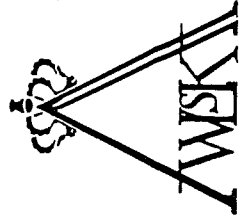


DE KRITIEKE DICHTHEID VAN
ONSAMENHANGENDE MATERIALEN

DOOR

Dr. Ir. Edward Edmond DE BEER

Gewoon hoogleraar aan de Universiteiten te Leuven en te Gent
Corresponderend lid van de Koninklijke Vlaamse Academie
voor Wetenschappen, Letteren en Schone Kunsten van België



1968

PALEIS DER ACADEMIËN — HERTOOGSSTRAAT 1
BRUSSEL

De volledige catalogus van de publikaties der Academie :
MEDEDELINGEN, VERHANDELINGEN, JAARBOEK,
VERSLAGEN EN VOORSTELLEN, SPECIALE UITGAVEN,
is verkrijgbaar op het Secretariaat van de Koninklijke Vlaamse
Academie voor Wetenschappen, Letteren en Schone Kunsten,
van België, Hertogsstraat 1, Brussel 1.

MEDEDELINGEN

VAN DE

KONINKLIJKE VLAAMSE ACADEMIE VOOR
WETENSCHAPPEN, LETTEREN EN SCHONE KUNSTEN
VAN BELGIË

•
K L A S S E D E R

WETENSCHAPPEN

JAARGANG XXX

Nr. 5

INLEIDING

Het begrip „kritieke dichtheid” van onsamenhangende grondsoorten werd voor het eerst ingevoerd door A. CASAGRANDE [1]. Hoewel dit begrip thans de specialisten wel bekend is, wordt er toch in de courante techniek niet voldoende aandacht aan besteed, zodat regelmatig meer of min spectaculaire, of zelfs ramspoedige ongevallen hiervan het gevolg zijn. Het kan dan ook nuttig zijn enkele dezer ongevallen welke met het begrip kritieke dichtheid in verband staan en in België zijn opgetreden nader te beschrijven.

Voor de niet-specialisten kan het echter nuttig zijn vooreerst het begrip kritieke dichtheid te verduidelijken.

1968

PALEIS DER ACADEMIËN — HERTOOGSSTRAAT, 1
BRUSSEL

DEEL I

HET BEGRIIP KRITIEKE DICHTHEID
 HET BEGRIIP DRIJFZAND
 WIJZE VAN BEPALING VAN DE KRITIEKE DICHTHEID
 EN VAN DE AANWEZIGHEID VAN DRIJFZAND

Laten we een bepaalde hoeveelheid zand plaatsen tussen 2 raspen, en deze zandmassa aan een verticale last P of eenheidsspanning $\sigma_{k,v}$ onderwerpen. Vervolgens wordt een geleidelijk stijgende horizontale kracht T of schuifspanning τ aangebracht, tot wanneer een afschuiving in het zand optreedt (fig. 1).

Met een meethorloge m kan de verticale beweging van de bovenste rasp worden opgemeten.

Wanneer de zandmassa dichtgepakt is, wordt vastgesteld dat tijdens de afschuiving de bovenste rasp rijst, hetgeen er op wijst dat er een volumevermeerdering van het zand optreedt. De dichtgepakte korrels dienen eerst uit elkaar vrij te komen vooraleer de afschuiving kan optreden.

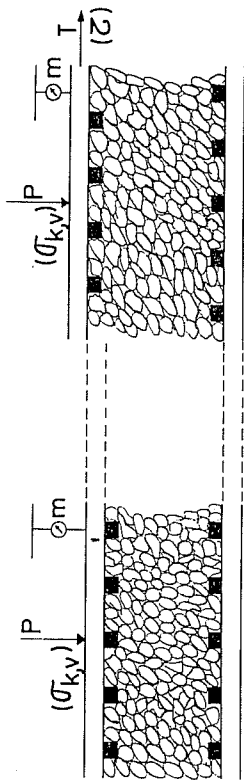
Wanneer intengedeel het beproefde zand zich in een losse pakkingstoestand bevindt, duidt het meethorloge aan dat de bovenste rasp tijdens de afschuiving zakt, dus dat er een volumevermindering van het zand plaats vindt. De losgepakte korrels vallen tijdens de afschuiving in de tussen hen bestaande grotere holten.

Proefondervindelijk blijkt thans dat voor een gegeven normaalspanning $\sigma_{k,v}$ er een bepaalde pakkingdichtheid bestaat voor dewelke er noch volumevermeerdering noch volumevermindering optreedt. Deze noemt men de *kritieke pakkingdichtheid*.

Een maat voor de pakkingdichtheid is b.v. het poriënvolume n , het poriëngetal ϵ of het drooggewicht γ_d . Voor een gegeven normaalspanning σ_k bestaat derhalve een kritiek poriënvolume n_c , een kritiek poriëngetal ϵ_c en een kritiek drooggewicht $\gamma_{d,c}$. Het kritiek poriënvolume n_c en het kritiek poriëngetal ϵ_c dalen, terwijl het kritiek drooggewicht $\gamma_{d,c}$ stijgt wanneer de normaalspanningen σ_k toenemen.

Dit op zichzelf onbelangrijk schijnend verschijnsel van de volumevermeerdering of volumevermindering van een onsamenvangend materiaal onder de invloed van schuifspanningen heeft echter uiterst belangrijke consequenties. Inderdaad wegens dit verschijnsel bevindt een met water verzadigde fijnkorrelige onsamenvangende grond met een dichtheid kleiner dan de kritieke zich in een toestand van *labiel evenwicht*.

Dicht gepakt zand voor de afschuiving
 Dicht gepakt zand van volume vermeerderend gedurende de afschuiving



Los gepakt zand of fijnkorrelig materiaal voor de afschuiving
 Los gepakt zand of fijnkorrelig materiaal van volume vermeerderend gedurende de afschuiving

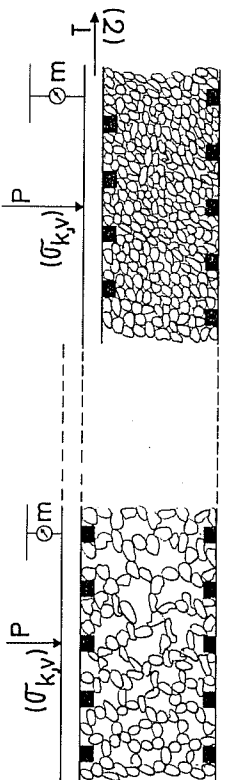


Fig. 1

Wanneer in een dergelijke massa een plaatselijke evenwichtsverstoring wordt veroorzaakt (b.v. door een kleine plaatselijke taludafschuiving, het indrukken van een voorwerp, trillingen) zo zal ten gevolge van de schuifspanningen deze massa de neiging hebben van volume te verminderen. Aangezien bij veronderstelling de massa met water verzadigd is, postuleert deze volumevermindering het uitpersen van een bepaalde hoeveelheid water. In fijnkorrelige massa's met betrekkelijk geringe doorlaetendheid kan een dergelijk uitpersen echter niet onmiddellijk optreden, zodat gedurende min of meer lange tijd het gewicht van het materiaal door het overvullig water wordt gedragen. Het gevolg is dat gedurende korte tijd de waterspanningen σ_w , dit zijn evenwichtsversturende krachten, toenemen, terwijl de korrelspanningen σ_k en de ermede verband houdende

schuifweerstand $W = c + \sigma_k \operatorname{tg} \varphi$, dit zijn de weerstandbiedende krachten, afnemen. De balans van het evenwicht wordt dus aan beide zijden ongunstig beïnvloed, hetgeen wel het kenmerk van een labiel evenwicht is.

Men kan de toestand van een losgepakt zand verduidelijken door het schema van de fig. 2a, waarbij een belasting P op een zuiger gedragen wordt door stangen voorzien met nokken en welke zich in de stand van uiterste verwijdering bevinden. Het vat waarin de zuiger zich bevindt is gevuld met water, en de wanden van het vat kunnen slechts aan een begrensd druk weerstand bieden. Door voldoende grote trillingen zullen de nokken N kunnen uitslaan, zodat alsdan plotseling de totale druk P op het water wordt overgedragen. Aangezien de wanden van het vat bij veronderstelling aan deze verhoogde drukken niet kunnen weerstaan zullen zij begeven en het uitstromen van het water ten gevolge hebben.

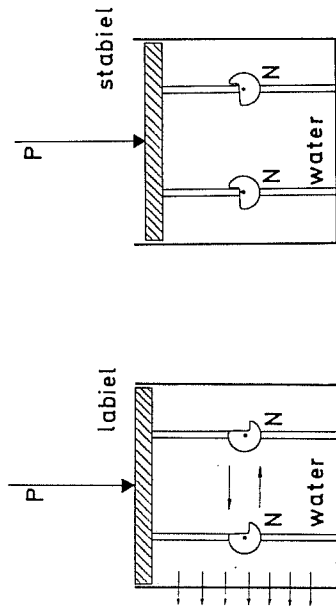


Fig. 2a

Fig. 2b

Een dichte pakkingstoestand wordt verduidelijkt door het schema der fig. 2 b. De stangen bevinden zich in de meest dichte stand. Trillingen kunnen thans het evenwicht niet verbreken.

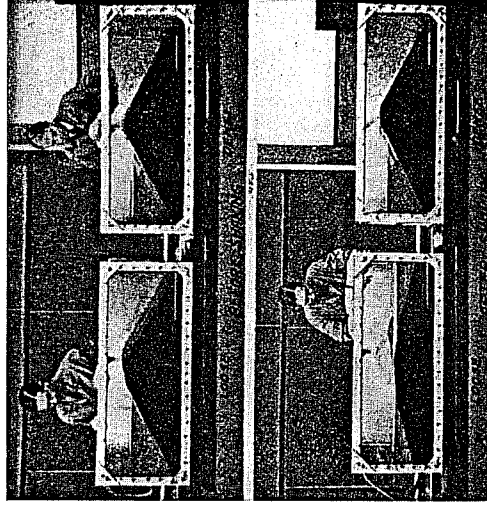
Uit het schema blijkt dat in met water verzadigde materialen met een pakkingdichtheid kleiner dan de kritieke, plaatselijke evenwichtsverstoringen zich, in uiterst korte tijd, tot een zeer groot gebied kunnen uitspreiden, en tot een vervloeiing van de massa kunnen leiden.

Het typisch voorbeeld is dit van CASAGRANDE (fig. 3). Twee dijkmodellen worden opgebouwd met hetzelfde zand, doch in het eerste model is het zand dichtgepakt, in het andere lossergepakt dan de kritieke dichtheid. Deze dijken met gelijk verval, worden aan dezelfde trillingsintensiteit onderworpen. De dichtgepakte dijk houdt stand, terwijl de losgepakte dijk volledig vervloeit.

Wanneer men met met water verzadigde onafhankelijke grondlagen te maken heeft is het derhalve van het grootste belang te weten of de

losgepakt

dichtgepakt



vóór het trillen

na het trillen

Fig. 3

pakingsdichtheid van deze grondlagen groter of geringer is dan de kritieke pakingsdichtheid.

