (t.g.v. e_g) verandert, zal de slibhoogte veranderen, maar de verzadigde slibhoogte blijft constant, dus er zal geen uitstroom plaatsvinden ($q=0$). De randvoorwaarde als specificatie van het debiet aan de rand maakt gebruik van de Wet van Darcy (GD, documentatie rekenprogramma "FSCONBAG" 1988)⁽³⁾. Door $\partial p/\partial z$ in de wet van Darcy te schrijven als $\partial \sigma/\partial z - \partial \sigma'/\partial z$, met $\partial \sigma/\partial z = -(\gamma_s + \gamma_f e(z,t))$ is vergelijking (23) ontstaan.

$$q = \frac{k(e_f)}{\gamma_f} \frac{1}{1+e} \left[\gamma_c + \frac{\partial \sigma'}{\partial z} \right] \quad \text{Darcy verzadigd slib} \quad \gamma_c = \gamma_s - \gamma_f \quad (23)$$

De wet van Darcy voor gashoudend slib ziet er als volgt uit:

$$q = \frac{k(e_f)}{\gamma_f} \frac{1}{(1+e_f+e_g)} \left[\gamma_c + \frac{\partial \sigma_{op}}{\partial z} \right] \quad \text{Darcy gashoudend slib} \quad \gamma_c = \gamma_s - \gamma_f(1+e_g) \quad (24)$$

2.6.4 Ongedraineerde onderrand

Op tijdstip $(j+1)$ kan vergelijking (24) voor een ongedraineerde onderrand d.w.z. ($q_{z=0} = 0$) als volgt worden geschreven:

$$q_{z=0}^{t+\Delta t} = \frac{k(e_f(0,t+\Delta t))}{\gamma_f} \frac{1}{(1+e_f(0,t+\Delta t)+e_g(0,t+\Delta t))} \left[\gamma_s - \gamma_f(1+e_g(0,t+\Delta t)) + \frac{\partial \sigma_{op}(e_f(0,t+\Delta t))}{\partial z} \right] \quad (25)$$

Linearisatie met Taylorpolynoom rond $q_{z=0}^t$ met tijdstap $\Delta t \ll 0$ geeft voor het debiet:

$$q_{z=0}^{t+\Delta t} = \frac{\partial}{\partial t} q_{z=0}^t \cdot \Delta t + q_{z=0}^t \quad (26)$$

$q_{z=0}^{t+\Delta t} =$ product van twee functies (bijv. m en n) op tijdstip $t+\Delta t$

Linearisatie van (25) levert dan via Kettingregel en lin. Taylorpolynoom:

$$q_{z=0}^{t+\Delta t} = m_{z=0}^{t+\Delta t} \cdot n_{z=0}^{t+\Delta t} = m_{z=0}^t \cdot n_{z=0}^t + \frac{\partial}{\partial t} m_{z=0}^t \cdot n_{z=0}^t \cdot \Delta t + m_{z=0}^t \cdot \frac{\partial}{\partial t} n_{z=0}^t \cdot \Delta t + O((\Delta t)^2)$$

⁽³⁾ "FSCONBAG" is een rekenprogramma voor verzadigd slib.

$$m_1 = \frac{1}{\gamma_f} \left[\frac{k(e_0^j)}{(1+e_{f,0}^j+e_{g,0}^j)} \cdot \frac{\frac{\partial \sigma_{op}(e_{f,1}^j)}{\partial e_f}}{\Delta z} \right] \quad (31)$$

$$n_0 = \frac{1}{\gamma_f} \left[\beta(e_{f,0}^j) \left[\gamma_s - \gamma_f (1+e_{g,0}^j) + \frac{\sigma_{op}(e_{f,1}^j) - \sigma_{op}(e_{f,0}^j)}{\Delta z} \right] - \left[\frac{k(e_{f,0}^j)}{(1+e_{f,0}^j+e_{g,0}^j)} \cdot \frac{\frac{\partial \sigma_{op}(e_{f,0}^j)}{\partial e_f}}{\Delta z} \right] \right] \quad (32)$$

$$n_1 = \frac{1}{\gamma_f} \left[\frac{k(e_{f,0}^j)}{(1+e_{f,0}^j+e_{g,0}^j)} \cdot \frac{\frac{\partial \sigma_{op}(e_{f,1}^j)}{\partial e_f}}{\Delta z} \right] \quad (33)$$

$$Rest = q_{z=0}^{j+1} - \left[\frac{1}{\gamma_f} \frac{k(e_{f,0}^j)}{(1+e_{f,0}^j+e_{g,0}^j)} \cdot \left[\gamma_s - \gamma_f (1+e_{g,0}^j) + \frac{\sigma_{op}(e_{f,1}^j) - \sigma_{op}(e_{f,0}^j)}{\Delta z} \right] \right] \quad (34)$$

$$met \ q_{z=0}^j = \left[\frac{1}{\gamma_f} \frac{k(e_{f,0}^j)}{(1+e_{f,0}^j+e_{g,0}^j)} \cdot \left[\gamma_s - \gamma_f (1+e_{g,0}^j) + \frac{\sigma_{op}(e_{f,1}^j) - \sigma_{op}(e_{f,0}^j)}{\Delta z} \right] \right]$$

In feite is de laatste term in vergelijking (34) tussen grote haken een discretisatie van de wet van Darcy en benadert dus q_0^j . Vervolgens wordt q_0^{j+1} gelijk aan nul gesteld voor een ongedraineerde rand.

De vergelijking wordt als volgt geschreven: $m_0 \cdot e_0^{j+1} + m_1 \cdot e_1^{j+1} = r$ met: $r = n_0 \cdot e_0^j + n_1 \cdot e_1^j + Rest$

$$r = n_0 \cdot e_0^j + n_1 \cdot e_1^j + q_0^{j+1} - q_0^j$$

Deze randvoorwaarde is toegepast in "FSCONGAS", "FSCGAS" en "FSCONBAG". Dezelfde procedure kan doorlopen worden voor de afleiding van een bovenrandvoorwaarde met een voorgeschreven debiet. Omdat een ongedraineerde bovenrand in de praktijk niet realistisch is komt deze maar weinig voor.

2.7 Inpassing randvoorwaarden in differentieschema

In de vorige paragrafen zijn het differentieschema en randvoorwaarden afgeleid. Hier zullen twee situaties worden uitgewerkt voor een eenvoudig schema van 5 knooppunten. De situaties omvatten allebei een gedraineerde bovenrand (e_f is voorgeschreven), een gedraineerde of ongedraineerde ($q_0=0$) onderrand.

gedraineerde onderrand:

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \tau \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_4^j & B_3^j & C_2^j & 0 & 0 \\ 0 & A_3^j & B_2^j & C_1^j & 0 \\ 0 & 0 & A_2^j & B_1^j & C_0^j \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{f,4}^{j+1} \\ e_{f,3}^{j+1} \\ e_{f,2}^{j+1} \\ e_{f,1}^{j+1} \\ e_{f,0}^{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{f,4}^j \\ e_{f,3}^j \\ e_{f,2}^j \\ e_{f,1}^j \\ e_{f,0}^j \end{bmatrix} + \tau \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ r_{n=3} \\ r_{n=2} \\ r_{n=1} \\ r_{n=0} \end{bmatrix} \end{pmatrix} \quad (35)$$

$e_{f,4}^{j+1}$ is de e-waarde op de bovenrand en $e_{f,0}^{j+1}$ is de e-waarde op de onderrand.

Deze waarden blijven ongewijzigd, ofwel hier wordt alleen vermenigvuldigd met 1 uit de eenheidsmatrix.

ongedraineerde onderrand:

$$\begin{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \tau \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ A_4^j & B_3^j & C_2^j & 0 & 0 \\ 0 & A_3^j & B_2^j & C_1^j & 0 \\ 0 & 0 & A_2^j & B_1^j & C_0^j \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\tau}m_1 & \frac{1}{\tau}(1-m_0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{f,4}^{j+1} \\ e_{f,3}^{j+1} \\ e_{f,2}^{j+1} \\ e_{f,1}^{j+1} \\ e_{f,0}^{j+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & n_1 & n_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_{f,4}^j \\ e_{f,3}^j \\ e_{f,2}^j \\ e_{f,1}^j \\ e_{f,0}^j \end{bmatrix} + \tau \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ r_{n=3} \\ r_{n=2} \\ r_{n=1} \\ Rest \end{bmatrix} \end{pmatrix} \quad (36)$$

$e_{f,0}^{j+1}$ is de e-waarde op de onderrand.

De volgende uitdrukkingen komen hierin voor:

$$A_{n+1}^j = - \frac{\gamma_s - \gamma_f(1 + e_{gn}^j)}{\gamma_f} \cdot \beta(e_{fn}^j) \cdot \frac{1}{2\Delta Z} - \frac{1}{\gamma_f} \frac{(\alpha(e_{fn+1}^j) - (\alpha(e_{fn-1}^j)))}{(2\Delta z)^2} - \frac{1}{\gamma_f} \alpha(e_{fn}^j) \cdot \frac{1}{(\Delta z)^2} \quad (15a)$$

$$B_n^j = + \frac{1}{\gamma_f} \alpha(e_{fn}^j) \cdot \frac{2}{(\Delta z)^2} \quad (15b)$$

$$C_{n-1}^j = + \frac{\gamma_s - \gamma_f(1+e_{gn}^j)}{\gamma_f} \cdot \beta(e_{fn}^j) \cdot \frac{1}{2\Delta z} + \frac{1}{\gamma_f} \frac{(\alpha(e_{fn+1}^j) - \alpha(e_{fn-1}^j))}{(2\Delta z)^2} - \frac{1}{\gamma_f} \alpha(e_{fn}^j) \cdot \frac{1}{(\Delta z)^2} \quad (15c)$$

$$RHSGAS: \quad r_n = \frac{1}{\gamma_f} \cdot \frac{(e_{gn+1}^j - e_{gn-1}^j)}{2\Delta z} \cdot \frac{k(e_{fn}^j)}{(1+e_{fn}^j+e_{gn}^j)^2} \cdot \left[(\gamma_s + e_{fn}^j \gamma_f) + \frac{\sigma_{op}(e_{fn+1}^j) - \sigma_{op}(e_{fn-1}^j)}{2\Delta z} \right] \quad (17a)$$

$$m_0 = \frac{1}{\gamma_f} \left[\beta(e_{f0}^j) \left[\gamma_s - \gamma_f(1+e_{g0}^j) + \frac{\sigma_{op}(e_{f1}^j) - \sigma_{op}(e_{f0}^j)}{\Delta z} \right] - \left[\frac{k(e_{f0}^j)}{(1+e_{f0}^j+e_{g0}^j)} \cdot \frac{\frac{\partial \sigma_{op}(e_{f0}^j)}{\partial e_f}}{\Delta z} \right] \right] \quad (30)$$

$$m_1 = \frac{1}{\gamma_f} \left[\frac{k(e_{f0}^j)}{(1+e_{f0}^j+e_{g0}^j)} \cdot \frac{\frac{\partial \sigma_{op}(e_{f1}^j)}{\partial e_f}}{\Delta z} \right] \quad (31)$$

$$n_0 = \frac{1}{\gamma_f} \left[\beta(e_{f0}^j) \left[\gamma_s - \gamma_f(1+e_{g0}^j) + \frac{\sigma_{op}(e_{f1}^j) - \sigma_{op}(e_{f0}^j)}{\Delta z} \right] - \left[\frac{k(e_{f0}^j)}{(1+e_{f0}^j+e_{g0}^j)} \cdot \frac{\frac{\partial \sigma_{op}(e_{f0}^j)}{\partial e_f}}{\Delta z} \right] \right] \quad (32)$$

$$n_1 = \frac{1}{\gamma_f} \left[\frac{k(e_{f0}^j)}{(1+e_{f0}^j+e_{g0}^j)} \cdot \frac{\frac{\partial \sigma_{op}(e_{f1}^j)}{\partial e_f}}{\Delta z} \right] \quad (33)$$

$$Rest = q_0^{j+1} - \left[\frac{1}{\gamma_f} \frac{k(e_{f0}^j)}{(1+e_{f0}^j+e_{g0}^j)} \cdot \left[\gamma_s - \gamma_f(1+e_{g0}^j) + \frac{\sigma_{op}(e_{f1}^j) - \sigma_{op}(e_{f0}^j)}{\Delta z} \right] \right] \quad (34)$$

3 Parameterbepaling

3.1 HYDCON-procedure

Het gebruik van de finite strain theorie houdt in, dat de volgende materiaal parameterfuncties bepaald moeten worden:

- ✓ de relatie tussen het vloeistof poriegetal en de operationele spanning $\sigma_{op}(e_f)$;
- ✓ de relatie tussen het vloeistofporiegetal en de doorlatendheid $k(e_f)$;

De effecten van kruip worden hierbij niet expliciet meegenomen.

Om deze relaties te bepalen is gebruik gemaakt van een combinatie van gegevens uit verschillende proeven over het gehele spanningsbereik van slib in een diep depot (, dus van 0 tot 250 kPa)⁽⁴⁾.

Voor verzadigd slib is sinds 1992 de HYDCON-procedure toegepast. De HYDCON-procedure (HYDraulic CONSolidation) maakt gebruik van verschillende meetopstellingen om parameterrelaties tussen het poriegetal (e) en de operationele spanning respectievelijk de doorlatendheid te bepalen. Iedere proef wordt weer bij een ander bereik van de effectieve spanning toegepast. De procedure bestaat uit een combinatie van een consolidatieproef onder een hydraulische belasting in de orde van 25 kPa, een oedometerproef met constant head doorlatendheidsproeven op hogere spanningsniveaus. Voor de laagste spanningsniveaus worden kolomproeven gebruikt. Deze combinatie van een meer geavanceerde proefopstelling (HYDCON-proef) en meer traditionele proeven bleek succesvol.

Om de verkregen metingen te interpreteren zijn drie verschillende methoden ontwikkeld (HYD4, HYDEX, DIRECT).

3.2 Meetopstellingen

3.2.1 Kolomproef

Spanningsbereik: 0.0 - 0.3 kPa.

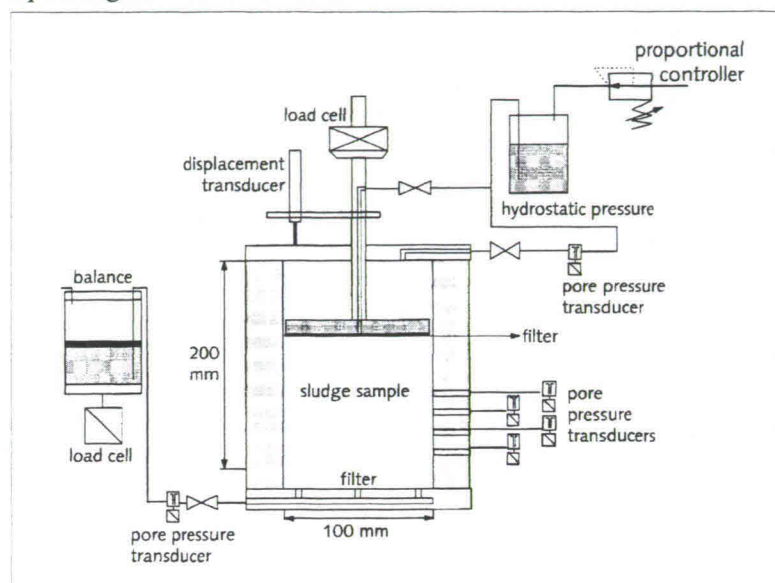
Om de $\sigma'(e_f)$ en $k(e_f)$ bij zeer lage spanningsniveau's te bepalen worden deze proeven uitgevoerd. Slechts één waarde voor $\sigma'(e_f)$ en één waarde voor $k(e_f)$ wordt vastgesteld per proef. De waarde van $\sigma'(e_f)$ wordt afgeleid van het gemiddelde poriegetal en het "gemiddelde" spanningsniveau aan het einde van de proef. Dus $\sigma'(e_f)$ is gelijk aan de helft van de maximale operationele spanning aan het einde van de proef en e_f is terug te rekenen uit het volume water en volume vaste stof in de kolom aan het eind van de consolidatie. De maximale operationele spanning wordt ook berekend, namelijk uit de initiële wateroverspanning. De doorlatendheid volgt niet direct uit de metingen, maar is te schatten uit de initiële zakkingsnelheid van de kolom. Het bij de doorlatendheid behorende poriegetal volgt uit het

⁽⁴⁾ Stel: een 40 meter diep depôt: $\sigma_{op} = 40 \cdot g \cdot (\rho_{nat} - \rho_w) = 40 \cdot 10 \cdot 0.6 = 240 \text{ kPa}$

watergehalte bij het storten van het slib in de kolom. De proeven worden uitgevoerd bij een constante temperatuur van 10 à 11 °C. De beginhoogte is variabel en ligt globaal tussen de 30 à 40 cm. De diameter van de kolommen is 5 à 6 cm. De kolomproeven waren niet bedoeld als sedimentatieproeven, maar als consolidatieproeven. De begindichtheid van het slib in de kolom benadert de initiële dichtheid in de HYDCON-cel. Deze initiële dichtheden⁽⁵⁾ wijken soms af, doordat de kolomproeven in een aantal gevallen later werden uitgevoerd dan de HYDCON-proeven.

3.2.2 HYDCON-proef

Spanningsbereik: 2 - 30 kPa.



Afbeelding 3.1 HYDCON-opstelling

In de HYDCON-proef vindt consolidatie plaats ten gevolge van doorstroming. Een hydraulische gradient is de drijvende kracht van het consolidatieproces. Deze hydraulische gradient wordt voor een periode van ongeveer 10 dagen opgelegd. Na deze tien dagen bleek van de geteste monsters het consolidatieproces te zijn "beëindigd".

De HYDCON-opstelling bestaat uit een perspex cel met een binnendiameter van 100 mm en een

hoogte van 200 mm, de cel is aan beide zijden gedraineerd. In de wand van de cel zijn 4 waterspanningsopnemers gemonteerd op afstanden van respectievelijk 20, 40, 60, 80 mm vanaf de bodem. Op de cel wordt in een stap een constante waterdruk van 25 kPa gezet. Bovendien rust op de sliblaag een plunjer (met een constante belasting van ongeveer 2 kPa). Dit heeft twee redenen:

- ✓ het registreren van de monsterhoogte via een aan de plunjer gekoppelde verplaatsingsopnemer.
- ✓ het voorkomen van doorslag tijdens het consolidatieproces. Dit wordt bewerkstelligd, doordat tengevolge van een lichte belasting op de plunjer, zich eventueel ontwikkelende scheuren worden dichtgedrukt.

Gedurende de consolidatie onder hydraulische belasting worden continu de zettingen, poriedrukken op verschillende hoogten en de afvoer geregistreerd. Om de natuurlijke omstandigheden zo goed mogelijk te simuleren wordt de HYDCON-proef bij een constante temperatuur van 10 °C uitgevoerd. Aan het einde van de HYDCON-test zijn de afvoer en de poriedrukken constant geworden. Daarvan kunnen de

⁽⁵⁾ Initiële dichtheid (ρ_{nat}) volgt uit watergehalte bepaling (w%).

doorlatendheden afgeleid worden. Men heeft verondersteld, dat de wandwrijving verwaarloosbaar is. Zo kunnen de effectieve spanningen bepaald worden door aan te nemen dat de totaalspanning constant is over de hoogte. Tevens moet bij de berekening van de effectieve spanningen het gewicht van de sliblaag worden meegenomen.

Na afloop van de proef wordt het monster uit de cel gehaald en in dunne plakjes van 1 à 2 cm dikte verdeeld voor doorlatendheidsproeven en oedometerproeven. Ook worden per laagje het watergehalte en de ongedraineerde schuifsterkte bepaald.

3.2.3 Oedometertest

Spanningsbereik: 25 - 250 kPa

Voor hogere spanningsniveau's wordt de $\sigma_{op}(e_p)$ -relatie bepaald m.b.v. de één-dimensionale samendrukkingsproef (oedometertest). Het poriegetal wordt uit de zetting per belastingstap berekend.

Na afloop van de HYDCON-proef wordt het monster uit de HYDCON-cel verdeeld in deelmonsters. Op het één na onderste deelmonster wordt een standaard samendrukkingsproef uitgevoerd volgens de "snelle" methode: d.w.z. één dag per belastingstap. Er wordt geen rekening gehouden met het seculair effect. De opgelegde belastingstappen zijn: 25, 50, 100, 150 en 250 kN/m².

Het poriegetal (e_p), behorende bij een bepaalde belastingstap, wordt berekend uit de eindzakking per belastingstap. De effectieve spanning volgt direct uit de opgelegde belasting per stap.

De oedometerproef wordt uitgevoerd bij een constante temperatuur van 18°C.

3.2.4 Constant head doorlatendheidsproef

Spanningsbereik: 50, 100 kPa

Vanwege de lage doorlatendheid bij hoge spanningsniveau's wordt een speciaal apparaat gebruikt. Dit apparaat bestaat uit een monsterhouder, die geplaatst is in een triaxiaalcel. Door meting van de poriedruk en de zetting kan de doorlatendheid gedurende en aan het eind van het consolidatieproces worden bepaald. De proef wordt bij twee spanningsniveau's, te weten 50 en 100 kPa, uitgevoerd en bij een constante temperatuur van 10°C.

Voor twee monsters uit het Ketelmeer (i.e. YM16 en YM7) is echter de falling head doorlatendheidsproef gebruikt i.p.v. de constant head doorlatendheidsproef.

3.3 Interpretatie proefresultaten

3.3.1 Interpretatie-methoden

Drie interpretatie-methoden zijn beschikbaar voor het vaststellen van de relaties tussen het poriegetal en de operationele spanning respectievelijk de doorlatendheidscoëfficiënt (van Essen et al., 1995):

✓ HYD-4

✓ HYDEX

✓ DIRECT.

HYDEX en HYD-4 zijn iteratieve methodes, die gebaseerd zijn op het model "FSCONBAG". Beide methodes optimaliseren voorgestelde consolidatie parameters om het verschil tussen de gemeten en berekende waarden te reduceren. Omdat deze methodes gebaseerd zijn op de finite strain theorie is de interpretatie gelimiteerd door de modelveronderstellingen. Een andere beperking is het type parameter functie wat verondersteld wordt: er worden lineaire exponentiële parameterfuncties gebruikt:

$$k(e_f) = \exp(m_1 + m_2 e_f)$$

$$\sigma_{op}(e_f) = \exp(m_3 + m_4 e_f) + \exp(m_5 + m_6 e_f)$$

De $\sigma_{op}(e_f)$ relatie wordt uitgebreid voor de hoge spanningsniveau's met gegevens van oedometerproeven. Buiten deze metingen en de HYDCON-proef worden geen resultaten van andere proeven gebruikt. De laatste term in de $\sigma_{op}(e_f)$ relatie is gerelateerd aan de oedometer gegevens.

Het verschil tussen HYD-4 en HYDEX zit in het aantal gefitte meetgegevens in het iteratieproces. HYD4 heeft de zetting, afvoer en poriegetal boven en onderin het monster aan het einde van de consolidatie als invoervariabelen. HYDEX gebruikt daarbij nog poriewaterdrukken versus de tijd, gemeten twee centimeter boven de bodem, en een compleet profiel van de porie water druk en het porie water getal aan het einde van de proef. De DIRECT-methode maakt gebruik van exponentiële regressie. Hierin zijn geen modelveronderstellingen verwerkt.

3.3.2 DIRECT-methode

Deze methode maakt gebruik van gegevens van alle proeven, berust niet op aannamen en wordt langzamerhand de standaardmethode om parameters van slib te bepalen. De DIRECT-methode resulteert in polynome exponentiële parameterfuncties (zie bijlage A):

$$\sigma_{op}(e_f) = \exp(m_1 + m_2 e_f + m_3 e_f^2 + m_4 e_f^3)$$

$$k(e_f) = \exp(m_5 + m_6 e_f + m_7 e_f^2 + m_8 e_f^3)$$

De operationele spanning op een bepaald punt in het slibmonster in de HYDCON-cel wordt berekend door de poriewaterdruk op dat punt af te trekken van de totaalspanning. De doorlatendheid volgt uit poriedruk gradiënt tussen twee poriedrukopnemers. Omdat het debiet bekend is, kan de doorlatendheid in dit deel van het monster berekend worden. Maar de consolidatie moet wel beëindigd zijn (poriewaterdrukken zijn constant). Vervolgens worden de meetpunten gefit m.b.v. exponentiële regressie. Metingen SS ⁽⁶⁾, KM ⁽⁷⁾ en K16 ⁽⁸⁾ (zie bijlage A) zijn "gefit" met deze methode (Rapport nr. CO-346630/15, GD).

Het resultaat van deze methode is: ✓ de $\sigma_{op}(e_f)$ - relatie wijkt weinig af van de meetpunten;
✓ de $k(e_f)$ - relatie is niet nauwkeurig genoeg vanwege het gebrek

⁽⁶⁾ Coördinaten SS: Slufter meetpaal Zuid

⁽⁷⁾ KM is een mengmonster uit 20 monsters van het Ketelmeer

⁽⁸⁾ Coördinaten K16: Ketelmeer X: 180004 Y: 510903

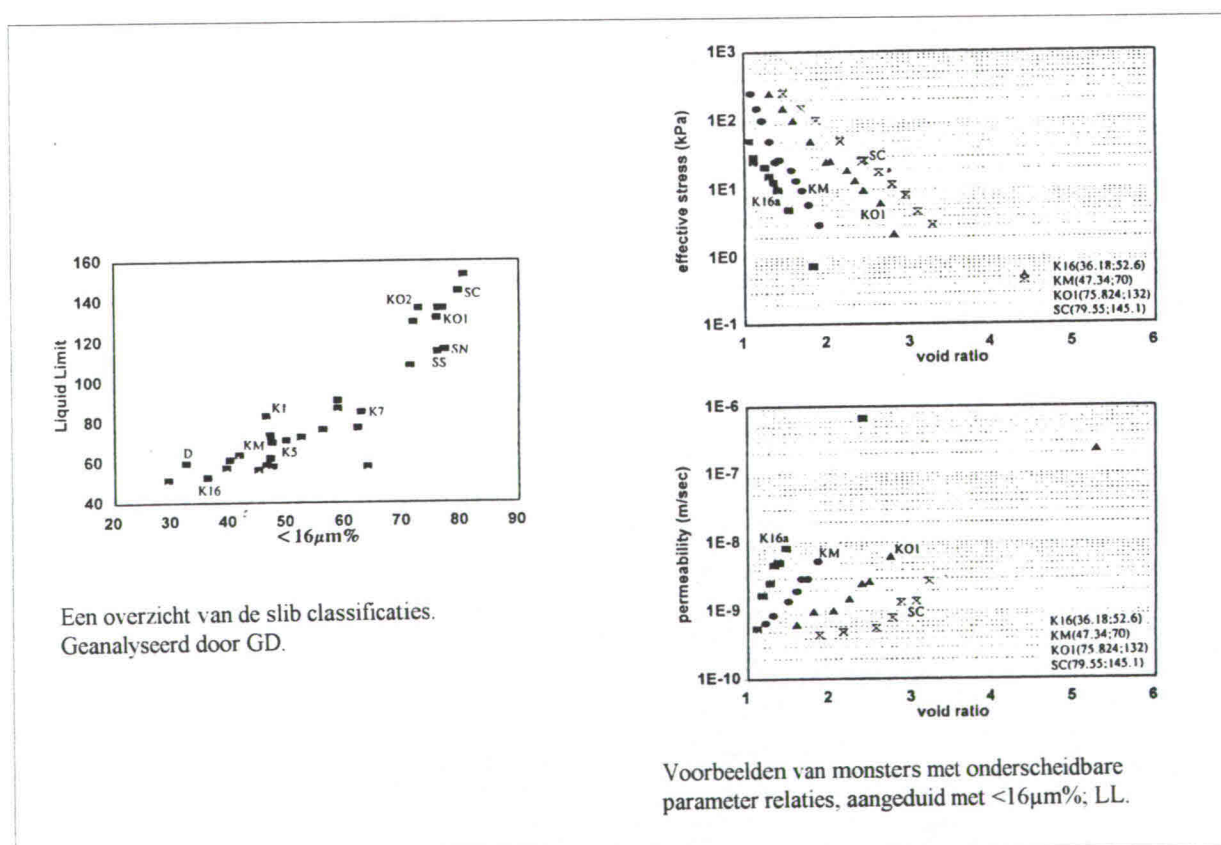
aan metingen tussen de kolomproef en de metingen uit de HYDCON-proef.

	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	m_6	m_7	m_8
SS	12.93	-7.15	1.54	-0.132	-25.1	1.64	0.021	0
KM	19	-18.5	6.33	-0.777	-24.6	2.95	-0.135	0
K16	12.9	-10.8	2.74	-0.39	-27.3	6.48	-0.43	0

Tabel 3.1 Parameter sets DIRECT-methode

3.3.3 Correlaties tussen parameterrelaties en classificatie eigenschappen

Onderstaande figuur (Wichman et al., 1995) laat de relatie zien tussen twee classificatie eigenschappen van slib, te weten de liquid limit en de korrelfractie $<16\mu\text{m}$. Hieruit blijkt, dat K16 de kleinste fractie fijne deeltjes bevat en SS de grootste. Deze bron vermeldt ook, dat er een correlatie is tussen de operatieve spanning en de liquid limit en tussen de doorlatendheid en de korrelfractie $<16\mu\text{m}$. Dit verklaart de verschillen tussen de parameterrelaties van K16, KM en SS. Anders gezegd: de fijnheid van het slib beïnvloedt de $\sigma_{op}(e_f)$ - en de $k(e_f)$ -relatie. Ook is de zandfractie (percentage $>63\mu\text{m}$) bepaald (door GD) behorend bij SS (5.2%), KM (20.7%) en K16 (30.2%).



Afbeelding 3.2 Parameterrelaties en classificatie eigenschappen

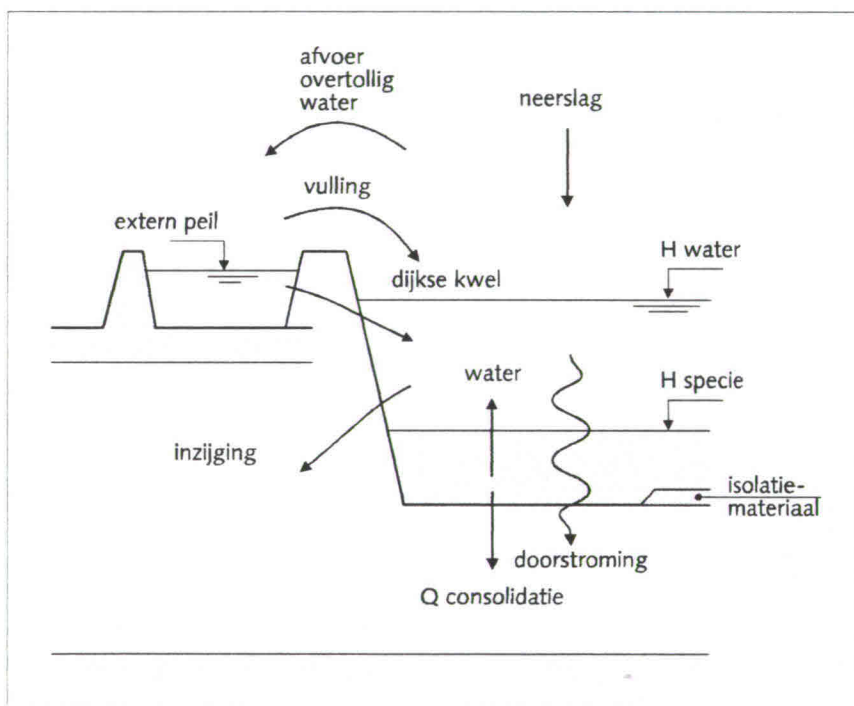
4 Gevoeligheidsanalyse

4.1 Depôtscenario

Voor de gevoeligheidsanalyse is een vereenvoudigd depôtscenario aangehouden. Deels is dit gedaan omdat de consolidatieaspecten beter zijn te beschouwen in een eenvoudig scenario, maar dit is ook het gevolg van het gebruik van een één-dimensionaal model. De berekeningen voor de gevoeligheidsanalyse zijn uitgevoerd met het computermodel "FSCONGAS".

4.1.1 Waterhuishouding en depôtgeometrie

De vereenvoudiging komt vooral naar voren in de waterhuishouding en de depôtgeometrie. Afbeelding



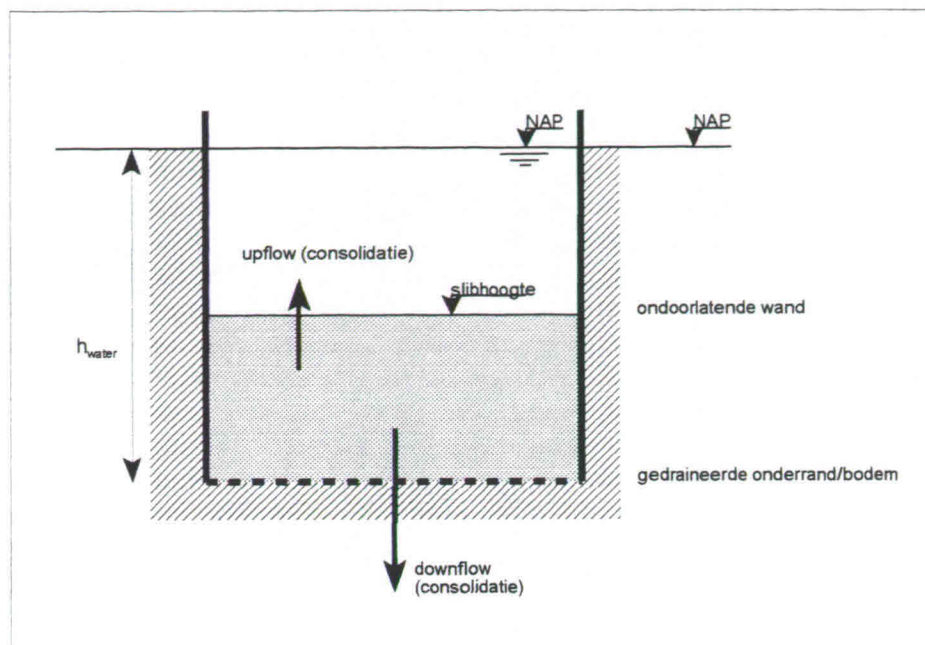
Afbeelding 4.1 Waterhuishouding depôt

4.1 geeft een overzicht van de waterhuishouding in een depôt, zoals deze in de praktijk voorkomt.

De berekeningen zijn één-dimensionaal uitgevoerd, d.w.z. voor een verticaal in een depôt zonder taluds. Er is dus geen rekening gehouden met de invloed van de taluds op het consolidatieproces. Deze invloed houdt in, dat de doorsnee van het depôt naar de bodem toe afneemt, terwijl het volume gedeponeerde vaste stof constant is (tenminste bij één depositiesnelheid). Dit beïnvloedt dus de slibhoog-

te en dus ook het consolidatieproces. Omdat in de praktijk de taluds een groot deel van het oppervlak van het depôt beslaan is dit geen onbelangrijk effect (zie ook hoofdstuk 5 voor een berekening waarbij wel rekening is gehouden met de taluds). Omdat ook de poriewaterstroming één-dimensionaal gemodelleerd is, kunnen de wanden van het depôt als ondoorlatend worden beschouwd in de berekeningen. In de praktijk heeft het hier berekende scenario dus betrekking op depôts, die omringd zijn door een damwand.

In de gevoeligheidsanalyse is geen sprake van hydraulische gradiënten in de sliblaag ten gevolge van verschillen in in- en extern waterpeil. Vanwege de afwezigheid van een hydraulisch drukverschil over de sliblaag is er geen doorstroming. In computerprogramma "FSCONGAS" wordt een vaste waterhoogte gedurende de simulatie opgege-



Afbeelding 4.2 Depôtscenario gevoeligheidsanalyse

ven en is een hydraulische gradiënt niet geïmplementeerd. Voor de boven- en onderrand kan gekozen worden tussen een ondoorlatende of doorlatende rand. In alle uitgevoerde berekeningen zijn zowel de bovenrand als onderrand gedraineerd. In hoofdstuk 2 is beschreven hoe een gedraineerde rand in het model verwerkt is. De enige stroming van poriewater naar het grondwater is die ten gevolge van de eigengewichtsconsolidatie.

