

Problemen bij de instandhouding van Sloottaluds

(nota nr. 115) juni 1961

Ir. J. J. Kouwe

1. Inleiding

6700 AB Wageningen

De sloot vormt in het Nederlandse landschapsbeeld een integrerend bestanddeel. De ontwatering en de afwatering van de landbouwgronden wordt praktisch geheel door de sloot verzorgd. Het regenwater dat op de hoge gronden valt, waar het slotennet zich beperkt tot wegsloten of greppels en perceelsscheiding greppels vindt uiteindelijk zijn weg door de ondergrond naar een sloot gelegen in de lager gelegen gronden.

Het belang van de sloot voor de ontwatering van de landbouwgronden wordt voorts nog aangetoond door enkele globale cijfers, voor de voornaamste grondsoorten aangevende het aantal meters sloot per ha:

Zoeklei	50 m/ha of 1.7% van het oppervlak
Rivierklei	80 m/ha of 2.4% van het oppervlak
Zandgronden	100 m/ha of 2.7% van het oppervlak
Voengronden	200 m/ha of 5 % van het oppervlak

Natuurlijk zijn er gebieden met veel grotere en veel kleinere slootlengten per ha. Wij behoeven slechts te denken aan het Coesterzandbaach in Noord-Holland en aan de hoge gronden met het gehele jaar door diepe grondwaterstanden, zoals op de Veluwe en de Utrechtse Heuvelrug.

Door vermenigvuldiging van het aantal meters sloot per ha met het oppervlak dat de vier grondsoorten innemen kan globaal de totale lengte aan sloot in Nederland berekend worden. Deze zou dan omstreeks 250.000 km bedragen met een oppervlak van 74.000 ha. Hierbij kunnen dan nog 25.000 ha aan wateren breder dan 5 m worden gevoegd, zodat het totaal aan oppervlakte waterleiding, dat meedoet aan de ontwatering en afwatering zo'n 99.000 ha beslaat.

Het zal duidelijk zijn, dat bij het voornemen tot in uitvoering nemen van 40.000 ha landbouwgronden in ruilverkaveling, belangrijke bedragen - 20 miljoen gulden - geïnvesteerd worden in werken die betrekking hebben op de waterbeheersing. Een onderdeel van deze waterbeheersingswerken heeft betrekking op het graven van nieuwe kavelsloten en het verbeteren van bestaande sloten en waterlopen.



11 FEB. 1998

1787093

In het afgelopen jaar 1960, waarin regenbuien van ongewone intensiteit gevallen zijn werden, aan bestaande sloten en waterleidingen veel beschadigingen toegebracht door het inzakken of tot afschaving komen van taluds. De grootte van deze schade landelijk gezien is niet bekend, doch deze kan in de miljoenen gulden lopen.

## 2. Doel van het onderzoek

Bij het graven van kavelsloten en waterlopen wordt de keuze van de toe te passen taludhellingen voornamelijk bepaald door de ervaringen die de praktijk gedurende vele tientallen jaren heeft opgedaan. Taludhellingen worden vastgesteld op grond van de grondsoort, de afmetingen van de te graven sloot of leiding en het aanbrengen van beschoeiingen en betuiningen. Dat deze ervaring soms te kort schiet wordt aangetoond door bepaalde gevallen van zeer ernstige beschadigingen van taluds en door grote moeilijkheden bij het graafwerk. In vele gevallen kunnen na het graven optredende beschadigingen achteraf door het aanbrengen van stapel- en plakzoden en van een betuining op afdoende wijze hersteld worden, doch er zijn objecten waar men moeilijkheden blijft houden.

Het lijkt van belang om door middel van een eenvoudig vooronderzoek uitvoerende instanties te kunnen adviseren tot het aanhouden van bepaalde taludhellingen, het treffen van bijzondere maatregelen op plaatsen waar moeilijkheden worden verwacht, zoals het aanbrengen van beschoeiingen en betuiningen of het toepassen van bijzondere werkmethoden.

## 3. Enkele vormen van taludbeschadiging

Wanneer de taludbeschadigingen veroorzaakt door niet natuurlijke factoren buiten beschouwing gelaten worden, dan zijn de meest voorkomende vormen ervan:

- A de erosie
- B onderspoeling
- C afkalving
- D afschaving

A. De taluderosie is het gevolg van over het kale en dus onbeschermd verne talud stromende water. Dit water kan dan afkomstig zijn van rechtstreeks op het talud oppervlak vallende regenwater, regenslag dus. Ook kan dit water afkomstig zijn van regenwater dat over het naar de sloot

toe hellende maaiwald stroomt. Ten derde oorzaak wordt gevormd door het in de kwelzone uittrekkende grondwater, dat langs het talud naar beneden sijpelt. Dit vindt veelal plaats onder een verhang van 0,70 of 1,55, waardoor de in het talud liggende fijnere bodemdeeltjes worden uitgespoeld en ook grovere bodemdeeltjes in beweging komen, resulterende in het zich vormen van puin-kegels onder aan het talud. In geval van afvloeiend water worden deze kwelstromen als roestige banen zichtbaar.

De taluderosie kan in het algemeen gemakkelijk voorkomen worden door maatregelen die een snelle begroeiing van het verse en dus kale oppervlak bevorderen. Bij het aanleggen van nieuwe sloten kan erop gelet worden dat het maaiwald niet naar de sloot toekelt met het eerder genoemde gevolg.

### B. Onterspoeling

Deze vorm van beschadiging van sloothinten wordt veroorzaakt door het optreden van te grote stroomsnelheden. Er vindt dan zandtransport plaats, terwijl in bochten en op andere plaatsen waar de stroomdraad de sloothint raakt beschadiging optreedt. In grotere waterlopen en rivieren vormt onderspoeling een sluipend gevaar, daar het proces zich aan directe waarneming onttrekt. Beperking van de optredende stroomsnelheden tot de maximaal toelaatbare is in dit geval de remedie. Deze toelaatbare stroomsnelheden wisselen voor de grondsoorten. Voor zandgronden wordt als bovengrens veelal 20-50 cm/sec. aangehouden, terwijl voor samenhangende gronden (klei, leem, löss) de snelheden groter mogen zijn namelijk 60-80 cm/sec.

### C. Afkalving

Afkalving van het talud is veelal het directe gevolg van onderspoeling. Van het onderspoelde talud breken stukken af tengevolge van het wegvallen van ondersteuning aan de onderzijde. Deze brokken kantelen als het ware voorover de sloot in. Deze vorm van beschadiging treedt ook op als secundaire beschadiging na een zich voorgedaan hebbende beschadiging door de hierna te noemen afschuiving van taluds.

### D. Afschuiving

Deze vorm van talud-beschadiging vormt het eigenlijke onderwerp van bestudering. Het vormt wellicht een van de moeilijkste problemen

waarmee de uitvoerende instanties zich soms geconfronteerd zien. De eerder genoemde vormen van taludbeschadiging zullen hier verder onbesproken blijven, zodat wij ons in hoofdzaak met het probleem van de afschuiving zullen bezig houden.

Een aanzien van de benaming van het verschijnsel bestaat in kringen van landbouwkundigen een zekere verwarring van terminologie. Men hoort termen als "inschuiving", "afschuiving" en "instorting" door elkaar voor de aanduiding van hetzelfde verschijnsel gebruiken. Het komt mij voor dat de term "afschuiving" die in de civieltechniek <sup>het</sup> meest gebruikelijke is, zodat deze dan ook verder zal worden aangehouden.