ANALOGIE MET MOLECULAIRE MASSA'S

Voor de natuurkundigen kan het ter verduidelijking van het begrip „kritieke dichtheid” nuttig zijn de analogie aan te halen welke door Prof. WINTERKORN tussen de verschijnselen in onsamenhangende materialen en deze van vloeistoffen werd gelegd. Hij gaat vooreerst uit van het feit dat wanneer het volume van enkelvoudige stoffen bij de absolute nul temperatuur en bij 1 atm. 1 is, volgens TRAUTZ, het volume bij het smeltpunt en 1 atm. 1,21 en bij het kookpunt en 1 atm. 1,42 bedraagt [2].

De kritieke dichtheid is de dichtheid waarbij een onsamenhangend korrelig materiaal van de vaste tot de vloeibare toestand overgaat. Deze dichtheid kan derhalve worden vergeleken met het *smeltpunt*.

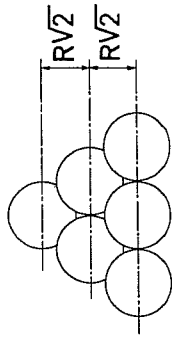
Deze analogie kan worden verduidelijkt aan de hand van een stapeling gelijke bollen. De dichtste pakking van een dergelijke stapeling wordt verkregen met de tetrahedrale schikking. Het poriëngetal bedraagt alsdan $\epsilon = 0,35$. Indien het volume ingenomen door de vaste stof als eenheid wordt genomen, bedraagt het totaal volume van een cel 1,35, hetgeen met de toestand van het absolute nulpunt der temperatuur voor de moleculaire stof overeenstemt.

Het „smeltpunt” voor de tetrahedrale pakking, zal gelet op de analogie optreden bij een volume $1,35 \times 1,21 = 1,63$. Dit betekent dat het kritieke poriëngetal 0,63 zou bedragen, of nog dat het kritieke poriënvolume

$$n_c = \frac{\epsilon_c}{1 + \epsilon_c} = \frac{0,63}{1,63} = 38,5 \% \text{ bedraagt.}$$

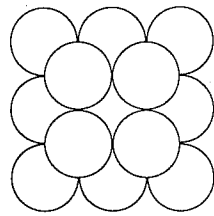
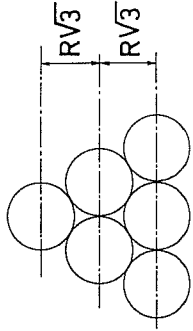
Wanneer de ruimte gevuld is met gelijke bollen in een rhombohedrale schikking met een vierkant basisnet zo kan geen enkele bol een translatie in een welkdanige richting ondergaan. De vertikale afstand van de bollen bedraagt in een dergelijke schikking $R\sqrt{2}$, waar R de straal is van de bol (fig. 4a). Wanneer het poriënvolume thans derwijze wordt vermeerderd dat de tussenaafstand tussen de verschillende lagen $R\sqrt{3}$ bedraagt, terwijl de vierkante schikking in plan wordt behouden, zo kan elke bollenlaag ten opzichte van de haar omringende in elk van de horizontale richtingen worden verschoven. De pakking is volgens de horizontale richting onstabiel geworden. Wanneer de lagen de ene t.o.v. de andere over R worden verschoven, zo zullen de bollen van de bovenlaag liggen in de dalen van twee bollen van de onderlaag, en men verkrijgt de orthorhombische pakking der fig. 4b.

rhombohedraal met vierkante basis

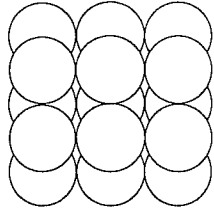


opstand

orthorhombisch met vierkante basis



$$V_0 = 1,35$$



$$V_1 = 1,65$$

bovenaanzicht

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{1,65}{1,35} = 1,22$$

Fig. 4a

Het poriëngetal van de rhombohedrale pakking is 0,35 en het volume van de eenheidscel $V_0 = 1,35$.

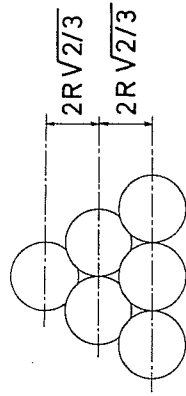
Het poriëngetal van de orthorhombische pakking is 0,65 en het volume van de eenheidscel $V_1 = 1,65$.

$$\text{De verhouding } \frac{V_1}{V_0} = \frac{1,65}{1,35} = 1,22.$$

Men vindt de verhouding van het smeltpunt terug.

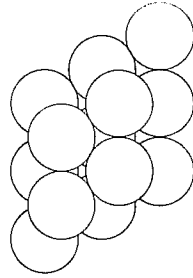
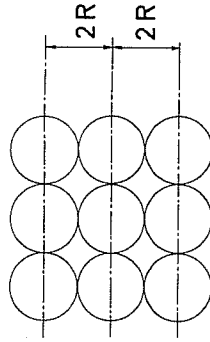
Wanneer vervolgens een rhombohedrale pakking met zeskantig basis-net wordt beschouwd (fig. 5a), zo liggen de verschillende lagen op een vertikale afstand $2R\sqrt{2/3}$. Opdat de horizontale lagen van deze pakkingstoestand onderling zouden kunnen verschuiven is het nodig de orthorhombische schikking der fig. 5b te verwezenlijken, waarbij de hexagonale schikking in plan behouden blijft. De afstand tussen de verschillende lagen wordt $2R$. De verhouding der volumina der eenheidscellen der schikkingen van de fig. 5b en 5a is terug 1.22.

rhombohedraal met zeskantige basis

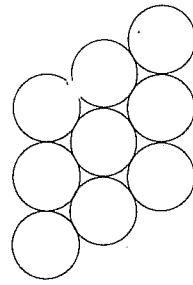


opstand

orthorhombisch met zeskantige basis



$$\frac{V_1}{V_0} = 1,22$$



bovenaanzicht

Kubische schikking $V_2 = 1,91$

$$\frac{V_2}{V_0} = \frac{1,91}{1,35} = 1,42$$

Fig. 5a

Fig. 5b

Laten we ten slotte opmerken dat de kubische schikking van gelijke bollen een twee-dimensionale instabiliteit invoert, daar de verschuivingen thans zowel langs horizontale als verticale vlakken kunnen geschieden. Bij een kubische schikking bedraagt het volume van de eenheidscel $V_2 = 1,91$, te vergelijken met het volume van de tetrahedrale pakking welke de meest dichte is.

$$\text{De verhouding is } \frac{1,91}{1,35} = 1,42$$

hetgeen precies met de verhouding van het kookpunt overeenstemt.

Deze analogie toont aan dat wanneer de kritieke dichtheid wordt bereikt, een instabiliteit tegen verschuiving ontstaat, en dat uit analogie met moleculaire stoffen de kritieke dichtheid met het smeltpunt kan worden vergeleken.

De vergelijking tussen vloeistoffen en onsamenhangende korrelige materialen werd door WINTERKORN [3] [4] nog verder doorgedreven.

Volgens BARSCHINSKI [5] kan de viscositeit η van enkelvoudige vloeistoffen worden uitgedrukt door :

$$\eta = \frac{B}{V - b} \quad (1)$$

Hierin zijn : V = het soortelijk volume van de vloeistof bij een gegeven temperatuur.

B = een parameter welke praktisch onafhankelijk is van de temperatuur en van het soortelijk volume.

b = het minimum soortelijk volume.

$V - b$ stelt het vrij volume van de vloeistof voor.

Analoog met (1) kan men thans stellen voor de wrijvingshoek van een onsamenhangend korrelig materiaal en welke met de piekwaarde (fig. 6) overeenstemt :

$$\text{tg } \varphi_p = \frac{C'}{V - V_{\min}} \quad (2)$$

waar V_{\min} = het minimum volume van de eenheidscel
 V = het beschouwde volume van de eenheidscel.

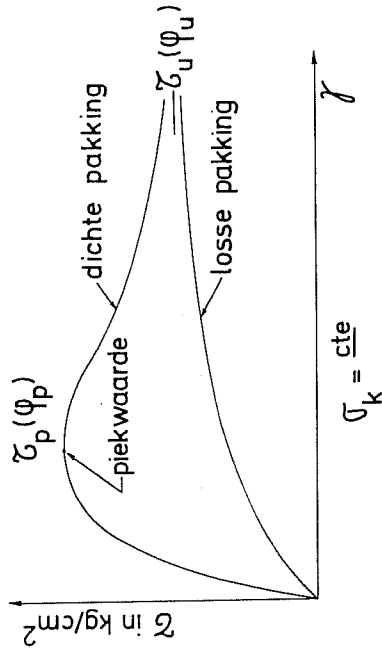


Fig. 6

De uitdrukking (2) kan ook worden geschreven :

$$\text{tg } \varphi_p = \frac{C}{\epsilon - \epsilon_{\min}} \quad (3)$$

waarin ϵ_{\min} = het beperkend poriëngetal.

ϵ = het poriëngetal van de beschouwde werkelijke schikking.

C = een constante.

De uitdrukking (4) houdt nauw verband met de proefondervindelijke wet van KÉRISEL [6]

$$\epsilon \text{ tg } \varphi_p = \text{cte} \quad (4)$$

Anderzijds stelde KEZDI [7] voor, ten einde een betere overeenstemming met de proefondervindelijke gegevens te verkrijgen

$$\text{tg } \varphi_p = \frac{C}{V - V_{\min}} + B \quad (5)$$

Wanneer proeven bij verschillende pakkingsdichtheden worden verricht, gaat men in het diagram $\tau = f(\gamma)$ voor dichte pakkingen doorheen een piek τ_p , en bij voldoende grote distorties γ komt men tot dezelfde waarde τ_u als voor losse pakkingen. De eindwaarde τ_u is in eerste instantie onafhankelijk van de pakkingsdichtheid. Past men de formule (3) toe voor de kritieke dichtheid, zo heeft men

$$\text{tg } \varphi_u = \frac{C}{\epsilon_{\text{crit}} - \epsilon_{\min}} \quad (6)$$

Uit (3) en (6) volgt :

$$\text{tg } \varphi_p = \text{tg } \varphi_u \frac{\epsilon_{\text{crit}} - \epsilon_{\min}}{\epsilon - \epsilon_{\min}} \quad (7)$$

De grootheid ϵ_{\min} heeft geen rechtstreekse fysieke betekenis. Deze parameter kan echter, in zoverre de wet van Winterkorn opgaat, voor elke zandsoort proefondervindelijk worden bepaald.

Zoals reeds werd opgemerkt, is de kritieke dichtheid een functie van de alzijdige normaalspanning, zoals ook het smeltpunt functie van de druk is.

Door WINTERKORN wordt gesteld :

$$\epsilon_{\text{crit}}^0 = \epsilon_{\text{crit}}^0 - a \sigma_{k,m} \quad (8)$$

Hier is ϵ_{crit}^0 = de kritieke dichtheid wanneer $\sigma_{k,m} = 0$.

a = een constante voor een gegeven zand.

$\sigma_{k,m}$ = de gemiddelde korrelspanning.

De waarden van ϵ_{crit}^0 en a kunnen ook proefondervindelijk worden bepaald.

BEPALING VAN DE KRITIEKE PAKKINGSDICHTHEID IN HET LABORATORIUM

De kritieke dichtheid kan in het laboratorium door middel van triaxiaalproeven worden bepaald (fig. 7).