4.1.2 Depositieperiode

In alle simulaties is sprake van één enkele homogene sliblaag (zonder isolatiemateriaal op de bodem), die met constante snelheid wordt gedeponneerd gedurende één depositieperiode. Rekenen met een isolerende voorziening op de depôtbodem is wel mogelijk, maar niet toegepast in de gevoeligheidsanalyse.

Bij de invoer voor de simulaties zijn twee vloeistof porie getallen ingevoerd: e_{dep} en e_{set} . e_{dep} is het vloeistof poriegetal bij depositie, ofwel zoals het slib uit de pijp komt, e_{set} het vloeistof porie getal waarbij het consolidatieproces begint (in de toplaag) en tevens de bovenrandvoorwaarde bij een gedraineerde bovenrand (met $e_{set} \leq e_{dep}$). Dit begin kan ook in operationele spanningen worden geformuleerd: $\sigma_{op}(e_{set})$, omdat de operationele spanningen een functie zijn van het porie vloeistof getal. Voordat het consolidatieproces begint vinden andere processen in het slib plaats (afhankelijk van de dichtheid waarbij het slib gedeponneerd wordt): sedimentatie, eventueel segregatie en "slibstroming". De operationele spanning, waarbij het consolidatieproces start bepaalt de waarde van e_{set} . In het model betekent dit, dat de e_f -waarde in de toplaag van slib maximaal gelijk is aan e_{set} . Daarbij worden de andere processen in dit model als afgesloten beschouwd, deze hebben immers een veel kleinere tijdschaal dan het consolidatieproces.

De simulaties zijn zo uitgevoerd, dat het slibniveau altijd onder het waterniveau blijft. De simulatie wordt namelijk instabiel in de "boven water fase", omdat dan de gradiënten in e_g (gas porie getal) groter worden.

4.1.3 Slibeigenschappen

Aangenomen is, dat de eigenschappen van het slib gedurende het vullen van het depôt constant zijn. Voor de simulaties is gebruik gemaakt van drie parametersets: SS (mengmonster Slufter zuid), KM (mengmonster van 20 monsters uit het Ketelmeer) en K16 (Ketelmeer K16a), die volgen uit de HYDCON-procedure m.b.v. de DIRECT-methode (zie hoofdstuk 3). De parameterrelaties zijn terug te vinden in bijlage A.1.

Tevens zijn m.b.v. meetwaarden uit de HYDCON-procedure lineaire parametersets bepaald. De meetwaarde uit de kolomproef is daarbij weggelaten. De kolomproef is de minst nauwkeurige meting, omdat de wanden van de kolom wandwrijving veroorzaken. (De doorsnede van een kolom is slechts 5 à 6 cm.) Via lineaire regressie zijn uit de meetwaardes van SS, KM en K16 de lineaire relaties afgeleid. Deze zijn afgebeeld in bijlage A.2.

Omdat in de hydconprocedure de monsters niet beproefd zijn op zwel, is het gedrag van het slib bij zwel niet te beschrijven met de hier afgeleide parameterrelaties. Daarom is in "FSCONGAS" de zwel uitgezet (zie ook bijlage B, instabiliteit begin simulatie). Zwel kan optreden t.g.v. een gradiënt in e_g (zie paragraaf 2.5), maar ook zonder gas t.g.v. ontlasting. Ontlasting treedt op als het slib zich in de "boven water fase" bevindt. Het waterpeil in het depôt blijft dan niet meer constant, maar het intern waterpeil stijgt met de slibhoogte mee en verschilt dus van het extern waterpeil. Als de onderrand gedraineerd is ontstaat een hydraulisch drukverschil over het slib. Na enige zakking van het slib (t.g.v. consolidatie) zakt ook het binnenwaterpeil met het slibniveau mee. Daardoor zal de hydraulische gradiënt afnemen. Deze afname van de hydraulische gradiënt veroorzaakt ontlasting.

4.1.4 Gas

De simulaties zijn uitgevoerd in gasmodus 3, wat inhoudt, dat er geen gasproductie is, maar een aan de hoeveelheid gedeponeerde vaste stof gerelateerde hoeveelheid gas (e_g^{atm}). Aangenomen is, dat in het model het gas instantaan aanwezig is na depositie van het slib en dat over het slibprofiel het atmosferisch gasgehalte constant is. Het gas is samendrukbaar en afhankelijk van de coëfficiënt van Henry (H) is het gas oplosbaar (wat tevens advectie oplevert). Verondersteld is, dat het gas voor 100% bestaat uit methaan, terwijl in de praktijk biogas voor 82% tot 90% uit methaan bestaat (Martens et al., 1980).

4.2 Kentallen consolidatie

Ten behoeve van de gevoeligheidsanalyse worden kentallen gedefinieerd. Een kental kan de interpretatie vergemakkelijken, omdat dan in één getal een bepaald effect te zien is, zonder vele grafieken te

moeten bekijken.

4.2.1 Consolidatiegraad $U(t)$

Gibson et al.(1981) definieert een dimensieloze consolidatiegraad $U(t)$ voor verzadigd slib:

$$U(t) = \frac{S(t)}{S(\infty)} = \frac{\int_0^{z_{\max}} [e(z,0) - e(z,t)] dz}{\int_0^{z_{\max}} [e(z,0) - e(z,\infty)] dz} \quad (37)$$

De consolidatiegraad is gedefinieerd als een verhouding tussen de zetting op tijdstip t en de eindzetting. Hierbij is geen rekening gehouden met een depositieperiode, daar het slibpakket instantaan aanwezig is.

Voor het gebruik in de praktijk, waarbij een depositieperiode en ook gas in het slib voorkomen is een vertaalslag nodig:

$$U(t) = \frac{S(t)}{S(\infty)} = \frac{\int_0^{z_{\max}} [e_{\text{set}} - e(z,t)] dz}{\int_0^{z_{\max}} [e_{\text{set}} - e(z,\infty)] dz} = \frac{(h_{\text{set}} - h_{\text{sat}})}{(h_{\text{set}} - h_{\text{sat}}^{\text{eind}})} \quad (38)$$

Hierbij zijn alle hoogtes verzadigde hoogtes, d.w.z. ook h_{dep} en h_{set} zijn verzadigde slibhoogtes.:

h_{sat} = verzadigde deel van de slibhoogte op tijdstip t

$h_{\text{sat}}^{\text{eind}}$ = verzadigde deel van de slibhoogte einde primaire consolidatie

h_{set} wordt als volgt gedefinieerd: $h_{\text{set}} = z_{\max} \cdot (1 + e_{\text{set}}) = (h_{\text{dep}} \cdot (1 + e_{\text{set}})) / (1 + e_{\text{dep}})$

met $z_{\max} = h_{\text{dep}} / (1 + e_{\text{dep}})$

$z_{\max}$ = hoogte materiaal (droge stof): materiaal/Lagrange coördinaat

$h_{\text{dep}} = z_{\max} \cdot (1 + e_{\text{dep}}) = v_{\text{dep}} \cdot t_{\text{dep}}$

Op tijdstip t_{dep} (einde depositietijd) bereikt het slib z'n hoogste niveau. Door $t = t_{\text{dep}}$ te kiezen geeft $U(t)$ het voltooide deel weer van de totale primaire consolidatie vlak na beëindiging van de depositieperiode (consolidatieproces voltooid: $U(t) = 1$, aanvang consolidatieproces: $U(t) = 0$).

4.2.2 Consolidatiefactor F_c

Voor de inhoudsberekening van baggerspeciedepot Ketelmeer is in het verleden gebruik gemaakt van de volgende formule (Kevelam, 1995):

$$I_{\text{depot}} = V_{\text{i,s}} * f_{\text{v,u}} * f_{\text{v,g}} * f_{\text{v,c}} * f_{\text{v,o}}$$

waarin: I_{depot} = benodigde depotinhoud (m^3)

$V_{\text{i,s}}$ = in-situ volume te bergen verontreinigde specie (m^3)

$f_{\text{v,u}}$ = uitleveringsfactor

$f_{\text{v,g}}$ = volumevergrotingsfactor door gasvorming

$f_{\text{v,c}}$ = consolidatiefactor

$f_{\text{v,o}}$ = onzekerheidsfactor

De consolidatiefactor is de verhouding tussen de initiële hoogte van het slib aan het einde van de

vulperiode en de hoogte na sedimentatie in het depôt, ofwel $f_{v,c} = h_{t=dep}/h_{set}$. Deze was voor het Ketelmeerdepot in de MER-procedure berekend m.b.v. het computermodel "FSCONBAG". Daar deze simulatie voor verzadigd slib uitgevoerd werd, was ook een volumevergrotingsfactor benodigd voor gasvorming.

Voor de simulaties met "FSCONGAS" kan een soortgelijke consolidatiefactor gedefinieerd worden, waar echter de volumevergroting t.g.v. gasvorming al in verwerkt is. Dit is de consolidatiefactor F_c .

Als $e_{dep} > e_{set}$: $F_c = h_{t=dep}/h_{set}$

Als $e_{dep} = e_{set}$: $F_c = h_{t=dep}/h_{set} = h_{t=dep}/h_{dep}$ (bijzonder geval)

De verzadigde consolidatiefactor ($F_{c,sat}$) kan op identiek wijze worden gedefinieerd, door voor $h_{t=dep}$ de verzadigde slibhoogte in te vullen. Dus $F_{c,sat}$ geeft wel de vertragende effecten van het gas op de consolidatie weer, maar niet het gasvolume in het slib.

4.2.3 Gas

Voor de hoeveelheid gas in het depôt zijn verschillende kentallen te definiëren:

Gashoogte h_g

De gashoogte h_g is het verschil tussen de slibhoogte en de verzadigde slibhoogte (h_{sat}) op een bepaald tijdstip in meters.

Gasvolume percentage $vg\%$

Het gasvolume percentage bestaat uit de gashoogte gedeeld door de totale slibhoogte op een bepaalde tijd. Het kental wordt in procenten weergegeven en geeft een volume percentage van het gas in het slib aan.

$$vg\% = \frac{e_g}{1 + e_f + e_g} \cdot 100\% \quad (39)$$

Gas porie getal $\bar{e}_g$

Het gasvolume in het slib kan ook als gas porie getal worden weergegeven. Bij atmosferische druk levert dit e_g^{atm} . Dit is een puur theoretische waarde. Veel interessanter is de in situ waarde van het gas porie getal. Daar de in situ waarde afhankelijk is van de totaalspanning (via de Wet van Boyle) wordt over de slibhoogte een gemiddelde waarde gedefinieerd: $\bar{e}_g = h_g/h_s$, waarin h_g de gashoogte is en h_s de vaste stof hoogte ($h_s = (v_{dep} \cdot t_{dep}) / (1 + e_{dep})$).

4.3 Invloed van e_{set} op simulatie

4.3.1 Achtergrond gevoeligheidsanalyse e_{set}

Zoals al in paragraaf 4.1.2 is beschreven, wordt de gedraineerde bovenrandvoorwaarde bepaald door de e_f -waarde, waarbij het consolidatieproces aanvangt in de bovenste sliblaag, gedefinieerd als e_{set} . Via de parameterrelaties kan dit vloeistof porie getal omgerekend worden in een operationele spanning in de top laag ($\sigma_{op}(e_{set})$).

Nu is het volgende probleem aanwezig: In laboratoria begint de consolidatie al bij zeer lage dichtheden (dus hoge e_{set} - waarden). Maar in de praktijk vinden bij deze lage dichtheden nog andere processen plaats (zoals slibstroming).

Zou men nu de gemeten dichtheden uit de toplaag in het veld gebruiken voor de bepaling van e_{set} , dan lijkt dit een reële schatting te zijn. Daarbij geldt het volgende: $e_{dep} > e_{set}$. Rekent men deze e_{set} -waarde om in een operationele spanning (met behulp van een parameterrelatie), dan zal blijken dat daar vaak een zeer lage operationele spanning bij hoort ($\sigma_{op}(e_{set}) < 0.1$ kPa). Bij deze lage operationele spanningen blijkt het model niet stabiel te zijn. Men is dus gedwongen een hogere waarde voor $\sigma_{op}(e_{set})$ te kiezen. De vraag is nu welke invloed de e_{set} - waarde heeft op de simulatie. Dit is belangrijk, omdat de waarde voor e_{set} een schatting is en soms aangepast moet worden vanwege de stabiliteit van het model.

4.3.2 Invoer simulaties

Bij een operationele spanning hoger dan 0.1 tot 0.5 kPa zijn in de praktijk andere processen zoals "slibstroming" gestopt. Deze waarde voor de operationele spanning hangt ook af van de slibsoort. Voor Slufter meetpaal Noord is slibstroming in de toplaag aangetoond m.b.v. van de schuifsterkte (zie paragraaf 5.3.3). Maar de bovengrens voor e_{set} (en dus ondergrens voor de operationele spanning) wordt bepaald door de stabiliteit van de berekening en door e_{dep} . Om de effecten van variaties in e_{set} te kunnen bepalen zijn deze dusdanig gevarieerd, dat $\sigma_{op}(e_{set})$ tussen 0.1 en 0.5 kPa ligt. Dit zijn de meest voorkomende waarden voor $\sigma_{op}(e_{set})$, waarvoor het model stabiel is. Voor e_{dep} is de waarde gekozen die bij $\sigma_{op}(e_{dep}) = 0.1$ kPa hoort. De simulaties zijn verricht met parameterrelaties volgens de **DIRECT methode** (bijlage A.1). De simulaties zijn uitgevoerd met $e_g^{atm} = 1.5$, gasmodus 3 $H=0.0333$ en zonder gas.

aantal lagen	1			
aantal perioden	2			
depositieperiode 1 [jaren]	0	10		
bodemrandvoorwaarde	Gedraineerd			
bovenrandvoorwaarde	Depositie			
e_{dep} ; v_{dep} ; e_{set}	5.73	2	5.73	
deeltijdstapfactor depositietijd	4			
consolidatietijd [jaren]	10	100		
bodemrandvoorwaarde	Gedraineerd			
bovenrandvoorwaarde	Gedraïneerd			
hoogte waterlaag [m]	25			
m1 t/m m4	12.93	-7.15	1.54	-0.132
m5 t/m m8	-25.1	1.64	0.021	0
γ_s ; γ_f ; e_g^{atm} ; H	25	10	1.5	0.0333
aantal knopen	50			
grid verfijningsfactoren	0	1.49	0	-0.49
tijdsfactor; aantal tijdstappen; skipout	1.05	100	5	

Tabel 4.1 Invoerfile SS gasmodus 3 lage depositie snelheid

Twee berekende scenario's zijn opgenomen in het supplement: met een snelle depositiesnelheid: 5 m/jaar ($t_{\text{dep}}=4$ jaar) en een langzamere depositietijd: 2 m/jaar ($t_{\text{dep}} = 10$ jaar). Zodoende is ook de invloed van de depositiesnelheid en het gas in de analyse meegenomen. Als voorbeeld is de invoerfile voor Slufter Zuid afgebeeld in tabel 4.1. De andere invoerfiles zijn bij de grafieken en tabellen in supplement A.1 te vinden.

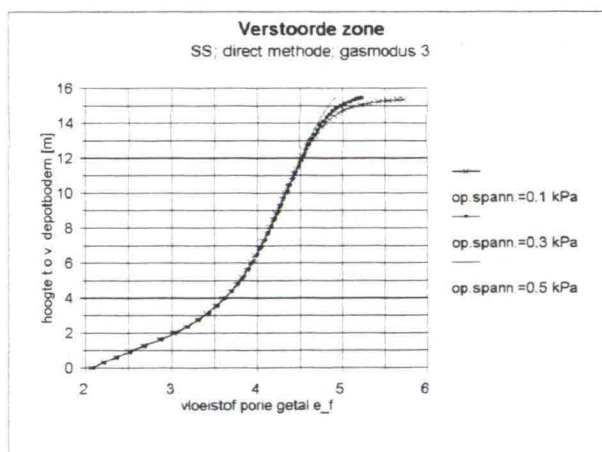
operatieve spanning	SS	KM	operatieve spanning	K16
0.1 kPa	5.73	3.7	0.1 kPa	2.33
0.3 kPa	5.22	3.4	0.3 kPa	2.08
0.5 kPa	4.92	3.1	0.4 kPa	2.01
			0.5 kPa	1.96

Tabel 4.2 e_f horend bij operatieve spanning per parameter set

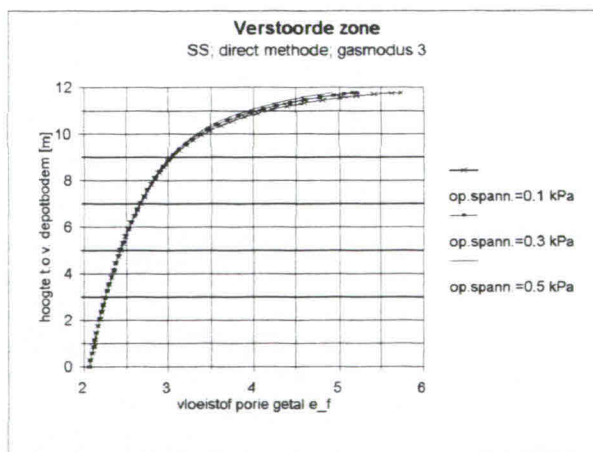
Met parameter set SS, KM en K16 zijn simulaties uitgevoerd voor $\sigma_{\text{op}}(e_{\text{dep}}) = 0.1$ kPa, 0.3 kPa en 0.5 kPa. Omdat K16 bij de laagste operatieve spanning instabiele berekeningen opleverde zijn hier ook simulaties uitgevoerd met $\sigma_{\text{op}}(e_{\text{dep}}) = 0.4$ kPa. De bijbehorende waarden voor e_{set} staan in tabel 4.2 vermeld.

De eindtijd van de simulatie is gekozen op 100 jaar. Dit betekent dat na 100 jaar voor simulaties met parameter set SS nog een maximale water overspanning resteert van 2 kPa, voor KM 0.04 kPa en voor K16 0.01 kPa. Dus SS zal nog iets consolideren na 100 jaar, maar bij KM en K16 is de primaire consolidatie al beëindigd.

4.3.3 Verstoring toplaag door keuze e_{set}



Afbeelding 4.3 Slufter Zuid $t=t_{\text{dep}}$



Afbeelding 4.4 Slufter Zuid $t=100$ jaar

Omdat de ingevoerde waarde voor e_{set} een randvoorwaarde is, is het interessant te kijken tot welke diepte de e_{set} - waarde invloed heeft op het e_f - profiel. Vanaf een bepaalde diepte blijkt een bepaalde

variatie in de bovenrandvoorwaarde geen invloed meer te hebben. Dit zou men een splitsingspunt kunnen noemen en de sliblaag daarboven de “verstoorde zône”. De hoogte van deze zône is een maat voor de invloed van de waarde van e_{set} op het consolidatieproces. Afbeelding 4.3 en 4.4 geven het e_f -profiel op het tijdstip vlak na beëindiging van de depositieperiode (na 10 jaar) en na 100 jaar voor drie verschillende waarden voor e_{set} . De gebruikte invoer voor een van deze berekeningen staat in tabel 4.1 vermeld. In plaats van het splitsingspunt van de profielen uit de drie berekeningen te zoeken kan de verstoorde zône ook op een andere manier worden uitgedrukt: Namelijk in het hoogteverschil tussen het punt, waar $\sigma_{op}(e_f) = 0.5$ kPa in het e_f -profiel van de berekening met $\sigma_{op}(e_{set}) = 0.1$ kPa en de slibhoogte in de berekening waar $\sigma_{op}(e_{set}) = 0.5$ kPa. Dit hoogteverschil (supplement A.3) geeft dan een ondergrens voor de verstoorde zône. Tabel 4.3 geeft de op deze wijze berekende “storingshoogte” voor $\sigma_{op}(e_{set}) = 0.1$ kPa en 0.5 kPa en $\sigma_{op}(e_{set}) = 0.3$ kPa en 0.5 kPa voor simulaties met gasmodus 3 ($e_g^{atm} = 1.5$ en $H=0.0333$).

Een hogere depositiesnelheid vergroot de storingszône op $t=t_{dep}$. Dit is als volgt te verklaren: Bij een hogere depositiesnelheid, en dus een kortere depositieperiode is de consolidatiegraad lager. Dit betekent, dat zeker de laatst gedeponeerde lagen, dus de toplagen, nauwelijks zijn geconsolideerd. Deze lagen hebben een e_f -waarde, die nog dicht bij de randvoorwaarde (e_{set}) ligt. Dus de invloed van de randvoorwaarde op het e_f -profiel is relatief groot. Na honderd jaar zijn geen verschillen meer in de storingszônes aanwezig, omdat dan de primaire consolidatie beëindigd is.

vdep [m/j]	tijd [j]	Mengmonster 20 Ketelmeer		Ketelmeer K16		Slufter Zuid	
		0.1 kPa → 0.5 kPa	0.3 kPa → 0.5 kPa	0.1 kPa → 0.5 kPa	0.3 kPa → 0.5 kPa	0.1 kPa → 0.5 kPa	0.3 kPa → 0.5 kPa
2	t_{dep}	1.06	0.85		0.27	0.96	0.65
2	100	0.21	0.21		0.10	0.26	0.12
5	t_{dep}	6.66	6.65		0.58	4.87	4.90
5	100	0.20	0.11		0.10	0.26	0.12

Tabel 4.3 Hoogteverschil σ_{op} in simulaties gasmodus 3, $e_g^{atm} = 1.5$ en $H=0.0333$

Als men het gas weglaat in de simulaties heeft dit een reducerend effect op de storingszône (zie tabel 4.4). Deze verkleining van de storingszône is toe te schrijven aan drie effecten van het gas:

- ✓ Gas vertraagt de consolidatie. Dus de consolidatiegraad is in de laatst gedeponeerde lagen (de toplagen) lager op $t=t_{dep}$.
- ✓ De drijvende kracht ($\gamma_s - \gamma_f \cdot (1+e_g)$) is t.g.v. het gasvolume lager, dus het slib is na de primaire consolidatie minder geconsolideerd. Omdat het gasvolume in de toplagen het grootst is (gasdruk is daar het kleinst) is juist daar de invloed het grootst voor alle tijden.
- ✓ De gashoogte is de belangrijkste oorzaak. In de toplagen is de gasdruk het laagst en het gasvolume het grootst. De afstand tussen de roosterpunten in de toplaag van het model met gas

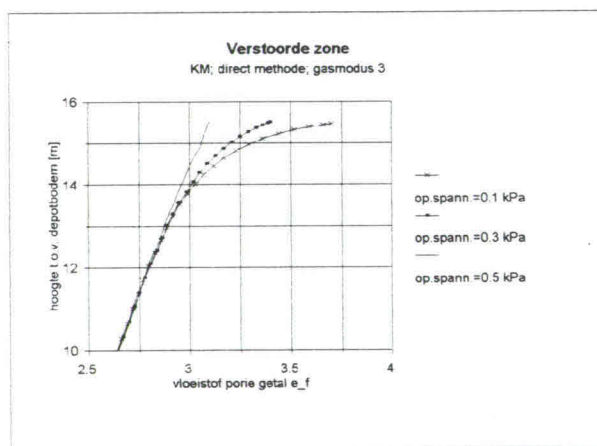
wordt dus groter.

Ook in een berekening zonder gas vergroot een hogere depositiesnelheid de storingszone.

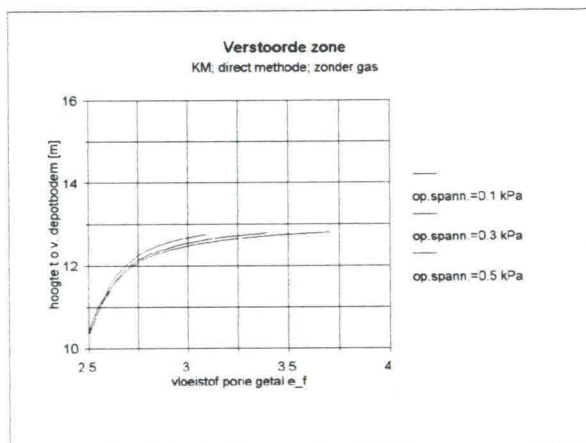
vdep [m/j]	tijd [j]	Mengmonster 20 Ketelmeer		Ketelmeer K16		Slufter Zuid	
		0.1 kPa → 0.5 kPa	0.3 kPa → 0.5 kPa	0.1 kPa → 0.5 kPa	0.3 kPa → 0.5 kPa	0.1 kPa → 0.5 kPa	0.3 kPa → 0.5 kPa
2	t_{dep}	0.19	0.11		0.04	0.36	0.15
2	100	0.05	0.03		0.02	0.08	0.04
5	t_{dep}	1.05	0.98		0.05	1.00	0.86
5	100	0.05	0.03		0.03	0.08	0.04

Tabel 4.4 Hoogteverschil σ_{op} in simulaties gasmodus 3, $e_g^{atm} = 0$ en $H=0$

Het effect van gas op de storingszone is ook zichtbaar in de e_f -profielen. De e_f -profielen in supplement A (waaruit afbeelding 4.5 en 4.6 afgeleid zijn) tonen duidelijk voor alle parameter sets, dat zonder gas de e_f -waarden van de toplaag in de diepte zeer snel afnemen (vooral voor de laagste $\sigma_{op}(e_{set})$ -waarden). Bovendien is de vorm van de berekende profielen zonder gas voor verschillende $\sigma_{op}(e_{set})$ -waarden meer gelijkvormig in de toplaag.



Afbeelding 4.5 KM $e_g^{atm} = 1.5$ $H=0.0333$

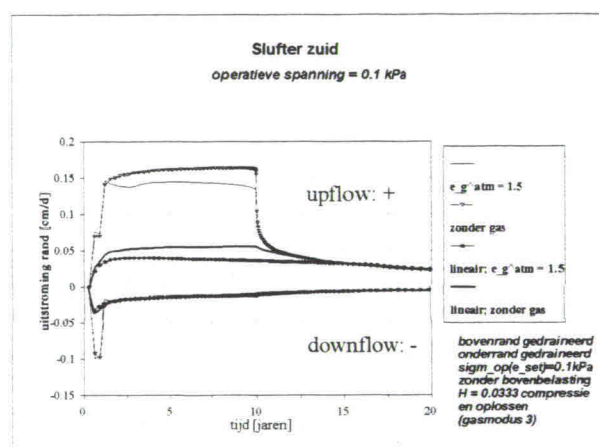


Afbeelding 4.6 KM $e_g^{atm} = 0$

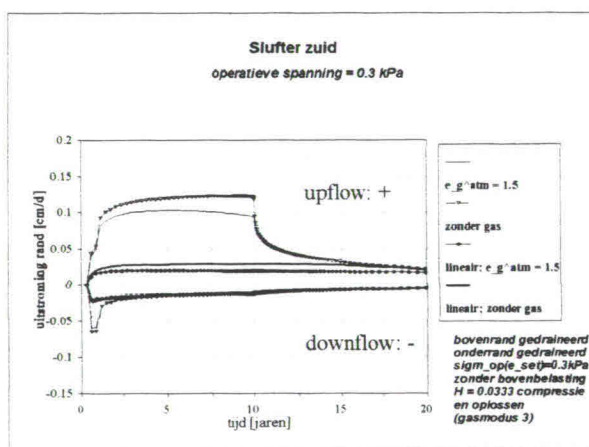
4.3.4 Effect op uitkomsten simulatie

In het algemeen zijn de slibhoogte en de verzadigde slibhoogte ongevoelig voor variaties van $\sigma_{op}(e_{set})$ voor een bepaalde slibsoort binnen een scenario. (Het afwijkingpercentage is kleiner dan 2% voor simulatie met parameter sets van de direct methode.) Dit betekent dat voor het ontwerp van de hoogte van de ringdijk van een depôt een schatting van $\sigma_{op}(e_{set})$ als beginvoorwaarde voldoet.

Dit houdt echter niet in, dat de waarde van $\sigma_{op}(e_{set})$ onbelangrijk is. Zo is de uitstroming uit de bovenrand in de depositieperiode heel gevoelig voor e_{set} . Het is mogelijk door $\sigma_{op}(e_{set})$ iets te variëren, wat h_{set} verandert, de debieten te beïnvloeden, omdat de verandering van slibhoogte (h) en verzadigde slibhoogte (h_{sat}) aan het einde van de depositietijd zeer gering is voor variatie van $\sigma_{op}(e_{set})$. Dit is als volgt voor te stellen: de gemiddelde totale uitstroming in de depositieperiode is $q_{gem} = (h_{set} - h_{t=t_{dep}})/t_{dep}$. Omdat h_{set} afhankelijk is van e_{set} verklaart dit de grote invloed op de uitstroming. Een lagere waarde voor e_{set} geeft dus minder uitstroming. Zonder gas is de invloed op de uitstroming iets minder groot. De upflow (q_{up}) op $t=t_{dep}$ wijkt dan ook percentueel sterk af. De downflow (q_{down}) wijkt bij een depositiesnelheid van 2 m/jaar op $t=t_{dep}$ slechts enkele procenten af voor $\sigma_{op}(e_{set}) = 0.5$ kPa t.o.v. $\sigma_{op}(e_{set}) = 0.1$ kPa. Bij hogere depositiesnelheden ($v=5$ m/jaar) wijkt de downflow minder af en de upflow meer. Nu bevindt zich aan het begin van de depositieperiode wel een piek in de downflow, die sterk wordt beïnvloed door e_{set} . Deze piek duurt echter zeer kort, omdat de doorlatendheid onderin het depôt snel kleiner wordt gedurende de depositieperiode. (Zie afbeelding 4.7, 4.8 en 4.9 afkomstig uit supplement A.4 met $v_{dep} = 2$ m/jaar; ook de berekeningsresultaten van lineaire parameter sets zijn in deze grafieken opgenomen, zie paragraaf 4.4.) Omdat deze piek zo smal is (zie ook paragraaf 4.5.5), heeft deze weinig invloed op de totale uitstroom door de depotbodem gedurende de depositieperiode.



Afbeelding 4.7 SS $\sigma_{op}(e_{set})=0.1$ kPa



Afbeelding 4.8 SS $\sigma_{op}(e_{set})=0.3$ kPa

De invloed van deze "manipulatie" is dus groot voor de voorspelling van de uitstroming van porie water naar het oppervlaktewater, maar slechts zeer gering voor de uitstroming door de depôtbodem naar watervoerende lagen.

4.3.5 Kentallen

In paragraaf 4.2 zijn diverse kentallen gedefinieerd, zodat het effect van e_{set} getalsmatig kan worden uitgedrukt. Tabel 4.5 geeft de kentallen uit de simulaties ($v_{dep} = 2$ m/jaar) en het afwijkingpercentage t.o.v. de waarde van het kental bij $\sigma_{op}(e_{set}) = 0.1$ kPa (en 0.3 kPa bij K16).

Hoewel de slibhoogten niet veel veranderen voor een andere e_{set} -waarde, blijken de kentallen, die uit

de slibhoogten zijn afgeleid (F_c , $F_{c_{sat}}$ en $U(t)$) wel gevoelig te zijn. $U(t)$ is het meest gevoelige kentall. Het gasgehalte varieert ook iets. Uit de kentallen F_c , $F_{c_{sat}}$ en $U(t)$ volgt dus duidelijk, dat e_{set} invloed heeft op het consolidatieproces. Zonder gas blijkt de invloed kleiner te zijn.

	$\sigma_{op}(e_{set})$ [kPa]	F_c	afw. perc.	$F_{c_{sat}}$	afw. perc.	$U(t)$	afw. perc.	vg% t_{dep}	afw. perc.
SS	0.1	0.768	0%	0.716	0%	0.616	0%	6.45%	0%
$e_g^{atm} = 1.5$	0.3	0.835	8.8%	0.779	8.35%	0.534	-13.3%	6.80%	5.51%
Gasmodus 3	0.5	0.877	14.2%	0.816	13.5%	0.477	-22.6%	7.00%	8.60%
SS	0.1	0.687	0%	0.687	0%	0.650	0%	0%	
$e_g^{atm} = 0$	0.3	0.743	8.12%	0.743	8.12%	0.582	-10.4%	0%	
	0.5	0.779	13.4%	0.779	13.4%	0.532	-18.1%	0%	
KM	0.1	0.774	0%	0.690	0%	0.680	0%	10.9%	0%
$e_g^{atm} = 1.5$	0.3	0.828	7.1%	0.737	6.82%	0.626	-7.99%	11.1%	2.12%
Gasmodus 3	0.5	0.889	14.9%	0.788	14.3%	0.556	-18.2%	11.4%	4.49%
KM	0.1	0.640	0%	0.640	0%	0.760	0%	0%	
$e_g^{atm} = 0$	0.3	0.683	6.73%	0.683	6.73%	0.722	-5.1%	0%	
	0.5	0.731	14.3%	0.731	14.3%	0.672	-11.6%	0%	
K16	0.1								
$e_g^{atm} = 1.5$	0.3	0.926	0%	0.776	0%	0.814	0%	16.2%	0%
Gasmodus 3	0.5	0.969	4.66%	0.811	4.56%	0.764	-6.16%	16.3%	0.5%
K16	0.1								
$e_g^{atm} = 0$	0.3	0.746	0%	0.746	0%	0.847	0%	0%	
	0.5	0.775	3.98%	0.775	3.98%	0.823	-2.85%	0%	

Tabel 4.5 Kentallen van simulaties met $v_{dep} = 2$ m/jaar

4.3.6 Slibtype

Het slibtype is van groot belang voor de analyse. Een ander slibtype geeft een significant andere simulatie. Dit komt naar voren in de berekeningswaarden, de kentallen en de gevoeligheid voor variaties van variabelen (zoals $\sigma_{op}(e_{set})$).

Zo geeft een $\sigma_{op}(e_{set})$ -waarde van 0.1 kPa voor Slufter zuid een redelijk stabiele berekening en zo ook voor mengmonster 20 Ketelmeer (een stabiele berekening). Echter voor Ketelmeer K16a geeft $\sigma_{op}(e_{set}) = 0.3$ kPa pas een stabiele berekening. Dit spanningscriterium voor het startpunt van de consolidatie betekent wel, dat de dichtheid waarbij het consolidatieproces aanvangt voor iedere parameterrelatie anders is. Zo heeft slib met de kleinste slibfractie $< 16\mu m$ (K16) gemiddeld over het profiel de grootste dichtheid en het fijnste slib (SS) de kleinste dichtheid. Dit wordt veroorzaakt, doordat deze classifica-

tie eigenschap correleert met de $\sigma_{op}(e_f)$ -relatie.

Voor KM en SS is de grootte van de storingszone vlak na de depositieperiode aanzienlijk. Opvallend is, dat de storingszone voor K16 het kleinst is. Dit komt goed uit, omdat simulaties met K16 zeer snel instabiel worden voor lage waarden voor $\sigma_{op}(e_{set})$, zodat hier een grotere waarde van 0.3 kPa kan worden gekozen.

4.4 Lineaire parameter relaties

4.4.1 Nut van lineair exponentiële parameter sets

Bij de bestudering van de meetwaarden van de HYDCON-procedure, waaruit de parameter sets via de direct methode zijn bepaald, valt het volgende op: De meetwaarden vallen allen binnen een relatief smalle spanningsrange met uitzondering van de meetwaarde van de (minder nauwkeurige) kolomproef. Juist in het gebied, waar de consolidatie start (lage operationele spanningen), is slechts één meetwaarde aanwezig. In het lage spanningsgebied tussen de meetwaarde van de kolomproef en de anderen zijn geen andere metingen verricht. Bovendien zijn de meetwaarden met uitzondering van de waarde van de kolomproef, mits logaritmisch uitgezet, goed lineair te fitten. De parameter sets afgeleid met de DIRECT-methode hebben bij de lage operationele spanningen een sterke kromming, die mede is ontstaan door de meting uit de kolomproef.