Tot besluit van deze opsomming van oorzaken van beschadiging van sloottaluds worden nog genoemd de bevroezing en de welvorming. Bevroezing van onvoldoende begroeiide taluds kan bij het ontdooien aanleiding geven tot het vervloeden en afglijden van grond, doch dit verschijnsel is veel minder sprekend dan de eerdergenoemde beschadigingstypen.

De welvorming is een sluipend gevaar. De onschuldige uitziende welletjes in slootbodems kunnen ondermijnend werken. Door hoge stroomsnelheden in de welbanen worden de fijnere bodemdelen uitgespoeld, zodat de welbaan zich steeds verder het talud invreest op de wijze van de "terugschrijdende erosie" van een rivier. Het gevolg hiervan is meer een toenemend verhang, zodat dit proces zichzelf versterkt, totdat tenslotte de welbaan verstoord wordt door instorting van de bovenliggende grond, of afschuiving van het talud ter plaatse van de wel.

#### 4. Het medium grond:

De grond kan gezien worden als een driefasig-stelsel namelijk met een:

vaste fase  
een vloeibare fase  
een gasvormige fase.

In een volume eenheid grond kunnen de verschillende fasen in verschillende verhoudingen tot elkaar voorkomen. Het deel dat door de vloeibare en de gasvormige fase gezamenlijk wordt ingenomen wordt het poriënvolume genoemd. In de grondmechanica wordt meestal gewerkt met het begrip poriënetal, dat weergeeft de verhouding van het volume aan poriën tot het volume aan vaste delen. Hiervoor wordt gebruikt het symbool "e". In kringen van landbouwkundigen wordt meestal gewerkt met het begrip poriëngehalte, voorgesteld door "n", dat de verhouding aangeeft van het

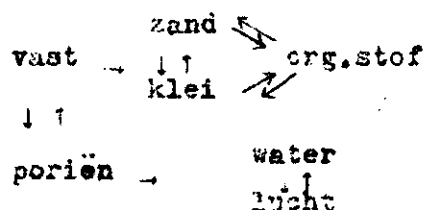
volume van poriën tot het totale volume van een zekere hoeveelheid grond. Het verband tussen beide wijzen van beschouwen wordt weergegeven door de betrekking:

$$e = \frac{n}{1-n} \quad \text{of} \quad n = \frac{e}{1+e}$$

De oorzaken waardoor afschuiving van een zandwal talud kan optreden kunnen zijn:

1. verhoging van de schuifspanning in de grond
2. vermindering van de schuifweerstand van de grond
3. stromingsdruk.

De stabiliteit van een grondlichaam wordt bepaald door de inwendige weerstand die dit grondlichaam kan opbrengen tegen de daarop werkende vervormende krachten. Hierbij hebben <sup>we</sup> dus te maken met het systeem



Bunushoudende en venige gronden worden verder buiten beschouwing gelaten.

De vaste delen bepalen in hoge mate de grondmechanische eigenschappen van de grond.

een tweedeling<sup>ge</sup> maakt onderscheid tussen samenhangende (klei) en niet-samenhangende gronden (zand).

Tussen deze beide uitersten kunnen een aantal overgangen zich voordoen. afhankelijk van de soort van kleimineralen en het gehalte en de vorm daarvan kunnen deze samenhangende gronden stevig of slap zijn bij een zeker watergehalte. Kleigronden bestaande uit hoofdzakelijk plaatvormige kleimineralen in de lutumfractie, welke bovendien nog voorzien zijn van een geadsorbeerde watersmantel kunnen bijzonder slap zijn en zeer gevoelig voor plastische vervorming. Samenhangende gronden zijn voorts onderhevig aan cohesie krachten die de grond in droge toestand zeer hard maken. Een andere eigenschap van kleigronden is de neiging tot zwellen en krimpen bij wisselende watergehaltenes en wisselende belastingen. De dikwijls geringe doorlatendheid van deze gronden is voorts nog een factor van betekenis.

De niet-samenhangende gronden worden in hoofdzaak gevormd door de

zandgronden. In deze gronden treden in droge toestand geen cohesie krachten op. Een zeker gehalte aan afslibbare delen echter geeft ook aan zand een zekere samenhang. Nat zand heeft ook een zekere samenhang veroorzaakt door de capillaire krachten die de gronddeeltjes tegen elkaar aanrukken. Men spreekt daarom ook wel van schijnbare cohesie.

De stevigheid van zand lichamen wordt ondermeer bepaald door de korrelvorm. Deze korrels kunnen hoekig of afgerond zijn, waarmee de weerstand tegen het langs elkaar heen schuiven samenhangt: de inwendige wrijving verbandhoudende met de later te noemen hoek van inwendige weerstand en de haakweerstand, een weerstand die de korrels onder vinden bij het langs elkaar heen schuiven, zonder dat ze tegen elkaar aan gedrukt worden; deze weerstand is te vergelijken met een soort "cohesie".

Het volume aan poriën in de grond wordt geheel ingenomen door water bij verzadigde gronden ( $G=1$ ) en door lucht bij geheel droge grond ( $G=0$ ). Tussen de verzadigingsgraad 0 en 1 bevat de grond wisselende hoeveelheden lucht en water.

Het water komt voor als vrij- of freatisch water met een positieve spanning, als capillair water met een negatieve spanning en in geadsorbeerde toestand.

De lucht komt voor als vrije lucht, in verbinding staande met de vrije atmosfeer via de capillairen in de grond, als ingesloten lucht en als geadsorbeerde lucht.

De verhouding tussen het volume aan vaste delen en poriën van de grond bepaalt of men te maken heeft met een vaste of een losse grond. Een bijzondere positie neemt het kritische poriëngehalte in, waar zich tijdens de schuifproef, waarbij dus het weerstandsvermogen van de grond tegen schuifkrachten wordt onderzocht, geen volume veranderingen van het grondmonster voordoen. Bij zulk een schuifproef gaan losgepakte gronden een kleiner- en vastgepakte gronden een ruimer volume innemen (fig. 1).

Het gehalte aan poriën beïnvloedt verder de doorlatendheid van de grond, een eigenschap die mede het consolidatie vermogen ervan bepaalt, waaronder verstaan wordt het vermogen van de grond om zich aan een situatie met gewijzigde spanningeverhoudingen aan te passen.

Beweegt het volumegewicht van de vaste korrelmassa zich binnen nauwe grenzen, met als gemiddelde  $\gamma_k \approx 2,65$  het volumegewicht van de grond wordt sterk beïnvloed door het poriëngehalte ( $n$ ) en het watergehalte ( $w$ ). Vernadigde grond heeft een volumegewicht  $= n + (1-n)\gamma_k$  ter zijl uit bij geheel droge grond  $\gamma = (1-n)\gamma_k$  bedraagt. Daar tussen in bedraagt

$$\gamma = (1-n)\gamma_k + w(1-n)\frac{\gamma_k}{\gamma_w} \quad (w \text{ in gewichts } \% \text{ van de vastedelen})$$
$$\gamma = (1+w)(1-n)\gamma_k$$

en voor  $\gamma_w = 1$

Het onderwatergewicht van de grond is

$$\gamma' = (1-n)(\gamma_k - \gamma_w) = (1-n)(\gamma_k - 1)$$

### 5. De Krachten in de grond

In de grondmechanica wordt het systeem grond en de daarin en daarop werkende krachten op twee wijzen beschouwd, welke beschouwingswijzen los van elkaar staan.