Het monster M wordt bij een bepaald poriënvolume n in een rubberzak ingebouwd, met water verzadigd en aan een zijdelingse normaalspanning σ_3 onderworpen (fig. 7). Vervolgens wordt een deviatorische spanning $\sigma_1 - \sigma_3$

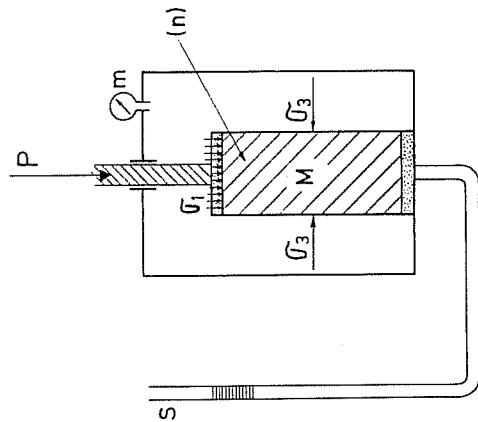


Fig. 7

aangebracht, waarbij er zorg wordt voor gedragen de gemiddelde normaalspanning constant te houden, terwijl het waterniveau wordt waargenomen in een standpijp S welke met het monster is verbonden.

Is $n < n_c$, zo wordt water door het monster aangezogen, het niveau van het water in S daalt.

Is $n > n_c$, zo wordt water uit het monster uitgeperst, zodat het niveau van het water in S stijgt.

De kritieke dichtheid is deze, voor dewelke het niveau in S niet varieert.

Deze proef kan bij verschillende alzijdige drukken σ_3 worden herhaald, zodat kan worden bepaald op welke wijze n_c afneemt, wanneer σ_3 toeneemt.

Het gevolg van de afname van n_c met toenemende σ_3 is, dat zeer dikke massieven of zeer hoge taluds nog kunnen vervloeien bij pakkingsdichtheden, voor dewelke minder hoge taluds dit gevaar niet meer vertonen.

BEPALEN VAN DE PAKKINGSDICHTHEID IN SITU

Het volstaat niet de kritieke pakkingsdichtheid in het laboratorium te kunnen opsporen, men dient ook nog de pakkingsdichtheid van de werkelijke lagen te kunnen bepalen.

In principe zou het hiertoe volstaan ongeroerde monsters aan de grond te ontnemen. Doch dit is in onafhankelijke gronden onder het P.O. praktisch onmogelijk. Inderdaad zodra men een bus in de grond drukt, en deze grond een lossere pakking heeft dan de kritieke dichtheid, zal deze ten gevolge van de opgewekte schuifspanningen van volume verminderen, zodat het gestoken monster een gunstiger pakkingsdichtheid zal vertonen dan de natuurlijke laag.

Men dient derhalve naar andere middelen uit te zien.

Een eerste middel zijn de *diepsonderingen*. Wanneer de konus van het diepsondeerapparaat wordt weggedrukt ontstaan schuifspanningen. Wanneer men een zeer losgepakt zand heeft, gaat de grond vervloeien, en men meet een voor zand uiterst geringe puntweerstand. De figuur 8 geeft het voorbeeld van een diepsondering verricht te *Plassendale* [8].

Toch geeft de diepsondering niet altijd een volkomen duidelijk antwoord, omdat vooreerst de buizen van het diepsondeerapparaat worden weggedrukt, en hierdoor reeds een voorverdichting zal zijn opgetreden.

In elk geval wijzen puntweerstand van slechts 20 à 40 kg/cm² in zuivere zanden op pakkingsdichtheden welke mogelijk kleiner dan de kritieke zijn.

Een andere methode om na te gaan of een zand losser gepakt is dan de kritieke dichtheid is een nauwkeurige waarneming van de verschijnselen welke tijdens een boring optreden.

Wanneer b.v. een boring met een pulsboor in zand onder het P.O. wordt uitgevoerd, zal men vaak vaststellen dat in fijne zanden het zand in de voerbuis opwelt.

DIEPSONDERING te PLASSENDALE

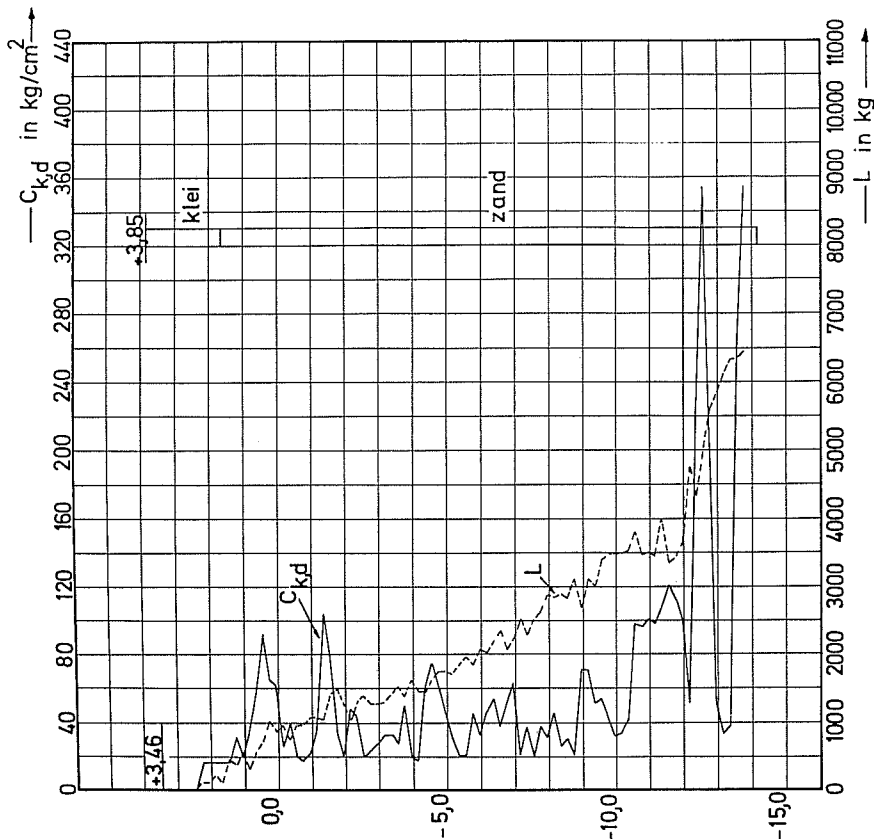


Fig. 8

Over het algemeen is dit opwellen echter niet aan een speciale toestand van het zand, doch wel aan het volgende verschijnsel toe te schrijven. Met de pulsboor wordt niet enkel zand doch ook water aan het boorgat ontnomen (fig. 9). Hierdoor komt het waterpeil α in de voerbuis lager te staan dan het P.O. Wanneer de boring ietwat snel wordt doorgevoerd, en het zand fijn is, dus betrekkelijk weinig doorlatend, kan het waterpeil $\beta\beta$ de daling van het waterpeil α niet volgen, zodat op de bodem van het boorgat opwaarts gerichte stromingsdrukken $P_s = \delta_w \alpha$ ontstaan. Wanneer deze voldoende groot worden zullen ze het opwellen van de zandkorrels tot gevolg hebben.

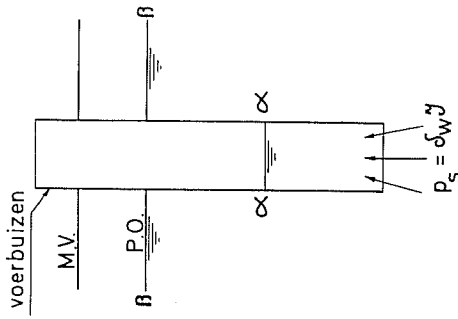


Fig. 9

In de meeste zanden kan men dit opwellen zeer eenvoudig tegengaan door, tijdens het pulsen, water aan het boorgat toe te voegen, zodat het peil α van het water in het boorgat niet onder het oorspronkelijk P.O. daalt.

Enkel in het geval van zanden met een lossere pakking dan de kritieke zal deze maatregel niet volstaan. De uitleg hiervoor is eenvoudig. Indien het niveau α in de boorbuis samenvalt met het P.O. zijn er in rusttoestand geen stromingsdrukken (fig. 10). Wanneer thans de voerbuis dieper

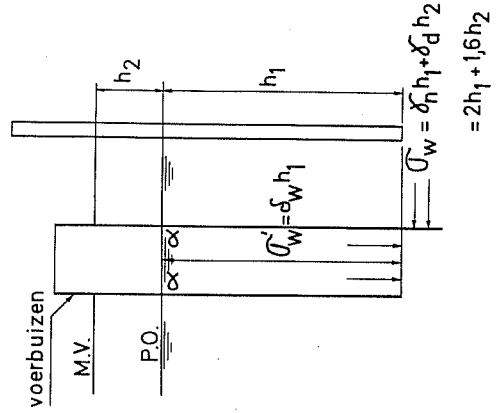


Fig. 10

worden doorgedrukt, veroorzaakt men schuifspanningen, en in losgepakte zanden gaat hiermede een neiging tot volumevermindering gepaard. Daar het overtollige water niet onmiddellijk kan ontsnappen, krijgt men in losgepakte zanden een kortstondige waterdruk

$$\begin{aligned}\sigma_w &= \gamma_n h_1 + \gamma_d h_2 \\ &= 2 h_1 + 1,6 h_2\end{aligned}$$

en deze waterdruk is zeer veel groter dan de tegendruk $\sigma'_w = \delta_w h_1 = 1 h_1$ van het water in de voerbuis.

Dus, niettegenstaande de genomen voorzorg het waterpeil in de voerbuis gelijk of hoger te houden dan het P.O., zal het zand toch in de voerbuis opwellen.

Laten we opmerken dat in gewone zanden zeer gemakkelijk boringen zonder voerbuizen kunnen worden uitgevoerd. Het volstaat hiertoe de voorzorg te nemen het water in het boorgat ietwat hoger te houden dan het P.O. Men krijgt aldus stabiliserende stromingsdrukken p_s op de wanden, welke volstaan om deze in evenwicht te houden (fig. 11).

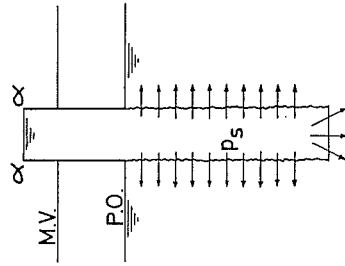


Fig. 11

Deze voorzorg volstaat echter niet in zeer losgepakte zanden. De boortoestellen veroorzaken immers schuifspanningen, welke een neiging tot volumevermindering veroorzaken waardoor locale waterdrukken $\sigma_w = \gamma_n h_1 + \gamma_d h_2$ ontstaan, welke veel groter zijn dan de tegendruk $\sigma'_w = \delta_w h_1$, zodat de wanden noodzakelijk instorten (fig. 12).

Men beschikt dus bij de boringen over een vrij eenvoudig middel om „zanden lossergepakt dan de kritieke dichtheid” op te sporen [9].

Wanneer men er in de boringen met voerbuis over waakt dat het waterpeil in de voerbuis steeds hoger ligt dan het P.O., zullen enkel zanden men een lossere pakking dan de kritieke opwellen.