Door het gebruik van de lineaire sets kan de invloed van de keuze van een andere parameter set voor eenzelfde type slib worden onderzocht. Het verschil zit vooral in het lage spanningsgebied, waarvoor de relaties van de DIRECT-methode sterk gekromd zijn in tegenstelling tot de lineaire relaties.

4.4.2 Invoer

De meetpunten van de HYDCON-procedure zijn gefit met behulp van lineaire regressie, maar het meetpunt van de kolomproef is daarbij weggelaten. De lineair exponentiële parameterrelaties zijn terug te vinden in bijlage A.2 en de materiaalparameters in tabel 4.6.

	m_1	st.afw. m_1	m_2	st.afw. m_2	m_5	st.afw. m_5	m_6	st.afw. m_6
SS	8.97	0.285	-2.57	0.215	-25.21	0.107	1.74	0.127
KM	9.25	0.196	-4.19	0.427	-25.11	0.103	3.23	0.187
K16	9.16	0.189	-5.19	0.510	-26.78	0.405	5.54	1.011

Tabel 4.6 Materiaalparameters uit lineaire regressie

Voor de berekeningen is dezelfde invoer toegepast als voor de simulaties van paragraaf 4.3 met uitzondering van de e_{set} -waarden. Deze waarden zijn voor de lineaire materiaal parameters opnieuw bepaald (zie tabel 4.7).

operatieve spanning	SS lineair	KM lineair	operatieve spanning	K16 lineair
0.1 kPa	4.39	2.76	0.1 kPa	2.21
0.3 kPa	3.96	2.49	0.3 kPa	2
			0.4 kPa	1.94
0.5 kPa	3.76	2.37	0.5 kPa	1.9

Tabel 4.7 e_f horend bij operatieve spanning per parameter set

4.4.3 Verstoorde zone in toplaag

Voor de verstoorde zone zijn conform paragraaf 4.3.3 tabellen afgeleid, om de simulaties met de verschillende parameter sets te kunnen vergelijken.

vdep [m/j]	tijd [j]	Mengmonster 20 Ketelmeer		Ketelmeer K16		Slufter Zuid	
		0.1 kPa → 0.5 kPa	0.3 kPa → 0.5 kPa	0.1 kPa → 0.5 kPa	0.3 kPa → 0.5 kPa	0.1 kPa → 0.5 kPa	0.3 kPa → 0.5 kPa
2	t_{dep}	0.91	0.68		berekening	9.43	9.08
2	100	0.19	0.08		instabiel	0.24	0.11
5	t_{dep}	5.60	5.50		0.44	12.27	11.92
5	100	0.19	0.08		0.09	0.24	0.11

Tabel 4.8 Hoogteverschil σ_{op} in simulaties gasmodus 3, $e_g^{atm} = 1.5$ en $H=0.0333$; lin.par. relaties

vdep [m/j]	tijd [j]	Mengmonster 20 Ketelmeer		Ketelmeer K16		Slufter Zuid	
		0.1 kPa → 0.5 kPa	0.3 kPa → 0.5 kPa	0.1 kPa → 0.5 kPa	0.3 kPa → 0.5 kPa	0.1 kPa → 0.5 kPa	0.3 kPa → 0.5 kPa
2	t_{dep}	0.17	0.09		0.00	7.16	6.74
2	100	0.06	0.03		0.03	0.08	0.04
5	t_{dep}	1.02	0.96		0.06	10.71	10.36
5	100	0.06	0.03		0.03	0.08	0.04

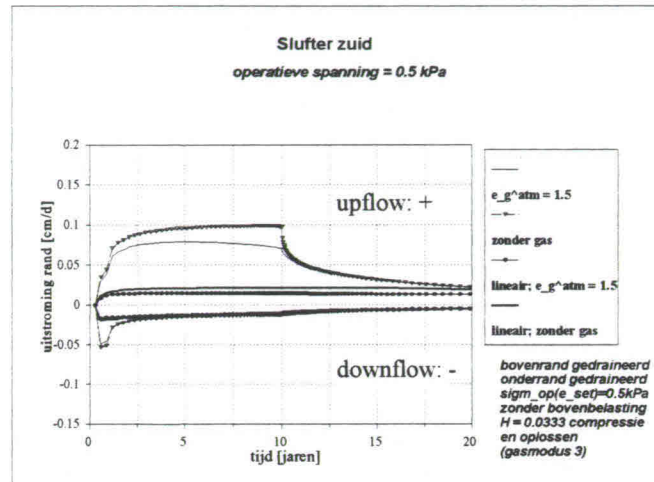
Tabel 4.9 Hoogteverschil σ_{op} in simulaties gasmodus 3, $e_g^{atm} = 0$ en $H=0$; lin.par. relaties

Als tabel 4.8 en 4.9 vergeleken worden met de tabellen uit paragraaf 4.3.3 (DIRECT-methode) dan valt meteen op, dat de lineaire parameter set voor SS op $t=t_{dep}$ hele grote storingszones geeft. Bij de lineaire parameter sets voor K16 en KM is dit niet het geval.

Dit verschil tussen de simulaties met parameter sets SS volgt ook uit de vergelijking van de e_f -

profielen van supplement A.1 en A.2. Bij simulaties met de lineaire set voor SS is het vloeistof porie getal in de toplaag "afgekapt". De profielen van simulaties met gas vertonen voor de afkapping een knik t.g.v. de eis, dat er geen zwel mag optreden. Zonder gas gaat het profiel geleidelijk over in een constante e_f - waarde ($=e_{set}$).

4.4.4 Effect op uitkomsten simulatie



Afbeelding 4.9 SS $\sigma_{op}(e_{set})=0.5$ kPa

De effecten van e_{set} op de simulatie zijn dezelfde als bij de DIRECT-methode. Alleen de relatieve afwijking van de slibhoogte op $t=t_{dep}$ van SS is groter dan bij de DIRECT-methode. Voor KM en K16 is dit verschil zeer gering.

Voor parameter set KM wijkt de slibhoogte op $t=t_{dep}$ het meest af van de DIRECT-methode (als $v_{dep} = 2$ m/jaar ongeveer -10%).

De uitstroombedielen naar de bovenrand zijn veel lager dan die van de DIRECT-methode, omdat de bij deze operationele spanningen horende doorlatendheden ook lager zijn.

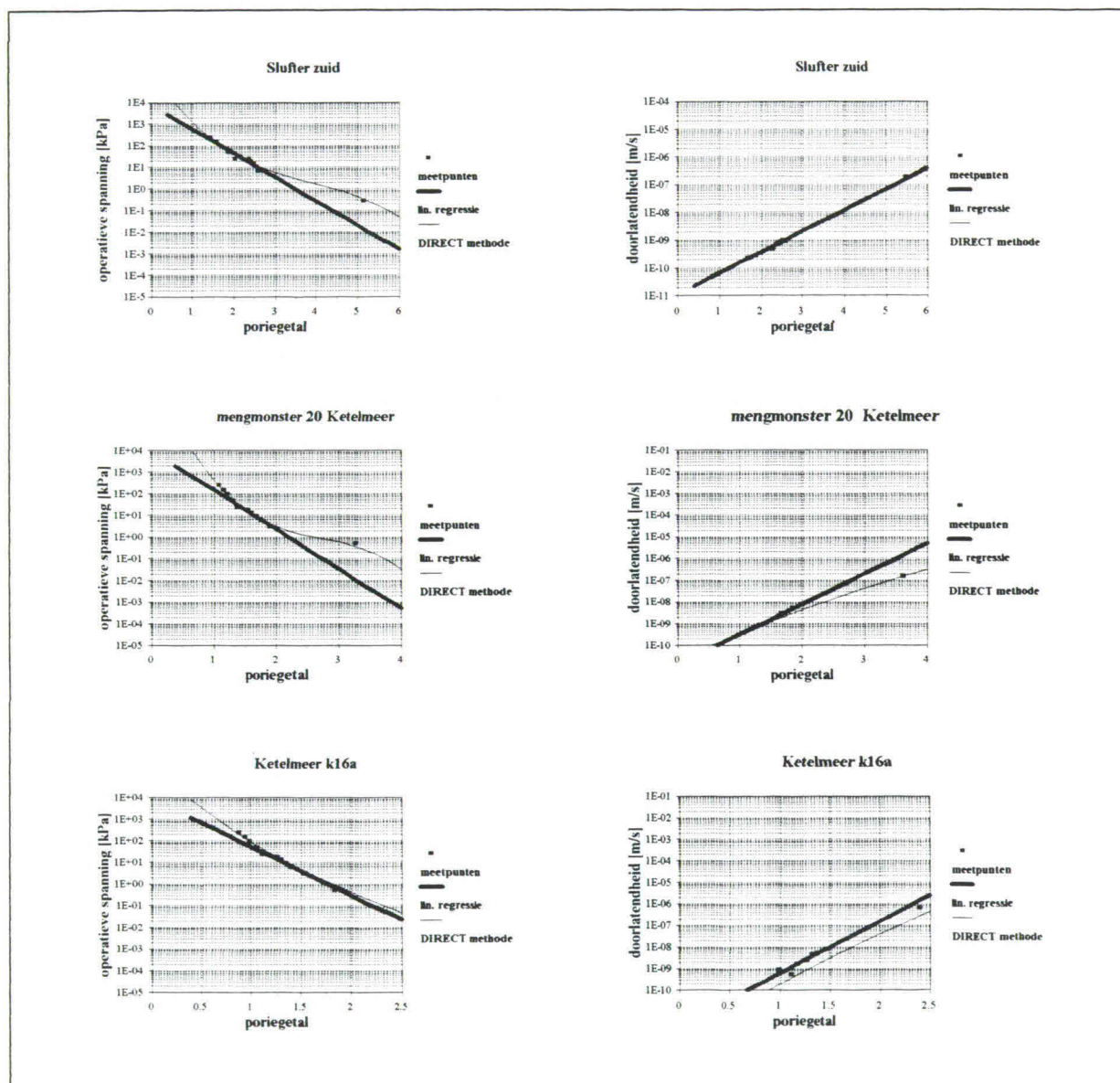
De percentuele verandering in upflow bij

variatie van e_{set} t.o.v. de DIRECT parameter sets is voor SS en KM groter. SS wijkt het meest af. Overigens is ook hier het debiet de meest gevoelige waarde.

Een verklaring voor de piek bij de downflow kan de kromming in de materiaal parameterrelaties van de DIRECT-methode (operationele spanning versus porie getal) zijn, daar een lineaire betrekking een veel lagere piekwaarde heeft (zie afbeelding 4.7, 4.8 en 4.9).

4.4.5 Effect op kentallen

Het effect van de e_{set} -waarde op de kentallen is net als in paragraaf 4.3.5 duidelijk aanwezig. Per parameter set is echter de waarde t.o.v. de DIRECT-methode anders. Zo is t.o.v. de DIRECT-kromme de consolidatiegraad ($U(t)$) voor de lineaire parameter set van SS veel lager, maar van KM juist hoger. Dit verschil is als volgt te verklaren (zie afbeelding 4.10): $U(t)$ is gedefinieerd d.m.v. drie hoogten (zie paragraaf 4.2): h_{set} , h_{sat} op $t=t_{dep}$ en h_{sat}^{eind} (in dit geval op $t=100$ jaar). De $\sigma_{op}(e_f)$ -relaties van de DIRECT-methode (van SS en KM) wijken voor het lage spanningsgebied veel af van de lineaire sets. De startwaarde van het consolidatieproces (e_{set}) ligt bij de lineaire sets dan ook lager. Het gevolg is, dat de doorlatendheid ($k(e_f)$) lager is bij de lineaire sets (KM en SS) t.g.v. de $\sigma_{op}(e_f)$ -relaties in het lage spanningsgebied. Bovendien hebben ook de $k(e_f)$ -relaties invloed op het consolidatieproces: de lineaire $k(e_f)$ -relatie van KM geeft een hogere doorlatendheid dan de DIRECT-kromme. Voor SS zijn de $k(e_f)$ -relaties vrijwel identiek. De lagere h_{set} -waarde bij gebruik van de lineaire sets verlaagt de $U(t)$ -waarde. De $U(t)$ -waarde van SS is dan ook lager. Vanwege het verschil in de $k(e_f)$ -relaties van KM is bij



Afbeelding 4.10 Parameter sets volgens DIRECT methode en lineaire regressie

gebruik van de lineaire relatie van KM h_{sat} lager. Als gevolg daarvan is $U(t)$ hoger dan bij de berekeningen met de DIRECT-methode.

De consolidatiefactor (F_c) is voor alle lineaire sets hoger dan de waarde uit berekeningen met de DIRECT parameterrelaties. De lineaire set geeft lagere h_{sat} -waarden, dus een verhoging van F_c . Het verschil in de $k(e_f)$ -relaties van KM zorgt ervoor, dat de slibhoogte uit berekeningen met de lineaire parameter set van KM meer afwijkt dan van SS. Daarom is het verschil van F_c voor SS het grootst. In het algemeen wijken de kentallen van berekeningen met de lineaire parameter set voor K16 het minst af van de kentallen uit simulaties met parameters van de DIRECT-methode. De $\sigma_{\text{op}}(e_f)$ -relaties van de DIRECT-methode van K16 liggen dichtbij de lineaire kromme en ook de $k(e_f)$ -relaties van K16 verschillen niet veel. De kentallen staan in supplement A.4 en A.5.

4.4.6 Vergelijking met parameter set van de DIRECT-methode

De lineaire parameterrelaties geven andere uitkomsten dan de simulaties met parameterrelaties volgens de DIRECT-methode. Het gaat hierbij om de hoogte van de sliblaag op $t=t_{\text{dep}}$ en de debieten, die het meest verschillen. Dit geldt in veel mindere mate voor K16. De afwijkingen voor K16 t.o.v. de DIRECT-methode zijn gering, wat te verklaren is uit het feit, dat de $\sigma_{\text{op}}(e_f)$ -relatie van de DIRECT-methode veel minder afwijkt van de lineaire fit dan bij de andere slibsoorten (KM en SS) het geval is. Het verschil zit voornamelijk in de kromming in de $\sigma_{\text{op}}(e_f)$ -relaties van de DIRECT-methode. De resultaten van lineaire relaties zijn dus duidelijk anders, maar dit verschilt per slibsoort. Overigens blijkt de lineaire parameter set voor K16 minder stabiel te zijn dan de set van de DIRECT-methode. Uit de verschillen in uitkomsten voor de verschillende "fits" van de meetgegevens blijkt het volgende: Het is belangrijk metingen te verrichten over een brede range van σ_{op} -waardes. Deze range verschilt per slibsoort en scenario. De ondergrens wordt bepaald door e_{set} . Omdat de meest voorkomende waarde van $\sigma_{\text{op}}(e_{\text{set}})$ tussen 0.1 en 0.5 kPa ligt, kan een maximum waarde voor e_f per slibsoort worden bepaald. De ondergrens voor e_f wordt bepaald door het scenario. Zo geeft een 40 meter diep depôt al een maximale operationele spanning van 240 kPa (voor een gemiddeld specifiek gewicht van 16 kN/m³). Vooral in het gebied van de lage spanningen verschillen de lineaire fit en de DIRECT-methode veel van elkaar. Dit wordt veroorzaakt door het "gat" in de meetgegevens tussen waarden van de HYDCON-proef en de kolomproef. Zonder extra meetgegevens is niet te zeggen welke fit het beste is.

4.5 Effecten gasgehalte op consolidatieproces

4.5.1 Invoer simulaties

Om de effecten van het gasgehalte op de consolidatie te bepalen zijn aparte berekeningen uitgevoerd, waarbij het gasgehalte gevarieerd is. Tevens is gelet op het in situ gasgehalte in het slib. Voor de simulaties is gebruik gemaakt van hetzelfde scenario als in paragraaf 4.3.2 met enige aanpassingen (zie tabel 4.10). Het volgende scenario is gebruikt voor verschillende gas porie getallen: Er is uitgegaan is

van gasmodus 3 (compressie) zonder oplossen ($H=0$). Hierbij is een maximum voor het in situ gasgehalte aangehouden i.v.m. "opdrijven" van het slib. Het maximum is voor de toplaag: $e_g \times \gamma_s / \gamma_f - 1 = 1.5$ voor $\gamma_s = 25 \text{ kN/m}^3$ en $\gamma_f = 10 \text{ kN/m}^3$ (zie paragraaf 2.5 en bijlage B). Deze bovengrens beperkt dus de ingevoerde waarde voor e_g^{atm} . In de praktijk zou deze waarde onderin het slib hoger kunnen zijn, maar voor gasmodus 3 is het gehele gasprofiel bij atmosferische druk constant. Deze bovengrens geeft andere maximum gasgehalten per slibsoort.

Een depositiesnelheid van 2 m/jaar is aangehouden met een vaste waarde voor $\sigma_{\text{op}}(e_{\text{set}})$ ($= 0.3 \text{ kPa}$) voor alle drie de slibsoorten. Deze hogere waarde voor de operationele spanning is gekozen vanwege stabiliteit van de simulaties bij zeer lage gasgehalten (zie bijlage B). Tevens zijn simulaties uitgevoerd met een hogere depositiesnelheid (4 m/jaar), maar gelijke depositiehoogte ($h_{\text{dep}} = 20 \text{ m}$). Het vloeistofporie getal bij depositie (e_{dep}) is gelijk genomen aan de waarde van e_f voor $\sigma_{\text{op}}(e_f) = 0.1 \text{ kPa}$. Ook is weer gebruik gemaakt van de materiaal parametersets verkregen met de DIRECT-methode (hoofdstuk 3 van dit rapport). Dus de dichtheden bij depositie verschillen per parameter set. De berekeningsresultaten zijn terug te vinden in supplement B.

aantal lagen	1			
aantal perioden	2			
depositieperiode 1 [jaren]	0	10		
bodemrandvoorwaarde	Gedraineerd			
bovenrandvoorwaarde	Depositie			
$e_{\text{dep}} ; V_{\text{dep}} ; e_{\text{set}}$	5.73	2	5.22	
deeltijdstapfactor depositietijd	4			
consolidatietijd [jaren]	10	170		
bodemrandvoorwaarde	Gedraineerd			
bovenrandvoorwaarde	Gedraineerd			
hoogte waterlaag [m]	25			
m1 t/m m4	12.93	-7.15	1.54	-0.132
m5 t/m m8	-25.1	1.64	0.021	0
$\gamma_s ; \gamma_f ; e_g^{\text{atm}} ; H$	25	10	1.5	0
aantal knopen	80			
grid verfijningsfactoren	0	1.49	0	-0.49
tijdsfactor; aantal tijdstappen; skipout	1.05	150	2	

Tabel 4.10 Invoerfile SS $e_g^{\text{atm}} = 1.5$ gasmodus 3; $H=0$ lage depositie snelheid

Om de eindtijd van het consolidatieproces te bepalen is gebruik gemaakt van een criterium. Dit criterium houdt in, dat de primaire consolidatie is afgelopen als excess porie water drukken lager zijn dan 0.5 kPa. Dit is van belang, omdat door het vertragende effect van gas de eindtijd van een simulatie voor verschillende gasgehalten niet constant is.

4.5.2 In situ gasgehalte

Het vertragende effect van gas op de consolidatie verschilt per slibsoort. Om de slibsoorten met elkaar te kunnen vergelijken, moeten ze wel hetzelfde in situ gasgehalte hebben. In paragraaf 4.2.3 is

gedefinieerd: $\bar{e}_g = h_g/h_s$, het gas porie getal gemiddeld over de hoogte van de sliblaag, waarin h_g de gashoogte voorstelt en h_s de vaste stof hoogte ($h_s = (v_{dep} \cdot t_{dep}) / (1 + e_{dep})$). Uit simulaties m.b.v. het hierboven beschreven scenario volgt dat berekeningen met gelijke atmosferische gasporiegetallen (e_g^{atm}) ook vrijwel dezelfde in situ gemiddelde gas porie getallen (afwijking: enkele procenten) geven voor verschillende slibsoorten. De $\bar{e}_g$ -waarden verminderen maximaal 10% t.o.v. de waarde op het einde van de depositietijd tijdens het consolidatieproces (met $H=0$, zonder oplossen van gas).

e_g^{atm}	$t=t_{dep}$	SS	KM	K16	$t=t_{eind}$	SS	KM	K16
0		0	0	0		0	0	0
0.5		0.17	0.16	0.16		0.16	0.16	0.16
1		0.35	0.34	0.34		0.33	0.32	0.33
1.5		0.54	0.53	0.54		0.50	0.50	0.53
2		0.74	0.74	0.76		0.68	0.69	0.75
2.5		0.97	0.98			0.88	0.90	

Tabel 4.11 Gemiddeld in situ gas porie getal $\bar{e}_g$ van simulaties $v_{dep} = 2$ m/jaar, $H=0$

Tevens blijken de $\bar{e}_g$ - waarden van simulaties met $v_{dep} = 4$ m/jaar slechts enkele procenten af te wijken van de waarden in tabel 4.11. Dit betekent, dat als van de verschillende parameter sets e_g^{atm} gelijk is, de gemiddelde in situ waarden maar weinig van elkaar afwijken (gas is niet oplosbaar!).

Om de $\bar{e}_g$ - waarden te kunnen interpreteren zijn met behulp van een spreadsheet de gasporiegetallen berekend indien geen consolidatie zou optreden. Tabel 4.12 toont het gemiddeld in situ gas porie getal van deze spreadsheet berekening (met in dit geval $H=0$). Hier blijkt hetzelfde effect uit.

e_g^{atm}	SS	KM	K16
0	0	0	0
0.5	0.193	0.19	0.184
1	0.391	0.387	0.377
1.5	0.593	0.590	0.577
2	0.799	0.798	0.785
2.5	1.009	1.012	1.000

Tabel 4.12 Gemiddeld in situ gas porie getal e_g^{atm} op $t=0$
sliblaag instantaan aanwezig, geen consolidatie

Maar deze $\bar{e}_g$ -waarden verschillen uiteraard wel sterker van de $\bar{e}_g$ - waarden van de simulaties op t_{dep} . Dit is te verklaren uit het feit, dat bij de spreadsheetberekening geen consolidatie heeft plaatsgevonden en op $t=0$ de gehele sliblaag instantaan aanwezig is. Echter in het berekende scenario vindt de meeste consolidatie in de depositieperiode plaats. In deze spreadsheet is de slibhoogte voor consolidatie gelijk

genomen aan h_{set} en $e_f = e_{set}$ voor het gehele slibprofiel. Voor alle parametersets is gekozen: $\sigma_{op}(e_{set}) = 0.3$ kPa. Het in situ gasporiegetal e_g wordt per laagje berekend met de volgende formules: $p_g = u_{atm} + (h_w - h_{set}) \cdot g$ en $e_g = (e_g^{atm} \cdot u_{atm}) / p_g$ (waarbij de gasdruk $p_g = \sigma + u^{atm}$ en $u^{atm} = 100$ kPa). Dit volgt uit vergelijking (19) uit hoofdstuk 2 met $\Delta_{gas} = 0$, omdat advectie zonder consolidatie niet optreedt.

Tevens was al verondersteld, dat het gas niet oplost ($H=0$), dus hierdoor treedt er ook geen advectie op.

In de bulkdichtheid zit ook het in situ gas porie getal verwerkt. Tabel 4.13 toont de over de hoogte gemiddelde bulkdichtheid van simulaties ($v_{dep} = 2$ m/jaar), die bij de waarden uit tabel 4.11 horen.

e_g^{atm}	$t=t_{dep}$	SS	KM	K16	$t=t_{eind}$	SS	KM	K16
0		1.31	1.48	1.65		1.42	1.58	1.69
0.5		1.26	1.39	1.54		1.34	1.48	1.57
1		1.21	1.31	1.43		1.33	1.38	1.46
1.5		1.16	1.23	1.35		1.22	1.30	1.35
2		1.12	1.16	1.23		1.16	1.22	1.25
2.5		1.07	1.09			1.11	1.14	

Tabel 4.13 Gemiddelde bulkdichtheid ρ_{bulk} [g/cc] van simulaties $v_{dep} = 2$ m/jaar

De bulkdichtheid verschilt t.o.v. de in situ gas porie getallen veel meer per slibsoort bij een gelijke e_g^{atm} , omdat de invloed van e_f groot is. ($\rho_{bulk} = (\gamma_s + e_f \cdot \gamma_f) / ((1 + e_f + e_g) \cdot g)$)

4.5.3 Toename van slibhoogte gerelateerd aan gasvolume

Het gasgehalte heeft grote invloed op zowel de slibhoogte als de verzadigde slibhoogte en deze invloed blijft tot aan het einde van de simulatie ("einde primaire consolidatie") aanwezig. Deze invloed op de toename in slibhoogte t.o.v. een verzadigde berekening (Δh) is op te splitsen in delen:

① de gashoogte

Al lijkt dit heel erg voor de hand te liggen. Toch is deze hoogte niet zonder meer te voorspellen. Deze is namelijk gekoppeld aan de consolidatie. Bij meer consolidatie, is het slibniveau t.o.v. van het waterniveau lager, wat dus meer compressie geeft en een lagere gashoogte. Echter het gas vertraagt de consolidatie en vermindert deze zelfs. Dit volgt uit de volgende punten.

② vertraging

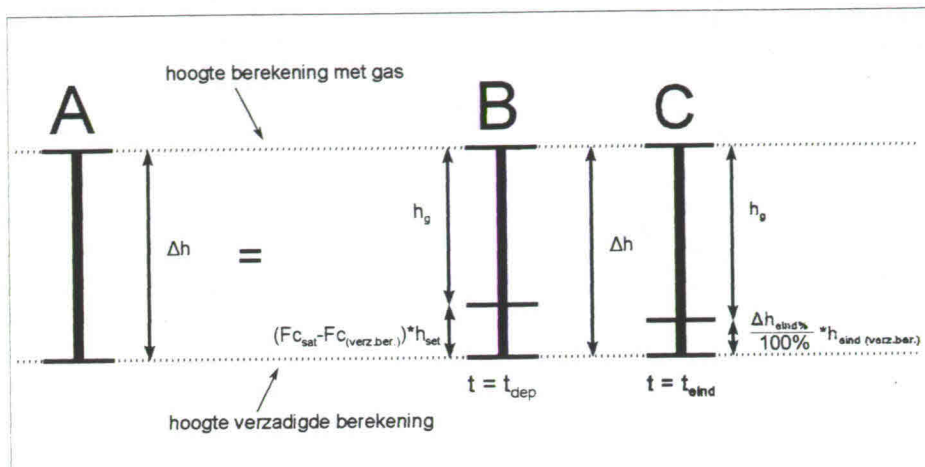
De vertraging van de consolidatie is te verklaren, omdat bij een hoger gasgehalte de drainagepaden langer zijn t.g.v. de gashoogte.

③ lagere drijvende kracht

De drijvende kracht is verminderd t.g.v. van een "opwaartse druk" van het gas. Dit zit in de term $\gamma_s - \gamma_f(1 + e_g)$. Het resultaat is, dat h_{sat} aan het einde van de consolidatie (vertragend effect speelt dus niet meer mee) hoger is dan h_{eind} uit een verzadigde berekening.

Deze drie termen kunnen uitgedrukt worden in kentallen, zodat de invloed van variatie van het gasgehalte eenvoudig bekeken kan worden:

- ① h_g of $(F_c - F_{c_{sat}})$, d.w.z. $(h_{t=dep}^{sat} - h_{t=dep}^{sat})/h_{set}$
- ② $U(t)$
- ③ $U(t)$ en $\Delta h_{eind}\% = \frac{(h_{sat}^{eind} - h_{verzadigde\ berekening}^{eind})}{h_{verzadigde\ berekening}^{eind}} * 100\%$



Afbeelding 4.11 Hoogte toename t.g.v. gas per gaseffect

Als $t \neq t_{eind}$ zijn effect ② en ③ moeilijk te scheiden en beiden komen tot uitdrukking in de consolidatiegraad. Visueel zijn deze effecten als delen van de hoogte toename voor te stellen. Dit is te zien in nevenstaande afbeelding. Met behulp van de bovenstaande kentallen kan

de hoogte toename per effect berekend worden.

In supplement B.2 is een tabel opgenomen, die voor het berekende scenario de kentallen van de simulaties van SS, KM en K16 ($\sigma_{op}(e_{set}) = 0.3$ kPa) weergeeft voor $v_{dep} = 2$ m/jaar.

4.5.4 Invloed slibsoort op het gaseffect

M.b.v. de kentallen uit de vorige paragraaf kan de invloed van de slibsoort op het effect van gas op het consolidatieproces per effect worden beschreven. Tabel 4.14 geeft een overzicht.

Duidelijk is, dat het fijnste slib (dus met een hoog percentage slibdeeltjes $< 16\mu m$) voor $U(t)$ (absoluut gezien) de laagste waarde heeft, wat ook te verwachten is. In paragraaf 3.3.3 zijn de classificatie eigenschappen van slib al kort beschreven (Essen et al. 1995). Hier is vermeld dat tussen de doorlaetendheid en de slibfractie $< 16\mu m$ een correlatie bestaat. Overigens is de range beschikbare classificaties K16, KM en SS beperkt.

De vraag is nu of gas in fijner slib een groter vertragend effect heeft dan op grover slib. Dit is af te leiden uit het afwijkingspercentage van $U(t)$ t.o.v. de verzadigde berekening. Uit tabel 4.14 volgt dat het slib van mengmonster 20 Ketelmeer relatief de grootste afname van de consolidatiegraad t.g.v. gas heeft en Ketelmeer K16a de kleinste afname. Slib met een fijnere korrelfractie consolideert langzamer, maar er is geen trend met betrekking tot het vertragend effect van gas gerelateerd aan de slibfractie $< 16\mu m$. Bij een ander kental $\Delta h_{eind}\%$, dat de afname van de drijvende kracht van het consolidatieproces beschrijft, lijkt wel een correlatie aanwezig te zijn tussen de grootte van de effecten t.g.v. de aanwezigheid van gas en de grootte van de slibfractie in het slib.

	$\bar{e}_g$ $t=t_{dep}$	$U(t_{dep})$	afw.% $U(t_{dep})$ verz. ber.	$\Delta h_{eind\%}$	$F_c - F_{c_{sat}}$ $t=t_{dep}$	$F_c - F_{c_{sat}}$ $t=t_{eind}$
K16	0.54	0.788	-6.8%	4.32%	0.17	0.17
KM	0.53	0.591	-18%	4.47%	0.12	0.11
SS	0.54	0.493	-14.6%	7.10%	0.09	0.08

Tabel 4.14 Kentallen simulatie $v_{dep} = 2$ m/jaar en $e_g^{atm} = 1.5$, $H=0$

Wordt de toename van de slibhoogte (zie afbeelding 4.11) beschouwd, dan is wel een verband aanwezig met de korrelfractie van het slib. De gashoogte en toename in slibhoogte t.g.v. gas (Δh) worden kleiner als de fijne korrelfractie groter is. Overigens neemt bij een hoger gasgehalte de relatieve hoogte toename van het slib t.g.v. vertraging en de lagere drijvende kracht toe, ofwel $h_g/\Delta h$ wordt kleiner, zie tabel 4.15 (in supplement B.2 is een uitgebreide tabel opgenomen).

	e_g^{atm}	h_g [m]	$(F_{c_{sat}} - F_{c_{verz.ber.}}) * h_{set}$ vertraging effect [m]	$\Delta h_{eind\%} * h_{eind(verz.ber.)}$ drijvende kracht [m]	$h_g/\Delta h$ *100%	Δh [m]	h [m]	$\Delta h/h$ *100%
K16 t_{dep}	0.5	0.98	0.2		83%	1.18	14.99	7.9%
	1.5	3.23	0.76		81%	3.99	17.8	22.4%
	2	4.58	1.23		79%	5.81	19.62	29.6%
K16 t_{eind}	0.5	0.97		0.13	88%	1.10	14.05	7.8%
	1.5	3.17		0.56	85%	3.73	16.68	22.4%
	2	4.48		0.99	82%	5.47	18.42	29.7%
KM t_{dep}	0.5	0.7	0.37		65%	1.07	13.88	7.7%
	1.5	2.25	1.34		63%	3.59	16.4	21.9%
	2	3.15	2.03		61%	5.18	17.99	28.8
KM t_{eind}	0.5	0.67		0.12	85%	0.79	11.3	6.99%
	1.5	2.12		0.47	82%	2.59	13.1	19.8%
	2	2.92		0.77	79%	3.69	14.2	26%
SS t_{dep}	0.5	0.51	0.3		63%	0.81	14.56	5.56%
	1.5	1.61	1.05		61%	2.66	16.41	16.2%
	2	2.21	1.57		58%	3.78	17.53	21.6%
SS t_{eind}	0.5	0.47		0.19	71%	0.66	10.94	6.03%
	1.5	1.49		0.73	67%	2.22	12.5	17.8%
	2	2.03		1.18	63%	3.21	13.49	23.8%

Tabel 4.15 Slibhoogtetoe name per term simulatie $v_{dep} = 2$ m/jaar, $H=0$

In tabel 4.15 is $e_g^{atm} = 2$ de hoogste waarde. Dit is de maximale waarde voor gasmodus 3 met $H=0$, omdat e_g in de toplaag de volgende waardes heeft op $t=t_{dep}$: 1.14 (SS), 1.17 (KM) en 1.28 (K16). Was nu $e_g^{atm} = 2.5$ gekozen dan gaf dit in de toplaag voor SS $e_g = 1.54$ en voor KM $e_g = 1.64$ (K16 is instabiel). Dit betekent dat $e_g > 1.5$ en de berekening voldoet dan niet aan het stabiliteitscriterium (paragraaf 2.5).

Wat betreft het gaseffect kan het volgende worden geconcludeerd: De kentallen h_g , $F_c - F_{c_{verz.ber.}}$ en $\Delta h_{eind\%}$ en de slibfractie $< 16\mu m$ vertonen blijkbaar een trend. Maar het kental $U(t_{dep})$ laat geen trend zien. De toename in slibhoogte, Δh , h_g en $h_g/\Delta h \cdot 100\%$ blijken wel te correleren met de slibfractie. Het is dus de vraag of deze trend met betrekking tot de fijne korrelfractie werkelijk aanwezig is, omdat één kental de trend niet volgt. De relatieve toename in slibhoogte per gaseffect is zonder uitzondering wel gecorreleerd aan het slibtype (een grotere slibfractie houdt een kleiner gasaandeel in de hoogtetoe-naam in). Voor de zekerheid is ook een ander scenario doorgererekend met een twee maal zo korte depositietijd en een twee maal zo grote depositiesnelheid. Dit gaf dezelfde resultaten.

Het effect van gas op de totale slibhoogte is als volgt: Voor een hoog gasgehalte zoals $e_g^{atm} = 2$ is het effect van gas op de slibhoogte groot ($\Delta h/h \cdot 100\%$). De slibhoogtetoe-naam t.g.v. gaseffect ② (vertragend effect) en gaseffect ③ (drijvende kracht), ofwel $\Delta h - h_g$ kan dan ook niet verwaarloosd worden (uit tabel 4.15 volgt een waarde tussen de 5 à 12% van de totale slibhoogte). Dit kan zeker niet bij slib met een hoge slibfractie ($< 16\mu m$), omdat bij "fijn" slib gaseffect ② en ③ een nog groter aandeel vormen in de slibhoogtetoe-naam t.g.v. gas, dan bij zandig slib het geval is. Als men nu het gasvolume t.g.v. gasvorming in een verzadigde berekening implementeert d.m.v. een volumevergrotingsfactor ($f_{v,g}$ zie paragraaf 4.2.2) wordt dit verwaarloosd. Voor een lager gasgehalte zoals $e_g^{atm} = 0.5$ zijn gaseffect ② en ③ op de totale slibhoogte minder groot (in tabel 4.15 kleiner dan 3% van de totale slibhoogte).