Bij de eerste beschouwingwijze beziet men een volume deel grond (bijv. vast-vloeibaar) en gaat na welke krachten hier op werken. Evenwicht van krachten moet er bestaan tussent:

- A. 1. het gewicht van de grond-water-massa;
2. de resultante van alle waterdrukken die op de begrenzing van het grondelement werken;
3. de resultante van alle korrelspanningen die op de begrenzingen van het element werken.

Bij de tweede beschouwingwijze gaat men uit van de gronddeelen, die als het ware het grondskelet vormen. De krachten die evenwicht moeten maken zijn:

- B. 1. het gewicht van de korrels;
2. de resultante van de waterdrukken op de individuele korrels;
3. de resultante van alle korrelspanningen op de grensvlakken van het grondelement.

De krachten A.3 en B.3 noemt men de weerstandskrachten (restraining forces). Deze zijn bij evenwicht gelijk, doch tegengesteld gericht, aan de krachten onder A.1 en 2 en B.1 en 2 genoemd. Deze laatste zijn dus de gezamenlijke krachten uitgeoefend door het water en door de zwaartekracht. In het Engels wordt de resultante hiervan "resultant body force" genoemd.

Het zal van het te onderzoeken probleem afhangen, welke van de twee beschouwingwijzen men zal gebruiken.

In een vlak terrein waarin zich het water in hydrostatisch evenwicht bevindt, er is dus geen stroming, neemt met de diepte de gronddruk toe. In het terrein zijn dus alle krachten met elkaar in evenwicht.

Afhankelijk van de diepte onder maai veld bestaat er een zekere spanning waarmee de korrelmassa tegen elkaar gedrukt wordt: de korrelspanning  $p_k$ . Op dezelfde diepte bestaat ook een zekere waterspanning  $p_w$  (fig. 2).



Korrel- en waterspanning leven gezamenlijk de gronddruk. Tussen beide spanningen bestaat de betrekking.

$$p_{\text{grond}} = p_k + p_w$$

Wordt dus de  $p_w$  gewijzigd dan verandert ook  $p_k$  zodat  $p_g = p_k + p_w$  blijft. Onder spanning wordt steeds de kracht per eenheid van oppervlakte verstaan. De normaalspanning is de kracht per eenheid van oppervlakte loodrecht op het vlak dat beschouwd wordt, terwijl de schuifspanning de kracht per eenheid van oppervlakte is evenwijdig aan dit vlak werkend. Een spanning werkend op een willekeurig vlak kan dus steeds in een normaal- en een schuifspanning ontbonden worden.

In de grondmechanica onderscheidt men bij de spanningsleer voor vaste stoffen in geval van een ruimte-spanningstoestand drie onderling loodrechte schuifspanningsloze hoofdspanningsvlakken met loodrecht daarop werkende de drie hoofdspanningen, namelijk de grootste, de middelste en de kleinste-hoofdspanning (resp.  $p_1$ ,  $p_2$ , en  $p_3$ ). In het geval van een vrij grondprisma werkt  $p_1$  verticaal en  $p_2 = p_3$  horizontaal. De ligging van de hoofdspanningsvlakken wordt bepaald door de richting van de hoofdspanningen.

Erken op een grondlichaam de drie onderling loodrechte hoofdspanningen  $p_1 \neq p_2 \neq p_3$  dan kan men voor ieder willekeurig gekozen vlak in dat lichaam de resultante van de ontbondenen van de hoofdspanningen loodrecht op en evenwijdig aan dat vlak bepalen. Men houdt dan over een normaalspanning loodrecht op het vlak en een schuifspanning evenwijdig aan en in dit vlak werkend. Kiest men de richting van het vlak evenwijdig aan de middelste hoofdspanning  $p_2$ , dan oefent deze geen invloed uit op de door  $p_1$  en  $p_3$  veroorzaakte normaal- en schuifspanning op en in dat vlak.evens zal duidelijk zijn dat de combinatie van  $p_1$  en  $p_3$  eerder aanleiding zal geven tot overschrijding van de evenwichtstoestand dan de combinatie van  $p_1$  en  $p_2$  of van  $p_2$  en  $p_3$ . Derhalve kan

de middelste hoofdspansing  $p_2$  verder buiten beschouwing blijven (zie fig. 4).

Wanneer er in een vlak onder een hoek  $\alpha$  met de kleinste hoofdspansing evenwicht van krachten bestaat in een grondlichaam, dan is de schuifspanning  $S$  gelijk aan de schuifweerstand  $\mathcal{W}$  van de grond. Door Coulomb werd tussen de schuifweerstand  $\mathcal{W}$  en de normaalspanning  $p$  de volgende betrekking gevonden (zie fig. 5).

$$\begin{aligned} S &= \mathcal{W} = C + p \operatorname{tg} \varphi, \text{ waarin } C \text{ de cohesie van de grond is.} \\ \text{wanneer} \quad p &= \frac{1}{2} (p_1 - p_3) \operatorname{tg} 2 \alpha + \frac{1}{2} (p_1 + p_3) \\ S &= \frac{1}{2} (p_1 - p_3) \operatorname{tg} 2 \alpha \end{aligned}$$

Tussen  $S$  en  $p_k$  bestaat een vast verband, dat in de zogenaamde cirkel van Mohr wordt weergegeven (fig. 5).

De kritieke toestand voor afschuiving ontstaat nu wanneer de cirkel met zijn middelpunt op  $\frac{1}{2}(p_1 + p_3)$  en met een straal gelijk  $\frac{1}{2}(p_1 - p_3)$  raakt aan de lijn  $\tau = p \frac{S}{C}$  (cohesie  $C = 0$  verondersteld zand). Dan is de verhouding  $\frac{S}{p}$  maximaal, want  $\frac{S}{p} = \frac{C}{p}$ .

Uit de figuur kan verder nog de volgende betrekking tussen  $p_1$  en  $p_3$  worden afgeleid:

$$p_1 = 2 \cdot C \cdot \operatorname{tg} \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) + p_3 \cdot \operatorname{tg}^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right).$$

Het vlak van afschuiving maakt een hoek  $\alpha = 45 + \frac{\phi}{2}$  met de richting voor de kleinste hoofdspansing  $p_3$  en een hoek  $45 - \frac{\phi}{2}$  met de richting van de grootste hoofdspansing  $p_1$ .

#### 6. De krachten werkende op de gronddelen liggende in het vlak van het sloottalud

De vraag is thans hoe de in het voorgaande besproken theorie een verklaring kan bieden voor de stabiliteit van sloottaluds. De in het talud werkende krachten zijn :

Gewicht van de korrelmassa per volume eenheid  
Schuifweerstand  
Stromingsdruk

Op een gronddeeltje van het onder hoek  $\alpha$  staande talud werkt alleen het gewicht  $G$ . Loodrecht op het talud staat de ontbondene (fig. 6)

$$p = G \cos \alpha$$

en evenwijdig aan het talud  $s = G \sin \alpha$

De wrijvingsweerstand die maximaal kan worden opgebracht is nu volgens Coulomb :

$$S = R = C + p \cdot \operatorname{tg} \varphi = C + G \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi$$

Wanneer  $C = 0$  verondersteld wordt, dan kan de resultante  $G$  hoogstens een hoek  $\varphi$  maken met de normaal op het talud, waaruit volgt dat afschuiving plaatsvindt indien  $s = G \cos \varphi \operatorname{tg} \varphi = G \sin \varphi$ . Voor  $\varphi = 30^\circ$  (zandgrond) is  $s = \frac{1}{2} G$ .