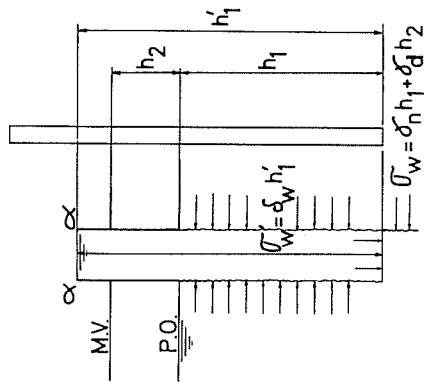


Fig. 12

In de techniek van boringen zonder voerbuis, en met tegendruk in de voerbuis, zullen enkel zanden met een lossere pakking dan de kritieke zich tot deze techniek niet lenen. In dergelijke zanden dient men noodzakelijk met voerbuizen te werken, tenzij men een tegendruk zou geven welke nagenoeg 2 maal groter is dan de diepte van het boorgat, hetgeen om uitvoeringsredenen meestal onmogelijk is.

Laten we opmerken dat we verplicht zijn te spreken over „zanden lossergepakt dan de kritieke dichtheid”. Dit is een zeer lange uitdrukking. Anderzijds beschikt men over de woorden „drijfzand” en „loopzand”. Enkel het eerste woord behoort tot het gewone spraakgebruik.

Wanneer zand in een boorgat of in een gegraven holte opdrijft, spreekt men van drijfzand. Een dergelijk opdrijven geeft een uiterst ongunstige indruk, met het gevolg dat men een dergelijk zand als een uiterst ongunstige bouwgrond gaat beschouwen. Doch meestal zijn dit juist de beste bouwgronden.

Inderdaad het waargenomen opwellen is meestal niet toe te schrijven aan de intrinsieke toestand van het zand, doch enkel aan het feit dat men het zand aan nadelige stromingsdrukken p_s heeft onderworpen.

Wanneer men een zand aan voldoende grote opwaarts gerichte stromingsdrukken p_s onderwerpt, gaat het noodzakelijk opwellen, „lopen”. Daarom gebruiken we de benaming „loopzand” voor zanden welke wegens stromingsdrukken aan het wellen zijn. Deze benaming stelt dus niets voorop betreffende de intrinsieke toestand van het zand.

De benaming „drijfzand” wordt voorbehouden aan zanden welke, verzadigd met water, zich in een lossere pakkingstoestand dan de kritieke dichtheid bevinden. Dit zijn de enige gevaarlijke zanden. Ze kunnen in

loopzand overgaan, zelfs, wanneer het waterpeil in het boorgat zich boven het P.O. bevindt.

Het voordeel van de koppeling van het woord „drijfzand” met het begrip „kritieke dichtheid” is, dat zodoende de pejorative betekenis welke de volksvmond aan dit woord hecht, enkelslaat op die zanden welke die pejorative betekenis inderdaad verdienen.

„Drijfzanden” met de bepaling die we zo juist aan dit begrip hebben gegeven, komen in de natuur gelukkig vrij zelden voor.

Dit hoeft niet te verwonderen. Zand is immers een relatief grofkorrelig materiaal dat enkel in betrekkelijk snel vloeiend water of ook nog bij betrekkelijk grote windsnelheden wordt afgezet. Dank zij de snelheid van het water of van de wind worden de korrels behoorlijk in elkaar gewerkt zodat de pakingsdichtheid betrekkelijk groot zal zijn.

In België worden „drijfzanden” hoofdzakelijk gevonden in bepaalde kustafzettingen, in het Flandriaan, en in het hellingpuin*.

KORRELVERDELINGSDIAGRAM
ZAND van PLASSENDALE

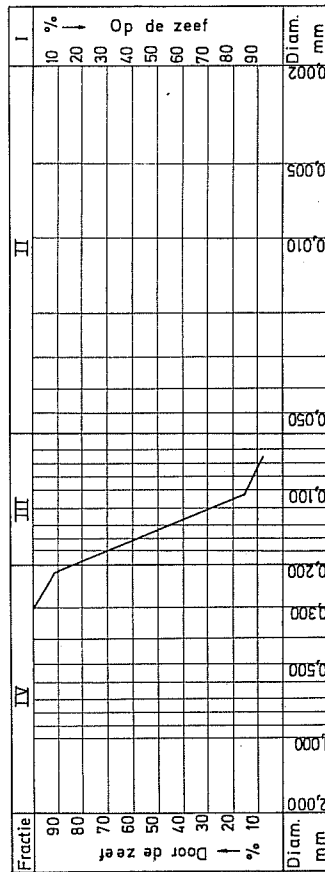


Fig. 13

In kunstmatige aanvullingen welke enkel door neerstorten zonder verdichting worden verwezenlijkt, zal men intengedeel, over het algemeen een lossere pakingsdichtheid dan de kritieke hebben.

De firma Smet welke in de uitvoering van boringen zonder voerbuizen is gespecialiseerd, schat op circa 5 % de gevallen waar deze techniek in

* Uit een mededeling van Prof. Tavernier blijkt dat zanden lossere gepakt dan de kritieke dichtheid o.m. kunnen ontstaan, wanneer het zand in sneeuwdriften wordt afgezet. Tussen de zandkorrels bevinden zich alsdan sneeuwvlokken. Wanneer deze achteraf wegsmelten, kan vanzelfsprekend een zeer losse korrelstapel ontstaen.

zandlagen falicant is uitgelopen. Dit geeft dan ongeveer het percentage van de aanwezigheid van „drijfzand” in ons land.

De figuur 8 geeft de resultaten van een diepsondering en een boring te Plassendale. Vastgesteld wordt dat vanaf circa 2 m diepte zand wordt gevonden. De puntweerstand bedragen slechts 20 à 40 kg/cm² en wijzen op een geringe pakingsdichtheid, welke kleiner dan de kritieke kan zijn. Een kenmerkende korrelverdeling van dit zand is op de fig. 13 aangegeven.

Het kritiek poriënvolumen, bij $\sigma_k = 1 \text{ kg/cm}^2$, bedraagt $n_c = 41,8 \%$ (fig. 14).

ZAND van PLASSENDALE

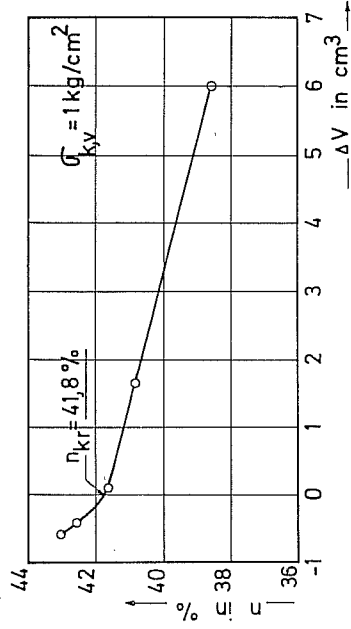


Fig. 14

Uit studies verricht in het laboratorium is gebleken dat een $C_{k,d}$ waarde van circa 20 kg/cm² wijst op een lossere pakking dan de kritieke dichtheid.

Het zand gevonden te Plassendale behoort vermoedelijk tot het Oostendiaan.

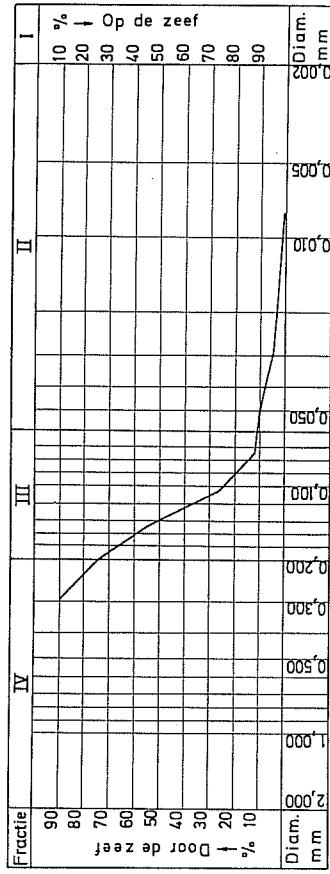


Fig. 16

en dat de minste plaatselijke evenwichtsverstoring tot het totaal vervloeien van het dijklichaam kon voeren.

Het dijklichaam werd met hetzelfde zand herbouwd, doch er werd thans zorg voor gedragen dat de pakingsdichtheid hoger dan de kritieke lag.

Aangezien ook alle andere dijken tussen Eigenbilzen en Hasselt zich in dezelfde zieke toestand bevonden, werden zij aan de landzijde gestut

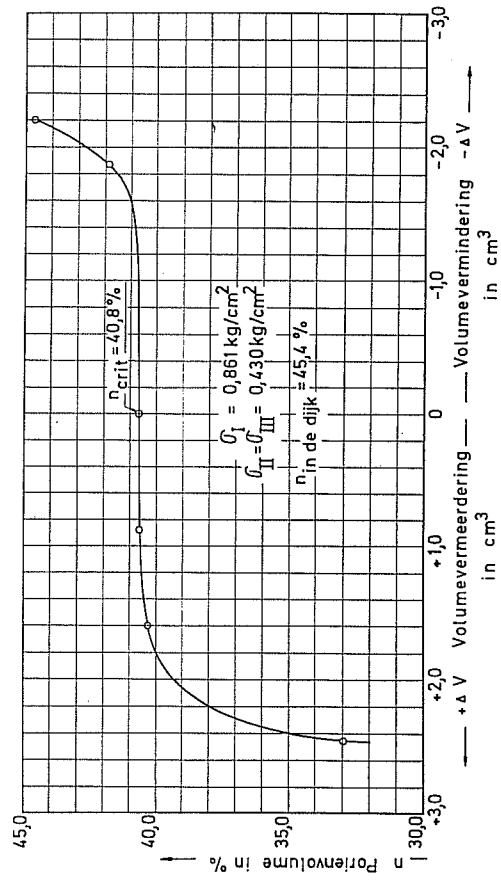


Fig. 17

DEEL II

Laten we thans overgaan tot een korte beschrijving van enkele ongevallen welke zich in ons land in verband met de kritieke dichtheid hebben voorgedaan.

A. DE DIJKEN VAN HET ALBERTKANAAL TE HASSELT [10]

Stroomopwaarts van de sluis te Hasselt waren de dijken van het Albertkanaal uitgevoerd met een weinig leemhoudend fijnzand dat eenvoudig werd neergestort en door bulldozers werd uitgespreid. Aangezien de dijk juist stroomopwaarts van de sluis een zeer grote kruinbreedte had, had men een zeer grote indruk van veiligheid (fig. 15).

DIJKEN van ALBERTKANAAL te HASSELT

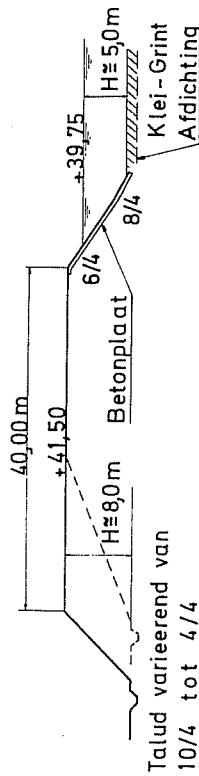


Fig. 15

Nochtans korte tijd na het onderwaterzetten van het kanaalpand ontstonden kleine afschuivingen in het binnentalud, en de ingenieur van de aannemer was in 1938 juist bezig met de maatregelen te onderzoeken welke tegen deze kleine afschuivingen waren genomen, toen plotseling de gehele dijkmassa vervloede, hetgeen de dood van de ingenieur tot gevolg had.

Een korrelverdeling van het aangewende leemhoudend fijnzand is op de fig. 16 gegeven.