Opgemerkt dient te worden, dat de simulaties zijn uitgevoerd met verschillende vaste stof hoogtes, omdat e_{dep} bepaald is door $\sigma_{op}(e_{dep}) = 0.1$ kPa en $h_{dep} = 20$ m voor alle simulaties. Dit betekent, dat de slibhoogte h groter is voor K16 en ook de gashoogte h_g is groter. De gashoogte wordt echter ook beïnvloed door het consolidatieproces. Immers $(h_{water} - h) \cdot \gamma_f$ heeft invloed op de gasdruk. Uiteindelijk blijkt $\bar{e}_g = h_g/h_s$ vrijwel gelijk (of iets groter) te zijn dan de waarde van SS en KM. Hierdoor is het gasvolume in K16 het grootst en in SS het kleinst, terwijl de atmosferische gas porie getallen gelijk zijn en de gemiddelde in situ waarden weinig van elkaar afwijken. T.g.v. de grotere waarde voor de gashoogte h_g is slibhoogtetoe-naam Δh van K16 ook groter.

4.5.5 Uitstroomdebieten

De uitstroming is het meest gevoelig voor variaties van variabelen. Ook het begin van instabiliteit van de simulatie is bij de uitstroming als eerste duidelijk te zien. De uitstroming is te onderscheiden in een upflow en een downflow.

De downflow wordt voornamelijk bepaald door de doorlatendheid onderin het slib, die weer afhankelijk is via e_f van de operationele spanning, die snel toeneemt onderin. Bovenin de sliblaag neemt de doorlatendheid langzamer af.

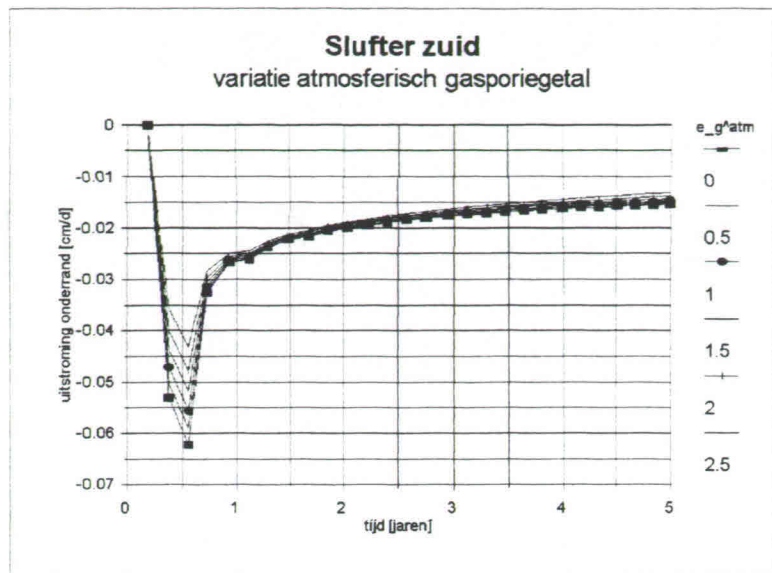
In de depositieperiode is de uitstroming het grootst en zijn de volgende effecten ten gevolge van gas gesignaleerd (supplement B.1):

- ✓ een toenemend gaspercentage doet het maximum van de upflow naar een eerder tijdstip verschuiven en verlaagt het maximum.
- ✓ een toenemend gaspercentage verschuift de piek in de downflow, die zich in de eerste stappen van de simulatie bevindt vrijwel niet, maar verlaagt deze wel.

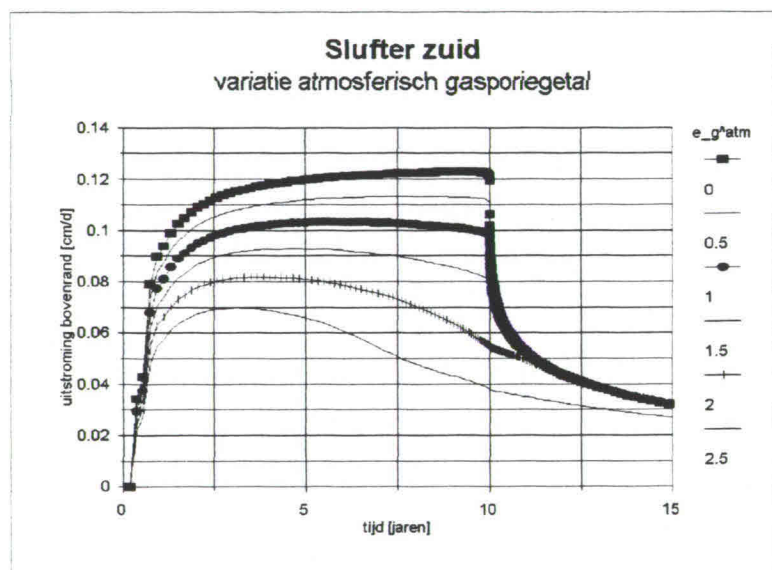
De piekwaarde van de downflow is niet zo betrouwbaar, omdat deze zich aan het begin van de depositieperiode bevindt. Een kleine laagdikte betekent dan weinig knopen. Het tijdstip van de piek blijft vrijwel constant. Dit is te verklaren door de relatief grote tijdstappen. Omdat de piekwaarde enigszins onbetrouwbaar is, is het beter te kijken naar de gemiddelde downflow in de depositietijd. De verlaging van de gemiddelde downflow is percentueel minimaal de helft kleiner dan de verlaging van de gemiddelde upflow bij een hoger gemiddeld in situ gasgehalte. Een verklaring hiervoor kan zijn, dat het gas onderin de sliblaag meer wordt samengedrukt dan bovenin. Daardoor is het effect van het gas lokaal minder groot.

Simulaties, waarbij het slib twee maal zo snel wordt gestort geven dezelfde effecten.

Ter vergelijking is dezelfde simulatie uitgevoerd (zie tabel 4.10) voor **gasmodus 1** (constant gas poriegetal). Ten behoeve hiervan is $\bar{e}_g$ berekend m.b.v. een spreadsheet (paragraaf 4.5.2 en bijlage C). Deze waarde voor e_g (zie tabel 4.12) is in de invoer gebruikt. Zodoende kunnen deze simulaties vergeleken worden met behulp van gasmodus 3 (en $H=0$). Het verschuiven van het maximum in de upflow is hierbij niet naar een eerder tijdstip, maar juist naar een later tijdstip bij oplopend gasgehalte. Alle



Afbeelding 4.12 Downflow gasmodus 3, $H=0$



Afbeelding 4.13 Upflow gasmodus 3, $H=0$

maxima liggen dicht bij de depositietijd in de buurt (zie supplement B.3).

Opvallend is, dat voor gasmodus 1 de pieken van de debieten bij stijgend gasgehalte percentueel meer afnemen dan voor gasmodus 3 (met name de downflow), maar de over de depositieperiode gemiddelde uitstroom neemt juist percentueel minder af. Dit komt, omdat in gasmodus 1 een over de sliblaag gemiddeld in situ gasgehalte is ingevoerd. Dit gemiddelde is bepaald uit een slibprofiel in gasmodus 3 voor de start van het consolidatieproces (met $h=h_{set}$). Bij een berekening in gasmodus 3 is het in situ gas porie getal niet constant i.v.m. de in de diepte toenemende totaalspanning (gasdruk $p_g = \sigma + u^{atm}$). Ook in de tijd is het gasprofiel niet constant t.g.v. het consolidatieproces en de depositieperiode (effect op totaalspanning). Dus zowel lokaal als in de tijd verschilt het gasgehalte van berekeningen in gasmodus 3 van de gemiddelde waarde uit de spreadsheet en dit heeft invloed op de berekening. De getabelleerde berekeningsresultaten staan in supplement B.3 vermeld.

4.5.6 Variatie coëfficiënt van Henry

Voor het in deze paragraaf beschreven scenario (met $e_g^{atm} = 1.5$) zijn ook simulaties uitgevoerd, om het effect van de coëfficiënt van Henry (H) op het gemiddeld in situ gas porie getal $\bar{e}_g$ te onderzoeken.

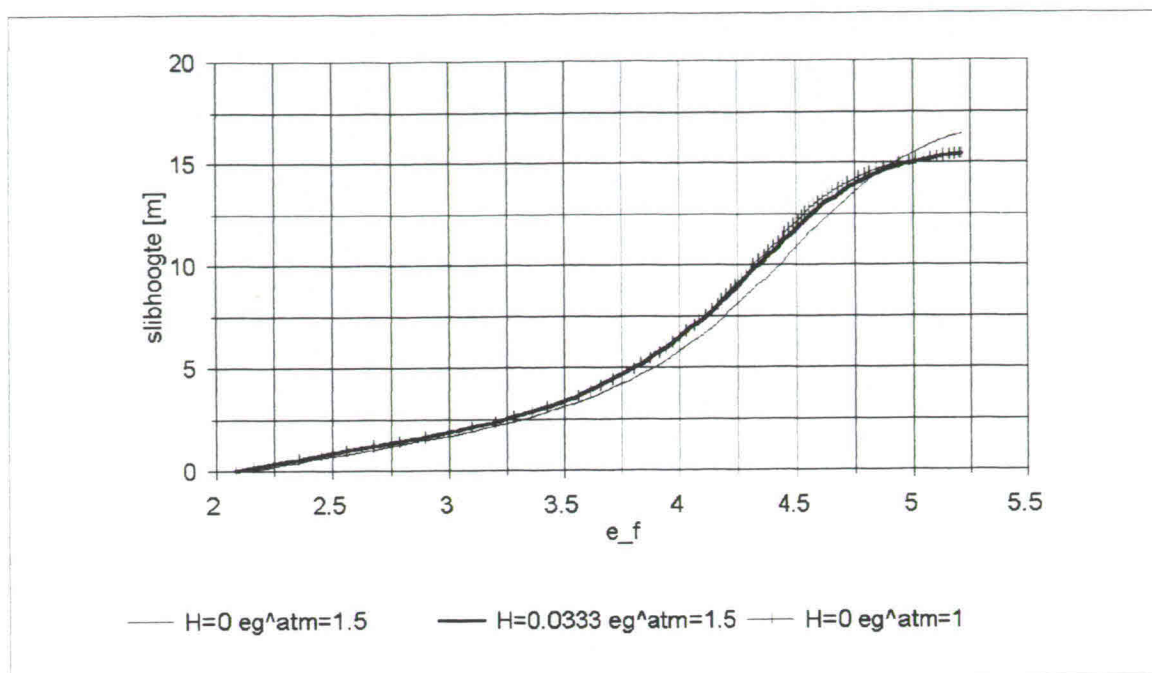
Slibsoort	H	$\bar{e}_g$ t= t_{dep} (10jaar)	$\bar{e}_g$ t=100jaar
SS	0	0.54	0.50
	0.0333	0.35	0.32
	0.0666	0.17	0.14
KM	0	0.53	0.50
	0.0333	0.40	0.38
	0.0666	0.28	0.26
K16	0	0.54	0.53
	0.0333	0.46	0.45
	0.0666	0.38	0.37

Tabel 4.16 Gemiddeld in situ gas porie getal

Daartoe zijn per parameter set drie simulaties uitgevoerd met $H=0$, $H=0.0333$ en $H=0.0666$ in gasmodus 3, waarbij de rest van de invoer gelijk is aan de invoer van paragraaf 4.3.2 (tabel 4.1), maar met $\sigma_{op}(e_{set}) = 0.3$ kPa. In water heeft de oplosbaarheid van gas een waarde van 0.0333 (Yamamoto et al., 1976) en in slib ligt de oplosbaarheid tussen een waarde van 0.0333 en 0.0666 in. Het effect voor het in situ gasgehalte is aanzienlijk (zie tabel 4.16).

Supplement B.4 toont de profielen voor diverse oplosbaarheden. De oplosbaarheid H heeft invloed op het vloeistof porie getal, omdat de $\bar{e}_g$ -waarde t.g.v. H kleiner wordt. Nu is voor $H=0$ een lagere e_g^{atm} -waarde gekozen zodat het in situ gasgehalte ($\bar{e}_g = 0.39$ op $t=t_{dep}$) redelijk dichtbij het in situ gasgehalte ($\bar{e}_g = 0.35$ op $t=t_{dep}$) voor de simulatie met $H=0.0333$ ligt. Het e_f -profiel ($H=0.0333$ en $e_g^{atm} = 1.5$)

blijkt dan slechts weinig af te wijken van het profiel zonder oplosbaarheid ($H=0$ en $e_g^{\text{atm}} = 1$). Dus de invloed van H op het e_f - profiel is niet veel anders dan de invloed van het gemiddelde in situ gasgehalte op het e_f - profiel (zie afbeelding 4.14).



Afbeelding 4.14 Invloed oplosbaarheid op e_f -profiel Slufter Zuid; gasmodus 3

Aan het e_g - profiel (in supplement B.4) is te zien, dat de lichtgebogen grafiek opschuift naar een lager gemiddeld in situ gas porie getal. Bovendien verlaagt een hogere oplosbaarheid de e_g - waarde in de toplaag meer dan de e_g - waarde net boven de depôtbodem. Met andere woorden: het bereik van het e_g -profiel wordt iets kleiner bij een hogere oplosbaarheid.

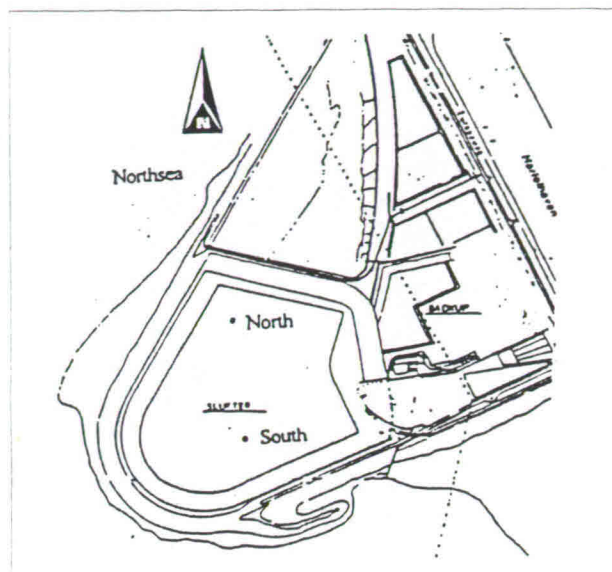
5 Veldmetingen Slufter

Dit hoofdstuk omvat het laatste deel van het onderzoek: toetsing van de berekeningen aan de veldmetingen van de Slufter. De kennis over de parameters van slib en gasvorming in slib worden hier toegepast voor een praktijk-case.

Voor de simulaties betreffende meetpaal Noord en Zuid in de Slufter is het computerprogramma "FSCONGAS" gebruikt. Zo kon gebruik worden gemaakt van de meetgegevens van meetpaal Noord en Zuid (zie afbeelding 5.1 (Deibel et al., 1996)) van november 1992 en november 1994.

Tevens waren er waterspanningen beschikbaar van 1995 en 1996. De modellering is in twee stappen opgebouwd, eerst een verzadigde berekening, waarbij een keuze werd gemaakt voor

een bepaalde parameterset en vervolgens is de invoer van deze berekening gebruikt als basis voor een berekening met gashoudend slib.



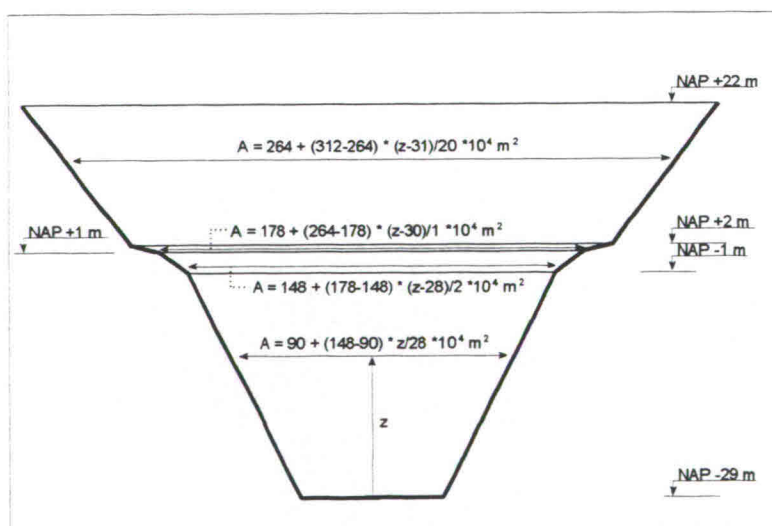
Afbeelding 5.1 Bovenaanzicht Slufter met meetpaal Noord en Zuid

5.1 Depôt karakteristieken

5.1.1 Geometrie

De Slufter is ontworpen als een diepe put tot -28m NAP omringd door een 24 m hoge ringdijk. De bodem van de Noordzee, waar deze beringslocatie is aangelegd, bestaat tot een diepte van -22 m NAP uit fijn zand (holoceen zand). Daaronder ligt een 2m dikke kleilaag (laag van Velsen), welke grenst aan een zandlaag (pleistoceen zand) tot -40 m NAP.

In de praktijk is het exacte niveau van de depôtbodem niet bekend,



Afbeelding 5.2 Depôtgeometrie

omdat na het bereiken van de bestekdiepte van -28 m NAP, nog zandwinning heeft plaatsgevonden in delen van het depôt. De waterspanningsmetingen kunnen meer zekerheid geven over het lokale bodemniveau.

Daar de taluds een groot deel van het oppervlak van het depôt beslaan is de geometrie zeer belangrijk voor de inhoud van het depôt. Het gemiddelde depôt oppervlak (Rapport nr. 92-165/A, GWR) wordt beschreven met behulp van formule (40a t/m 40d). Waarbij z de hoogte in meters voorstelt vanaf de putbodem op -29m NAP. A is het gemiddelde oppervlak van het depôt in ha..

$$0 < z < 28$$

$$A = 90 + (148 - 90) \cdot z / 28 \quad (40a)$$

$$28 < z < 30$$

$$A = 148 + (178 - 148) \cdot (z - 28) / 2 \quad (40b)$$

$$30 < z < 31$$

$$A = 178 + (264 - 178) \cdot (z - 30) / 1 \quad (40c)$$

$$31 < z < 51$$

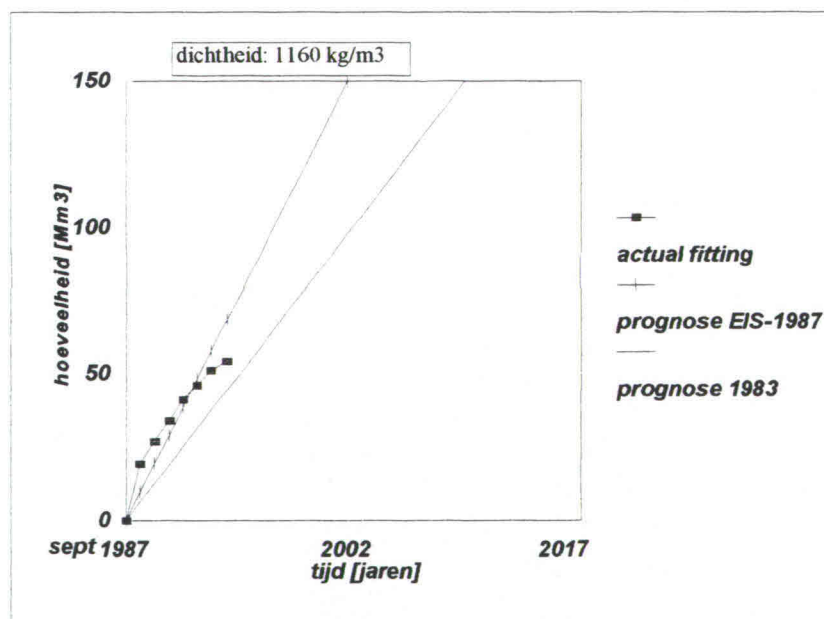
$$A = 264 + (312 - 264) \cdot (z - 31) / 20 \quad (40d)$$

Tot op heden (augustus 1997) bevindt het depôt zich nog in de "onderwaterfase", het waterniveau wordt constant op $\pm$ NAP gehouden.

5.1.2 Vulkromme

Voor de bepaling van de hoeveelheid geborgen slib is een vulkromme gemaakt (Deibel et al., 1996), zie figuur 5.3. Uitgangspunt in de ontwerpberekeningen was, dat tot minimaal in 2002 verontreinigde baggerspecie kon worden gedeponeerd in het depôt, totaal 150 Mm^3 .

In de praktijk blijkt de te bergen hoeveelheid specie per jaar af te nemen en lager te zijn dan de geraamde 10 Mm^3 per jaar.



Afbeelding 5.3

Vulkromme

Bij aanvang van het vullen van het depôt loopt het slibvolume snel op, dit wordt veroorzaakt van het legen van het tijdelijke "Badkuipdepôt" in 1988.

5.2 Aangeleverde meetgegevens

Voor de opzet van het model is gebruik gemaakt van meetgegevens van Gemeentewerken Rotterdam van november 1992 en november 1994 van meetpaal Noord en Zuid.

5.2.1 Niveau aanvang sliblaag en bodem depôt

De waterspanningsmetingen zijn gebruikt voor de bepaling van het slibniveau en de depôtbodem met een bepaalde nauwkeurigheid. Aan het sliboppervlak beginnen de waterspanningen af te wijken van de hydrostatische druk. De positie van de depôtbodem volgt uit de waterspanningen, omdat daar de waterspanningen plotseling dalen tot hydrostatische druk. Dit is mogelijk, omdat er geen isolerende voorzieningen aanwezig zijn.

De diepte van het depôt is enigzins onzeker, omdat t.g.v. zandwinning enige "putten" zijn ontstaan in de Slufter. Uit de waterspanningen van 1994 bleek de bodem van Noord op ongeveer -30.2m NAP te liggen en van zuid op ongeveer -29.2m NAP. In 1992 is met de slibsampler tot -28m NAP gestoken voor zowel Noord als Zuid dus de meetgegevens zijn niet volledig voor het gehele profiel. Alleen de waterspanningsmetingen van 1994 reikten diep genoeg voor de bepaling van de depôtbodem. De onnauwkeurigheid in hoogte van deze metingen bedraagt één tot een halve meter.

De waterspanningsmetingen van 1992 zijn niet te vertrouwen, omdat de totaalspanningen, zoals berekend uit de metingen m.b.v. de slibsampler, kleiner zijn dan de gemeten waterspanningen. In de toplaag van het slib zijn de waterspanningen wel kleiner of gelijk aan de totaalspanningen, dus die meetwaarden zijn toch bruikbaar. Met deze waarden voor de waterspanning kan dus het begin van de toplaag van het slib worden geschat.

In de praktijk blijkt het begin van de wateroverspanning een redelijke schatting te geven voor het slibniveau en kan de dichtheid van het slib in de bovenste paar meter van het grensvlak aangenomen worden als ongeveer 1200 kg/m^3 . Tabel 5.1 geeft de aldus bepaalde slibniveau's in 1992 en 1994.

Tevens is m.b.v. de door de slibsampler gestoken monsters het slibniveau bepaald. De nauwkeurigheid van deze waarden is afhankelijk van het aantal geleverde meetpunten over het gehele profiel. Het aantal meetpunten is gelijk aan het aantal monsterbuizen, omdat de slibeigenschappen bepaald zijn uit een mengmonster per monsterbuis. Het midden van de monsterbuis geeft zodoende de positie van het meetpunt. De nauwkeurigheid is maximaal gelijk aan de lengte van een monsterbuis (1m) en minimaal aan de afstanden tussen de monsters (in 1992 aaneengesloten en in 1994 per 1.5 m). Voor meetpaal Zuid is in 1992 ook het slibniveau in de monsterbuis bekend. De eerste monsterbuis is bij meetpaal Zuid half gevuld met slib, zodat het slibniveau met zekerheid is bepaald. Bij meetpaal Noord was deze volledig met slib gevuld, zodat onzekerheid blijft bestaan over het exacte slibniveau. In 1994 is het

slibniveau gekozen op bovenzijde monsterbuis. De resultaten staan in tabel 5.1.

De verschillen tussen slibniveau's in tabel 5.1 zijn op verschillende wijzen te verklaren:

- ✓ De metingen zijn niet gelijktijdig uitgevoerd, maar met een tussentijd van maximaal enkele weken, zodat bij latere metingen al meer slib gestort is;
- ✓ Een locale slibberg in het depôt kan tussentijds zijn ingezakt.
- ✓ De metingen zijn niet exact op dezelfde plaats uitgevoerd, maar binnen een straal van 10m. Dit heeft overigens weinig invloed, omdat het fysisch onmogelijk is, dat het slib over een afstand van 10m een hoogteverschil heeft van een meter of meer.
- ✓ Mogelijk is een deel van de toplaag bij meetpaal Noord in 1992 niet gestoken. Dit volgt uit het feit, dat de eerste monsterbuis volledig met slib gevuld was. Als deze buis gedeeltelijk met water gevuld was geweest dan had men het slibniveau met zekerheid vast kunnen stellen.
- ✓ De waterspanningen zijn soms moeilijk te interpreteren, omdat ze met intervallen van 1m in de diepte bepaald zijn. Daar het verloop ook nog enigszins "grillig" kan zijn is het lastig het punt van afbuiging t.o.v. de hydrostatische druk te bepalen.

	Noord nov. 1992	Noord nov. 1994	Zuid nov. 1992	Zuid nov. 1994
waterspanningen	-9 m NAP	-8.7 m NAP	-11 m NAP	-7.2 m NAP
slibsampler	-11 m NAP	-4.9 m NAP	-11.5 m NAP	-8 m NAP

Tabel 5.1 Slibniveau uit metingen

De cursief gedrukte slibhoogten in tabel 5.1 zijn gebruikt t.b.v. de interpretatie van de meetgegevens. Daarbij is in het algemeen gekozen voor de slibhoogte, die uit de waterspanningen volgt. De reden is, dat in 1992 voor meetpaal Noord de bovenste sliblagen mogelijk niet gestoken zijn en in 1994 van de waterspanningsmetingen meer meetpunten beschikbaar zijn dan van de slibsampler. Vooral omdat de waterspanningsmeting en het steken van monsters met de slibsampler niet op dezelfde tijd plaats hebben gevonden is het beter één type meting te gebruiken voor de bepaling van de slibhoogte. Er is echter een uitzondering gemaakt voor meetpaal Noord in 1994, omdat het niet logisch is wel gestoken slib als niet bestaand aan te nemen. De waterspanningen wijken immers op die hoogte niet significant af van de hydrostatische druk. Tevens bevindt zich een vreemde toename in de waterspanning nabij het peil van -2m NAP. Dit kan op een instabiliteit van deze meting in de toplaag duiden. Tevens zijn de slibniveaus voor 1995 en 1996 bepaald uit de waterspanningsmetingen (zie tabel 5.2)⁽⁹⁾

Noord nov. 1995	Noord nov. 1996	Zuid nov. 1995	Zuid nov. 1996
-6.4 m NAP	-5.4 m NAP	-5 m NAP	-3 m NAP

Tabel 5.2 Slibniveau bepaald uit waterspanningsmetingen

⁽⁹⁾ Bron: aanbiedingsbrief van 2 april 1997 waarin delen uit rapport 96-204/A GWR\IG

Naast de waterspanningsmetingen kan het slibniveau, behorend bij een bepaalde dichtheid, bepaald worden uit andere metingen:

- ✓ temperatuurmetingen in de Slufter ⁽¹⁰⁾, waarbij een constante temperatuurwaarde wordt gevonden voor water, maar bij de toplaag van het slib de temperatuurkromme een duidelijke piek vertoont.
- ✓ echoloding
- ✓ back-scatter metingen vanaf een vaartuig
- ✓ nucleaire dichtheidsmetingen vanaf de meetpalen (Rapport nr. 92-165/A, GWRIG)

Deze metingen zijn gebruikt als referentiepunten, om de berekende hoogte te kunnen beoordelen.

5.2.2 Profielen

Via gemeentewerken Rotterdam zijn profielen beschikbaar voor het watergehalte, atmosferisch gasgehalte, de bulkdichtheid, de plasticiteitsindex en het zandgehalte voor november 1992 en november 1994. ⁽¹¹⁾ Daar de aangeleverde bulkdichtheid niet nauwkeurig genoeg bepaald is, is deze opnieuw berekend met behulp van het watergehalte en het in situ gasgehalte. Het atmosferisch gasgehalte is bepaald met behulp van compressie/decompressie proeven. Door nu laag voor laag vanaf de bovenzijde de totaalspanning te bepalen (met $\gamma_s = 25 \text{ kN/m}^3$ en $\gamma_f = 10.2 \text{ kN/m}^3$) volgt daar het in situ gas porie getal uit (supplement C.1). In eerste instantie is uitgegaan van gasmodus 3, d.w.z. alleen compressie en geen oplossen van gas ($H=0$). De gemeten waterspanning is gebruikt voor de berekening van de totaalspanning aan het sliboppervlak. Aangenomen is dat de gasdruk gelijk is aan de totaalspanning plus de atmosferische druk ($u=100 \text{ kPa}$). Hieruit is de bulkdichtheid bepaald (zie formule (44)).

$$\rho_{bulk} = \frac{(\rho_s + \rho_f \cdot e_f)}{(1 + e_f + e_g)} \quad (44)$$

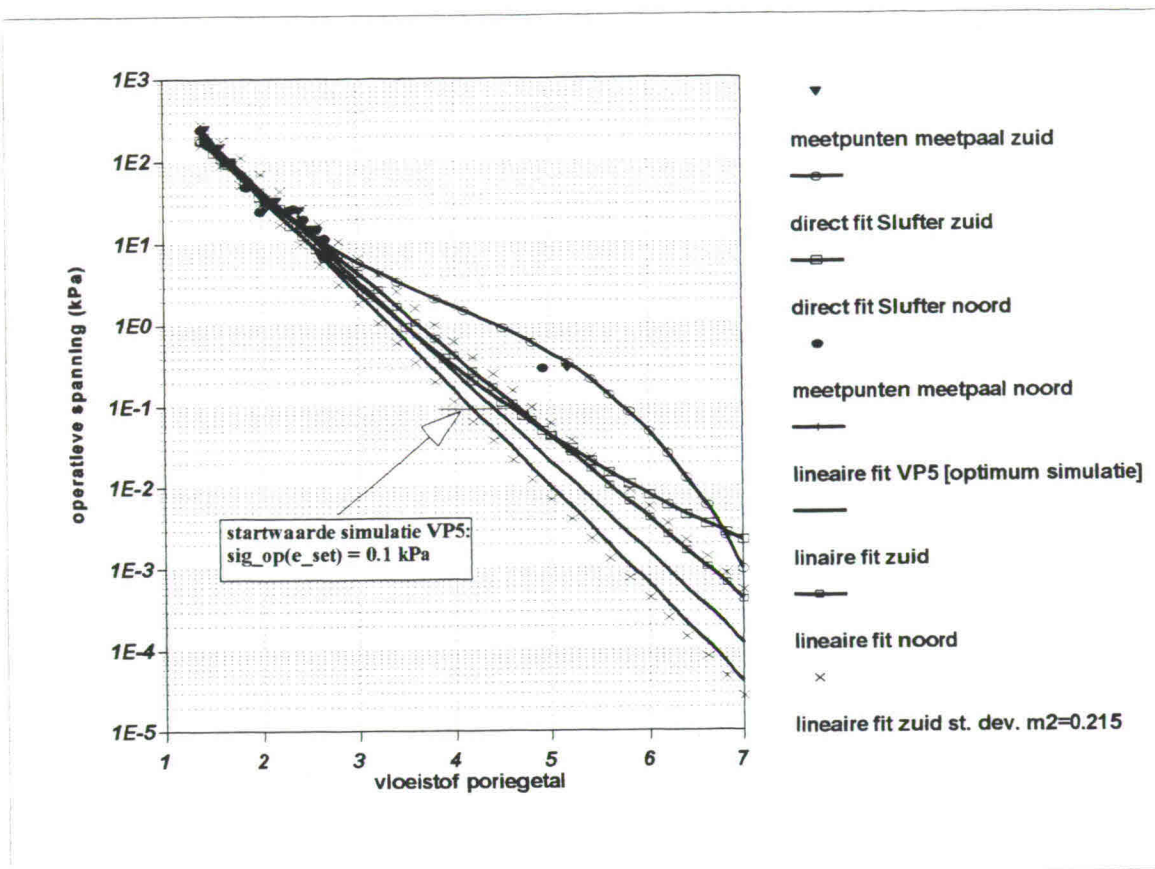
5.3 Berekening scenario voor één-dimensionale modellering

5.3.1 Algemene beschrijving scenario

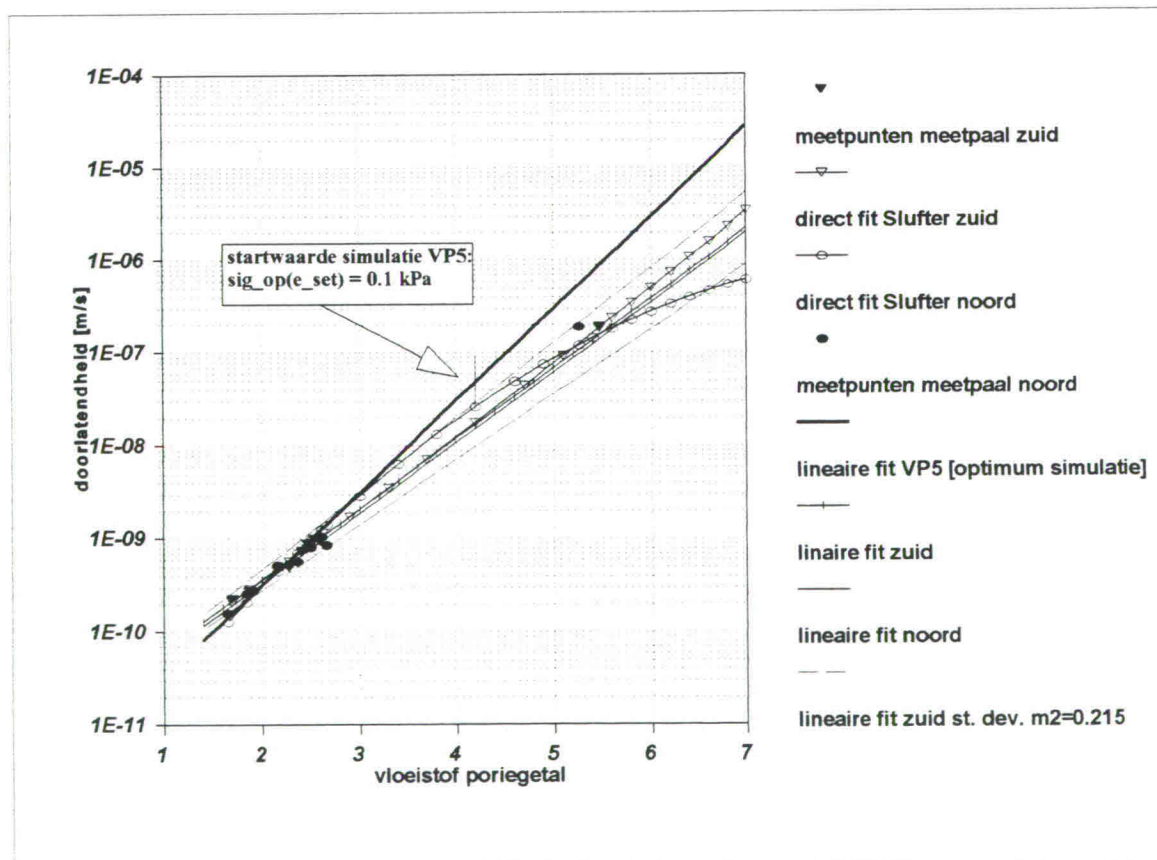
Er is uitgegaan van een gedraineerde onderrand op -29m NAP en een constant waterpeil op NAP. De keuze van dit bodemniveau voor zowel Noord als Zuid is te verdedigen, omdat na de tot standkoming van de depôtbodem op -28m NAP door zandwinning putten zijn ontstaan. Deze locale putten zullen t.g.v. de slibstroming direct "dichtstromen", zodat de depôtbodem vlak wordt. Tevens is de nauwkeu-

⁽¹⁰⁾ Bron: aanbiedingsbrief van 22 november 1993 betreffende Temperatuurmetingen in de Slufter Gemeentewerken Rotterdam, A. Opstal
Bron: Opstal, A.Th.P.J. (1995) Veldmetingen in het Slufterdepôt 1994. Factual Report GWRIGM, nr.94-010/A

⁽¹¹⁾ Bron: aanbiedingsbrief van 11 december 1996 in het kader van offerte U96/39048 GWRIG



Afbeelding 5.4a Parameterrelaties: $\sigma_{op}(e_r)$ -curves



Afbeelding 5.4b Parameterrelaties: $k(e_r)$ -curves

t.g.v. de slibstroming direct "dichtstromen", zodat de depôtbodem vlak wordt. Tevens is de nauwkeurigheid in de hoogtebepaling 1m. Door een bodemniveau van -29 m NAP aan te houden kan de depôtgeometrie beschreven worden met formules (40a t/m 40d), zodat aan een bepaald niveau een oppervlak toegekend kan worden. De geometrie van het depôt is meegenomen door deze in de berekening van de stortsnelheid te implementeren [in meters slib per jaar], welke volgt uit de vulkromme [in kubieke meters per jaar]. Echter de modellering is alleen buiten de taluds toepasbaar! Het slib wordt in de modellering als één homogene laag in heel het depôt gelijkmatig gestort, en de materiaalparameters zijn bepaald m.b.v. de HYDCON-procedure uit een mengmonster. Uit de metingen blijkt, dat dit een vereenvoudiging is, aangezien er lokaal flinke verschillen zijn in slibeigenschappen.