Stromend water oefent op de gronddelen een druk uit, de stromingsdruk. Wordt ten behoeve van de doorstroming van een grondelement met afmetingen  $dl$ ,  $db$  en  $l$  een potentiaalverschil  $\Delta h$  verbruikt dan wordt op dat grondelement een kracht uitgeoefend, gelijk aan:

$$\Delta h \cdot \gamma_w \cdot db \cdot l.$$

of per volume eenheid  $\frac{\Delta h \cdot \gamma_w \cdot db \cdot l}{\Delta b \cdot db \cdot l} = \frac{\Delta h}{\Delta b} \gamma_w = i \gamma_w$

De stromingsdruk is dus gelijk aan  $i \gamma_w$  en werkt in de stromingsrichting. Een vertikaal gerichte waterstroom in een zandgrond met een onderwatergewicht van 1 zal bij een verhang  $i = 1$  overgaan in drijfzandtoestand omdat  $p_k = 0$  geworden is. Het verhang waarbij dit gebeurt wordt het kritieke verhang genoemd.

In het geval dat er op een gronddeeltje in het talud naast de zwaartekracht nog een horizontaal gerichte stromingsdruk  $i \gamma_w$  werkt geeft de evenwichts voorwaarde (zie fig. 7).

$$\operatorname{tg}(\beta - \alpha) = \frac{\gamma_w \cdot i}{g} = \frac{\gamma_w \cdot i}{(\gamma_k - \gamma_w)(1-n)}$$

voor  $n = 0.4$ ,  $\gamma_w = 1$  en  $\gamma_k = 2,65$  terwijl in het talud  $i = \operatorname{tg} \alpha$  is  
wordt  $\operatorname{tg}(\beta - \alpha) = \operatorname{tg} \alpha$

$\beta$  kan maximaal gelijk  $\varphi$  zijn in welk geval de invondige weerstand wordt overschreden dus,

$$\operatorname{tg}(\varphi - \alpha) = \operatorname{tg} \alpha$$

voor  $\varphi = 30^\circ$  wordt  $\alpha = 15^\circ$ , een talud van 1 : 3,75

In werkelijkheid zal in de nabijheid de stromingsrichting niet horizontaal gericht zijn. Er bestaat voorts een zekere wetmatigheid bij de overgang van het freatisch vlak in de grond naar het vrij water oppervlak in de sloot. Deze overgang zal steeds moeten geschieden door middel van een kweloppervlak, dat in de regel smal is.

In een punt A van het freatisch vlak (zie fig. 8a) geldt:

$$V_A = k \cdot i = k \cdot \frac{dh}{ds} = k \sin \alpha^1$$

In B dat zowel deel uitmaakt van het talud met taludhelling  $\alpha$  als van het freatisch vlak geldt:

$$\left. \begin{array}{l} V_B = k \sin \alpha^1 \\ \text{en } V_t = k \sin \alpha \end{array} \right\} \text{Hieruit volgt } \alpha^1 = \alpha$$

dus het freatisch vlak raakt in B het talud.

In een punt C van de kwelzone maakt de stromingsrichting een zekere hoek  $\beta$  met het vlak van het talud. Nu geldt :

$$V_c = V_t \sec \beta \text{ waarin } V_t = k \sin \alpha$$

$$\text{zodat } V_c = k \sin \alpha \sec \beta$$

de component van  $V_c$  loodrecht op het talud is dan

$$V_n = V_c \sin \beta = k \sin \alpha \sin \beta \sec \beta$$

$$= k \sin \alpha \operatorname{tg} \beta$$

in het punt F staan de stroomlijnen loodrecht op het talud en is  $\beta = 90^\circ$  zodat :

$$V_n = k \sin \alpha \operatorname{tg} 90^\circ = \infty$$

Het trefpunt tussen vrijwater oppervlak in de sloot en talud vormt dus een zeer kwetsbaar punt. Hierin heeft de vertikaal op het talud staande stromingscomponent zijn maximale waarde, die slechts begrensd wordt door de doorlauftfactor van de grond. Bovendien wordt op dit punt het talud belaagd door stroming in de sloot en door golfslag.

Over het traject van de kwelzone op het talud wisselt de hoek  $\beta$  waaronder de stroomlijnen het talud snijden dus van  $0^\circ$  bij B tot  $90^\circ$  bij A.

Volgens figuur 8b geldt voor ieder punt C van het talud gelegen tussen B en A bij evenwicht van krachten:

$$\operatorname{tg}(\varphi - \alpha) = \frac{iY_w \cos(\alpha - \beta)}{Y_g - Y_w + iY_w \sin(\alpha - \beta)} = \frac{i \cdot \cos(\alpha - \beta)}{1 + i \cdot \sin(\alpha - \beta)}$$

In dit geval is  $i = \frac{\sin \alpha}{\cos \beta}$  (fig. 8c)

$$\text{en: } \operatorname{tg}(\varphi - \alpha) = \frac{\sin \alpha \cos(\alpha - \beta)}{\cos \beta + \sin \alpha \sin(\alpha - \beta)}$$

na omwerking volgt de betrekking:

$$\cotg \alpha = 2 \cotg \varphi + \operatorname{tg} \beta$$

Deze uitkomst geeft wanneer  $\varphi = 30^\circ$  wordt gesteld en bij

	$\beta = 0^\circ$	$15^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$60^\circ$	$75^\circ$	$90^\circ$
voor	$\alpha = 16^\circ$	$15^\circ$	$14^\circ$	$13^\circ$	$11^\circ$	$8^\circ$	$0^\circ$

In de kwelzone zou dus de taludhelling slechts 1:3,9 kunnen zijn bij het raakpunt van het freetisch vlak aan het talud, waarna vanaf dit punt een steeds vlakker beloop zou moeten worden aangebracht. Evenwel zijn de kwelzones in de regel smal zodat daarmee in de praktijk geen rekening gehouden kan worden.

Op deze wijze kan ook de invloed van ondoorlatende lagen beïnvloed worden, waarin de sloot insnijdt. Figuur 9a tot en met 9c geeft deze situatie weer. Voor de volgende gevallen is de grootte van  $V_n$  in punt A schematisch weergegeven:

$$\beta < 90^\circ \quad V_n = 0$$

$$\beta = 90^\circ \quad V_n = k \cos \alpha$$

$$\beta > 90^\circ \quad V_n = \infty \quad \text{In dit geval bestaat dus gevaar van}$$

uitspoeling in punt A.