Uit metingen verricht in de zijden van de bres bleek dat het poriënvolume van het zand in het dijklichaam gemiddeld 45,4 % bedroeg.

Uit laboratoriumproeven bleek dat bij $\sigma = 1 \text{ kg/cm}^2$ de kritieke dichtheid van het zand circa 41 % bedraagt (fig. 17). Het was dus overduidelijk dat het dijklichaam zich in de toestand van drijfzand bevond,

door massieven welke een gunstiger pakingsdichtheid dan de kritieke hadden.

Tijdens de gebeurtenissen van 1940 waren de kanaalpannen geleidigd. Bij het voorbijrijden van tanks op het jaagpad van het talud, zijn sommige plotseling met het buitentalud in het drooggelegd kanaal terechtgekomen.

B. HET STORT VAN VLEGASSE TE JUPILLE [11]

Een bijzonder tragische illustratie van de gevolgen van losse pakingsdichtheden is de catastrofe te Jupille.

Door een elektrische centrale werd aan het uiteinde van een dal haar vliegasse gestort. Dit geschiedde door uitklappen van de vrachtwagens en overduwen met een bulldozer. Aldus werden betrekkelijk steile taluds verwezenlijkt.

Inderdaad de vliegasse is vochtig en heeft een betrekkelijk grote capillaire cohesie, zodat het onder betrekkelijk steile taluds tot evenwicht komt. Op het ogenblik van de catastrofe bedroeg de dikte van het stortmateriaal ter plaatse van de dalweg ongeveer 30 m.

De vliegasse heeft een grijs uitzicht, doch bestaat in feite uit zwarte ongebrande resten, en uit witte pareltjes gesmolten silicium. Deze pareltjes zijn van binnen hol en wegen minder dan water.

Een foto van het materiaal is op de fig. 18 gegeven.

Het is zeer moeilijk de korrelverdeling van dit materiaal te bepalen, aangezien bepaalde korrels minder wegen dan water. Een waarschijnlijke korrelverdeling is op de fig. 19 gegeven. Hoewel de korrels uiterst fijn zijn heeft men toch een onsamenhangend materiaal.

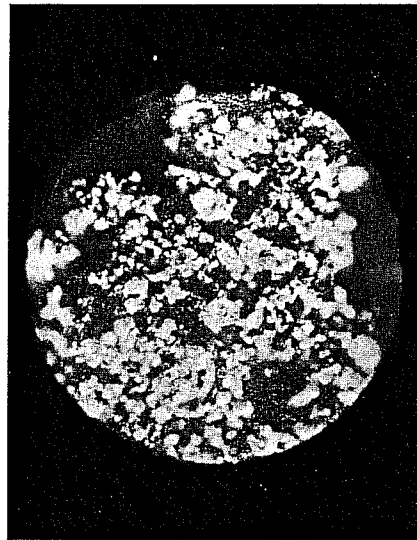


Fig. 18

KORRELVERDELINGSDIAGRAM van de VLEGASSE.

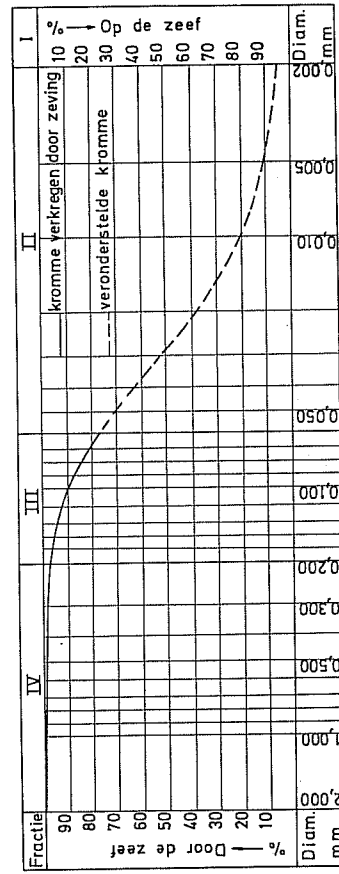


Fig. 19

Aan de onderkant van het stort heeft zich een P.O. ingesteld, zodat over enkele meters de vliegasse verzadigd was met water. Op een bepaald ogenblik heeft zich in het talud een plaatselijke afschuiving voorgedaan, waarschijnlijk ten gevolge van ontgrondingen aan de teen, door het stijgen van het water in de beek. De hierdoor ontstane schuifspanningen hebben dan aanleiding gegeven tot het vervloeiën van een massa van meer dan 180.000 m³. Deze is als een zware vloeistof uitgestroomd en is eerst meer dan 650 m verder tot rust gekomen. Een photo van de uitvloeiing is te zien op de fig. 20.

Een photo van de gedeelten welke zijn blijven staan is op de fig. 21 gegeven.

Een diagram van een der verrichte sonderingen in de gedeelten welke zijn blijven staan, is op de fig. 22 gegeven.

In de gedeelten welke zijn blijven staan, werden drooggewichten opgemeten variërend tussen 1,12 t/m³ en 0,58 t/m³, met een centrale waarde van 0,8 à 0,9 t/m³. Het is uiterst moeilijk een ernstige waarde voor het poriënvolume te bepalen daar het s.g. der korrels al te sterk varieert. Gemiddeld werd voor $\delta_k = 2,045$ à $2,25$ t/m³ gevonden. Vele korrels blijven echter op het water drijven. Voor deze korrels, de z.g. pareltjes, vindt men $\delta_k = 0,69$ à $0,7$ t/m³.

De resultaten van triaxiaalproeven welke op de vliegasse werden verricht zijn op de fig. 23 uitgedragen.

De proeven werden uitgevoerd bij $\sigma_3 = 1$ kg/cm². Vastgesteld wordt dat bij waarden van γ_d lager dan 1,10 t/m³ een volumevermindering optreedt. Bij $\gamma_k = 1,18$ t/m³ treedt integendeel een volumevermeerdering op tijdens de afschuiving. De kritieke dichtheid bij $\sigma_3 = 1$ kg/cm² ligt derhalve in de buurt van 1,10 t/m³. De maximum dichtheid welke in een verdichte proctorproef kan worden verwezenlijkt bedraagt slechts 1,170 t/m³, en is dus aan de rand van de kritieke dichtheid.

Door trillen kan echter een drooggewicht van 1,275 t/m³ worden verkregen. Hierbij is een watergehalte van 16,5 tot 28,5 % vereist.

Daar de gedeelten van het massief die niet waren vervloeid het gevaar boden door toevallige oorzaken ook te kunnen vervloeiën, werd beslist, ten einde het dal te beschermen, een weinig dalwaarts van het stort het dal door een dam af te sluiten. De fig. 24 geeft een langsdorsnede over het dal. Hierop ziet men in streeplijn de oorspronkelijke vorm van het stort voor de vervloeiing, in volle lijn de toestand na de vervloeiing, alsook de uitgevoerde dwarsdam over het dal.

Deze dwarsdam heeft een hoogte van circa 16,00 m, en reikt tot het peil + 160. Dit peil werd aangehouden daar kon worden vastgesteld dat de vliegasse, bij ingaande vervloeiing, ten gevolge van de voorhanden energie, tegen de tegenliggende glooiing tot het peil + 160,00 was opgelopen (fig. 25).