Slechts één type grondwaterstroming is mogelijk: afstroomdebiet t.g.v. eigengewichtsconsolidatie. Er is geen hydraulisch drukverschil over de sliblaag aanwezig, dus doorstroming is niet mogelijk.

5.3.2 Materiaalparameters

Met behulp van de HYDCON-procedure en een zogenaamde DIRECT fit (zie hoofdstuk 3) is voor beide meetpalen een afzonderlijke parameterset bepaald. De parameters staan vermeld in tabel 5.3. Deze horen thuis in de volgende relaties:

$$\sigma_{op}(e_f) = \exp(m1 + m2 \cdot e_f + m3 \cdot e_f^2 + m4 \cdot e_f^3) \quad (45)$$

$$k(e_f) = \exp(m5 + m6 \cdot e_f + m7 \cdot e_f^2 + m8 \cdot e_f^3) \quad (46)$$

De relaties blijken vooral voor lage dichtheden nogal te verschillen ten gevolge van de keuze van de polynoom. Dit betekent in feite dat bij een gelijke startdichtheid van het consolidatieproces, dus identieke e_{set} -waarde, de operationele spanningen heel veel verschillen. Dit is niet reëel voor slib uit hetzelfde depôt. De gemeten dichtheden zijn zowel voor Noord als Zuid in de toplaag van dezelfde orde van grootte. Het verschil in de materiaal parameters komt door enige willekeur in de keuze van de materiaal parameters van de DIRECT methode. De metingen uit de HYDCON-procedure komen echter wel met elkaar overeen.

Om deze reden is gekozen voor parameterset VP5 zowel voor Noord als Zuid, omdat dit in voorgaand onderzoek goede resultaten opleverde (Greeuw, 1994). Dit is een exponentieel lineaire parameterrelatie met een enigszins hoge k-waarde.

Daarnaast is ook de aldaar afgeleide lineaire parameterset voor Slufter Zuid uit hoofdstuk 4 bekeken. Dit is een set, die bepaald is d.m.v. lineaire regressie uit de metingen van de hydconprocedure met uitzondering van de kolomproef. Tevens zijn de standaardafwijkingen bepaald. Daarbij blijken de standaardafwijkingen van de richtingscoëfficiënt ($m2$ en $m6$) als enigen belangrijk te zijn. Zowel de lineaire fit voor Noord als VP5 blijken binnen de spreiding van coëfficiënt $m2$ te vallen van Zuid in figuur 5.4a. Maar in de $k(e_f)$ -curve valt VP5 buiten de spreiding van coëfficiënt $m6$ (zie figuur 5.4b).

parameterset	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
N"direct"	9.07	-2.82	0.03	0.009	-27.46	3.14	-0.18	0
Z"direct"	12.93	-7.15	1.54	-0.132	-25.1	1.64	0.02	0
VP5	9.21	-2.76	0	0	-26.43	2.28	0	0
lineair Zuid	8.97	-2.57	0	0	-25.21	1.74	0	0
stand.dev.	0.205	0.215			0.107	0.127		
lineair Noord	8.42	-2.32	0	0	-25.31	-1.74	0	0
stand.dev.	0.303	0.209			0.142	0.149		

Tabel 5.3 Parameter sets

5.3.3 Vloeistof porie getal bij start consolidatie

Voor het vloeistof porie getal bij depositie wordt een natte dichtheid van 1160 kg/m^3 ($e_{\text{dep}} = 9.57$) gekozen, omdat het mengsel van baggerspecie met transportwater meestal getransporteerd wordt met een dichtheid, die hier in de buurt ligt. In de praktijk is de dichtheid waarbij het slib wordt gestort niet constant. Als gevolg daarvan kan bij lagere dichtheden dan 1160 kg/m^3 nog sedimentatie voorkomen. De dichtheid waarbij de consolidatie wordt gestart wordt bepaald door instabiliteit van de berekening. Een dichtheid van 1160 kg/m^3 voldoet niet. Gekozen is nu voor een operationele spanning van 0.1 kPa , waarbij het consolidatieproces start (zie paragraaf 5.4.2). Uit deze spanning volgt een vloeistof porie getal (e_{set}) van 4.17 (VP5) en dus een natte dichtheid van 1306 kg/m^3 . Een hogere waarde voor e_{set} bleek een instabiele simulatie op te leveren. In laboratoriumproeven volgde dat het consolidatieproces al start bij een dichtheid van 1140 kg/m^3 , maar in de praktijk zijn andere processen zoals segregatie en "slibstroming" overheersend bij deze lage dichtheden. Ook volgt uit de dichtheidsmetingen on-site dat zulke lage dichtheden alleen helemaal bovenin het slib kunnen voorkomen (bovenste paar dm.). Het feit, dat slibstroming plaatsvindt in het depôt is aan te tonen m.b.v. een in situ meting van de schuifsterkte. Deze metingen zijn m.b.v. vane-proeven in oktober 1995 t.p.v. meetpaal Noord uitgevoerd (Rapport nr. 95-153/A, GWR; McDermott, 1996). Vanaf een diepte van $\pm 1 \text{ m}$ onder het slibniveau was de schuifsterkte meetbaar, wat betekent, dat op die diepte geen "slibstroming" plaatsvond. Op deze diepte heeft de operationele spanning een waarde van $\pm 0.2 \text{ kPa}$ (zie bijlage D).

5.3.4 Depositiesnelheden

Voor de bepaling van de hoeveelheid gedeponeerde droge stof zijn drie variabelen van belang:

- ✓ dichtheid bij depositie $\rho_{\text{dep}} (\rho_{\text{dep}} = (\rho_s + \rho_f * e_{\text{dep}}) / (1 + e_{\text{dep}}))$
- ✓ depositionsnelheid v_{dep}
- ✓ depositietijd t_{dep}

Bij de bepaling van de stortsnelheid wordt de invloed van het gas verwaarloosd. Het gemiddeld in situ gasvolume percentage (vg%) ligt onder de 4% in 1992.

Als eerste stap ten behoeve van het bepalen van de stortsnelheid wordt de hoeveelheid gedeponeerde

droge stof bepaald. Deze is bepaald uit tabellen aangeleverd door Gemeentewerken Rotterdam in termen van verrekenbare hoeveelheden met een dichtheid van ca. 1227 kg/m^3 . In de eerste periode (september 1987 - maart 1989) van 1.5 jaar wordt 15.43 Mm^3 slib gestort (Rapport nr. 92-165/A, GWR). Deze periode wordt gekenmerkt door een relatief hoge stortsnelheid, vanwege het legen van het "Badkuipdepôt" in 1988 in de Slufter. Hoewel de samenstelling van het slib en de werkelijke stortdichtheid veranderlijk zijn, worden deze in het model als constante grootheden aangenomen voor alle perioden.

Voor de tweede periode zijn tabellen beschikbaar tot en met 1991 en een prognose voor 1992. Hiervan is geen gebruik gemaakt. Het volume gedeponeerde baggerslib voor deze tweede periode is afgelezen van een vulkromme (Deibel et al., 1996). Uit afbeelding 5.3 is ook de hoeveelheid gedeponeerde specie in de eerste periode afgeleid en deze bleek overeen te komen met de berekende waarde aan de hand van de genoemde tabellen.

Voor de berekening van de depositiesnelheid is de depôtgeometrie van belang. De volgende relatie blijkt te gelden (rapport nr. 92-165/A, GWR) voor $0 < z < 28$:

$$A = 90 + (148 - 90) \cdot z / 28 \quad (40a)$$

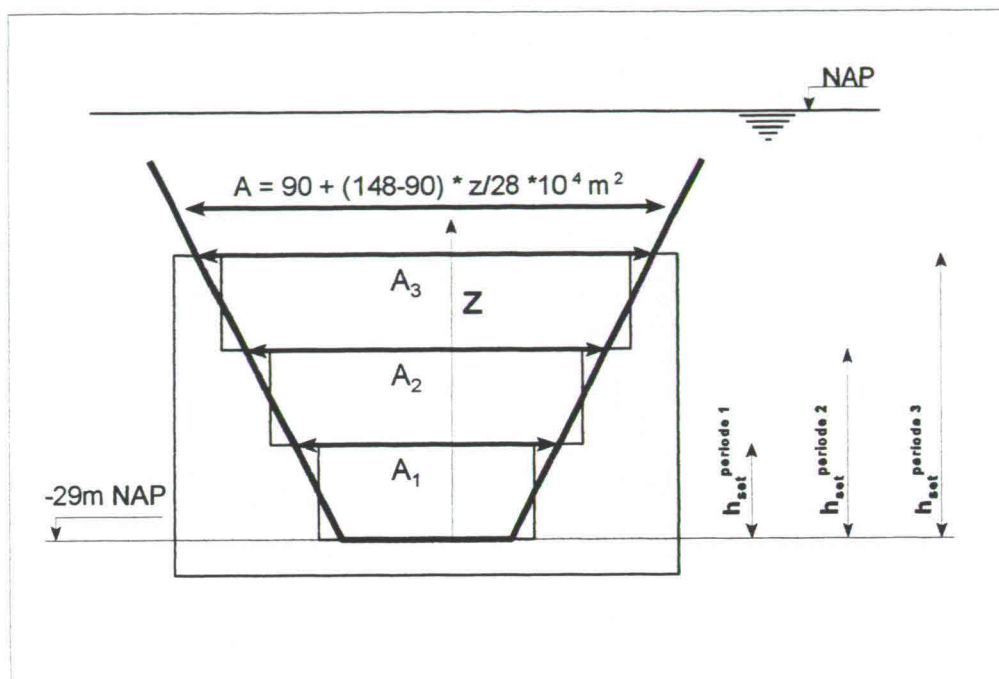
Waarbij z de hoogte in meters voorstelt vanaf de putbodem op -29m NAP. A is het gemiddelde oppervlak van het depôt in ha.. Aangenomen is dat de depotbodem zowel bij meetpaal Noord als meetpaal Zuid op -29 m NAP ligt. De reden hiervoor is, dat locale variaties niet voldoende bekend zijn en een "locale put" als eerste gevuld zal worden t.g.v. van stroming van het slib (wat voor het consolidatieproces plaats vindt). Zo wordt de depôtbodem in feite al in de beginfase "uitgevlakt". Overigens is één gemiddelde depositiesnelheid voor het hele depôt een vereenvoudiging van de werkelijkheid, omdat de diffusor, waarmee het slib gedeponeerde wordt, lokaal in het depôt slib deponeert. Hoewel men men de diffusor verplaatst om zo gelijkmatig mogelijk te vullen, treden er altijd enige hoogteverschillen op in het depôt. Omdat niet bekend is hoeveel slib er lokaal gedeponeerde wordt is hier geen rekening mee gehouden.

Per periode moet nu een gemiddeld oppervlak worden berekend, zodat het slibvolume omgerekend kan worden in een slibhoogte, die voor de simulatie van belang is. Het depôt wordt dus gemodelleerd als een benadering van een "terrasvormig" depôt.

Bij deze benadering wordt geen rekening gehouden met het drie-dimensionale effect van de geometrie op de het consolidatieproces. In feite berust het één-dimensionale model op een optelsom van een aantal slibslijven met een verschillend oppervlak. In de praktijk zal het consolidatieproces t.p.v. de taluds verschillen van een locatie midden in het depôt. T.p.v. de taluds is de slibhoogte niet constant en het slib zal op de taluds niet verticaal kunnen consolideren i.v.m. de hellingshoek van de taluds. Bovendien zal behalve via de onder- en bovenrand ook poriewater via de ringdijk wegstromen, indien op de taluds geen isolerende voorzieningen zijn aangebracht.

De slibhoogte bij aanvang van consolidatie (h_{set}) geeft echter een reële schatting voor de slibhoogte, omdat tijdens de depositieperioden de consolidatie nog beperkt is. Uit het gedeponeerde slibvolume (V_{dep}) kan in theorie per periode een slibvolume (V_{set}) worden berekend waarbij het slib start met het

consolidatieproces (althans volgens het model). Als dit laatst genoemde slibvolume (V_{set}) gelijk gesteld wordt aan de geïntegreerde formule van de depôtgeometrie volgt uit de variabele z de h_{set} -waarde. Het gemiddelde van het sliboppervlak aan het einde van de vulperiode en van het sliboppervlak aan het begin van deze periode geeft dan een schatting voor het oppervlak ($\bar{A}$) in deze periode. De berekende waarden staan vermeld in tabel 5.4.



Afbeelding 5.5

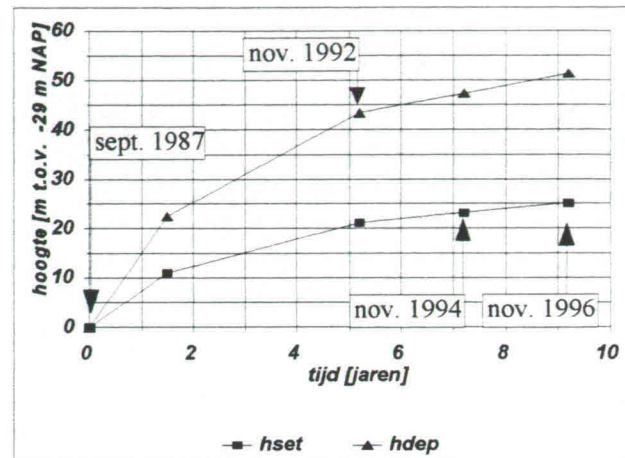
Modellering depôt

$e_{\text{dep}} = 9.57$ $e_{\text{set}} = 4.17$	periode 1 sept.1987-mrt. 1989 [1.5 jaar]	periode 2 mrt.1989-nov.1992 [3.7 jaar]	periode 3 nov.1992-nov.1994 [2 jaar]
V_{dep} [Mm ³] $\rho_{\text{nat}} = 1160 \text{ kg/m}^3$	22.81	48.57	54
V_{set} [Mm ³] $\rho_{\text{nat}} = 1306 \text{ kg/m}^3$	11.16	23.78	26.43
h_{set} [m]	11	21.2	23.2
A [10 ⁴ m ²] begin	113	113	134
A [10 ⁴ m ²] eind	90	134	138
$\bar{A}$ [10 ⁴ m ²] gemiddeld	101.4	123.5	136
v_{dep} [m/jaar]	15	5.64	2

Tabel 5.4 Berekening depositiesnelheden (methode ① voor berekening vaste stof hoogte)

Het sliboppervlak blijkt in de derde periode (november 1992 - november 1994) relatief minder toe te nemen. Daarom wordt de depositiesnelheid van depositieperiode 3 voorlopig ook gebruikt als schatting voor depositieperiode 4 (november 1994 - november 1996). De exacte hoeveelheid gedeponeerde slib in periode 4 is niet bekend, omdat deze waarden nog niet in de gebruikte vulkromme verwerkt waren.

Als in plaats van h_{set} (zie afbeelding 5.6) de slibhoogten uit de simulaties worden gebruikt in deze berekening van de depositiesnelheid, blijken de depositiesnelheden maar in geringe mate te stijgen ($v_{dep}^{periode 1} = 15.1$ m/jaar en $v_{dep}^{periode 2} = 5.8$ m/jaar). Zo kan geconcludeerd worden, dat h_{set} een goede schatting is van de slibhoogte ten behoeve van deze berekening en deze invoergegevens zullen dan ook worden gebruikt.



Afbeelding 5.6 Slibhoogte

5.3.5 Vaste stof hoogte

Cruciaal voor alle simulaties is de hoeveelheid gedeponeerde vaste stof. Deze is op verschillende manieren te bepalen. Drie berekeningswijzen zijn toegepast voor de vaste stof hoogte van november 1992 voor beide meetpalen (supplement C.1):

- ① via de vulkromme, een "standaard" waarde voor Noord en Zuid. Dit is een gemiddelde waarde voor alle punten in het midden van het depôt, ofwel niet op de taluds;
- ② uit het netto gewicht van de monsterbuizen en het gemeten watergehalte;
- ③ indirecte bepaling uit de gasgehalte- en watergehalteprofielen.

Berekeningswijze ① is al uitgewerkt in de bepaling van de depositiesnelheid in de vorige paragraaf (zie tabel 5.4). De vaste stof hoogten die volgen uit deze berekening zijn: $h_s^{periode 1} = 2.13$ m, $h_s^{periode 2} = 1.97$ m, $h_s^{periode 3} = 0.38$ m. Dus in november 1992 is $h_s = 2.13 + 1.97 = 4.10$ m en $h_s = 4.10 + 0.38 = 4.48$ m in november 1994.

Bij berekeningswijze ② is uitgegaan van wat er werkelijk lokaal gestoken is. Per gestoken monsterbuis is met behulp van het gemeten watergehalte de vaste stof hoogte bepaald.

$$M_s = \frac{M_{tot}}{\left(\frac{w\%}{100\%} + 1\right)} \quad h_s = \frac{V_s}{A_{monsterbuis}} = \frac{M_s / \rho_s}{A_{monsterbuis}} \quad (47)$$

Deze berekeningswijze is alleen uitgevoerd voor november 1992, omdat alleen die gegevens beschikbaar waren en hier ook alleen maar een vrijwel volledig profiel werd gestoken. Omdat de metingen van de toplaag bij meetpaal Noord ontbreken is de berekende vaste stofhoogte gecorrigeerd. Dit is ook gedaan tot op de depotbodem. Dit geeft dan voor Noord $h_s = 3.59$ m en voor Zuid $h_s = 3.45$ m (metho-

de ②).

De indirecte bepaling van de vaste stof hoogte volgens methode ③ volgt uit de berekende in situ gasgehalte- en watergehalteprofielen (zie formule (48) met h_{tot} = afstand tussen de meetpunten). Hiervoor zijn de berekende gasgehalteprofielen uit paragraaf 5.2.2 (gasmodus 3, compressie zonder oplossen, zie supplement C.1) gebruikt.

$$h_s = \frac{h_{sat}}{\left(1 + \frac{w^0}{100\%} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_f}\right)} = \frac{\left(h_{tot} - \frac{vg^0}{100\%} \cdot h_{tot}\right)}{\left(1 + \frac{w^0}{100\%} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_f}\right)} \quad (48)$$

De vaste stof hoogte voor nov.1992 en nov.1994 is per laag (monsterbuis) tussen twee meetpunten berekend waarbij er voor de top laag en bodem is geëxtrapoleerd.

Berekenings- methode	nov. 1992 Noord	nov. 1992 Zuid	nov. 1994 Noord	nov. 1994 Zuid
methode 1	4.10 m	4.10 m	4.48 m	4.48 m
methode 2	3.59 m	3.45 m		
methode 3	3.73 m	3.83 m	5.99 m	4.92 m

Tabel 5.5 Vaste stof hoogtes (h_s)

5.3.6 Afleiding depositiesnelheden uit profielmetingen

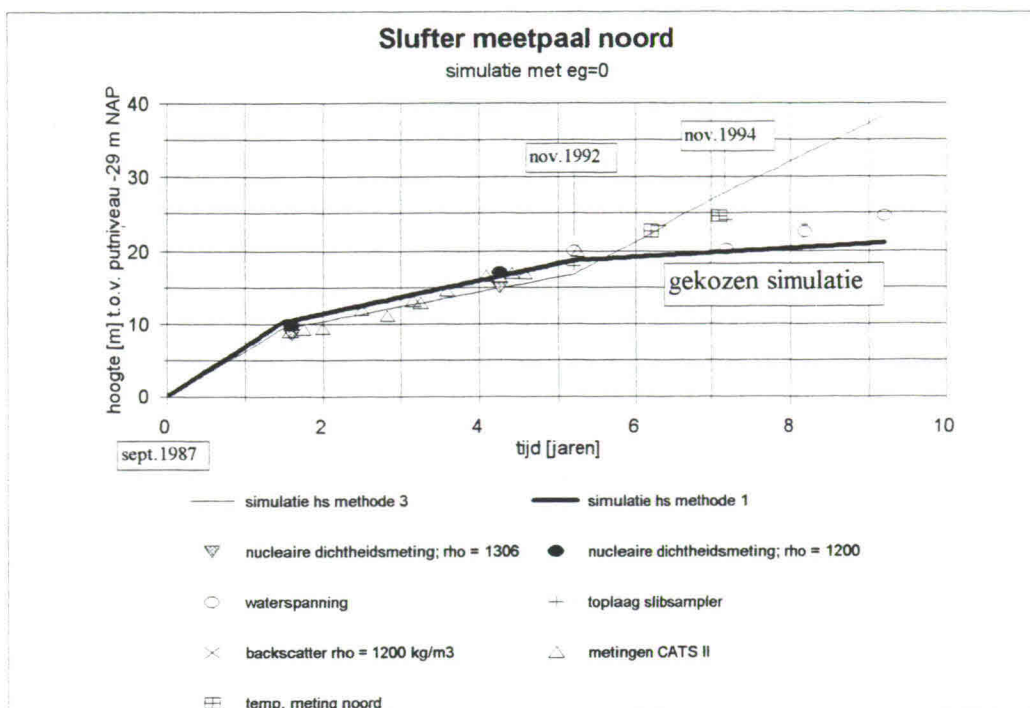
In paragraaf 5.3.4 zijn de depositiesnelheden bepaald volgens de gegeven vulkarakteristieken ($m^3/jaar$) voor de Slufter. Uit interpretatie van de meetgegevens volgden andere vaste stof hoogten dan uit de gemiddelde waarde uit de vulkarakteristieken met methode ①. Deze vaste stofhoogten zijn berekend voor nov. 1992 en nov. 1994 (zie tabel 5.5). T.b.v. de simulaties zijn (zie paragraaf 5.4.1) de depositiesnelheden voor de eerste twee perioden benaderd door de verhouding uit de al berekende depositiesnelheden uit de vulkarakteristiek te gebruiken. Zo volgt voor methode ③ voor bijvoorbeeld meetpaal Noord: $v_{dep}^{periode 1} = 3.73/4.1 \cdot 15 \text{ m/jaar} = 13.64 \text{ m/jaar}$.

De derde periode is direct uit de berekende vaste stofhoogte bepaald volgens methode ③:

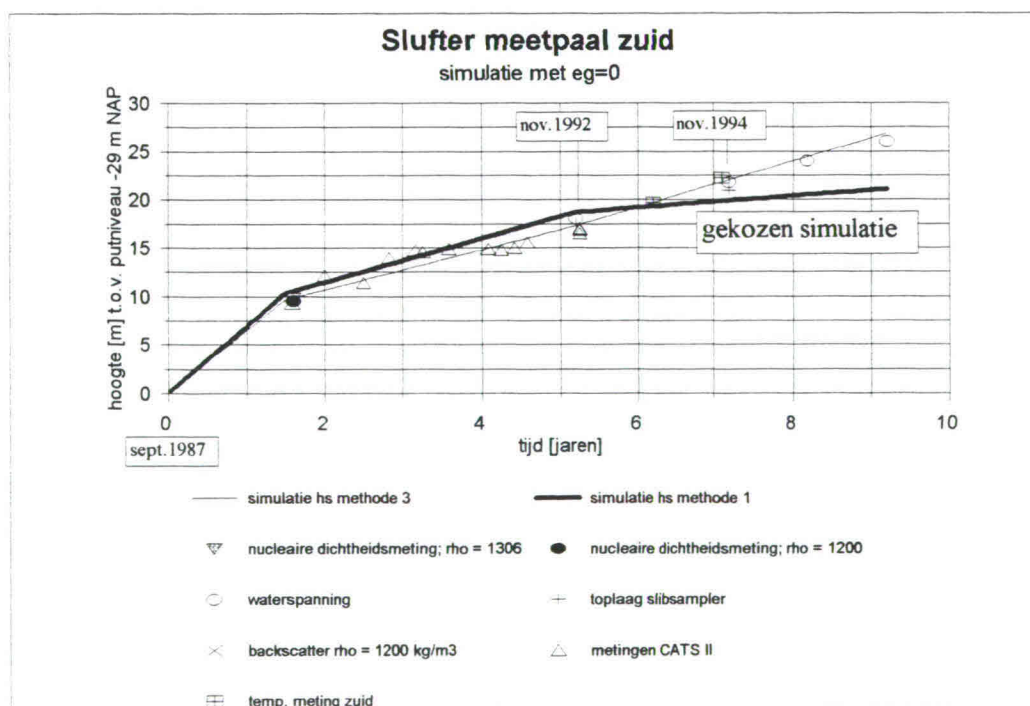
$$v_{dep}^{periode 3} = (h_s^{nov.1994} - h_s^{nov.1992}) / 2 \cdot (1 + e_{dep}) = (5.99 - 3.73) / 2 \cdot (1 + 9.57) = 11.94 \text{ m/jaar}$$

		$v_{dep}^{periode 1}$ [m/jaar]	$v_{dep}^{periode 2}$ [m/jaar]	$v_{dep}^{periode 3}$ [m/jaar]
vulkarakteristiek	methode ①	15	5.64	2
meting Noord	methode ③	13.64	5.13	11.94
meting Zuid	methode ③	14	5.27	5.67

Tabel 5.6 Depositiesnelheden behorende bij verschillende vaste stofhoogtes



meting toplaag:	1992	20 m	1995	22.8 m
uit waterspanning	1994	20.3 m	1996	24.6 m



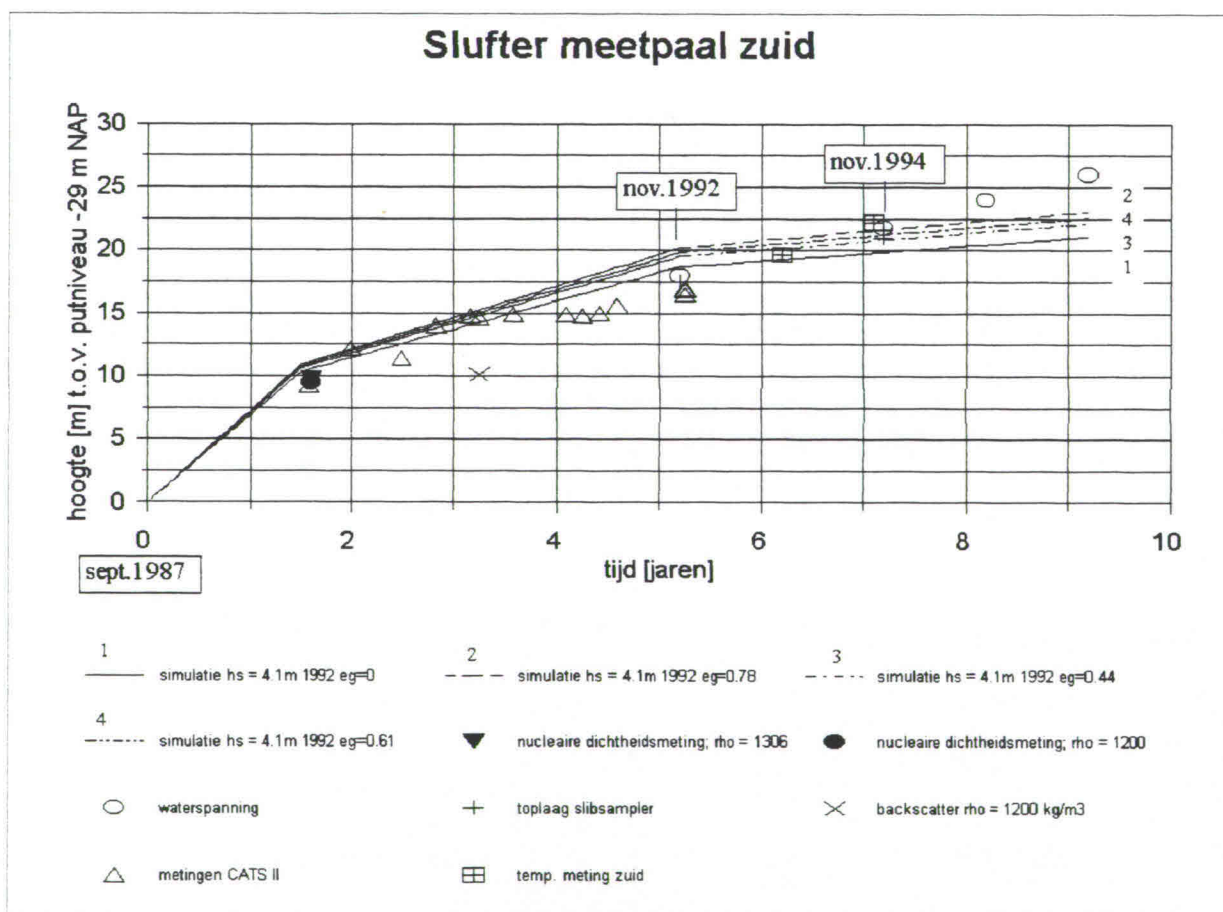
meting toplaag:	1992	18 m	1995	24 m
uit waterspanning	1994	11.8 m	1996	26 m

Afbeelding 5.7 Verzadigde berekeningen (zonder gas)

5.4 Resultaten verzadigde berekening

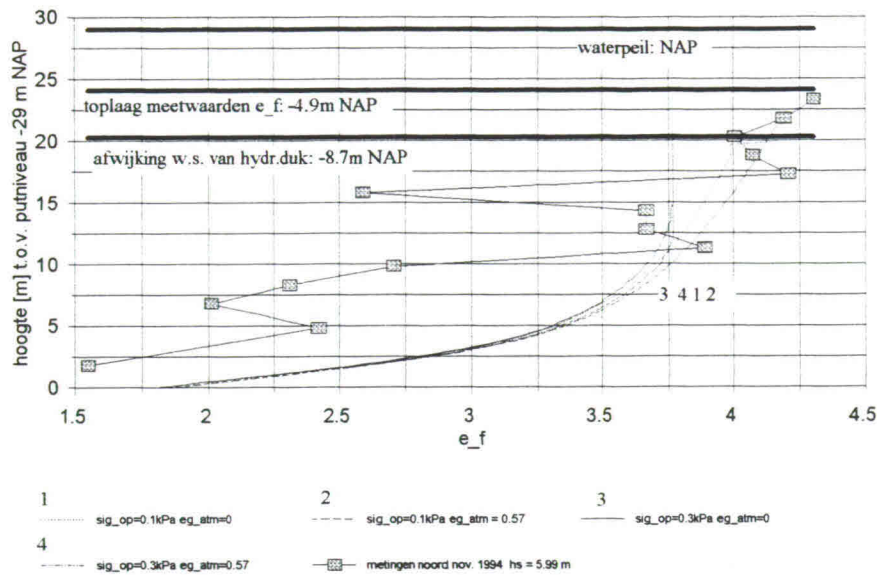
5.4.1 Variatie in vaste stof hoogte ofwel depositiesnelheid

Voor alle simulaties is parameterset VP5 toegepast (voor invoerfile zie supplement C.2). Als de slibhoogte tegen de tijd wordt uitgezet valt direct op dat in één depositieperiode de slibhoogtetoeename vrijwel lineair verloopt (afbeelding 5.7). Dit heeft te maken met het feit, dat in de depositieperiode de consolidatiegraad nog laag is. (Dus de aanname voor de bepaling van het sliboppervlak met behulp van h_{set} is redelijk.) Uit afbeelding 5.7 blijkt duidelijk, dat de simulatie met $h_s=4.10\text{m}$, die uit de vulkarakteristiek volgt, methode ① dus, de metingen van meetpaal Noord het beste volgt (dit zijn de dik getrokken lijnen in afbeelding 5.7). In de legenda van afbeelding 5.7 zijn de meetwaarden, genoemd "CATS II", afkomstig uit een publicatie (Elprama, van Tol, Greeuw en Thorborg, 1993). Het zijn gegevens afkomstig uit echolodingen, backscatter-metingen, monsternamen en poriewaterdrukken. Voor Zuid lijkt de simulatie volgens berekeningswijze ③ het beste, maar als ook het gasgehalte wordt meegenomen is de simulatie volgens de vulkarakteristiek (methode ①) beter (zie afbeelding 5.8 uit supplement C.4). Vandaar dat hier ook voor methode ① is gekozen.

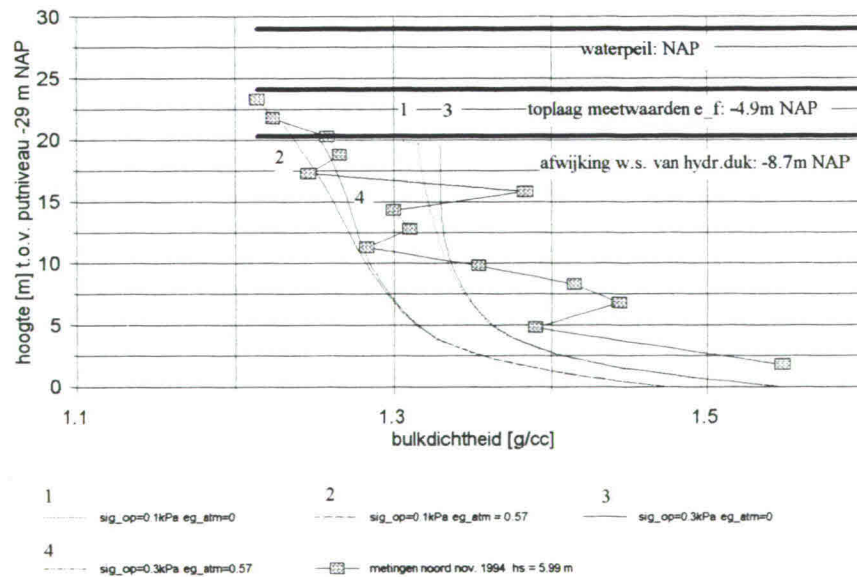


Afbeelding 5.8 Berekening met gas ($H=0$) voor Slufter meetpaal Zuid

Slufter meetpaal noord e_f 1994



Slufter meetpaal noord bulkduichtheid 1994



Afbeelding 5.9 Variatie startpunt consolidatieproces Slufter Noord (berekening met en zonder gas)

Extra depositieperioden lijken niet noodzakelijk, omdat de gesimuleerde hoogte de meetwaarden al goed volgt. Wel is van belang, dat de hoogtemetingen bij een andere dichtheid zijn verricht dan de startwaarde van de simulatie. Immers de bulkdichtheid in de toplaag van de verzadigde berekening is 1306 kg/m^3 en de dichtheid van de metingen is rond de 1200 kg/m^3 . Als de berekening met gas wordt uitgevoerd verandert de bulkdichtheid en zal dan de metingen beter benaderen (zie paragraaf 5.5).