Het aanbrengen van een ondoorlatende, of slechtdoorlatende talud- of bodembekleding in een drainerende sloot heeft naast het gevaar voor oprisping van deze bekleding nog tot gevolg dat zich een brede kwelzone boven de bekledingsrand gaat vormen. Hierdoor wordt de onderrand van het talud met doorwerking bedreigd. Daar de noodzaak tot het aanbrengen van bekledingen zich het sterkst doet gevoelen bij gronden waarin gegraven sloottaluds van nature reeds gevoelig zijn voor afschuiving, betekent het aanbrengen van ondoorlatende bekledingen in drainerende leidingen het introduceren van nieuwe gevaren.

## 7. De krachten in het iwendige van een talud

Teneinde enig inzicht te krijgen in het samenspel van krachten dat zich voordoet bij de stabiliteit van aardentaluds zal in de eerste plaats besien worden de toestand die zich voordoet bij een verticale ingraving in samenhangende grond. Zoals eerder vermeld spelen in deze gronden

cohesiekrachten een belangrijke rol. Aangezien echter bij vochtige zandgronden de capillaire krachten zich gedragen als een "schijnbare cohesie" geldt dus deze beschouwing bij benadering ook voor vochtige zandgrond. Evenwel is de schijnbare cohesie in dit geval sterk afhankelijk van de in de grond aanwezige vochtspanning.

Leenvoudigheidshalve geven we deze een constante waarde over de gehele diepte van de ingraving.

Door Rankine werd in 1857 de theorie van de actieve en passieve spanningstoestanden ontwikkeld. Actief ingeval de grootste hoofdspanning vertikaal en passief wanneer deze horizontaal gericht is. Voor het hier behandelde probleem is alleen de actieve spanningstoestand van belang.

Deze toestand heeft betrekking op een semi-oneindig grondlichaam, dat tengevolge van optredende krachten in horizontale zin een zekere uittrekking ondergaat. Hierdoor gaat het grondlichaam van de elastische toestand van evenwicht over in de plastische toestand. Er ontwikkelt zich dan een patroon van schuifvlakken in de grond, waarvan de richting een hoek  $45 + \frac{\varphi}{2}$  met de horizontaal maakt.

Den dergelijke toestand doet zich ook voor in de nabijheid van een bezwijkende grondkerende muur, met een volkomen glad oppervlak.



In figuur 10 stelt de lijn ab de achterzijde van de grondkerende muur voor. De grond heeft een volumegewicht  $\gamma$ , terwijl op het oppervlak nog een belasting van  $q \text{ kg/cm}^2$  is geplaatst.

De schuifweerstand van de grond is:

$$\tau = c + p \operatorname{tg} \varphi \quad \text{waarin } c \text{ de cohesie of "aanschijnbare cohesie" voorstelt.}$$

Voorts geldt voor de actieve spanningstoestand de betrekking:

$$p_c + q_c = p_c \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2) + 2c \operatorname{tg}(45 + \varphi/2)$$

waarin  $p_c$  de alzijdig op de grond werkende (cohesie) steunkrachten (confining pressure) en  $q_c$  de toegevoegde belasting (confined compressive strength) is welke afschuiving van de grond veroorzaakt. In het geval van figuur 10 is:

$$p_c + q_c = \text{vertikale spanning } p_v = \gamma z$$

$$\text{en: } p_c = \text{horizontale spanning } p_h$$

Op iedere diepte  $z$  is de horizontaal gerichte spanning:

$$p_h = \frac{\gamma z}{\operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2)} - \frac{2c}{\operatorname{tg}(45 + \varphi/2)}$$

$$\text{voor } z = z_0 = \frac{2c \operatorname{tg}(45 + \varphi/2)}{\gamma} \quad \text{wordt } p_h = 0$$

Men ziet dus dat tussen  $z = 0$  en  $z = z_0$  de op de muur uitgeoefende druk negatief is (behoudens scheurvorming) en dat tussen  $z = z_0$  en  $z = 2z_0$  de druk op de muur dezelfde doch positieve waarde heeft.

In figuur 10 worden deze drukken weergegeven door de driehoekjes ace respectievelijk efg.

De totale druk door de grond op de muur met een hoogte  $H$  door de grond uitgeoefend is

$$P_A = \int_0^H p_h \cdot dz = \frac{\gamma H^2}{2 \operatorname{tg}^2(45 + \varphi/2)} - \frac{2c H}{\operatorname{tg}(45 + \varphi/2)}$$

$$\text{Voor een diepte } H = 2z_0 = H_c = \frac{4c \operatorname{tg}(45 + \varphi/2)}{\gamma} \quad \text{wordt } P_A = 0$$

Bij samenhangende gronden ( $\varphi \approx 0; c > 0$ ) onderscheidt men (fig. 12)

taludafschuiving

teenafschuiving

bodemschuiving

Voor stabiliteitsberekeningen van taluds vervangt men het schuifvlak meestal door een cirkelvormig schuifvlak, soms door een logaritmische spiraal.

Evenwicht bestaat als (fig. 13)

$$G_1 l_1 - G_2 l_2 = W r \widehat{AB}$$

$$W = \frac{G_1 l_1 - G_2 l_2}{\widehat{AB}}$$

Hierbij moeten uit veldwaarnemingen de waarden  $G_1$  en  $G_2$  worden berekend (schuifvlak vaststellen).

Omgekeerd kan men door laboratorium proeven  $W$  vaststellen en op grond daarvan de taludhoek en toegestane ingravingsdiepte bepalen.

Hieruit kan men de veiligheidsfactor van het talud bepalen door aanname van verschillende schuifvlakken

$$G_s = \frac{G_2 l_2 + r W \widehat{AB}}{G_1 l_1}$$

Bij  $G_s = 1$  minimaal treedt afschuiving op en is  $r_c$  de straal van de kritieke cirkel

De grootste of kritieke diepte van ingraving in zachte kleigrond is

$$H_c = N_s \frac{c}{\gamma}$$

waarin  $N$  een veiligheidsfactor voorstelt afhankelijk van taludhelling  $\alpha$  en van de verhouding  $n_d$  tussen de diepte van de vaste ondergrond en de diepte van ingraving  $H$  (zie fig. 13 en 14)

$n_d = 1$	}	* altijd teenafschuiving
$\alpha > 53^\circ$		
$53^\circ > \alpha > 15^\circ$	}	+ altijd basisafschuiving
$n_d > 1,5$		
$55^\circ > \alpha > 15^\circ$	}	+ altijd taludafschuiving
$n_d < 1,5$		
$55^\circ > \alpha > 20^\circ$	}	+ altijd teenafschuiving
$n_d \approx 1,2$		

Gronden met  $\varphi \neq 0$  en  $C \neq 0$

Waarbij geldt weer  $\tau = c + \text{ptg } \varphi$  ; waarbij bedacht moet worden dat  $\varphi$  en  $c$  afhankelijk zijn van het watergehalte. Een vaste waarde voor  $\tau$  bestaat dus niet.

Er zijn drie krachten, die op het moment van afschuiving evenwicht moeten maken, en dan door één punt gaan (fig. 15).

C: de resultante van de cohesie op het schuifvlak

G: het gewicht van het grondblok

F: de resultante van de schuifweerstand en de spanningen <sup>loodrecht</sup> op het schuifvlak

C werkt // koorde ab op afstand x van H:

$$\text{moment: } Cx = c \cdot L_{ab} \cdot x = c \cdot r \cdot \widehat{ab} \quad x = \frac{c \cdot \widehat{ab}}{L_{ab}}$$

Bij afschuiving raakt F aan cirkel met straal  $r \cdot \sin \varphi$ , de z.g.  $\varphi$  - cirkel.