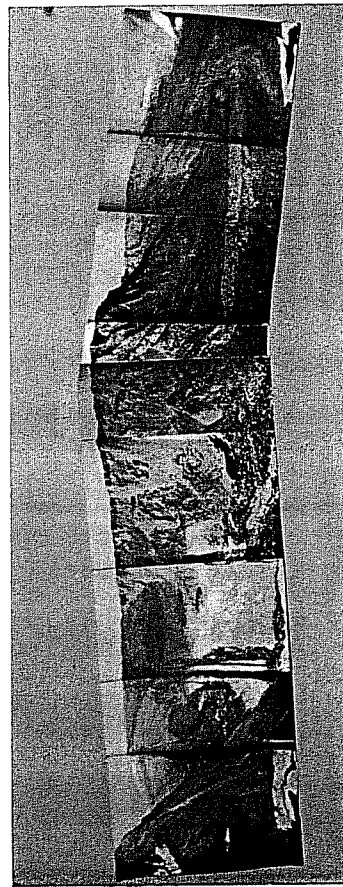


Fig. 21

HANDSONDERING te JUPILLE

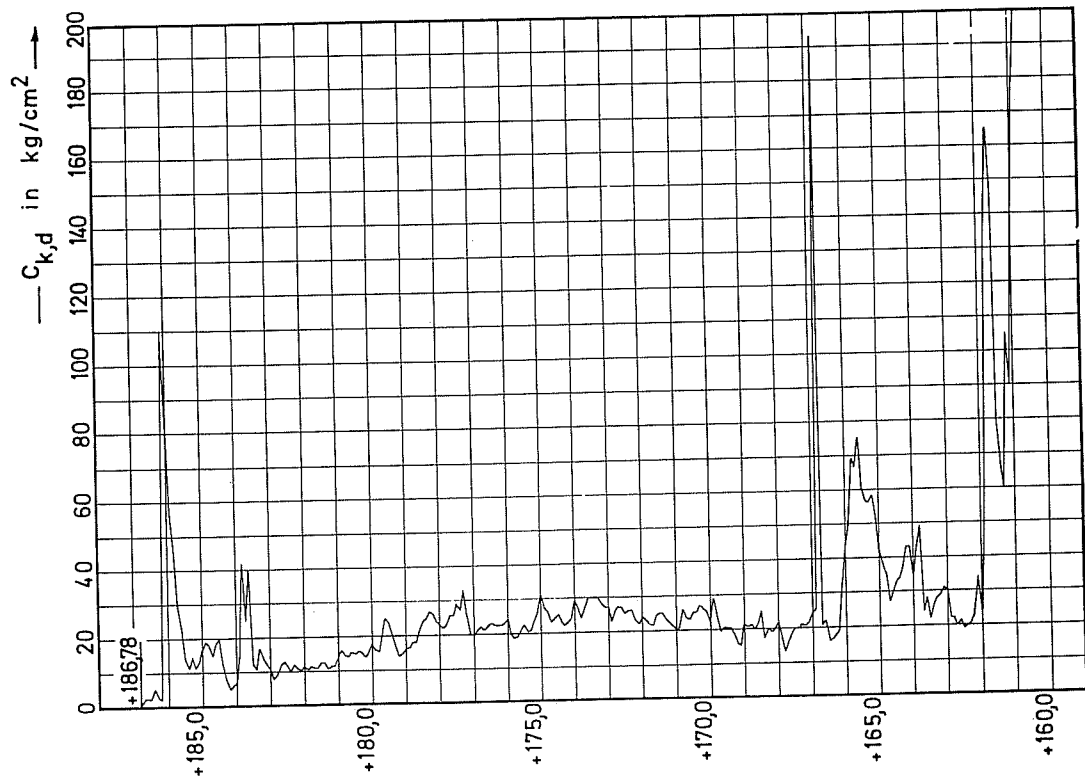


Fig. 22

LANGSDOORSNEDEN VAN DAL te JUPILLE

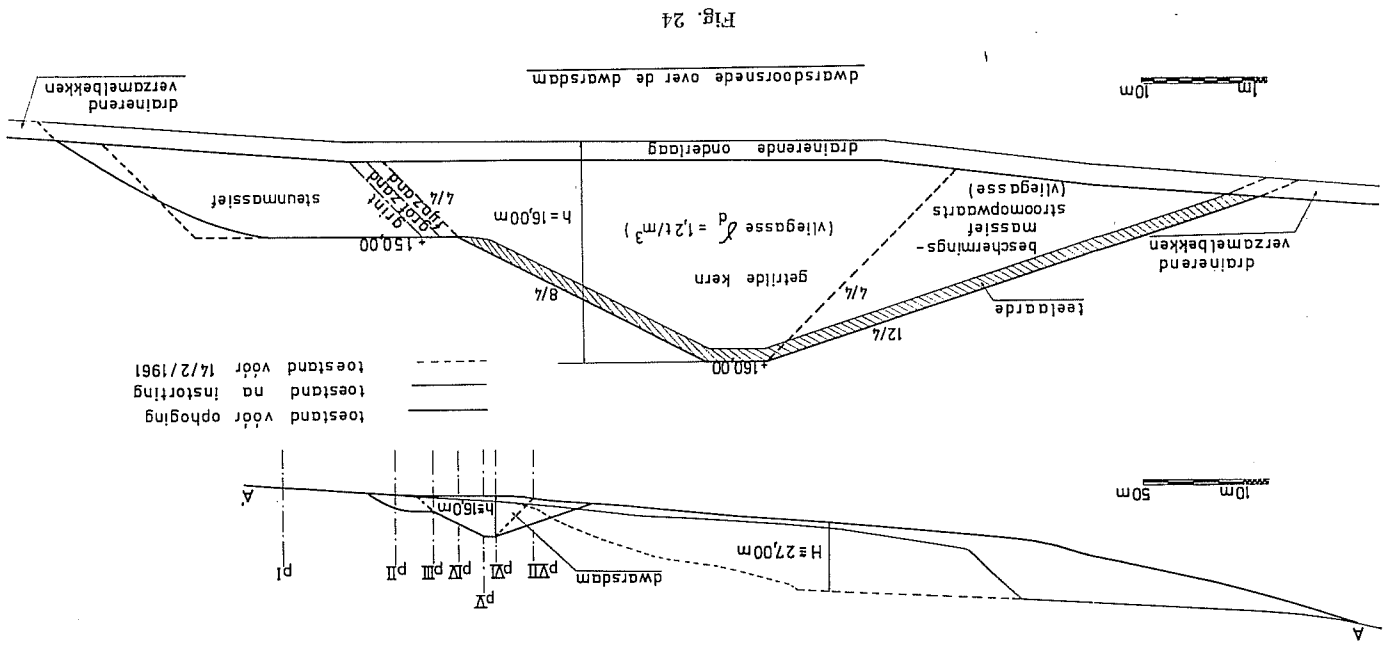


Fig. 24

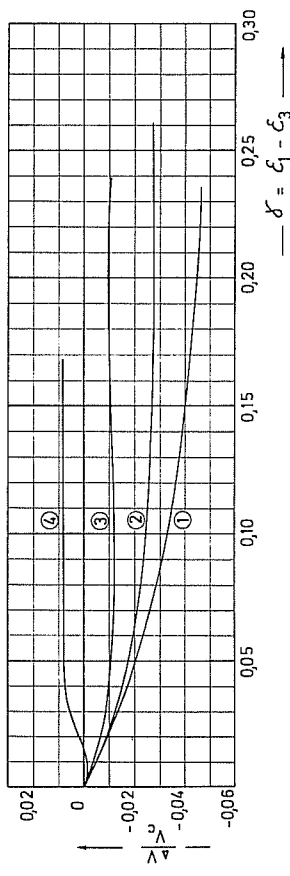
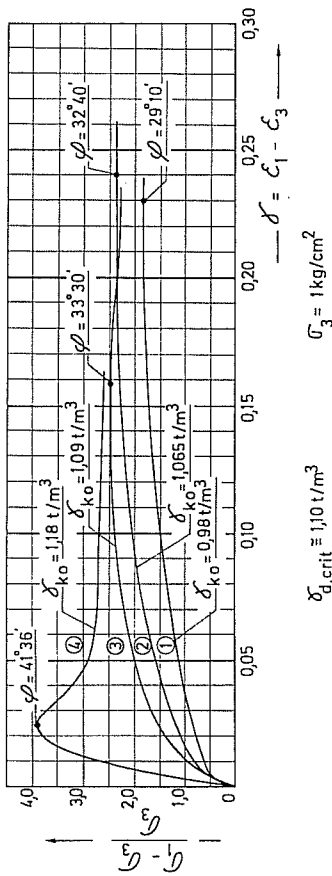


Fig. 23

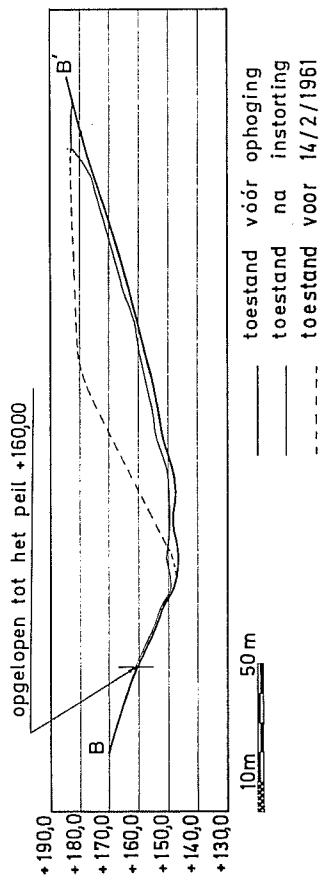


Fig. 25

De dwarsdam wordt opgebouwd met de vliegasse doch thans verdicht tot $1,2 \text{ t/m}^3$. Daar er zich in het stort sedert 1961 geen nieuwe vervloeiingen meer hebben voorgedaan, heeft de dwarsdam als versperring tegen een modderstroom van vliegasse nog niet moeten fungeren.

C. STORT LE HENA TE LES AWIRS VAN DE S.A. LINALUX NABIJ LUIK [12]

Daar de Electriche centrale Linalux haar vliegasse dient kwijt te spelen, heeft men een nieuw stort dienen aan te vangen. Een stort is thans in uitvoering in de gemeente Les Awirs nabij Luik.

De bedoeling is de vliegasse aldaar op te stapelen tot een hoogte van circa 78 m. Een dwarsdoorsnede over het hoogste punt is op de figuur 26 gegeven.

DWARSDOORSNEDE van het STORT LE HENA te LES AWIRS

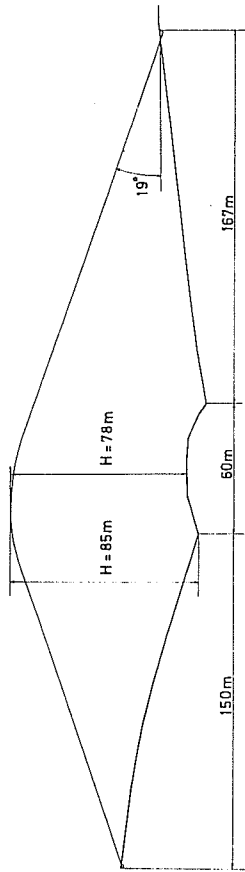


Fig. 26

De vliegasse dient grondig te worden verdicht ten einde een hogere dichtheid dan de kritieke dichtheid te vertonen.

Bovendien dient voor een behoorlijke drainage en ontwatering te worden gezorgd.

De kritieke dichtheid werd bij twee verschillende normaalspanningen bepaald.

Men vond :

bij $\sigma_3 = 1,0 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{d,crit} = 1,19 \text{ t/m}^3$
 bij $\sigma_3 = 10,0 \text{ kg/cm}^2$ $\gamma_{d,crit} = 1,28 \text{ t/m}^3$

Volgens WINTERKORN heeft men

$$\epsilon_{crit} = \epsilon_{crit}^0 - a \sigma_{k,m} \quad (8)$$

Tussen het drooggewicht γ_d en het poriëngetal ϵ bestaat het verband

$$\epsilon = \frac{\delta_k}{\gamma_d} - 1 \quad (9)$$

hetgeen ingevoerd in (8) geeft

$$\frac{\delta_k}{\gamma_{d,crit}} = \frac{\delta_k}{\gamma_{d,crit}^0} - a \sigma_{k,m} \quad (10)$$

hetgeen kan worden omgevormd tot

$$\frac{\gamma_{d,erit}^0}{\gamma_{d,erit}} = 1 - \frac{a \gamma_{d,erit}^0 \sigma_{k,m}}{\delta_k} \quad (11)$$

Stel $\frac{a \gamma_{d,erit}^0}{\delta_k} = m = \text{coëfficiënt met dimensie } \frac{\text{m}^2}{\text{t}}$

$$\frac{\gamma_{d,erit}^0}{\gamma_{d,erit}} = 1 - m \sigma_{k,m} \quad (12)$$

Men krijgt

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\gamma_{d,erit}^0}{1,19} = 1 - 10 \text{ m} \\ \frac{\gamma_{d,erit}^0}{1,28} = 1 - 100 \text{ m} \end{array} \right.$$

Hieruit

$$m = \frac{1,28 - 1,19}{10 \times 1,28 - 10 \times 1,19} = \frac{0,09}{116,1} = 7,75 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{t}}$$

$$\gamma_{d,erit}^0 = (1 - 100 \times 7,75 \times 10^{-4}) 1,28 = 1,189 \text{ t/m}^3$$

Men krijgt dus

$$\gamma_{d,erit} = \frac{1,189}{1 - 7,75 \times 10^{-4} \sigma_{k,m}} \quad (13)$$

Dit is de vergelijking van een hyperbool, welke op de figuur 27 is getekend.

Naast de schaal der $\sigma_{k,m}$ is de schaal der hoogten aangegeven, in de veronderstelling dat het verwezenlijkte volumegewicht $\gamma_a = 1,30 \text{ t/m}^3$ bedraagt, en dat er 20 % water in het materiaal aanwezig is. Hiermede stemt een volumegewicht $\gamma = (1 + w) \gamma_a = 1,20 \times 1,30 = 1,56 \text{ t/m}^3$ overeen.