5.4.2 Variatie startpunt consolidatieproces: e_{set}

Alle simulaties uit de vorige paragraaf zijn uitgevoerd met parameter set VP5 en $e_{\text{set}}=4.17$ ($\sigma_{\text{op}}(e_{\text{set}}) = 0.1 \text{ kPa}$). Uit de gevoeligheidsanalyse was al bekend, dat het vloeistof porie getal in de toplaag en de bulkdichtheid gevoelig zijn voor e_{set} . Daarom zijn ook berekeningen uitgevoerd met $\sigma_{\text{op}}(e_{\text{set}}) = 0.3 \text{ kPa}$ ($e_{\text{set}} = 3.77$). Hieruit volgt duidelijk, dat de berekening met $\sigma_{\text{op}}(e_{\text{set}}) = 0.3 \text{ kPa}$ de e_f -waarden in de toplaag minder goed benadert in november 1994 (zie afbeelding 5.9). Ook de dichtheid bij een lagere startwaarde van de operationele spanning geeft betere resultaten. Dus de invloed zit niet alleen in de toplaag. Opvallend is dat een groot deel van het profiel van e_f verandert bij een andere waarde voor e_{set} . Zoals verwacht (zie hoofdstuk 4 gevoeligheidsanalyse) is de invloed op de slibhoogte gering (zie supplement C.2). Ook is de invloed op de poriedrukken en totaalspanningen beperkt.

In afbeelding 5.9 staan ook berekeningen met gas, zoals beschreven in paragraaf 5.5. Daar zijn dezelfde effecten zichtbaar, als bij een verzadigde berekening.

5.4.3 Lineaire parameterset Slufter Zuid

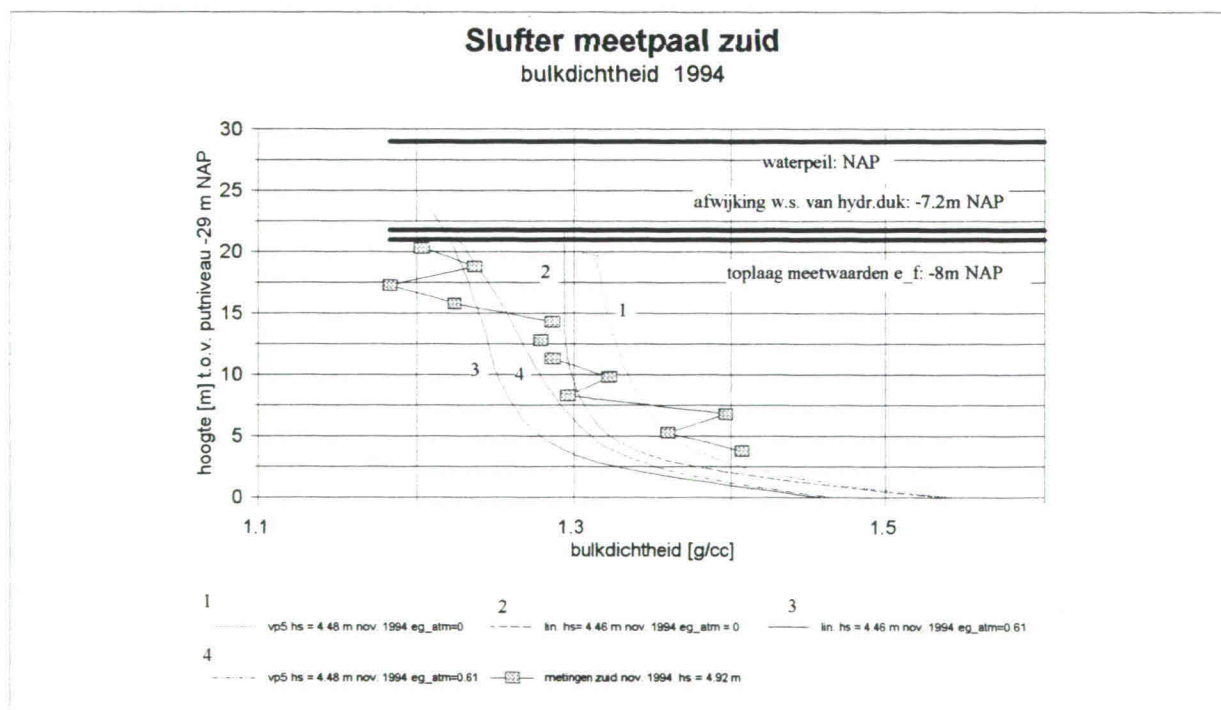
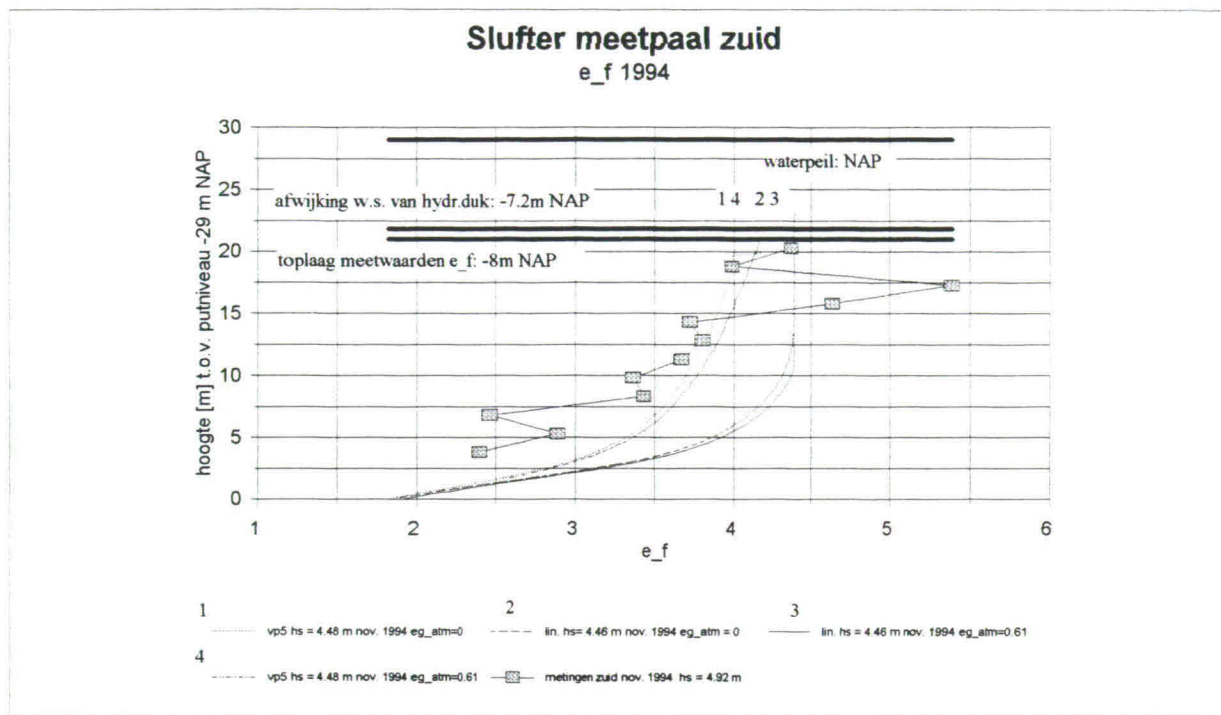
Tot nu toe is alleen gebruik gemaakt van parameterset VP5. De vraag is nu of de berekeningen m.b.v. een andere parameter set, zoals de lineaire (zie paragraaf 5.3.2) nog kunnen worden geoptimaliseerd. Voor de lineaire parameter set van Slufter Zuid (die via lineaire regressie was verkregen uit de HYDCON-data) zijn de depositiesnelheden opnieuw berekend met $e_{\text{set}} = 4.39$ ($\sigma_{\text{op}}(e_{\text{set}})=0.1 \text{ kPa}$). De depositiesnelheden blijken dan weinig af te wijken van die van parameterset VP5 voor berekeningsmethode ① (zie tabel 5.4):

$$\begin{aligned} v_{\text{dep}}^{\text{periode 1}} &= 15 \text{ m/jaar} \\ v_{\text{dep}}^{\text{periode 2}} &= 5.59 \text{ m/jaar} \\ v_{\text{dep}}^{\text{periode 3}} &= 1.97 \text{ m/jaar.} \end{aligned}$$

Dus ook de vaste stofhoogtes in 1992 ($h_s = 4.15\text{m}$) en 1994 ($h_s = 4.54\text{m}$) verschillen niet veel (zie tabel 5.5, methode ①).

De resultaten van de simulaties zijn wel erg verschillend. Dit was te verwachten omdat de doorlatendheid van deze lineaire fit veel lager is dan voor VP5 (zie afbeelding 5.4b). De verschillen zijn te zien in: de slibhoogte, de totaalspanningen, waterspanningen, de bulkdichtheid en het vloeistof porie getal (zie ook supplement C.3).

Als de berekende slibhoogten vergeleken worden, valt op dat deze van de lineaire parameter set hoger zijn dan van set VP5 (zie tabel 5.7). In de verzadigde berekening geeft de lineaire set voor enkele tijdstippen (1992 Noord en 1994 Zuid) betere resultaten dan parameter set VP5. Voor de andere tijdstippen zijn de berekende slibhoogten met set VP5 beter. Als de berekening met gas wordt uitgevoerd, zal de berekende slibhoogte hoger zijn. Het gevolg is dat de onderschatting van de slibhoogte



Afbeelding 5.10

Vergelijking parameter set VP5 en lineaire parameter set Slufter Zuid
(berekeningen met en zonder gas)

bij gebruik van parameter set VP5 minder wordt. Wat betreft de benadering van de slibhoogte is dus voor parameter set VP5 gekozen, waarbij de slibhoogte uit de waterspanningsmeting als meest betrouwbaar gemeten slibhoogte is beschouwd (zie paragraaf 5.2.1).

	Noord 1992	Noord 1994	Zuid 1992	Zuid 1994
lineaire parameter set Slufter Zuid	20.42m	21.94m	20.42m	21.94m
parameter set VP5	18.72m	19.92m	18.72m	19.92m
waarde uit waterspanningsmeting	20m	20.3m	18m	21.8m
waarde uit slibsampler	18m	24.1m	17.5m	21m

Tabel 5.7 Slibhoogte verzadigde berekening

De totaaldrukken worden door beide parameter sets slecht benaderd. Overigens zijn de totaalspanningen berekend uit metingen. In deze berekening is ook het in situ gasgehalte meegenomen (supplement C.1), terwijl de simulaties verzadigd zijn uitgevoerd. Simulaties met gas geven voor Noord 1992 en Zuid 1994 betere resultaten (zie paragraaf 5.5).

De waterspanningsmetingen zijn in 1994 nogal "springerig", zodat beide parameter sets, waarvan de waarden redelijk dicht bij elkaar liggen, het meetprofiel vrijwel even goed benaderen. In 1992 geeft de lineaire set voor meetpaal Noord het beste resultaat, maar de metingen zijn niet betrouwbaar, omdat de berekende totaalspanningen kleiner zijn dan de gemeten waterspanningen. Voor meetpaal Zuid liggen in 1992 alle gesimuleerde waterspanningen ver boven de gemeten waterspanning.

Wat betreft het c_f -profiel en het bulkdichtheidsprofiel (zie afbeelding 5.10) geeft parameterset VP5 resultaten, die duidelijk dichter bij de metingen liggen.

Zodoende is geconcludeerd, dat VP5 de optimale parameter set is. (Deze berekeningen zijn ook met gas uitgevoerd, zoals beschreven in paragraaf 5.5.)

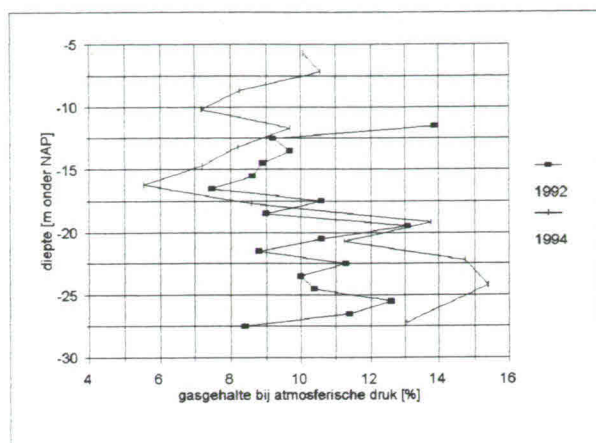
5.5 Resultaten berekening met gas

5.5.1 Gasmodus 3 zonder oplossen

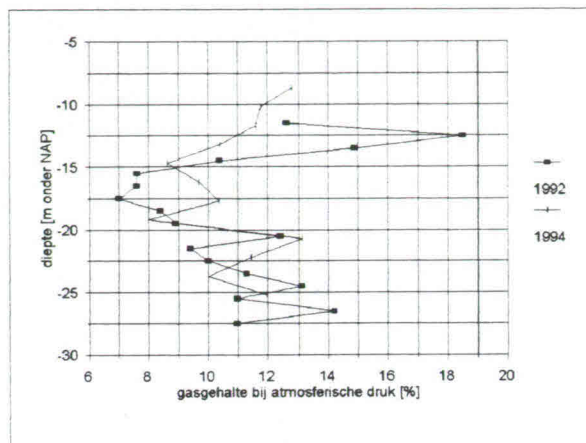
Als basis voor deze berekeningen zijn de verzadigde berekeningen met dezelfde invoer voor zowel Noord als Zuid gebruikt. Daarbij was v_{dep} berekend uit de vulkarakteristieken van de Slufter voor zowel de VP5 als de lineaire parameter set. De vaste stofhoogte is dus berekend volgens methode ① (zie paragraaf 5.3.5). Vervolgens is het gas in de simulatie geïmplementeerd. Er is gerekend met gasmodus 3, compressie zonder oplossen ($H=0$). De aanname was, dat het gas heel snel werd geproduceerd na depositie van het slib (d.w.z. binnen enkele maanden is er een significante hoeveelheid gas) en dat daarna geen productie of afname van de hoeveelheid gas optrad. D.w.z. dat de bijdragen t.g.v. biologische gasproductie en t.g.v. afvoer d.m.v. advectie en diffusie gelijk zijn verondersteld. Alleen

een constante waarde over de verticaal kon worden ingevoerd voor e_g^{atm} . Hiervoor is zowel t.p.v. meetpaal Noord als Zuid het gemiddelde over de verticaal uit de metingen genomen. Om de spreiding van deze e_g -waarden te kunnen afschatten is ook de standaarddeviatie berekend. De resultaten staan in tabel 5.8.

De gasprofielen van afbeelding 5.11 en 5.12 zijn berekend uit meetdata van GWR.



Afbeelding 5.11 Gasgehalte profiel Noord



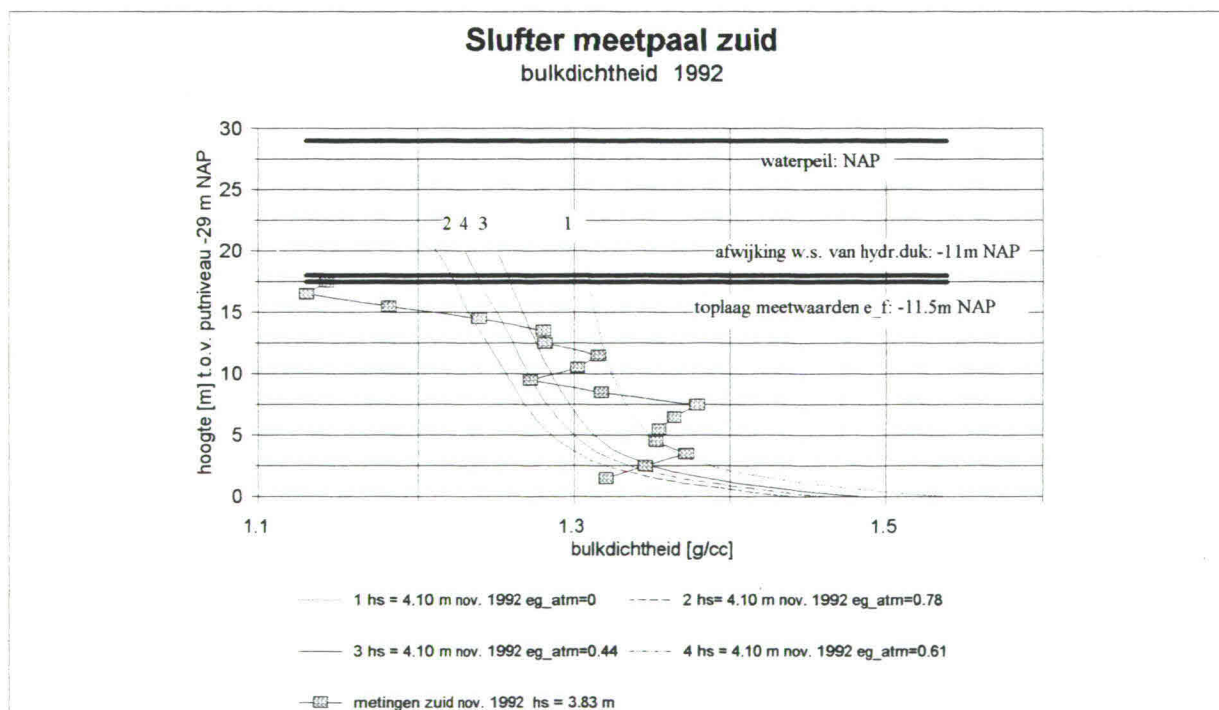
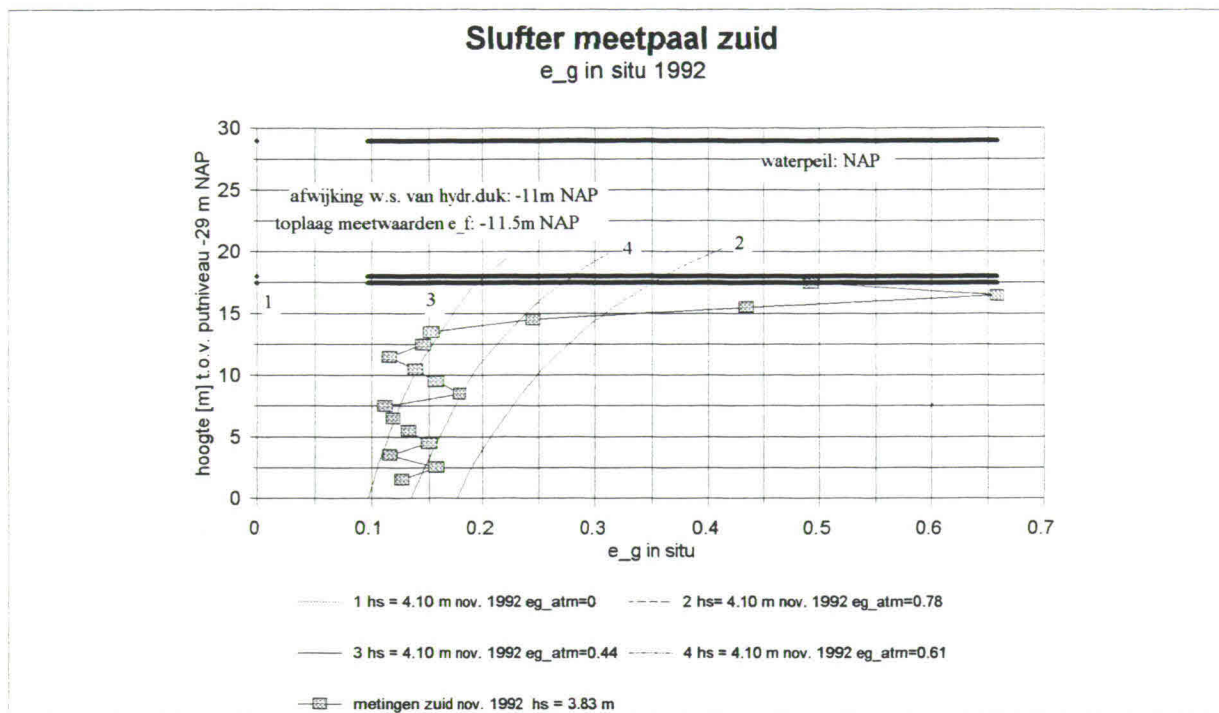
Afbeelding 5.12 Gasgehalte profiel Zuid

Noord		Zuid		
nov.1992	nov.1994	nov.1992	nov.1994	
0.57	0.47	0.61	0.57	gemiddelde
0.16	0.12	0.31	0.15	stand.dev. exclusief topplaat
		0.17		

Tabel 5.8 Gas porie getal

De standaarddeviatie voor Slufter Zuid in november 1992 is nogal hoog. In 1994 is deze waarde veel lager. Het wordt veroorzaakt door een piek in de topplaat van meetpaal zuid in 1992, d.w.z. dat het gasgehalte bij atmosferische druk 18.5% is (zie afbeelding 5.12). Daarom is een tweede waarde ($s=0.17$) afgeleid door de waarden in de topplaat tot -13.5 m NAP niet mee te nemen. In de simulaties is uitgegaan van de e_g -waarden, zoals berekend uit de metingen van november 1992. Voor deze keuze zijn verschillende redenen: ✓ in 1992 zijn voor zowel Noord als Zuid meer meetpunten beschikbaar; ✓ de monsters zijn aaneengesloten gestoken over de hoogte in 1992, terwijl in 1994 delen van het profiel niet bemonsterd zijn; ✓ in 1994 zijn de bemonsteringsafstanden niet gelijk.

De gemiddelde waarden van 1992 met en zonder standaardafwijking zijn gebruikt in de simulaties. Zodoende kon voor het gasprofiel de beste invoerwaarde worden gevonden. Verschillende criteria zijn



Afbeelding 5.13

Variatie gasgehalte in simulatie Slufter Zuid d.m.v. eg_atm en H=0

bekeken voor november 1992 en 1994:

- ✓ profiel van bulkdichtheid
- ✓ waterspanningen
- ✓ slibhoogte
- ✓ profiel van in situ gas porie getal
- ✓ profiel van vloeistof porie getal

Tabel 5.9 geeft aan in hoeverre de verschillende waarden voor e_g aan de criteria voldoen, hieruit volgt dan de optimale simulatie. De profielen zijn terug te vinden in supplement C.4 (en afbeelding 5.13).

	bulkdichtheid	e_g	waterspanning	slibhoogte
Noord 1992	$e_g^{atm} = \text{gem} + \text{st.d.}$	$e_g^{atm} = \text{gem}$	$e_g^{atm} = 0$	$e_g^{atm} = \text{gem} + \text{st.d.}$
Noord 1994	$e_g^{atm} = \text{gem} - \text{st.d.}$	$e_g^{atm} = \text{gem} - \text{st.d.}$	$e_g^{atm} = \text{gem}$	$e_g^{atm} = \text{gem} + \text{st.d.}$
Zuid 1992	$e_g^{atm} = \text{gem}$ of $e_g^{atm} = \text{gem} - \text{st.d.}$	$e_g^{atm} = \text{gem}$	$e_g^{atm} = \text{gem} + \text{st.d.}$	$e_g^{atm} = \text{gem} + \text{st.d.}$
Zuid 1994	$e_g^{atm} = \text{gem} - \text{st.d.}$	$e_g^{atm} = \text{gem}$	$e_g^{atm} = \text{gem}$ of $e_g^{atm} = \text{gem} - \text{st.d.}$	$e_g^{atm} = \text{gem} + \text{st.d.}$

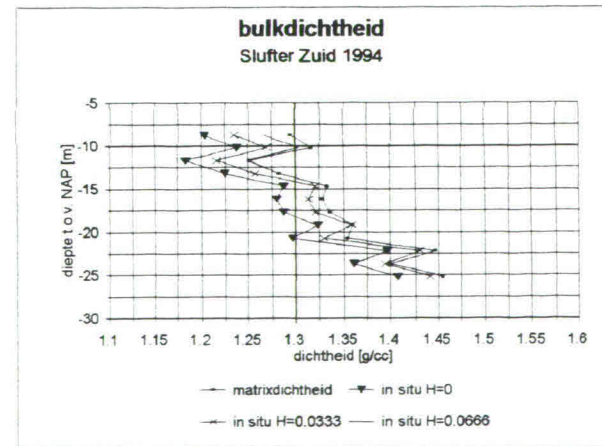
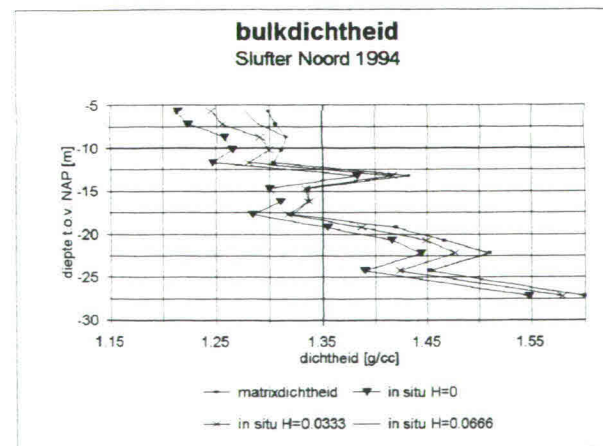
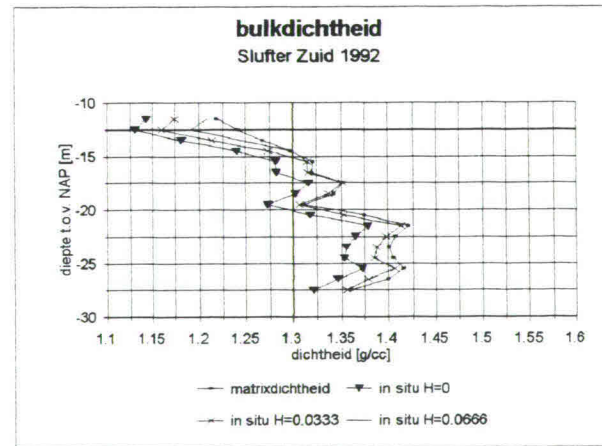
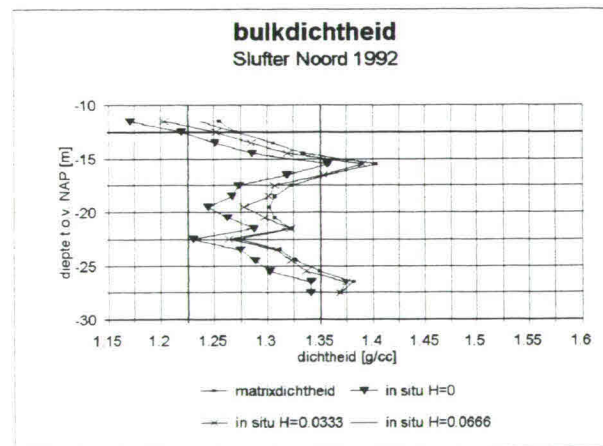
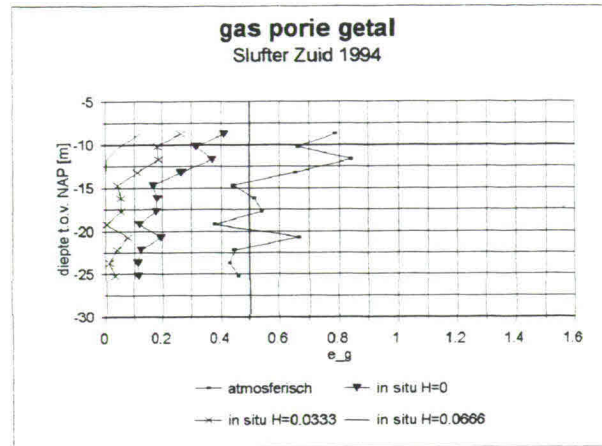
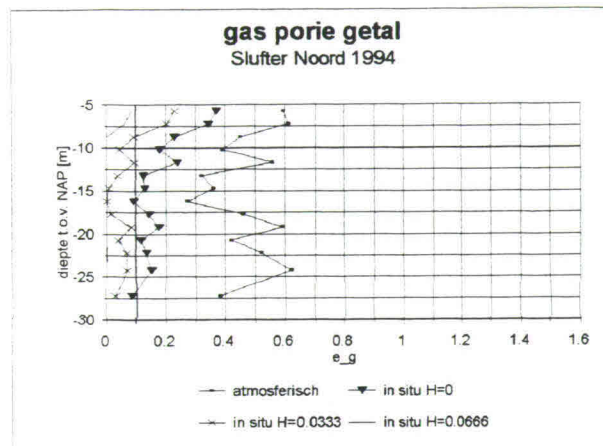
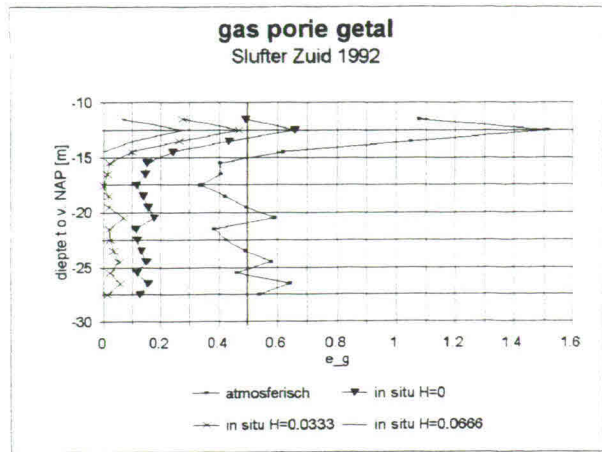
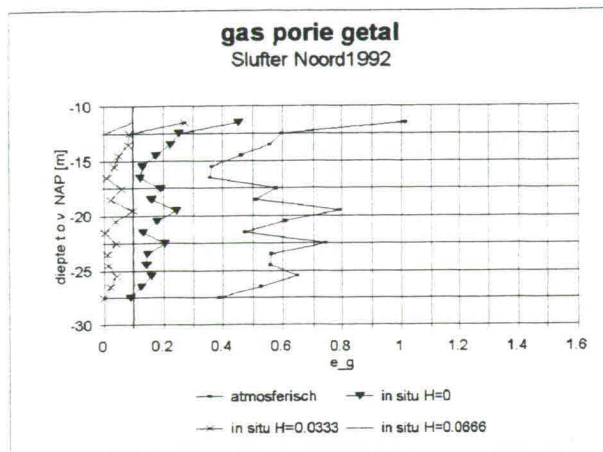
	$e_g^{atm} = \text{gem} + \text{st.d.}$	$e_g^{atm} = \text{gem.}$	$e_g^{atm} = \text{gem.} - \text{st.d.}$
Noord	0.73	0.57	0.41
Zuid	0.78	0.61	0.44

Tabel 5.9 Beste e_g^{atm} -invoerwaarde voor simulatie per meetserie

Als de bulkdichtheid en het gas porie getal het zwaarst wegen in de keuze voor de e_g^{atm} -waarde valt de keuze voor zowel Noord als Zuid op de **gemiddelde waarde** (uit november 1992 dus). De waterspanningsmetingen van Noord en Zuid 1992 komen slecht overeen met de berekeningen. Dit is niet vreemd, omdat de berekende totaalspanningen in 1992 kleiner bleken te zijn dan de gemeten waterspanningen. Dus dit is zeker deels toe te schrijven aan de meting. De invoer voor deze "optimale berekening" is in tabel 5.10 vermeld.

Als de gemeten gasprofielen vergeleken worden met de "optimale berekening" valt het volgende op:

- ✓ Deze hoge e_g - waarde in de toplaag van het slib is met name in nov. 1992 in de gasprofielen aanwezig en is voor meetpaal Zuid het grootst.
- ✓ Vooral het gasprofiel van meetpaal Zuid heeft door de hoge e_g - waarde in de toplaag een vreemde vorm gekregen: in de toplaag bevindt zich een grote piek en daaronder een gasprofiel, dat te benaderen is met een constante in situ e_g - waarde.



Afbeelding 5.14

Invloed coëfficiënt van Henry op berekende meetprofielen

parameter set	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
VP5	9.21	-2.76	0	0	-26.43	2.28	0	0
waterniveau: constant op NAP				putbodem: -29 m NAP				
	vol. gewicht vaste stof γ_s		vol. gewicht vloeistof γ_f			e_g^{atm}	H	
noord	25 kN/m ³		10.2 kN/m ³			0.57	0	
zuid	25 kN/m ³		10.2 kN/m ³			0.61	0	
depositie periode			tijd [jaren]	v_{dep} [m/j]	e_{dep}	e_{set}	e_g^{atm} noord	e_g^{atm} zuid
1	sept. 1987 - mrt. 1989		1.5	15	9.57	4.17	0.57	0.61
2	mrt. 1989 - nov. 1992		3.7	5.64	9.57	4.17	0.57	0.61
3	nov. 1992 - nov. 1994		2	2	9.57	4.17	0.57	0.61
4	nov. 1994 - nov. 1996		2	2	9.57	4.17	0.57	0.61

Tabel 5.10 Invoer "optimale berekening" gasmodus 3 zonder oplossen

5.5.2 Gasmodus 3 met oplosbaar gas

Door in de modellering gas (gasmodus 3) oplosbaar te veronderstellen wordt de praktijk, waarin gas ook oplosbaar is, beter benaderd.

Om het effect van oplossen te interpreteren zijn drie berekeningen uitgevoerd met dezelfde invoer als in de optimale simulatie van paragraaf 5.5.1: $H = 0$, $H = 0.0333$ (normale oplosbaarheid) en $H = 0.0666$ (hoge oplosbaarheid). In water is $H = 0.0333$ (Yamamoto et al., 1976) en in slib ligt H tussen een waarde van 0.0333 en 0.0666 in. Het resultaat staat in supplement C.5 en ook in afbeelding 5.15, 5.16 en 5.17.

Het effect van oplossen (en advectie) op het gasprofiel is, dat de spreiding van het gasprofiel iets kleiner wordt en in z 'n geheel naar een lager gemiddelde verschuift (dit volgt ook uit de gevoeligheidsanalyse paragraaf 4.5.6).

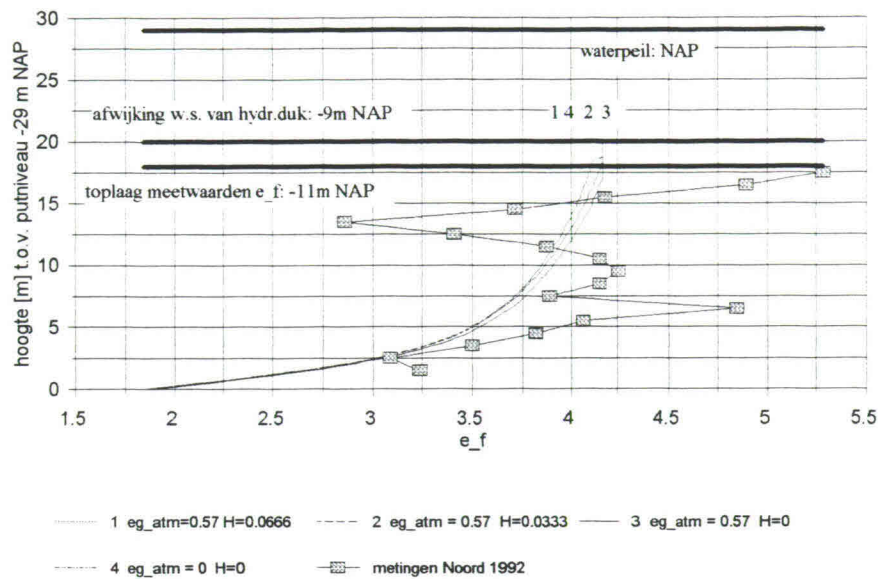
Deze simulaties kunnen niet met de eerder genoemde uit metingen berekende profielen worden vergeleken. Zo geldt voor iedere oplosbaarheid een andere waarde voor het in situ gasprofiel, de bulkdichtheid en de totaalspanning. Deze waarden worden namelijk beïnvloed door het in situ gasgehalte (zie afbeelding 5.14).