Evenze is de kritieke ingravingsdiepte weer

$$N_c = N_s \frac{c}{\gamma} \quad \text{of } N_s = \frac{H \gamma}{c}$$

$N_s$ : afh. van  $\alpha$  en  $\varphi$ .

Voor  $\alpha = \varphi$  wordt  $N_s = \dots$

In de regel hebben we in deze gronden te doen met teenaafschuiving en omdat basisafschuivingen alleen mogelijk worden bij  $\varphi \leq 3^\circ$ .

Wanneer we toch een basisafschuiving vinden dan is de conclusie dat om een of andere reden  $\varphi = 0^\circ$  geweest moet zijn (overspannen water)

Samenvattend kunnen we dus zeggen dat de stabiliteit van een talud afhankelijk is van de waarden van  $c$ ,  $\varphi$ ,  $\alpha$  en de belasting. De krachten die afschuiving bevorderen moeten dus overtroffen worden door de krachten die daaraan weerstand bieden.

In kleigronden speelt de cohesie  $c$  een grote rol, terwijl de waarde van  $\varphi$  klein is. In zandgronden speelt  $\varphi$  de belangrijkste rol, terwijl de cohesie afhankelijk is enerzijds van het gehalte aan afslibbare delen en anderzijds van het watergehalte. In de capillaire zone werken negatieve vochtspanningen als een schijnbare cohesie. Gaan door toenemend vochtgehalte deze negatieve spanningen om in positieve dan wordt de stabiliteit volledig afhankelijk van de korrelspanning en de slijvingsweerstand. Bestaat door een slechte doorlatendheid van het zand kans op overspanning van het grondwater dan wordt de stabiliteit verder verzwakt.

Hevige regenval met intensiteiten groter dan de indringingsnelheid van het water in de grond, werkt als een toename van het soortelijk gewicht  $\gamma$  van de grond, dus als een toename van de bovenbelasting. Deze toename is het sterkst in het grondblok, dat afschuiving bevordert. Wordt bovendien nog water verzameld in de kantvoor langs de insteek van het sloottalud, dan betekent dit een extra verzwaring.

Een toename van de belasting van het schuifvlak wordt ook bereikt in die gevallen waarbij een sloot een hoger terreingedeelte doorsnijdt. Voorkomende afschuivingen ziet men vaak juist in deze gedeelten optreden.

Veelal kent men aan de talud-begroeiing een zeker stabiliserende werking toe, door een soort 'gewapend beton' effect van de plantwortels. De cirkelvormige schuifvlakken ontwikkelen zich veelal juist achter de bewortelde zone langs.

Men doet er derhalve goed aan het effect van de taludbegroeiing op de stabiliteit niet te overschatten. Soms ziet men meters talud met begroeiing en al afschuiven. De beschermende werking van de begroeiing gaat vooral uit van de beperking van de taluderosie en het afwakken

van het effect van golfslag en de sleepkracht van stromend water.

Een ander sluipend gevaar voor de stabiliteit van slootwanden vormt de stromingsdruk. Gebieden met een enkele meters dikke matig doorlatende bovenlaag van zand of klei gelegen op een goed doorlatende watervoerende ondergrond. Het graven van diepe sloten heeft tot gevolg, dat de dikte van de laag matig doorlatend fijn zand tussen slootbodem en watervoerende laag kleiner wordt, waardoor bij het lage slootpeil een groot potentiaal verschil optreedt tussen slootpeil en het diepe grondwater. De sloot gaat water onttrekken aan de watervoerende laag, een verticale waterstroom stelt zich in onder mogelijk grote verhangen. Het gevolg hiervan is een sterke vermindering van de korrelspanning en daarmee van de stabiliteit van het talud.

Een plotselinge peilverlaging in een leiding werkt als een plotselinge schuifspanningsverhoging door het toenemen van het bovenwatergewicht van met water verzadigde grond. In slechtdoorlatende gronden ontstaat bovendien kans op overspannen water met als gevolg daarvan een sterke vermindering van de korrelspanning en de schuifweerstand.

Taludbeschadigingen worden bij het graven van sloten normaal gevonden, door de praktijk. Na voltooiing van een leidingvak herstelt men de beschadigde plekken, door middel van de geëigende constructies, zoals stapel- en plakzoden, een lichte betuining of een zwaardere al naar gelang de ernst van de situatie. Voorts komen aan de orde langere palen, waarachter vlechtwerk of wiepen, takkebossen in de teen van het talud als drainage en tenslotte gestempelde beschoeiingen en eventueel puinstortingen.

Ondanks deze verdedigingsmaatregelen is het soms niet mogelijk het zwakke talud in stand te houden. Betuinings- en beschoeiingspalen neigen binnenwaarts, of breken, stempels knappen af.

Bekleding van leidingen als maatregel tegen afschuiving wordt eveneens toegepast. Deze kunnen gebruikt worden in leidingvakken met een sterk verhang en dus een grote stroomsnelheid of in gevallen waar bij de stabilisering van het talud voorop staat. In die gevallen zal men ernstig rekening moeten houden met het gevaar van opdrijven van de goot, tenzij de bekledingslaag zo zwaar genomen wordt, dat de goot onder alle omstandigheden zwaarder is dan de opwaartse druk van het water. Bij lichtere constructies dient een systeem gevonden te worden,

waarbij door een voldoende wateropnemend vermogen de potentiaal onder de bekleding beneden de kritieke waarde wordt gehouden. Aan filterbedden en dergelijke dienen dan hoge eisen gesteld te worden, tensinde uitspoeling van zand door de perforaties in de bekleding te voorkomen, en nazakken van het talud en de grond achter het beklede deel ervan tegen te gaan.

Tenslotte nog deze opmerking, dat de drie genoemde oorzaken van taludafschuivingen te weten:

vermindering van de schuifweerstand  
verhoging van de schuifspanning  
en stroomingsdruk

nooit ieder voor zich een oorzaak zullen zijn voor een afschuiving, veeleer treden ze in een of andere combinatie gezamenlijk op.

Literatuur:

- ir. K.F. Huizinga - Grondmechanica  
K. Terzaghi en R.W. Peck - Soil Mechanics in Engineering Practice  
D.W. Taylor - Fundamentals of Soil Mechanics  
R. Dächler - Über den Strömungsvorgang bei Hangquellen.  
Die Wasserwirtschaft 1934/5-6.

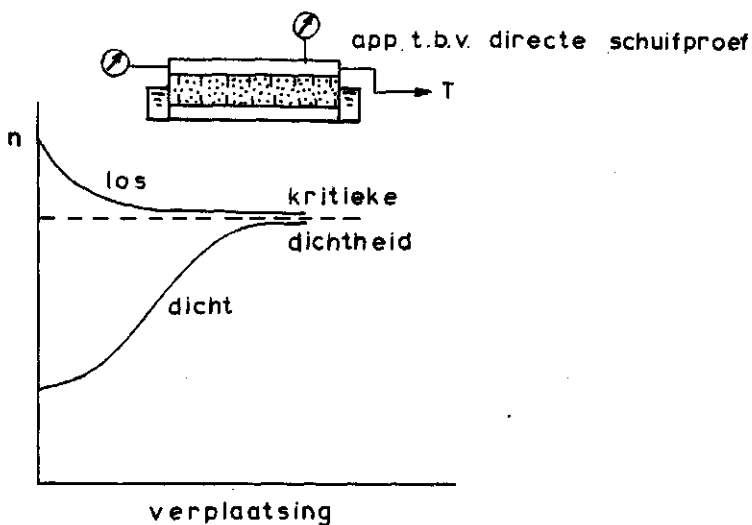


fig. 1 Verband tussen verplaatsing en poriëgehalte tijdens de schuifproef (Huizinga).