Derhalve heeft men voor $\sigma_{k,m} = 100 \text{ t/m}^2$, en in de ongunstigste veronderstelling $\sigma_{k,h} = \sigma_{k,v}$ een overeenstemmende hoogte

$$H = \frac{100}{1,56} = 64,50 \text{ m.}$$

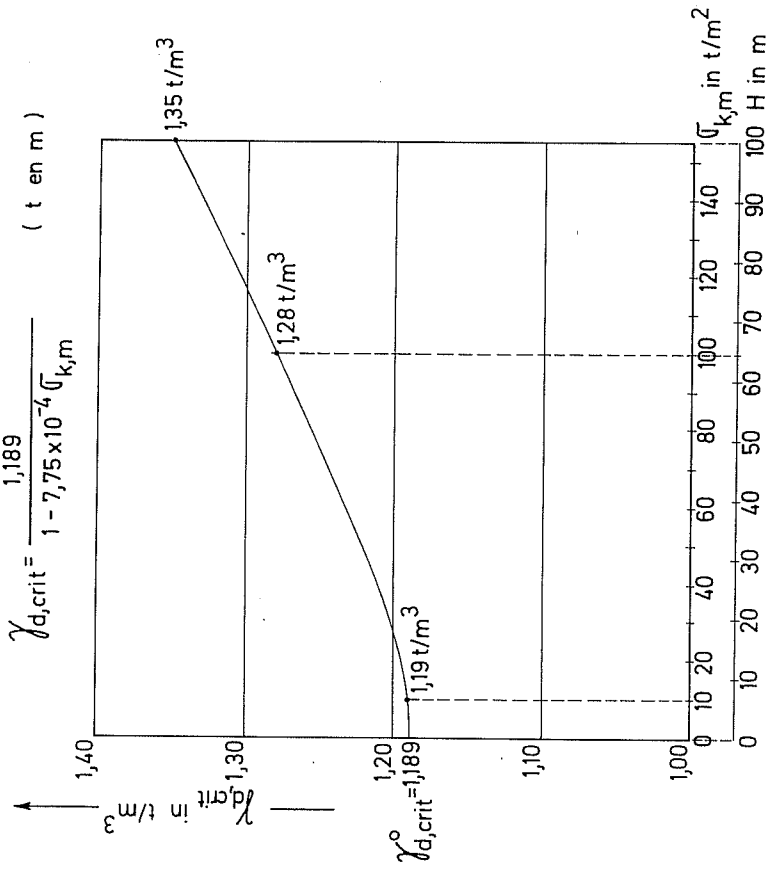


Fig. 27

Voor een hoogte $H = 100 \text{ m}$ heeft men met dezelfde ongunstige aandelen

$$\sigma_{k,m} = 100 \times 1,56 = 156 \text{ t/m}^2$$

en hieruit $\gamma_{d,erit}$

$$\gamma_{d,erit} = \frac{1,189}{1 - 7,75 \times 10^{-4} \times 156} = 1,35 \text{ t/m}^3$$

Voor een hoogte van $H = 78 \text{ m}$ heeft men op analoge wijze

$$\sigma_{k,m} = 78 \times 1,56 = 121 \text{ t/m}^2$$

en hieruit $\gamma_{d,crit}$

$$\gamma_{d,crit} = \frac{1,189}{1 - 7,75 \times 10^{-4} \times 121} = 1,31 \text{ t/m}^3$$

De maximum dichtheid bij de versterkte proctorproef bedraagt $\gamma_d = 1,33 \text{ t/m}^3$ bij een optimum watergehalte van 18,5 % (fig. 28). De curve is echter betrekkelijk vlak, zodat de invloed van het watergehalte niet zeer uitgesproken is. Vastgesteld wordt dat men voor een stort van 78 m hoogte een dichtheid welke praktisch gelijk is aan de optimum dichtheid in de versterkte proctorproef moet verwezenlijken.

De vliegasse wordt uitgespreid in lagen van 0,30 m tot 0,50 m, bij een watergehalte van circa 20 %, zijnde het watergehalte waarmede het uit de centrale komt. De vliegasse wordt verdicht met 3 tot 5 gangen van een trilwals van 3,5 ton. De verdichting wordt regelmatig gecontroleerd. Op 10 metingen, wordt geest dat het gemiddelde hoger ligt dan $1,3 \text{ t/m}^3$, met een absoluut minimum van $1,28 \text{ t/m}^3$.

VERSTERKTE PROCTORPROEF VLEGASSE LE HENA.

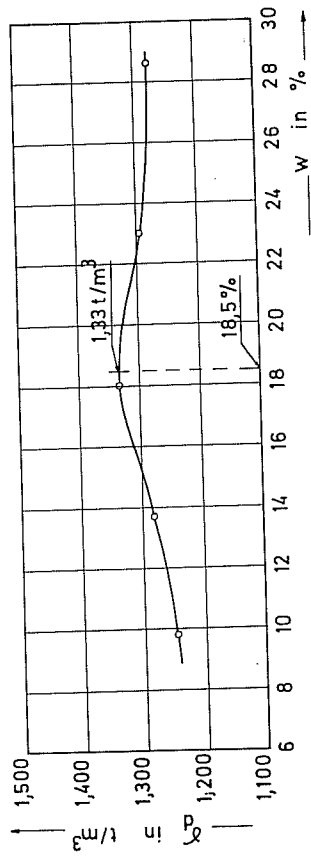


Fig. 28

D. AFSCHUIVINGEN VAN KANAALGLOOINGEN [13] [14]

Bij de cutterwerken voor de verbreding van het Kanaal Gent-Ter-neuzen, en voor de verwezenlijking van het Kanaaldok te Antwerpen, werden soms plotselinge vervloeiingen vastgelegd, welke tot ver buiten het te verwezenlijken profiel reiken. Dit is vanzelfsprekend zeer hinderlijk en veroorzaakt belangrijke bijkomende kosten.

Een cutter snijdt en zuigt de grond, waarbij zich een meer of min steil talud AB instelt (fig. 29). Wanneer dit talud dan verder wordt ondermijnd, doet zich een plaatselijke afschuiving AC voor. De kapitein van de cutter-

zuiger weet bij ervaring hoever de glijdschol ABC reikt en kan dus de opeenvolgende gangen van de machine zo kiezen, dat het theoretisch profiel MNP met een vrij goede benadering wordt verwezenlijkt.

Indien echter in drijfzand (zand losser gepakt dan de kritieke dichtheid) wordt gebaggerd, zo zal de primaire glijding ABC, tot het plotseling vervloeiën van een veel grotere massa AST kunnen voeren.

Dergelijke vervloeiingen kunnen a priori worden voorzien, wanneer men er slechts zorg voor draagt, voorafgaandelijk de pakingsdichtheid van de zandlagen te bepalen.

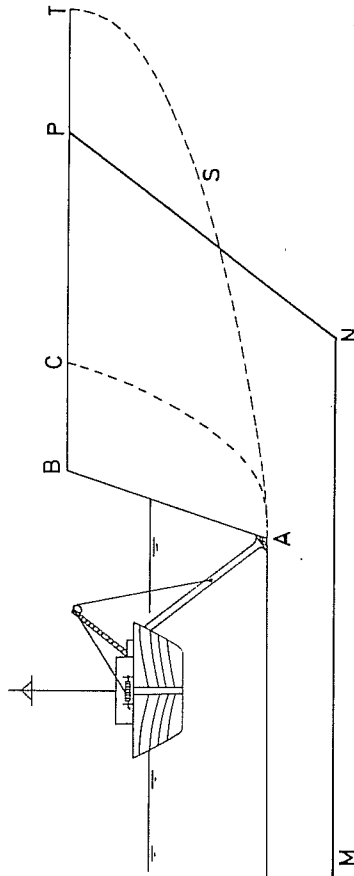


Fig. 29

De figuur 30 geeft een afschuiving welke is opgetreden tijdens het cutteren van het Kanaaldok, nabij de Zandvlietsluis te Antwerpen. Het zand is eerst onder een zeer flauw beloop tot rust gekomen. De figuur toont ook een sondering welke aan de rand van de afschuiving werd uitgevoerd. Er kan worden vastgesteld dat de vervloeiing is opgetreden in het zand dat slechts puntweerstand van 30 à 40 kg/cm^2 vertoont, en dat het dichtgepakte zand met puntweerstand groter dan 100 kg/cm^2 in evenwicht is gebleven. De fig. 31 toont een foto van de afschuiving.

De taludvoorzieningen tussen + 5,00 en + 0,00 had men reeds voor het baggeren van het Kanaaldok uitgevoerd; de opgetreden afschuiving heeft over een bepaalde afstand deze taludvoorzieningen volledig vernietigd.

Analoge vervloeiingen bij de cutterwerken worden regelmatig vastgesteld, wanneer drijfzanden aanwezig zijn. Dergelijke vervloeiingen worden vanzelfsprekend door de depressie welke aan de zuigermond bestaat in de hand gewerkt.

Een korrelverdeling van het zand van het Kanaaldok is op de fig. 32 gegeven. Het gaat wel degelijk om een middelmatig zand.

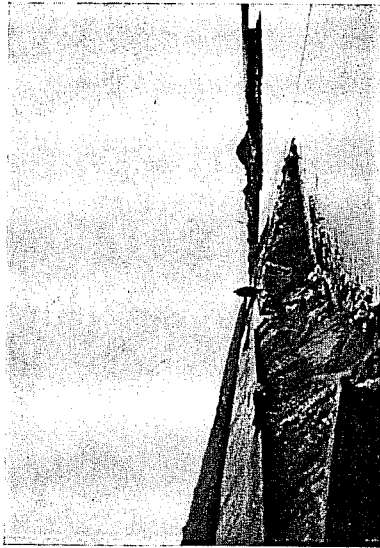
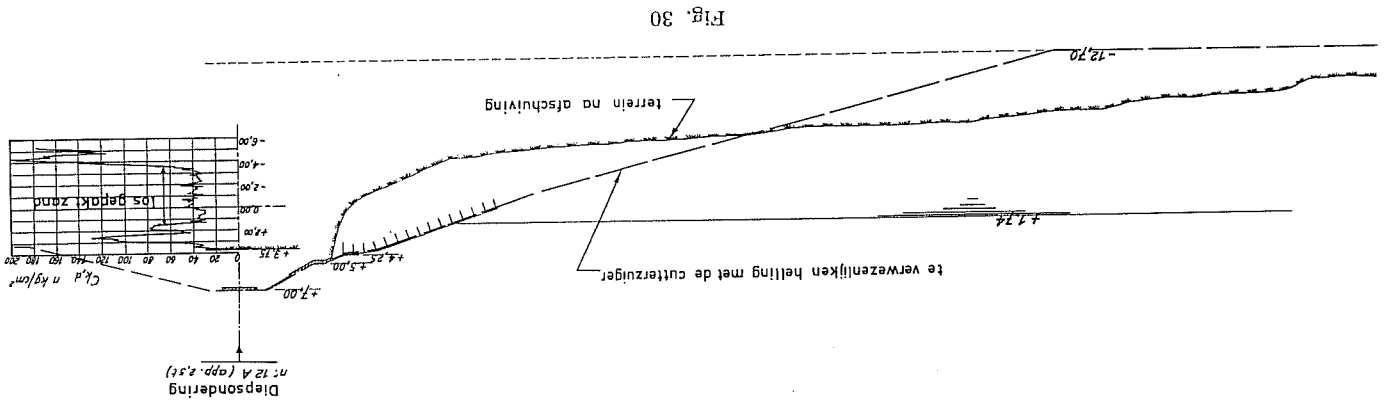