De omrekening van het atmosferisch gas porie getal naar de in situ waarde is uitgevoerd met de volgende uitdrukking ($u^{atm} = 100$ kPa):

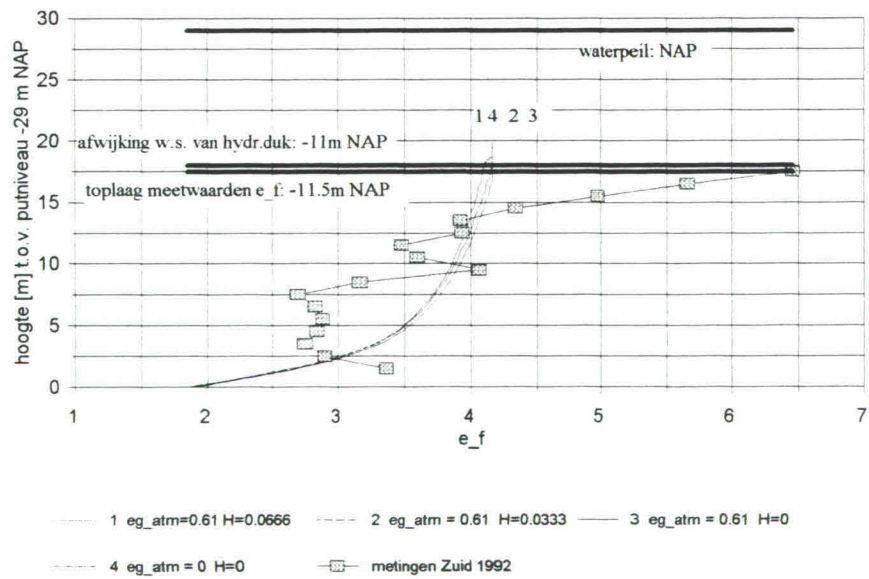
$$e_g^{atm} \cdot u^{atm} = (e_g^{insitu} + H \cdot e_f) \cdot p_g \quad e_g^{insitu} > 0 \quad p_g = \sigma + u^{atm} \quad (49)$$

Ook de berekende vaste stofhoogte (h_s) afgeleid uit de meetprofielen volgens berekeningsmethode ③ wijzigt (zie tabel 5.11).

Slufter meetpaal noord e_f 1992



Slufter meetpaal zuid e_f 1992



Afbeelding 5.15

Vloeistof porie getal uit simulaties gasmodus 3 ($H = 0, 0.0333$ en 0.0666)

methode ③		H=0	H=0.0333	H=0.0666	methode ①
Noord	1992	3.73 m	3.83 m	3.86 m	4.10 m
	1994	5.99 m	6.14 m	6.23 m	4.48 m
Zuid	1992	3.83 m	3.93 m	3.97 m	4.10 m
	1994	4.92 m	5.04 m	5.10 m	4.48 m

Tabel 5.11 Vaste stofhoogte

De oplosbaarheid van gas is zo groot, dat onderin het profiel (nov.1992) de berekening verzadigd wordt, als de gemiddelde atmosferische gas porie getallen uit de vorige paragraaf worden gebruikt voor de invoer. Echter de berekende e_g -waarden uit de metingen nemen ook zeer snel af tot nul bij oplossing.

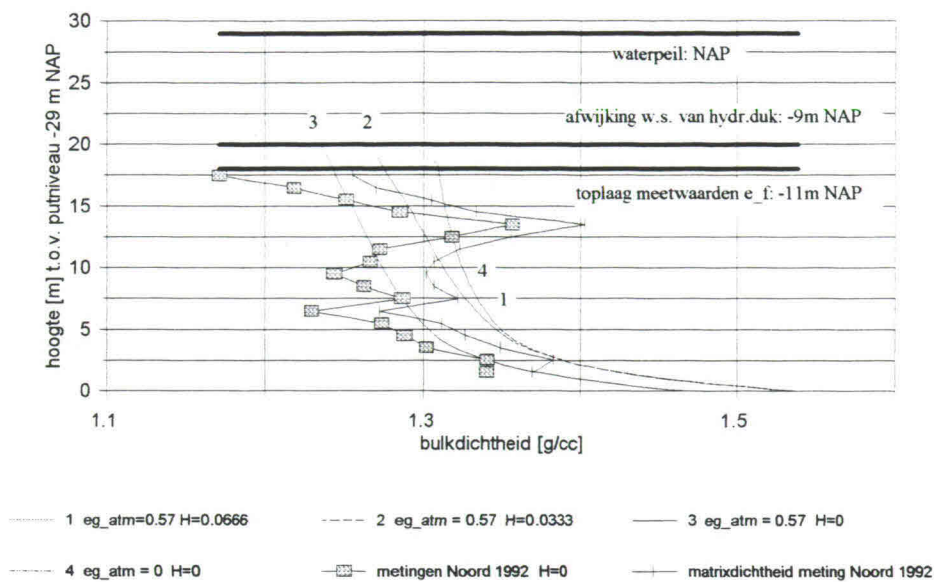
parameter set	m1	m2	m3	m4	m5	m6	m7	m8
VP5	9.21	-2.76	0	0	-26.43	2.28	0	0
waterniveau: constant op NAP				putbodem: -29 m NAP				
	vol. gewicht vaste stof γ_s		vol. gewicht vloeistof γ_f			e_g^{atm}		H
noord	25 kN/m ³		10.2 kN/m ³			0.57		0.0333
zuid	25 kN/m ³		10.2 kN/m ³			0.61		0.0333
depositie periode			tijd [jaren]	v_{dep} [m/j]	e_{dep}	e_{set}	e_g^{atm} noord	e_g^{atm} zuid
1	sept.1987 - mrt. 1989		1.5	15	9.57	4.17	0.57	0.61
2	mrt.1989 - nov. 1992		3.7	5.64	9.57	4.17	0.57	0.61
3	nov.1992 - nov. 1994		2	2	9.57	4.17	0.57	0.61
4	nov.1994 - nov. 1996		2	2	9.57	4.17	0.57	0.61

Tabel 5.12 Invoer "optimale berekening" gasmodus 3 met oplosbaar gas

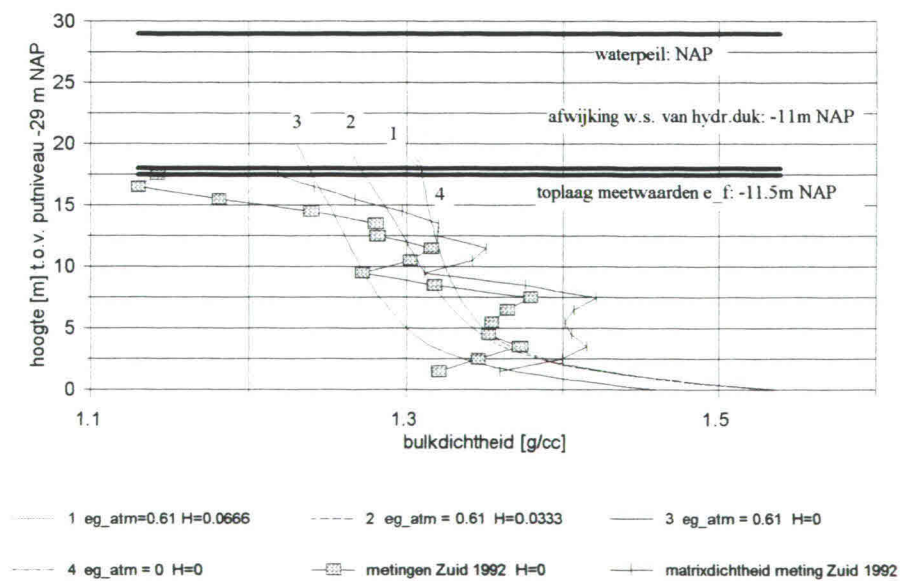
Na analyse van de resultaten, lijkt de keuze van de oplosbaarheid het resultaat weinig te beïnvloeden, omdat zowel de simulaties als de meetgegevens wijzigen. Dit is echter niet zo! In dit geval is voor normale oplosbaarheid ($H=0.0333$) gekozen in het slib, omdat dit ook bleek uit proefresultaten van Sills en Yuan (1994). Hier moet wel opgemerkt worden, dat H bijzonder moeilijk te meten is. Dus de H-waarde blijft een factor van onzekerheid.

Daar de oplosbaarheid het in situ gasgehalte beïnvloedt, verandert de waarde voor de oplosbaarheid van gas wel de slibhoogte. Het resultaat van berekeningen bij normale oplosbaarheid staat in tabel 5.13 voor november 1992 en november 1994.

Slufter meetpaal noord bulkdictheid 1992



Slufter meetpaal zuid bulkdictheid 1992



Afbeelding 5.16

Bulkdictheid uit simulaties gasmodus 3 ($H = 0, 0.0333$ en 0.0666)

	Noord 1992	Noord 1994	Zuid 1992	Zuid 1994
“optimale” simulatie	18.99m	20.24m	19.06m	20.32m
waarde uit waterspanningmeting	20m	20.3m	18m	21.8m
waarde uit slibsampler	18m	24.1m	17.5m	21m

Tabel 5.13 Slibhoogte optimale simulatie ($H=0.0333$) en meetwaarden

5.5.3 Gasprofiel van oplosbaar gas

Gasmodus 3 heeft diverse implicaties voor het gasprofiel van de simulaties en de meetwaarden zoals al bleek in de vorige paragraaf. Bij bestudering van afbeelding 5.14 valt het volgende op aan het gasprofiel:

- ✓ de piek in de toplaag neemt sterk af bij oplosbaar gas
- ✓ de spreiding wordt veel minder groot bij oplosbaar gas

Uit formule (49) blijkt, dat voor een hoge e_f -waarde de opgeloste hoeveelheid gas groter is als $H>0$. Dus voor een inhomogeen slibprofiel, waarbij de e_f -waarde een sterke spreiding heeft, zal het in situ gasgehalte op punten, waar de e_f -meetwaarde hoger is dan de waarde uit het e_f -profiel van homogeen gemengd slib, relatief meer afnemen. In de meetprofielen is te zien, dat op plaatsen waar zich een piek in het e_f -profiel bevindt, ook vaak een piek in het e_g -profiel aanwezig is. Zo lijkt een positieve correlatie te bestaan tussen de afwijking van de e_f -profielen t.o.v. homogeen slib (zoals de simulaties) en de e_g -profielen. Daarom zijn correlatiecoëfficiënten berekend (zie tabel 5.14).

	Noord 1992	Noord 1994	Zuid 1992	Zuid 1994
correlatie e_f met in situ e_g	0.66	-0.005	0.80	0.71
correlatie e_f met e_g^{atm}	0.78	-0.12	0.78	0.79

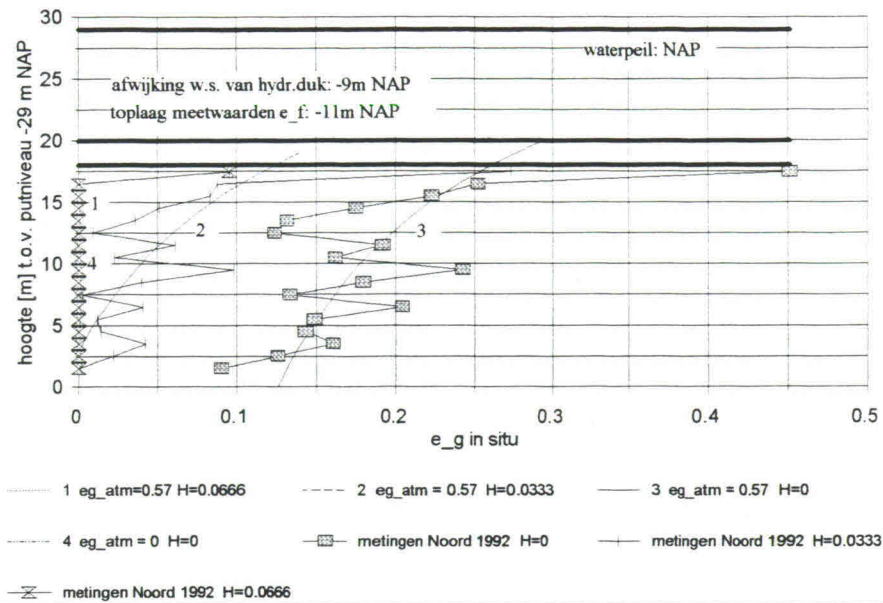
Tabel 5.14 Correlatiecoëfficiënten voor metingen van vloeistof porie getal en gas porie getal

De metingen van Noord 1994 correleren voor een deel van het profiel niet met elkaar, maar de overige metingen doen dit wel. Omdat de correlatie betreffende de oplossing van gas en de positieve correlatie van e_f -profielen en de e_g -profielen elkaar “tegenwerken”, verklaart dit ook de afname van de piek en spreiding van e_g . Afwijkingen in het e_f -profiel kunnen veroorzaakt worden door gelaagdheid van het slib (zie paragraaf 5.6), dus het profiel kan worden beschreven met classificatiegrootheden. Dit kan een interessant onderwerp zijn voor nader onderzoek, namelijk om de correlatie te zoeken tussen classificatiegrootheden en het gasprofiel.

In de optimale simulatie van paragraaf 5.5.2 speelt vanwege het feit dat gas oplosbaar is ook advectie een rol. In de simulaties wordt t.g.v. de advectie het gemiddelde gasgehalte steeds kleiner. Uit de metingen van 1992 en 1994 blijkt dit ook, maar dit kan toeval zijn (tabel 5.15). Daarom zijn meer metingen benodigd. In de praktijk vindt ook gasproductie plaats. Als dit zou worden geïmplementeerd in het model moet een gasproductiekromme worden gedefinieerd (gasmodus 4). Bij bestudering van

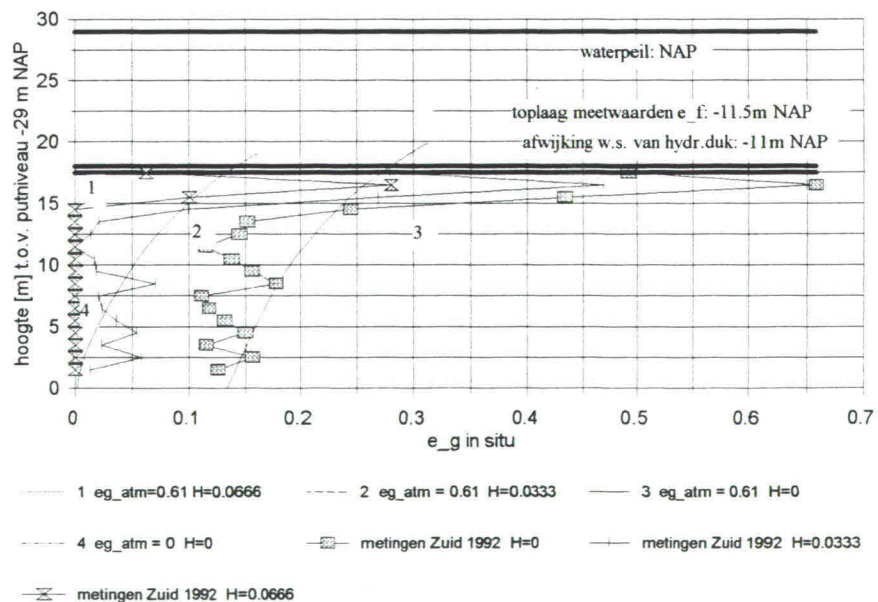
Slufter meetpaal noord

e_g in situ 1992



Slufter meetpaal zuid

e_g in situ 1992



Afbeelding 5.17

Gas porie getal uit simulaties gasmodus 3 ($H = 0, 0.0333$ en 0.0666)

de optimale simulatie blijkt dat het gesimuleerde profiel het gemeten profiel redelijk doorkruist. De simulaties van meetpaal Zuid benaderen de e_f - en bulkdichtheidsprofielen goed, maar dit is slechts op twee tijdstippen gecontroleerd. Dat is niet het geval voor meetpaal Noord. Dit komt niet alleen door de aanname van gasmodus 3 (gas is instantaan aanwezig), maar vooral ook door de gelaagdheid van het slib op deze locatie (zie volgende paragraaf).

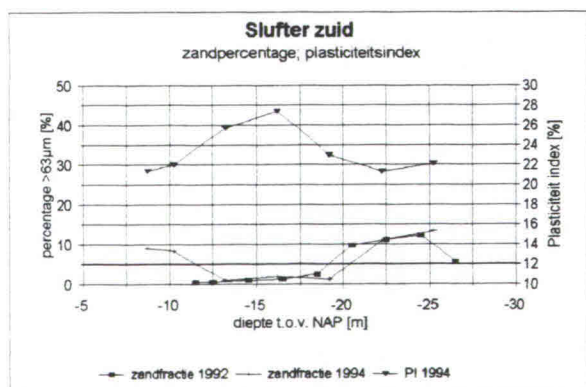
	simulatie sept.1987	simulatie nov.1992	meting nov.1992	simulatie nov.1994	meting nov.1994
Noord	0.57	0.50	0.57	0.49	0.47
Zuid	0.61	0.53	0.61	0.52	0.57

Tabel 5.15 Over slibhoogte gemiddelde e_g^{atm} - waarde

Het is wel zinvol om de invloed van gasmodus 4 te onderzoeken op het consolidatieproces, omdat het gasgehalte dan in de tijd per knoop kan worden gedefinieerd, daar de gasgehalte metingen lokaal afwijken van simulaties met gasmodus 3. Zo kan het effect op het consolidatieproces onderzocht worden van een lokale piek in het gasgehalte. Maar uit de simulaties in gasmodus 3 blijkt ook, dat zonder gasproductie goede berekeningsresultaten mogelijk zijn (voor Slufter Zuid).

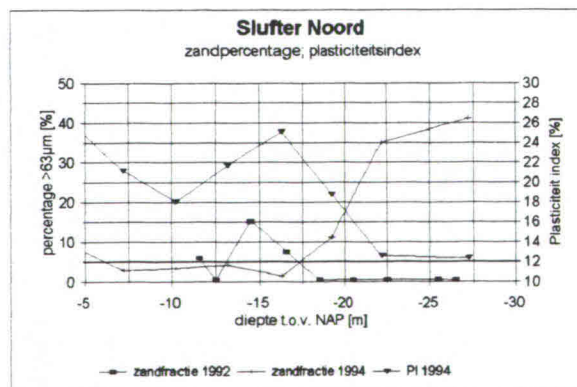
5.6 Gelaagdheid slib meetpaal Noord/Zuid

Classificatie is een goed middel om de gelaagdheid van het slib te onderzoeken. Zo blijkt een correlatie te bestaan tussen de parameterrelaties en de classificatiegrootheden ($\sigma_{op}(e_f)$ met de liquid limit (LL) en $k(e_f)$ met de slibfractie $<16\mu m$). De correlatie met andere classificatiegrootheden is minder duidelijk aanwezig. Omdat tevens een duidelijke correlatie bestaat tussen LL en de slibfractie $<16\mu m$ zijn deze correlaties consistent (Wichman, Thorborg, et al., 1995).



Afbeelding 5.18

Classificatiegrootheden
Slufter Zuid



Afbeelding 5.19

Classificatiegrootheden
Slufter Noord

Voor meetpaal Noord en Zuid in de Slufter zijn ook classificatie eigenschappen bepaald (nov.1992/ nov.1994). Helaas zijn dit niet de bovengenoemde liquid limit en de slibfractie maar de plasticiteitsindex (PI = liquid limit (LL) - plastic limit (PL)) en de zandfractie (percentage >63 μm). Vooral de slibfractie is voor de doorlatendheid van belang. Deze classificatie eigenschappen zijn dus enigzins "grof".

We kunnen deze classificatie eigenschappen ook toepassen, om afwijkingen van de meetprofielen t.o.v. de optimale simulatie (gasmodus 3 met normale oplosbaarheid $H=0.0333$) van paragraaf 5.5.2 te verklaren. Opvallend is dat de classificatie eigenschappen van meetpaal Zuid veel minder variëren dan die van meetpaal Noord, dus Zuid is meer homogeen.

Vergelijking van afbeelding 5.15, 5.16 en 5.17 met de zandgehalteprofielen verklaart niet alle afwijkingen (bepaalde afwijkende sliblagen worden niet in het profiel opgemerkt, omdat de zandfractie een "grove" classificatieeigenschap is), maar wel enkele belangrijke:

- ✓ Noord 1992: piek bulkdichtheid en e_f - profiel +10 - +15 m t.o.v. bodem
- ✓ Zuid 1992: piek bulkdichtheid en e_f - profiel +5 - +10 m t.o.v. bodem

Aan de hand van de classificatie eigenschappen kan ook bepaald worden of een model met een homogene sliblaag, zoals tot nu toe toegepast is zinvol is. Voor meetpaal Zuid zijn de resultaten van de berekeningen goed, zoals al aan de profielen te zien is. Dit wordt bevestigd door de zandfractie en de plasticiteitsindex, die over het gehele slibprofiel niet veel variëren.

De resultaten van meetpaal Noord zijn duidelijk minder goed. De heterogeniteit is een groot probleem. Het blijkt, dat de laagswijze variatie van de dichtheid groter is dan de verdichting door consolidatie (zie afbeelding 5.16). Hier zou dus een meerlagenmodel toegepast moeten worden.

Dit resultaat blijkt niet direct uit de relatieve fout (tabel 5.16) van de optimale simulatie van paragraaf 5.5.2 ($\text{rel.fout} = \sum(\text{sim.waarde} - \text{meetwaarde})/\text{meetwaarde} * 100\% / \text{aantal meetwaarden}$). Hierbij is te zien, dat meetpaal Noord een iets grotere relatieve fout heeft dan meetpaal Zuid, terwijl de berekende profielen van meetpaal Noord duidelijk minder goed overeenkomen met de meetwaarden dan van meetpaal Zuid.

	e_f 1992	e_f 1994	e_g 1992	e_g 1994	ρ_{bulk} 1992	ρ_{bulk} 1994
Noord	-4.48%	27.52%	55.71%	90.32%	1.18%	-4.27%
Zuid	4.04%	6.07%	39.37%	85.27%	-0.04%	-0.79%

Tabel 5.16 Relatieve fout "optimale berekening" $H=0.0333$

In het algemeen is ook te zien, dat het e_f - en dichtheidsprofiel in 1994 meer aansluit bij de metingen dan in 1992. Tevens is de spreiding van e_f en de bulkdichtheid in de toplagen belangrijk, omdat de operationele spanningen daar nog relatief laag zijn, maar onder in het depôt zijn de consolidatieeffecten belangrijker.

6 Conclusies en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de conclusies en aanbevelingen van het afstudeerverslag samengevat. Ze hebben betrekking op de gevoeligheidsanalyse met een vereenvoudigd scenario en een meer gedetailleerde berekening, die getoetst is aan veldmetingen van de Slufter.

6.1 Conclusies

Uit de gevoeligheidsanalyse zijn de volgende conclusies getrokken:

- Het is van belang te weten voor welk doel men een simulatie uitvoert. Zo blijkt voor een berekening van de slibhoogte een nauwkeurige schatting van de e_{set} waarde van minder belang. Voor de berekening van uitstroomdebieten moet men echter veel voorzichtiger zijn.
- Het slibtype en de parameter set zijn van groot belang voor de uitkomsten van de simulatie. Een ander slibtype geeft een significant andere simulatie bij dezelfde "startwaarde" ($\sigma_{op} e_{set}$) van het consolidatieproces.
- Om een parameter set goed te kunnen "fitten" is het belangrijk metingen te verrichten over een brede spanningsrange. Deze range verschilt per slibsoort en scenario. De bovengrens wordt bepaald door $\sigma_{op}(e_{set})$ (randvoorwaarde mits bovenrand gedraineerd is). De onderrand wordt bepaald door het scenario.
- Een standaardwaarde in de simulaties voor de "start" van het consolidatieproces ligt tussen de 0.1 en 0.5 kPa (in operationele spanningen uitgedrukt) afhankelijk van de slibsoort. De stabiliteit van de berekening is hierbij het belangrijkste criterium. T.g.v. van dit criterium ligt voor SS en KM de $\sigma_{op}(e_{set})$ -waarde op 0.1 kPa en voor K16 op 0.3 kPa.
- Gas blijkt in slib toch een factor van betekenis te vormen bij simulaties voor slib met grotere percentages gas. Een "standaard" gasfactor gebruiken bij een verzadigde berekening voor de bepaling van de slibhoogte is dan niet voldoende. Per slibtype is de invloed van het gas anders op het consolidatieproces. Zo blijkt een correlatie aanwezig te zijn tussen de relatieve slibhoogte toename door het gas en de slibfractie $< 16\mu m$.

De toetsing van de berekeningen aan de veldmetingen van de Slufter gaf de volgende conclusies:

- Een éénlaags model geeft een goede weergave van het consolidatieproces van redelijk homogeen slib (zoals bij meetpaal Slufter Zuid), maar geen goede profielen voor heterogeen slib (zoals Slufter Noord).
- Het blijkt mogelijk te zijn de depositiesnelheden via de vulkromme te berekenen en zo één model

te maken voor de gehele Slufter. De Slufter wordt namelijk zo gelijkmatig mogelijk gevuld. Alleen de eigenschappen van het slib kunnen ter plaatse verschillen (eventueel gelaagdheid zoals bij meetpaal Noord). Dit maakt het mogelijk met een parameter set afgeleid van een mengmonster een redelijke ontwerpberekening te maken voor een depôt.

- Gasmodus 3 (compressie en oplossen van gas met advectie) geeft voor de metingen in 1992 en 1994 redelijke resultaten voor de benadering van het in situ gasgehalte en het gesimuleerde consolidatieproces mits het slib niet sterk heterogeen is.

Algemene conclusies:

- Een één-dimensionaal consolidatiemodel is nuttig voor monitoringsprogramma's. Ondanks de vereenvoudigingen t.o.v. de werkelijkheid zijn de resultaten voor redelijk homogeen slib bruikbaar.
- Het effect van de slibsoort op debieten en kentallen is belangrijker dan het effect van gas op het consolidatieproces mits het gemiddeld gasgehalte laag is ($e_g^{atm} < 0.5$). Dit geldt ook voor de slibhoogte mits deze verhoogd wordt met een volumevergrotingsfactor voor gas. Dit betekent, dat voor gelaagd slib met weinig gas een verzadigd meerlagenmodel betere resultaten zal geven dan een enkellaagsmodel, waarin gas is geïmplementeerd.

6.2 Aanbevelingen

De gevoeligheidsanalyse leverde de volgende aanbevelingen op:

- Uit de simulaties is gebleken, dat vooral het lage spanningsgebied van de parameter relaties van belang is voor het consolidatieproces. Omdat in dit gebied slechts één meting beschikbaar was (een kolomproef) is bestaat er onzekerheid over de parameter sets. In dit gebied zouden nog meer metingen gedaan moeten worden, om betere parameter sets te kunnen samenstellen.

De toetsing van het éénlaags model aan de veldmetingen van de Slufter liet zien, dat ondanks de goede resultaten voor meetpaal Slufter Zuid het model nog te verbeteren is:

- Daar het model voor de Slufter slechts getoetst is aan veldmetingen van november 1992 en november 1994 is het noodzakelijk om ook meer recente metingen te betrekken in de toetsing.
- De berekende profielen van meetpaal Noord wijken veel af van de veldmetingen, omdat een éénlaags model is gebruikt. Om dit beter te modelleren is een meerlaags model noodzakelijk. Daarvoor is het noodzakelijk de classificatieeigenschappen per laag te "koppelen" aan een materiaalparameter set voor die specifieke laag.
- Daar er een correlatie lijkt te bestaan tussen afwijkende e_r - waarden en het gasprofiel, is het nuttig te onderzoeken of er een verband bestaat tussen classificatie eigenschappen (de gelaagdheid van het slib) en het gasgehalte. Tevens moet hierbij de gasproductie worden betrokken.

- De invloed van een gasproductiekromme (gasmodus 4) op het consolidatieproces is een interessant onderwerp voor toekomstig onderzoek. Daarvoor is het nodig een gasproductiekromme te implementeren in het computermodel.
- De gasgehalten worden met compressie- /decompressieproeven bepaald. Daarbij is het niet bekend hoeveel gas er oplost. Dit heeft invloed op het gemeten atmosferische gasgehalte. Bovendien is vanwege de onbekende coëfficiënt van Henry voor slib het in situ gasgehalte niet goed te bepalen. Dit heeft invloed op het computermodel. De oplosbaarheid zou dus beter bepaald moeten worden en zal tussen 0.0333 (water) en 0.0666 in liggen.
- Omdat de waterspanningsmetingen in de Slufter enkele weken later binnen een straal van 10 meter zijn uitgevoerd dan de monsternames met de slibsamplers zijn er afwijkingen in de meetgegevens, zoals de bepaling van het slibniveau. Door het aanbrengen van een waterspanningsmeter op de slibsamplers kunnen de metingen beter geïnterpreteerd worden.

Literatuurlijst

- Barends, F.B.J. (1992) Theory of consolidation, collegedictaat b26 TUD.
- Blommaart, P.L.J., B.B.W. Thorborg, Evaluatie van de modellering van consolidatie van baggerspecie aan de hand van veldmetingen (concept juni 1996), Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Delft.
- Deibel, I.K., J.W. Zwakhals, A.Th.P. Opstal (1996) Nine years experience in filling a large disposal site with dredged material. Characterisation and Treatment of clean-up sludge from dredging, sewage sludge, drinking water sludge and comparable industrial process sludge, Cats III Congress, Oostende.
- Elprama, R., A.F. van Tol, G. Greeuw, B.B. Thorborg (1993) Validation of consolidation models for sludge disposal sites. Characterisation and Treatment of Contaminated Dredged Material, Cats II congress, Antwerpen, 21-26
- van Essen, H.M., G. Greeuw, B. Wichman (1995), Combination of laboratory tests to determine consolidation parameter functions for sludge. Compression and Consolidation of Clayey Soils, Balkema Rotterdam, 593-596.
- Gibson, R.E., R.L. Schiffman en K.W. Cargill (1981) Theory of one dimensional consolidation of saturated clays. II. Finite nonlinear consolidation of thick homogeneous layers. Can. Geotech. J. 18, 280-293.
- Gibson, R.E., G.L. England, M.J.L. Hussey (1967) The theory of one dimensional consolidation of saturated clays. Géotechnique 17, 261-273.
- Greeuw, G. en A. van Ommen (1992) FSConbag, a computer program for simulation of large strain consolidation, handleiding, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde en Grondmechanica Delft.
- Greeuw, G. en J.K. van Deen (1993) Simulatie van consolidatie in het Slufterdepot met FSCON-BAG. Rapport nr. CO-343470/6, Grondmechanica Delft.
- Greeuw, G. (1994) Evaluatie Slufteronderzoek 1992-1993, Grondmechanica Delft.
- Kevelam, D.J. (1995) Onzekerheid inhoudsberekening vergt marge van 25%, Land + Water nummer 9/ 1995, 30-32.
- Martens, Ch.S. and Val Klump (1980) Biochemical cycling in an organic rich coastal marine basin - I. Methane sediment-water exchange processes. Geochimica et Cosmochimica Acta Vol. 44, 471-490.
- McDermott, I.R. (1996) In Situ shear stiffness of the Slufter contaminated dredge spoils. Contract report for the Rijkswaterstaat, Netherlands, C-CORE Publication number 96-C2.
- Ommen, A. van (1989) Documentatie rekenprogramma FSConbag, Grondmechanica Delft.
- Opstal, A.T., A.F. van Tol (1993) A new sludge-sampling system. Characterisation and Treatment of Contaminated Dredged Material, Cats II congress, Antwerpen, 15-19

- Opstal, A.Th.P.J. (1995) Veldmetingen in het Slufterdepôt 1994. Factual Report GWRIGM, nr.94-010/A
- Sills, G.C., S.J. Wheeler, S.D. Thomas en T.N. Gardner (1991) Behaviour of offshore soils containing gas bubbles. *Géotechnique* 41, nr.2, 227-241.
- Sills, G.C. (1994) Rapport onder contract DWW-853, nr.3100_1899, in opdracht van Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde, Nederland.
- Sills, G.C. and F. Yuan (1994), Consolidation behaviour of gassy soils, Oxford University. Rapport onder contractnummer DWW-783, in opdracht van het Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- Validatie consolidatiemodel voor baggerspecie aan de hand van veldmetingen. Fase 1: Inventarisatie van gegevens, april 1993. Rapport nr. 92-165/A, Gemeentewerken Rotterdam.
- Veldmetingen Slufter. Noordpaal oktober 1995. Rapport nr. 95-153/A, Gemeentewerken Rotterdam.
- Vergelijking procedures HYDCON-interpretatie, november 1993. Rapport nr. CO-336630/15, Grondmechanica Delft.
- Wichman, B. en B.B.W. Thorborg, G. Greeuw en H. van Essen, A. Opstal (1995) Determination of consolidation parameters for sludge with different characteristics. *Compression and Consolidation of Clayey Soils*, Balkema Rotterdam, 597-601.
- Wichman, B. (1996a) Treatment of finite strain theory for gassy sludge and numerical implementation, Geotechnical Report nr. 411, TUD Faculty of Civil Engineering.
- Wichman, B. (1996b) Finite strain theory for gassy sludge: experimental verification, Geotechnical Report nr. 412, TUD Faculty of Civil Engineering.
- Yamamoto, S., J.B. Alcantas and T.E. Crozier (1976) Solubility of Methane in distilled water and seawater. *J. of chemical and engineering data*, vol. 21, no. 1, 78-80

Symbolenlijst

(a,t)	Lagrange coördinatenstelsel	[Gibson et al., 1967]
Δ_{gas}	verliesterm, t.g.v. uitstroming opgelost gas (advectie)	
Δz	knoopafstand	
e	vloeistof poriegetal (verzadigde slibmatrix)	
e_0	vloeistof poriegetal (verzadigde slibmatrixmatrix) op $t=0$	
e_{dep}	vloeistof poriegetal bij depositie	
e_f	vloeistof porie getal	$e_f = S_r n / (1-n)$
e_g	gas porie getal	$e_g = (1-S_r) n / (1-n)$
e_g^{atm}	gas porie getal bij atmosferische druk	
e_g^{max}	maximum gas porie getal	
e_{set}	maximum vloeistof poriegetal, dat het begin van het consolidatieproces bepaalt	
$\bar{e}_g$	over de slibhoogte gemiddeld in situ gas porie getal	$\bar{e}_g = h_g / h_s$
g	zwaartekrachtsversnelling	
γ_f	specifiek gewicht vloeistof	
γ_s	specifiek gewicht vaste stof	
F_c	consolidatiefactor	als $e_{\text{dep}} = e_{\text{set}}$: $F_c = h_{t=\text{tdep}} / h_{\text{dep}} = h_{t=\text{tdep}} / h_{\text{set}}$ als $e_{\text{dep}} \neq e_{\text{set}}$: $F_c = h_{t=\text{tdep}} / h_{\text{set}}$
$F_{c_{\text{sat}}}$	“verzadigde” consolidatiefactor	
h_{dep}	depositiehoogte	$h_{\text{dep}} = h_s * (1+e_{\text{dep}})$
h_g	gashoogte	
h_s	hoogte vaste stof	$h_s = (v_{\text{dep}} \cdot t_{\text{dep}}) / (1+e_{\text{dep}})$
h_{tot}	totale slibhoogte	
h^{water}	hoogte vrije waterlaag op slibniveau t.o.v. depôtbodem	
H	coëfficiënt van Henry	
bovenschrift j	nummer van de tijdstap	
k	doorlatendheid	
ξ	ruimtelijke (Euler) coördinaat	[geotechnisch rapport nr. 411]
ξ_{max}	hoogte van de sliblaag	
(ξ,t)	convectief coördinatenstelsel	[Gibson et al., 1967]
M_s	gewicht vaste stof	
M_w	gewicht water	
n	porositeit verzadigde matrix	$n = e / (1+e)$
onderschrift n	knoopnummer	
p	porie water druk	
p_g	gasdruk (absoluut)	