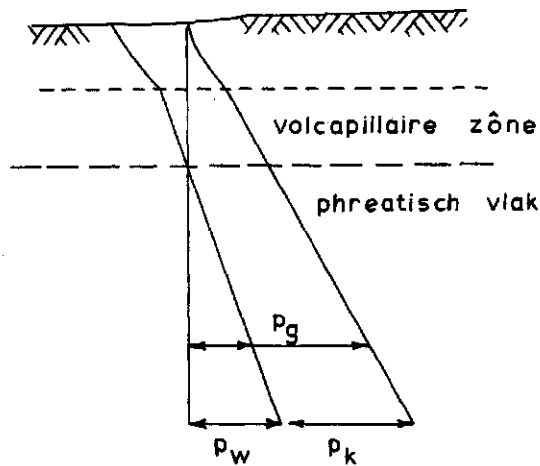


fig. 2 Diagram van korrel- en waterspanningen.

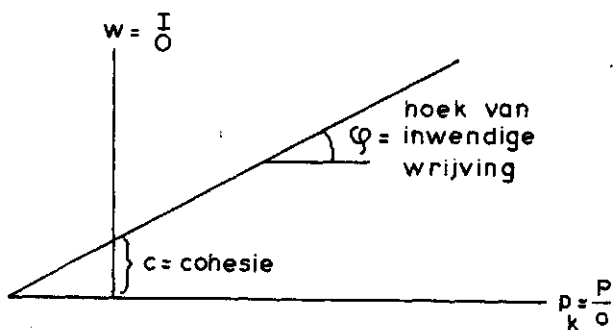


fig. 3 Het verband tussen schuif weerstand  $w$  en normaalspanning  $p_k$ . Bij evenwicht is  $w = S_k$ .

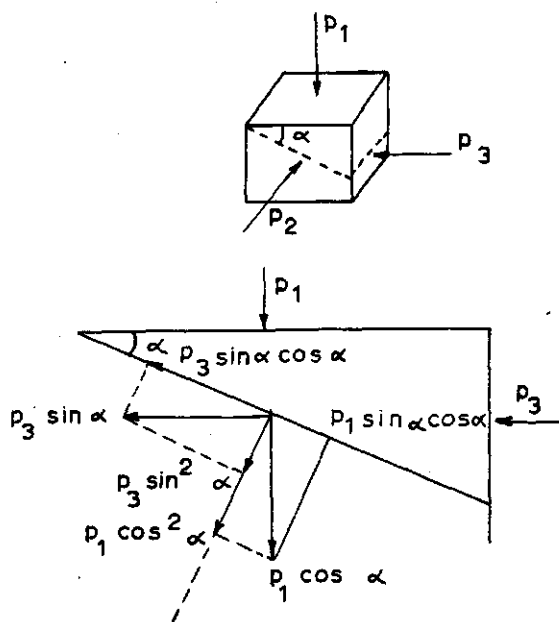


fig. 4 Diagram van de spanningen werkende op een toekomstig vlak van afschuiving. (Huizinga)

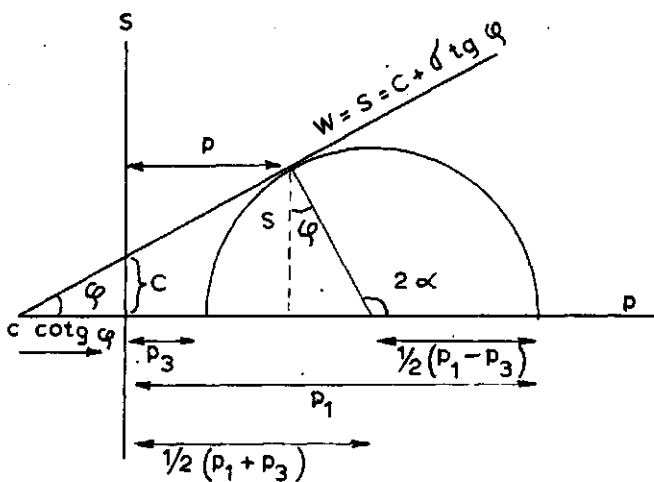


fig. 5 Het verband tussen  $S$  en  $p$  weergegeven in het diagram van Mohr. (Huizinga)

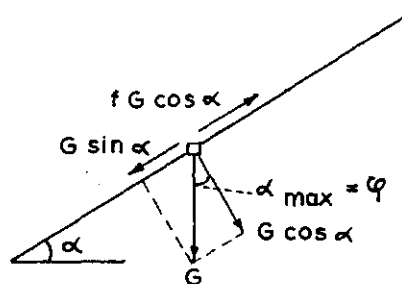


fig. 6 Het evenwicht van krachten werkend op een gronddeeltje in een talud onder hoek  $\alpha$  (Huizinga)



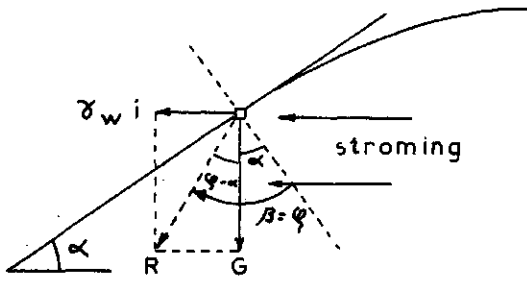


fig. 7 Evenwicht van krachten werkend op een grondeeltje in het talud bij horizontale grondwaterstroming (Huizinga).

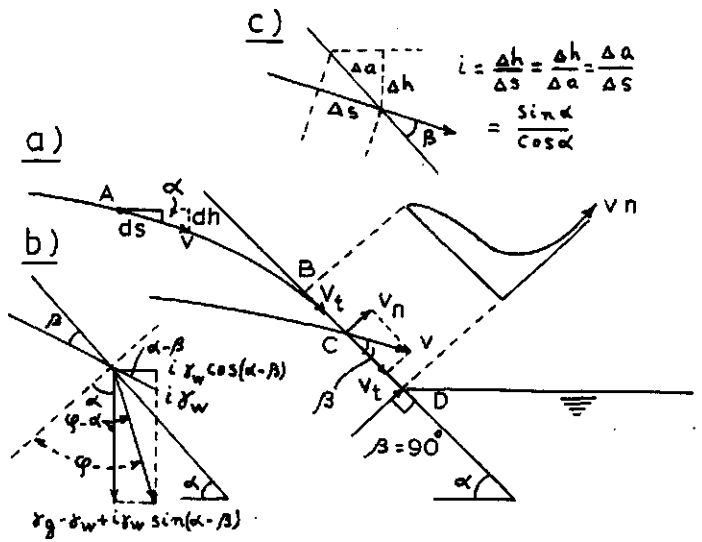


fig. 8 Invloed van de grondwaterstroming in de kwelzone van het talud. (Dachter)