Fig. 31



KANAALDOEK NABIJ DE ZANDVLIETSLEUIS TE ANTWERPEN

ZAND KANAALDOK nabij ZANDVLIETSLUIS
KORRELVERDELINGSDIAGRAM

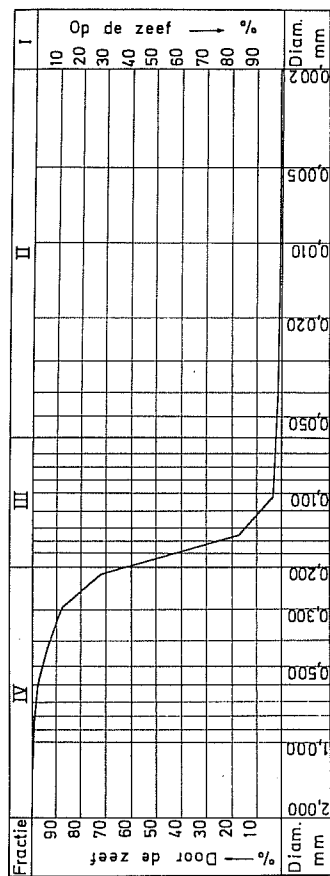


Fig. 32

Het maximum mogelijke poriënvolume

$$\eta_{\max} = 49,8 \%$$

$$\gamma_{d,\min} = 1,34 \text{ t/m}^3$$

Het minimum poriënvolume in een versterkte proctorproef

$$\eta_{\min}$$

$$\gamma_{d,\max} = 1,695 \text{ t/m}^3$$

ZAND KANAALDOK nabij ZANDVLIETSLUIS

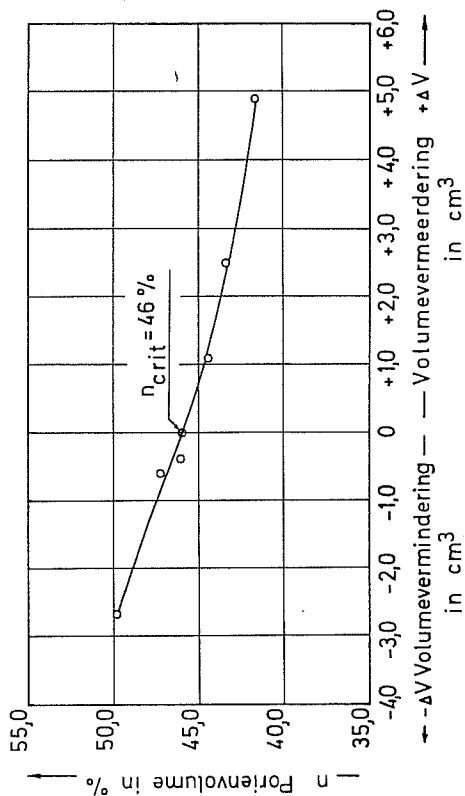


Fig. 33

Bij een spanningstoestand $\sigma_v = 0,56 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_h = 0,28 \text{ kg/cm}^2$ dit is de terreinspanning op halve hoogte van de laag, werden bij verschillende pakingsdichtheden celproeven verricht, en de volumeveranderingen gemeten. De resultaten zijn op de fig. 33 gegeven. Vastgesteld wordt dat de kritieke dichtheid bij circa $n_c = 46\%$ is gelegen, $\gamma_{d,crit} = 1,445 \text{ t/m}^3$.

Bij verschillende pakingsdichtheden werden ook konusproeven onder een bovenbelasting $p_b = 0,56 \text{ kg/cm}^2$ verricht. De aldus gevonden $C_{k,0}$ waarden zijn op de figuur 34a getekend.

Men kan schrijven

$$C_{k,0} \leq p_b e^{\pi \tan \varphi'} \operatorname{tg} (45^\circ + \varphi'/2) \quad (14)$$

Hieruit kan men een schijnbare wrijvingshoek φ' afleiden.

Verder heeft men voor de dieptekonusweerstand

$$C_{k,d} \leq C_{k,0} e^{\pi \tan \varphi'} \quad (15)$$

$C_{k,0}$ is in het laboratorium bepaald. φ' krijgt men uit de uitdrukking (14).

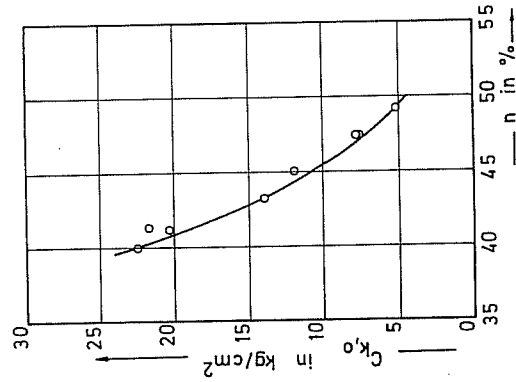


Fig. 34a

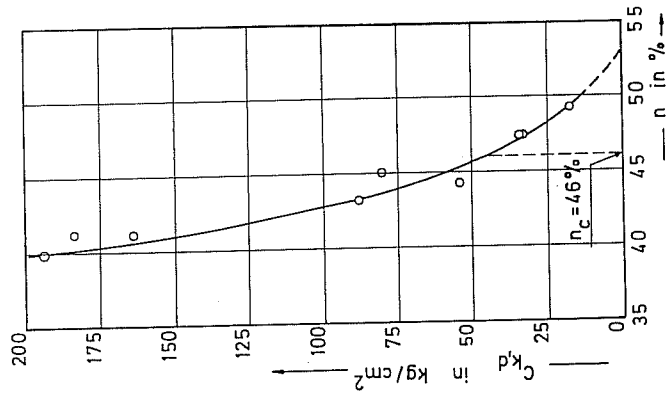


Fig. 34b

Uit de uitdrukking (15) kan men derhalve een bovenste grens voor de diepte konusweerstand afleiden.

Men krijgt de variatie van $C_{k,d}$ in functie van het poriënvolume der fig. 34b. Vastgesteld wordt dat voor $n_c = 46\%$, de overeenstemmende dieptekonusweerstand circa 35 kg/cm^2 bedraagt. Conusweerstand kleiner dan 35 kg/cm^2 wijzen derhalve op drijfzand.

De sondering 12A toont aan dat van $+1,50$ tot $-3,50$ de $C_{k,d}$ waarden gemiddeld variëren tussen 30 en 40 kg/cm^2 (fig. 35). Men is dus zeer dicht bij de kritieke dichtheid.

Sondering Kanaaldok nabij Zandvlietslujs

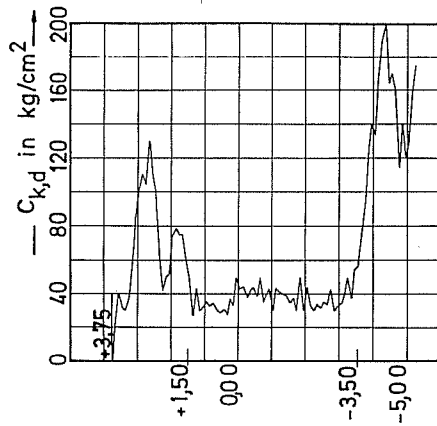


Fig. 35

CONCLUSIES

1. Bij onafhankelijke gronden bestaat bij een gegeven spherische spanningstoestand een bepaalde pakkingdichtheid voor dewelke bij stijgende deviatorische spanningen geen volumeverandering optreedt. Dit is de kritieke pakkingdichtheid overeenstemmend met de beschouwdede spherische spanning σ_m .
2. Onafhankelijke gronden welke verzadigd zijn met water en een geringere pakkingdichtheid dan de kritieke bezitten, verkeren in een toestand van labiel evenwicht. De minste plaatselijke evenwichtsverstoring kan zich tot een grote massa uitbreiden en deze doen vervloeden.
3. Voorgesteld wordt dat de technici de benaming „drijfzand” zouden voorbehouden aan zanden welke een lossere pakking dan de kritieke bezitten. Zand dat onder invloed van nadelige stromingsdrukken aan het lopen is, noeme men loopzand. De koppeling van het begrip „drijfzand” aan de kritieke dichtheid biedt het voordeel dat de kwade roep van het woord „drijfzand” aldus enkel wordt toegepast op zanden welke deze kwade roep verdienen, en niet langer op zanden welke onder de beste funderingsgronden dienen te worden gerekend.
4. De aanwezigheid van „drijfzanden” zoals hiervoor gedefinieerd kan worden aangetoond:
 - a) door sonderingen. Konusweerstand kleiner dan 30 à 40 kg/cm² in zuivere zanden wijzen op uiterst losse pakkingen.
 - b) door het nauwkeurig nagaan van de verschijnselen welke bij het verrichten van de boring optreden. De aanwezigheid van drijfzand blijkt uit het opwellen van het zand in het boorgat, zelfs wanneer de waterspiegel in het boorgat hoger dan het niveau van het P.O. wordt gehouden of ook nog door het feit dat de techniek van het boren zonder voerbuis niet toepasselijk blijkt te zijn.
5. Aangehouden wordt dat de dijkbreuk van de dijken van het Albertkanaal te Hasselt in 1938, de catastrofe van Jupille in 1961, en de oevervallen bij het cutterzuigen van diverse kanalen (Kanaaldok te Antwerpen, verbreding van het Kanaal Gent-Terneuzen, verbreding van het Kanaal om Brugge) aan de aanwezigheid van drijfzanden, dit zijn zanden lossere gepakt dan de kritieke dichtheid toe te schrijven zijn.

LITERATUUR

- [1] A. CASAGRANDE, Characteristics of cohesionless soils affecting the stability of slopes and earth fills. — *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, January 1936. Vol. XXIII, No 1.
- [2] O. T. FAROUKI and H. F. WINTERKORN, Mechanical properties of granular systems. — *Princeton Soil Engineering Research Series*, No 1, 1 January 1964.
- [3] H. F. WINTERKORN, Macromeritic Liquids. — *American Society for Testing Materials, Special Technical Publication*, No 156, pp. 77-89, 1953.
- [4] H. F. WINTERKORN, Shear resistance and equation of state for non-cohesive, granular macromeritic systems. — Paper presented at the Symposium on Equation of State of the Earth of the American Geophysical Union, 20th April 1966.
- [5] A. J. BATSCHINSKI, Investigations on the internal friction of liquids (in German). — *Z. Phys. Chem.*, Vol. 84, pp. 643-706, 1913.
- [6] J. KERISEL et A. CAQUOT, *Traité de mécanique des sols*. — 4^e édition, 1966. Gauthier-Villars, Paris.
- [7] Arpad KEZDI, Contribution tot the investigations of granular systems. — Department of Civil Engg., Princeton University, January 1964.
- [8] Verklarende nota betreffende de diepsonderingen uitgevoerd voor de studie van de funderingen van de brug te bouwen over de vaart te Plassendale in de Antosnelweg Brussel-Oostende te Plassendale. — Verslag van het Rijksinstituut voor Grondmechanica, 26 februari 1942. (niet gepubliceerd).
- [9] E. E. DE BEER, Grondmechanica, Deel III. — Het water in de grond. Standaard Boekhandel
- [10] E. E. DE BEER, De dijken van het Albertkanaal tussen Eigenbilzen en Hasselt. — *Tijdschrift der Openbare Werken van België*, juni, augustus, oktober en december 1946.
- [11] Rapport concernant les résultats des essais in situ et au laboratoire en vue de l'étude des travaux à exécuter au crassier de Moulin-sous-Fiéron à Jupille. — Rapport de l'Institut Géotechnique de l'Etat, 29 septembre 1961. (non publié).
- [12] Procès-verbal relatif aux résultats des essais triaxiaux effectués sur un échantillon de cendres volantes en provenance de la centrale des Awirs. — Rapports de l'Institut Géotechnique de l'Etat, 14 août 1963 et 13 novembre 1963. (non publié).
- [13] Verklarende note betreffende de resultaten van het grondonderzoek uitgevoerd langs het kanaal Gent-Terneuzen tussen Gent en Zelzate. — Verslag van het Rijksinstituut voor Grondmechanica, 6 augustus 1958. (niet gepubliceerd).
- [14] Aanvullende nota betreffende de resultaten van een bijkomend grondonderzoek ter plaatse van de oosterdijk van de zwaalkom te Zandvliet. — Verslag van het Rijksinstituut voor Grondmechanica, 13 oktober 1965. (niet gepubliceerd).