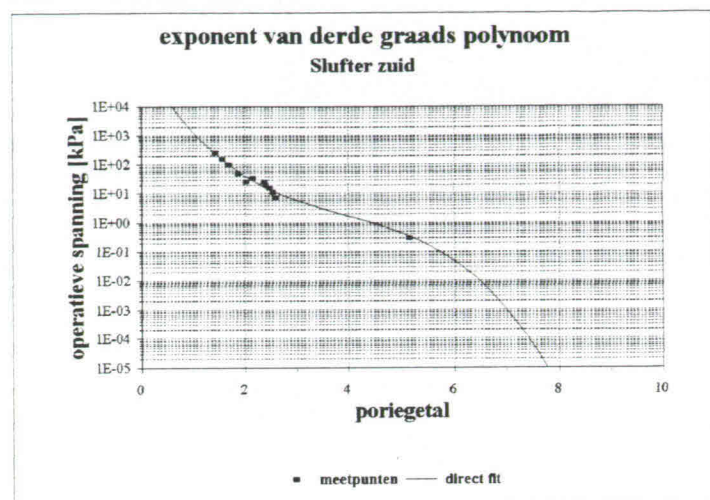
$p_{\text{hydrostat}}$	hydrostatische druk	
q	specifiek debiet van vloeistof	
r	discretisatie van RHSGAS	
R	gasconstante	
RHSGAS	niet hom. rechterdeel van de finite strain differentiaalvgl. voor gashoudend slib	
ρ_{bulk}	bulkdichtheid	$\rho_{\text{nat}} = (\rho_s + \rho_f \cdot e_f) / (1 + e_f + e_g)$
ρ_{nat}	matrixdichtheid of dichtheid van verzadigde slibmatrix	$\rho_{\text{nat}} = (\rho_s + \rho_f \cdot e_f) / (1 + e_f)$
ρ_s	dichtheid vaste stof	
ρ_w	dichtheid poriewater	
S_r	verzadigingsgraad	
σ	totaalspanning	
σ'	effecitieve spanning	
σ_{op}	operatieve spanning	
t_{dep}	tijdstip waarop depositieperiode in depôt eindigt	
t_{eind}	tijdstip waarop de consolidatie in de simulatie "eindigt"	
t_n^{ini}	tijdstip waarop de depositie van knoop n plaats vindt	
t_0	referentie tijd	
t^{prod}	gasproductie periode	
T	absolute temperatuur	
τ	grootte van de tijdstap	
u	excess porie water druk	
u^{atm}	atmosferische druk	
$U(t)$	consolidatiegraad	
$vg\%$	gasvolume percentage/gasgehalte	$vg\% = h_g/h_{\text{tot}} \cdot 100\%$
V_g	totaal volume van de grond	
V_p	volume van de poriën	
V_s	volume van de vaste stof	
V_w	volume van het poriewater	
$w\%$	watergehalte	$w\% = M_w/M_s = (\rho_w \cdot V_w) / (\rho_s \cdot V_s) = \rho_w/\rho_s \cdot e_f$
z	materiaal (Lagrange) coördinaat	
z_{max}	totale hoogte vaste stof	
(z,t)	gereduceerd coördinatenstelsel	[Gibson et al., 1967]

Bijlagen

- A Parameterrelaties
 - A.1 DIRECT-methode
 - A.2 Lineaire fit
 - B Instabiliteit simulatieprogramma
 - C Voorbeeldberekening sliblaag zonder consolidatie
 - D Vane-proeven Slufter meetpaal Noord oktober 1995
-

A Parameterrelaties

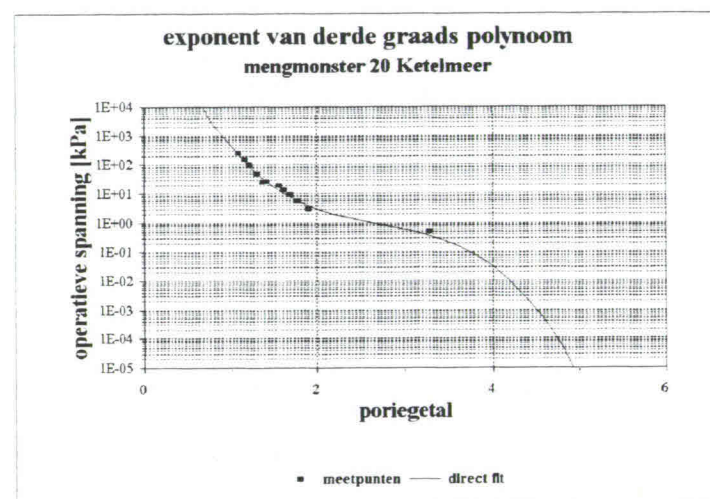
A.1 Directmethode



Slufter zuid

materiaalconstanten [SS]:

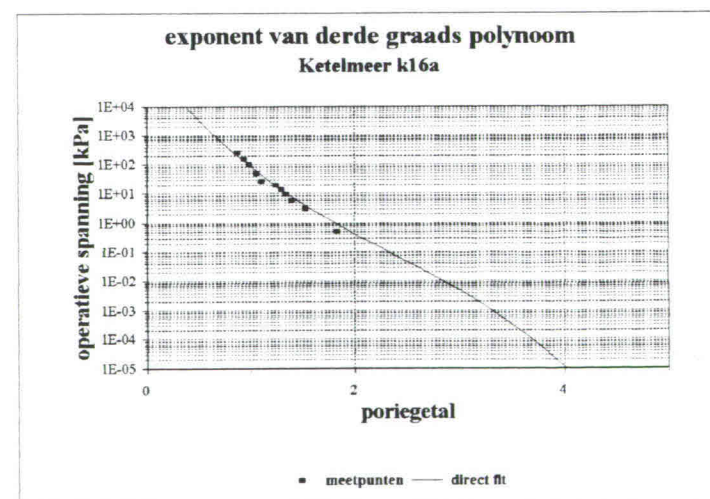
$$\begin{aligned} m_1 &= 12.93 \\ m_2 &= -7.15 \\ m_3 &= 1.54 \\ m_4 &= -0.132 \end{aligned}$$



mengmonster 20 Ketelmeer

materiaalconstanten [KM]:

$$\begin{aligned} m_1 &= 19 \\ m_2 &= -18.5 \\ m_3 &= 6.33 \\ m_4 &= -0.777 \end{aligned}$$

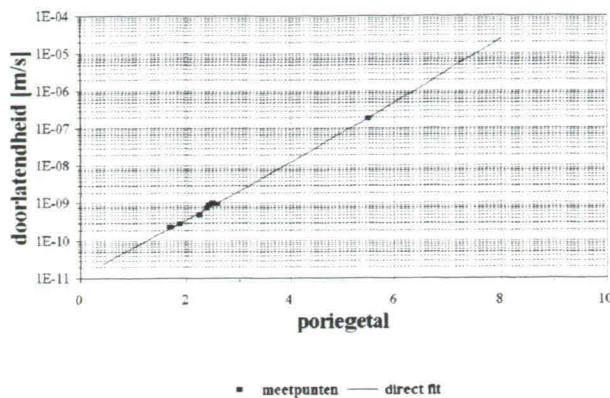


Ketelmeer K16a

materiaalconstanten [K16]:

$$\begin{aligned} m_1 &= 12.9 \\ m_2 &= -10.8 \\ m_3 &= 2.74 \\ m_4 &= -0.39 \end{aligned}$$

exponent van derde graads polynoom
Slufter zuid

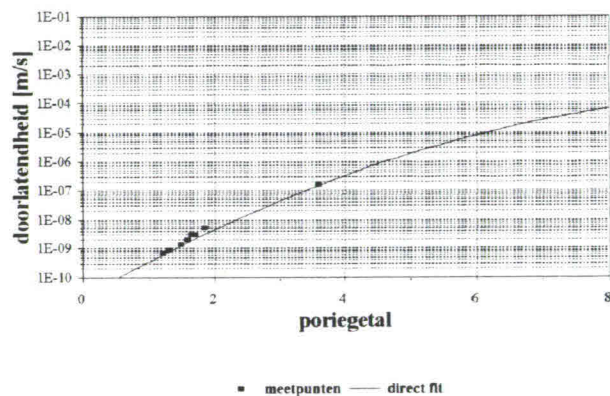


Slufter zuid

materiaalconstanten [SS]:

$$\begin{aligned} m_5 &= 25.1 \\ m_6 &= 1.64 \\ m_7 &= 0.021 \\ m_8 &= 0 \end{aligned}$$

exponent van derde graads polynoom
mengmonster 20 Ketelmeer

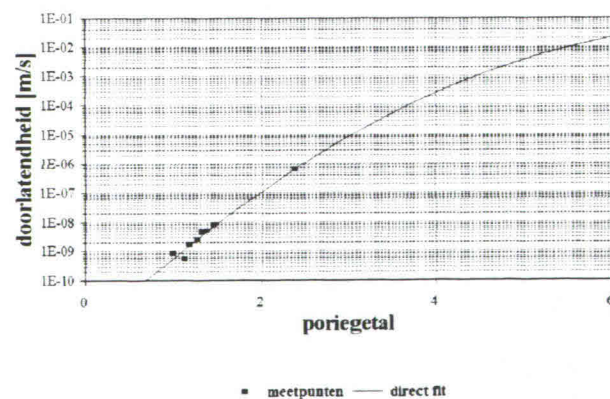


mengmonster 20 Ketelmeer

materiaalconstanten [KM]:

$$\begin{aligned} m_5 &= -24.6 \\ m_6 &= 2.95 \\ m_7 &= -0.135 \\ m_8 &= 0 \end{aligned}$$

exponent van derde graads polynoom
Ketelmeer k16a

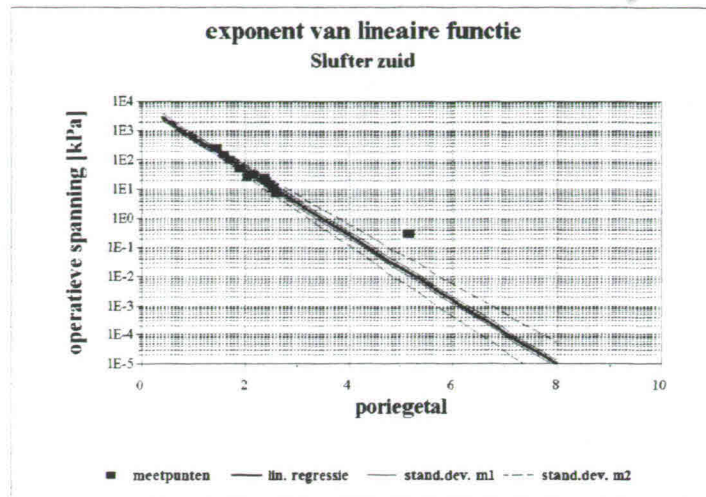


Ketelmeer K16a

materiaalconstanten [K16]:

$$\begin{aligned} m_5 &= -27.3 \\ m_6 &= 6.48 \\ m_7 &= -0.43 \\ m_8 &= 0 \end{aligned}$$

A.2 Lineaire fit



Slufter zuid

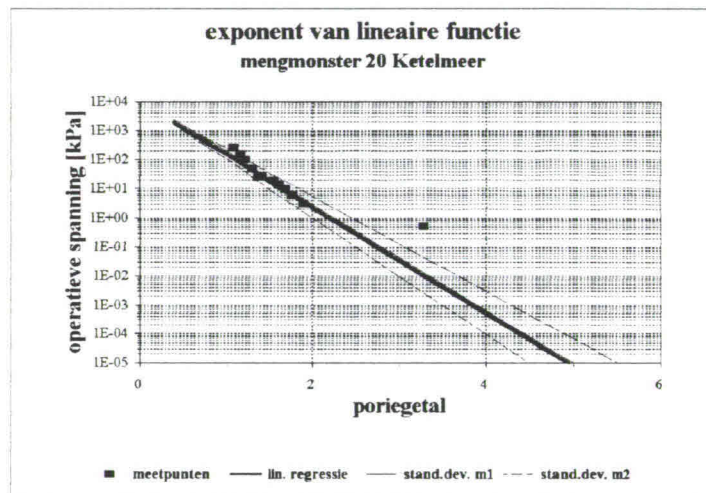
materiaalconstanten [SS]:

$$m_1 = 8.97$$

$$\text{stand.dev. } m_1 = 0.285$$

$$m_2 = -2.57$$

$$\text{stand.dev. } m_2 = 0.215$$



mengmonster 20 Ketelmeer

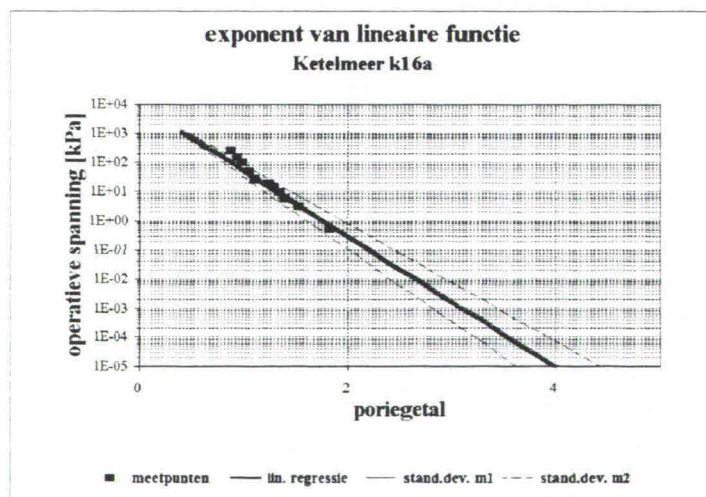
materiaalconstanten [KM]:

$$m_1 = 9.25$$

$$\text{stand.dev. } m_1 = 0.196$$

$$m_2 = -4.19$$

$$\text{stand.dev. } m_2 = 0.427$$



Ketelmeer K16a

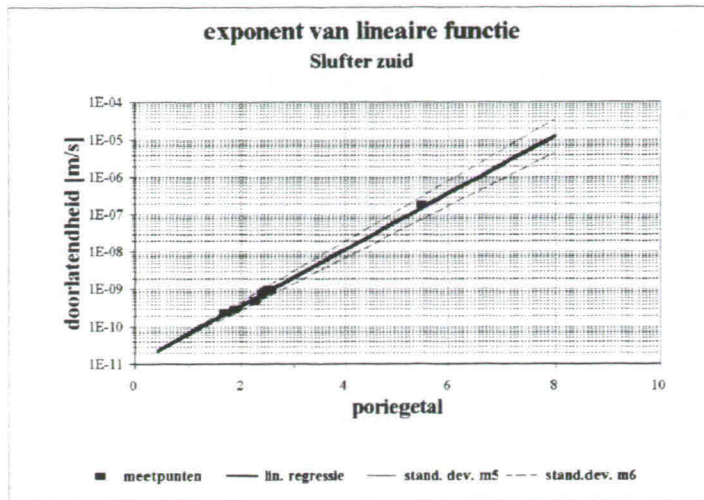
materiaalconstanten [K16]:

$$m_1 = 9.16$$

$$\text{stand.dev. } m_1 = 0.189$$

$$m_2 = -5.19$$

$$\text{stand.dev. } m_2 = 0.510$$



Slufter zuid

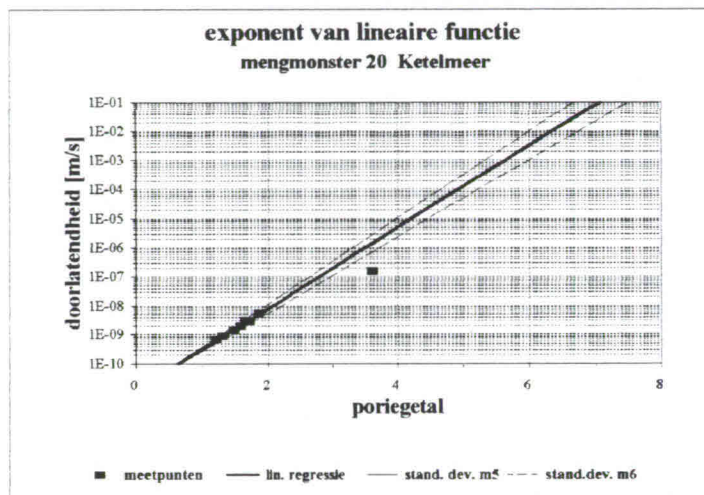
materiaalconstanten [SS]:

$$m_5 = -25.21$$

$$\text{stand.dev.} m_5 = 0.107$$

$$m_6 = 1.74$$

$$\text{stand.dev.} m_6 = 0.127$$



mengmonster 20 Ketelmeer

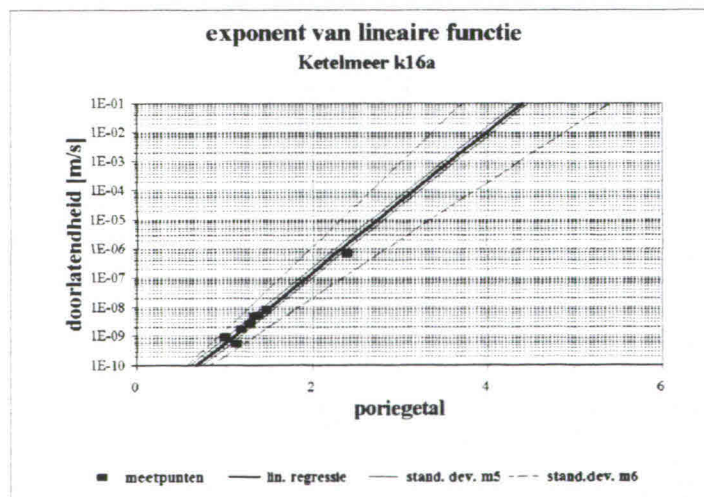
materiaalconstanten [KM]:

$$m_5 = -25.11$$

$$\text{stand.dev.} m_5 = 0.103$$

$$m_6 = 3.23$$

$$\text{stand.dev.} m_6 = 0.187$$



Ketelmeer K16a

materiaalconstanten [K16]:

$$m_5 = -26.78$$

$$\text{stand.dev.} m_5 = 0.405$$

$$m_6 = 5.54$$

$$\text{stand.dev.} m_6 = 1.011$$

B Instabiliteit simulatieprogramma

Voor de variatie van e_g^{atm} voor parameterset SS, KM en K16 moest rekening worden gehouden met instabiliteitsverschijnselen zowel aan het begin van de simulatie, die een numerieke achtergrond hebben, als instabiliteit t.g.v. opbreken, wat fysisch te verklaren is.

Deze simulaties zijn uitgevoerd met kennis van eerdere simulaties, waarbij $\sigma_{op}(e_{set})$ werd gevarieerd.

Dit is ook van invloed op de stabiliteit van de berekening. De volgende waarden zijn gekozen:

✓ Slufter zuid (SS):	$e_{set}=5.22$	$\sigma_{op}(e_{set})=0.3\text{kPa}$
✓ mengmonster 20 Ketelmeer (KM):	$e_{set}=3.4$	$\sigma_{op}(e_{set})=0.3\text{kPa}$
✓ Ketelmeer K16a (K16):	$e_{set}=2.08$	$\sigma_{op}(e_{set})=0.3\text{kPa}$

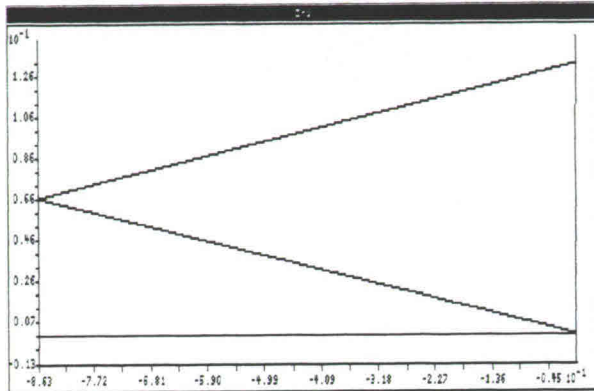
instabiliteit begin simulatie

SS en vooral K16 geven voor lage e_g^{atm} waarden in de eerste stappen van de simulatie onverklaarbare uitvoer op het scherm. Zo zijn de excess poriedrukken negatief. Vooral bij een lage skipout factor van het programma (in dit geval 2) zijn deze effecten te zien. Hoe lager de e_g^{atm} waarde hoe langer de excess poriedrukken negatieve waarden vertonen (oftewel in meer tijdstappen). Omdat voor $e_g^{atm}=0$ de berekening in sommige gevallen zelfs instabiel werd, is gerekend met een oudere versie van "FSCONGAS", die in het vervolg "FSZWEL" wordt genoemd. De zwel is in de nieuwere versies uitgezet, omdat het zwellen van slib niet in de HYDCON-procedure wordt beschouwd. Zwel kan optreden t.g.v. een gradiënt in e_g (zie paragraaf 2.5) of door ontlasting van slib (zie paragraaf 4.1.3). In deze oudere versie van "FSCONGAS" is de zwel niet uitgeschakeld, daarom is hier alleen verzadigd en zonder ontlasting mee gerekend (dus: zonder hydraulische gradiënt, omdat het in- en extern waterpeil gelijk zijn en het slib zich in de onderwaterfase bevindt, waardoor het binnenwaterpeil niet

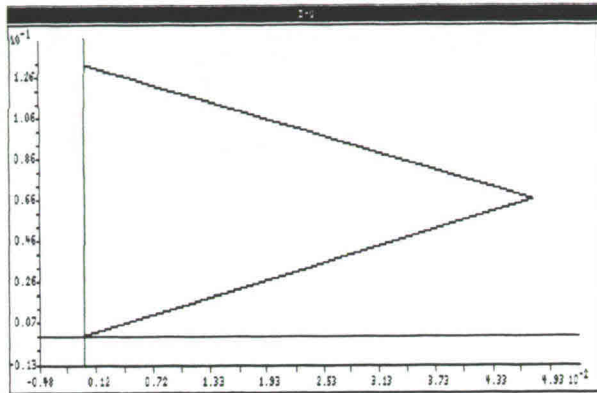
aantal lagen:	1			
aantal perioden:	2			
depositietijd [jaren]:	0	10		
bodemrandvoorwaarde:	d	[gedraineerd]		
bovenrandvoorwaarde:	a	[depositie]		
e_{dep} ; v_{dep} ; e_{set}	2.33	2	2.08	
deeltijdstapfactor depositietijd:	4			
consolidatietijd [jaren]:	10	60		
bodemrandvoorwaarde:	d	[gedraineerd]		
bovenrandvoorwaarde:	d	[gedraineerd]		
hoogte waterlaag:	25			
materiaalparameters m1 t/m m4:	12.9	-10.8	2.74	-0.39
materiaalparameters m5 t/m m8:	-27.3	6.48	-0.43	0
γ_s ; γ_f ; e_g^{atm} ; H	25	10	0	0
aantal knopen:	100			
grid verfijningsfactoren:	0.0	1.1	0.0	-0.1
tijdsfactor; aantal tijdstappen; skipout:	1.05	100	2	0.0

Tabel B.1 invoerfile parameter set K16

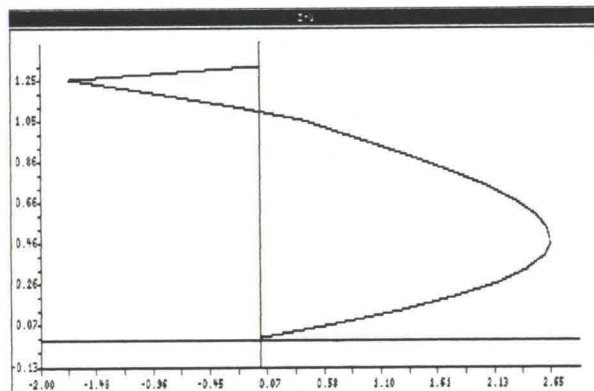
wijzig). Voor K16 en SS is "FSZWEL" toegepast voor de verzadigde som $e_g^{atm}=0$. Deze simulatie gaf toen wel positieve excess poriedrukken voor een lage skipout. Het berekende scenario voor K16 was: een depositietijd van 10 jaar, depositiesnelheid van 2 m/jaar, een vaste waterhoogte van 25 m, compressie zonder oplossen van gas en geen advectie, $e_g^{atm} = 0$, $e_{set}=2.08$ (ofwel $\sigma_{op}(e_{set})=0.3\text{kPa}$) en $e_{dep} = 2.33$. Zowel de bovenrand als de onderrand zijn gedraineerd tijdens het consolidatieproces. De invoerfile van tabel B.1 (K16) is gebruikt om enige schermplots te maken:



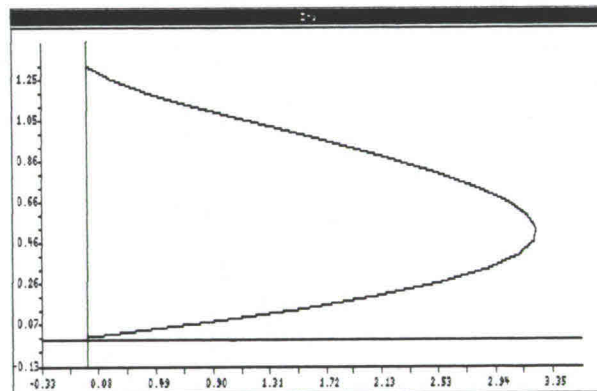
simulatie "FSCONGAS" K16 t=0.22 jaar



simulatie "FSZWEL" K16 t=0.22 jaar



simulatie "FSCONGAS" K16 t=2.19 jaar



simulatie "FSZWEL" K16 t=2.19 jaar

Daar dit verschijnsel in een enkele eerste stap wellicht niet veel invloed zal hebben op de berekening moet de uitvoer van de simulatie bekeken worden op instabiliteit: hiervoor worden de uitstroomdebieten gebruikt, omdat niet alleen is gebleken, dat deze zeer gevoelig zijn voor veranderingen in de invoer, maar ook voor instabiele berekeningsstappen. Het blijkt dat de uitstroomdebieten van SS geen vreemde afwijkingen vertonen t.g.v. lage waarden voor e_g^{atm} . Echter K16 geeft met $e_g^{atm}=0$ zowel voor het uitstroomdebiet aan de bovenrand als aan de onderrand een onverklaarbare piek, die duidt op instabiliteit. Dus de uitvoer van deze simulatie is zeker niet te vertrouwen voor $t < t_{dep}$ maar boven t_{dep} zijn de debieten wel "normaal". Toch is voorzichtigheid geboden.

Om de instabiliteit en de negatieve excess poriedrukken in het begin van de simulatie te verbeteren zijn

enige aanpassingen in de invoer mogelijk:

- ✓ fijner rooster: 100 punten;
- ✓ roosterverfijningsfactoren: 1.1 en -0.1 in plaats van 1.5 en -0.5;
- ✓ een hogere $\sigma_{op}(e_{set})$ waarde.

Dit bleek de uitvoer van SS iets te verbeteren, omdat het aantal stappen met $u < 0$ verminderde en de vreemde piek in de downflow (, die fysisch onmogelijk is) verdween voor simulaties met een hogere waarde voor e_g^{atm} . Deze aanpassingen leverden bij K16 onvoldoende resultaat op, omdat voor de lagere atmosferische gas poriegetallen ($e_g^{atm} = 0.5$) de simulatie instabiel bleef gedurende de depositieperiode.

instabiliteit t.g.v. "opbreken"

Bij een te hoog gaspercentage zal de bovenlaag van het slib "opbreken", omdat het slib lokaal een lagere dichtheid heeft dan water. In de simulatie geeft dit instabiliteit. Voor de keuze van de e_g^{atm} -waarde is de hoogte van de vrije waterlaag op het sliboppervlak van belang, omdat de totaalspanning (ook t.g.v. dit water) het gas comprimeert, waardoor de bulkdichtheid toeneemt en "opbreken" pas bij een veel hoger atmosferisch gas porie getal zal optreden. Tevens heeft de totaalspanning invloed op het oplossen van gas in het poriewater (en dus ook op de advectie).⁽¹⁾

In de simulaties is uitgegaan van een waterhoogte van 25 meter. Voor alle sets bleek $e_g^{atm} = 2.5$ instabiliteit te geven. Echter voor SS en KM kon de simulatie (voor $\sigma_{op}(e_{set}) = 0.3$ kPa) wel voltooid worden, omdat de instabiliteit nog niet erg groot was. Tijdens de simulatie (vlak voor het einde van de depositieperiode) werd de kritische waarde van e_g in de toplaag van het slib bereikt en gaf direct instabiliteit. Na enige stappen was deze al zo groot (K16), dat de simulatie werd afgebroken.

⁽¹⁾ In de simulaties is uitgegaan van gasmodus 3, compressie zonder oplossen (geen advectie), coëfficiënt van Henry $H = 0$. Een hogere waarde voor H zal pas instabiliteit geven voor een hogere waarde van e_g^{atm} .

C Voorbeeldberekening sliblaag zonder consolidatie

De op deze pagina afgebeelde voorbeeldberekening van een spreadsheet (voor Slufter Zuid) heeft betrekking op het theoretische geval als de sliblaag instantaan aanwezig is en er geen consolidatie plaatsvindt. De hoogte van de sliblaag is dan gelijk aan h_{set} .

H =	0	gamma_s	25 kN/m ³	u_atm	100 kPa	g	9.813 m/s ²
e_g^atm	1.5	gamma_f	10 kN/m ³				
e_f	5.22	hset	18.4844 m	hwater	25 m		
e_dep	5.73	hdep	20				

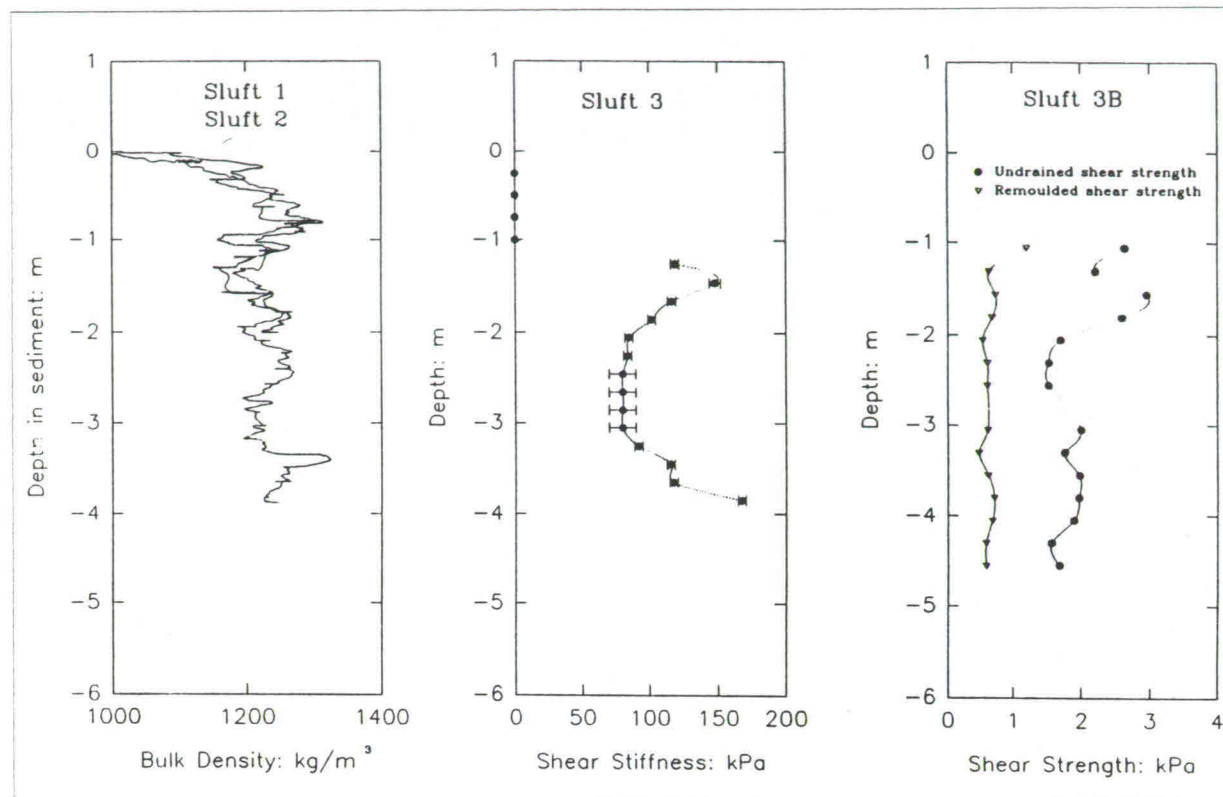
hoogte [m]	pg	eg	hoogte	pg	eg
18.4844	163.9376	0.914982	8.549034	274.7242	0.546002
18.25334	166.4376	0.901239	8.317979	277.3605	0.540812
18.02229	168.9424	0.887876	8.086924	279.9989	0.535716
17.79123	171.452	0.874881	7.855869	282.6392	0.530712
17.56018	173.9661	0.862237	7.624814	285.2815	0.525796
17.32912	176.4847	0.849932	7.393759	287.9258	0.520968
17.09807	179.0077	0.837953	7.162704	290.5719	0.516223
16.86701	181.535	0.826287	6.931649	293.2199	0.511561
16.63596	184.0665	0.814923	6.700594	295.8697	0.50698
16.4049	186.602	0.80385	6.469539	298.5213	0.502477
16.17385	189.1416	0.793057	6.238484	301.1747	0.49805
15.94279	191.685	0.782534	6.007429	303.8299	0.493697
15.71174	194.2323	0.772271	5.776374	306.4868	0.489418
15.48068	196.7833	0.76226	5.545319	309.1453	0.485209
15.24963	199.338	0.752491	5.314264	311.8056	0.481069
15.01857	201.8963	0.742956	5.08321	314.4674	0.476997
14.78752	204.458	0.733647	4.852155	317.1309	0.472991
14.55646	207.0232	0.724556	4.6211	319.796	0.469049
14.32541	209.5918	0.715677	4.390045	322.4627	0.46517
14.09435	212.1636	0.707002	4.15899	325.1309	0.461353
13.8633	214.7387	0.698523	3.927935	327.8007	0.457595
13.63224	217.3169	0.690236	3.69688	330.4719	0.453896
13.40119	219.8982	0.682134	3.465825	333.1446	0.450255
13.17013	222.4825	0.67421	3.23477	335.8188	0.446669
12.93908	225.0698	0.66646	3.003715	338.4944	0.443139
12.70802	227.6601	0.658877	2.77266	341.1714	0.439662
12.47697	230.2531	0.651457	2.541605	343.8499	0.436237
12.24591	232.849	0.644194	2.31055	346.5297	0.432863
12.01486	235.4476	0.637084	2.079495	349.2108	0.42954
11.7838	238.049	0.630122	1.84844	351.8934	0.426266
11.55275	240.6529	0.623304	1.617385	354.5772	0.423039
11.32169	243.2595	0.616626	1.38633	357.2623	0.41986
11.09064	245.8686	0.610082	1.155275	359.9487	0.416726
10.85958	248.4802	0.60367	0.92422	362.6364	0.413637
10.62853	251.0942	0.597385	0.693165	365.3254	0.410593
10.39747	253.7107	0.591225	0.46211	368.0155	0.407591
10.16642	256.3295	0.585184	0.231055	370.7069	0.404632
9.935364	258.9507	0.579261	1.6E-14	373.3995	0.401714
9.704309	261.5741	0.573451			
9.473254	264.1998	0.567752			
9.242199	266.8277	0.562161			
9.011144	269.4577	0.556674			
8.780089	272.0899	0.551288			

$$pg = \sigma + u_{atm}$$

$$\sigma = \int ((\gamma_s + e_{set} \gamma_f) / (1 + e_{set} + e_g)) dz + \gamma_f (h_{water} - z_{smax})$$

$$e_g \text{ gem } 0.593286$$

D Vane-proeven Slufter meetpaal Noord oktober 1995



**Profielen voor bulkdichtheid, schuifstijfheid en schuifsterkte
Slufter meetpaal Noord, oktober 1995**

(McDermott, 1996)

M.b.v. vane-proeven zijn in oktober 1995 t.p.v. meetpaal Noord in situ schuifsterktemetingen uitgevoerd (Rapport nr. 95-153/A, GWR; McDermott, 1996). Uit deze vane-proeven t.p.v. meetpaal Noord blijkt, dat in de bovenste meter slib het apparaat geen meetwaarden geeft. Vanwege de lage schuifsterkte in deze "toplaag" kon het apparaat hier geen metingen verrichten. De lage schuifsterkte wijst op slibstroming in de toplaag van het slib. Bovendien zijn de metingen op grote afstand uitgevoerd van de diffusor, waarmee het slib wordt gestort, zodat ze niet beïnvloed zijn door het stortproces.

De meetwaarden van de schuifsterkte beginnen bij ± 1 kPa. Uit het bepaalde dichtheidsprofiel nabij de meetlocatie blijkt, dat bij de eerste meetwaarde van de vane-proef de operationele spanning een waarde heeft van ± 0.2 kPa.