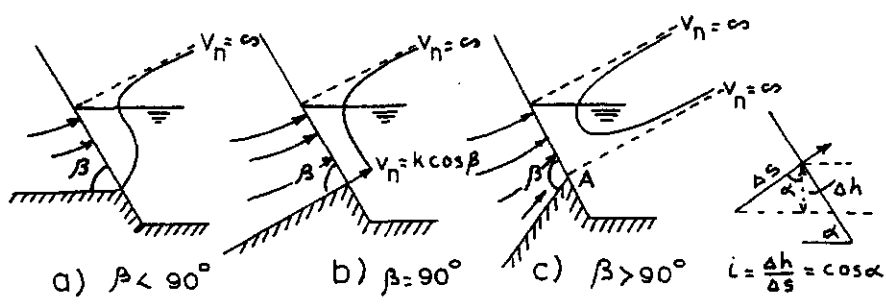


fig. 9 De invloed van een ondoorlatende laag in een sloottalud op de vertikaal op het talud gerichte stroming. (Dachter)

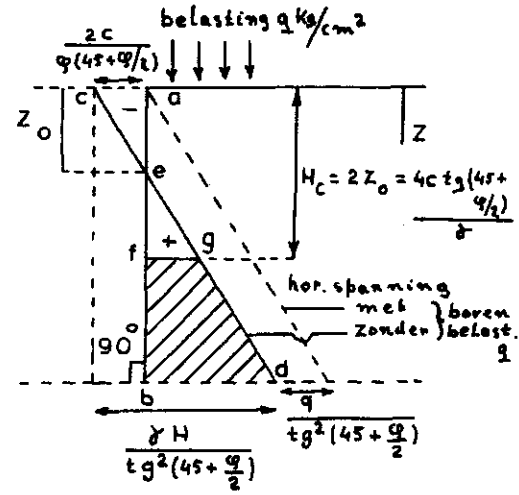


fig. 10 De krachten welke werken op een verticale ingraving (alpha = 90 degrees) (Terzaghi)

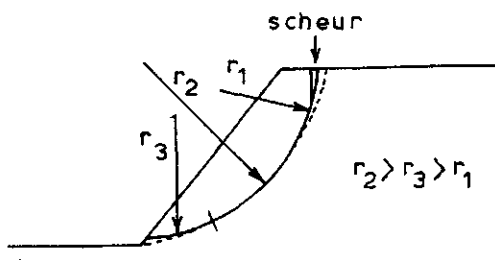


fig. 11 Het vlak van afschuiving is niet zuiver cirkelvormig. Voor dat afschuiving plaats vindt treft men vaak een scheur in de grond ter plaatse waar het schuifvlak het massiveld zal snijden.

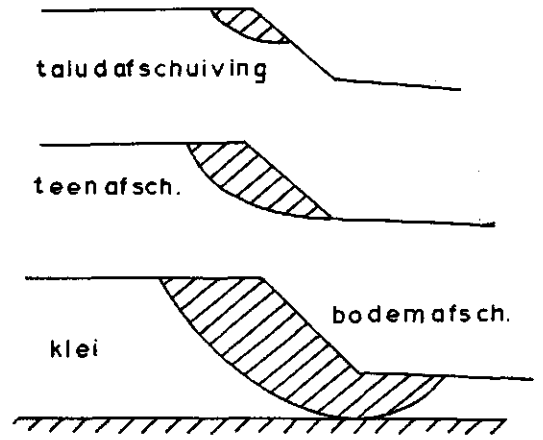


fig. 12 Drie soorten van afschuivingen van taluds.

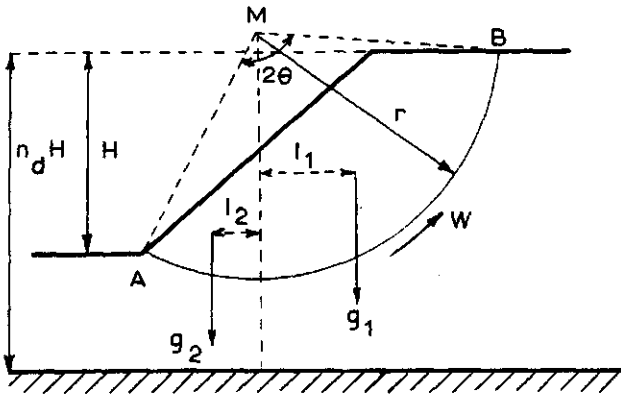


fig. 13 Het cilindervormig afgeschoven grondblok bestaat uit een afschuiving bevorderend deel (koppel  $g_1 l_1$ ) en een tegenwerkend deel (koppel  $g_2 l_2$ ) welke evenwicht moet maken met de schuifweerstand langs het schuifvlak. (s.r.  $\hat{A}\hat{B}$ ) (Terzaghi)

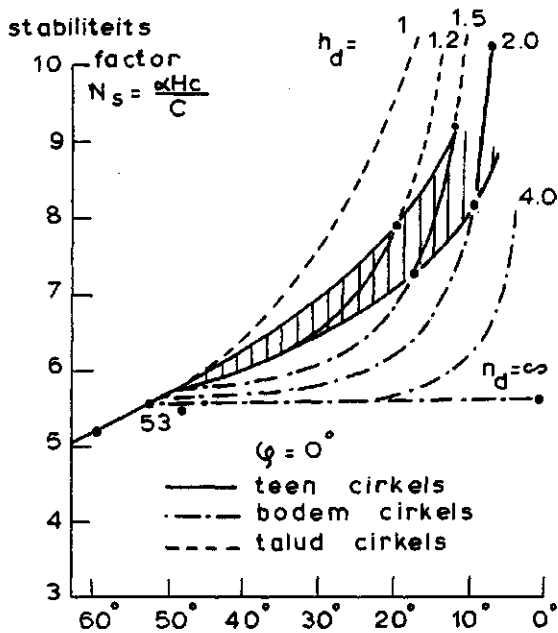


fig. 14 Het verband tussen  $N_s = \frac{\alpha H c}{C}$ , de taludhoek  $\alpha$ , de diepte van insnijding  $n_d$  en de soort van afschuiving. (faylor)

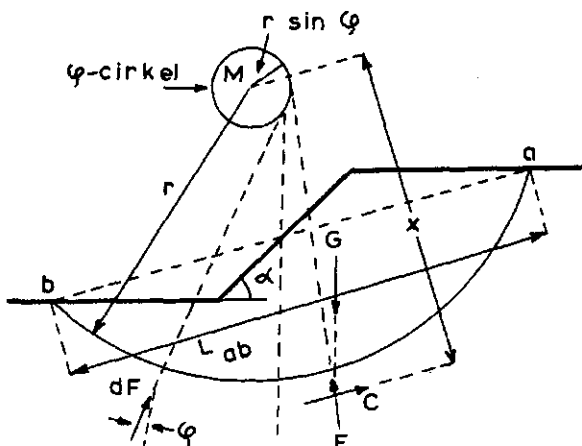


fig. 15 Afschuiving van grond met cohesie (c) en wrijvingsweerstand ( $\varphi$ ). Voorbeeld van stabiliteits berekening d.m.v. de  $\varphi$ -cirkelmethode. (Terzaghi)