

Rapport van de Commissie
voor het
Onderzoek naar de Spanningstoestand
in
Dijken.



Par. 1. Doelstelling van het werk der Commissie

De in de titel dezes aangeduide Commissie (in dit rapport aan te duiden als "de Commissie") werd ingesteld met het oogmerk de moderne wetenschap met alle beschikbare hulpmiddelen in te schakelen, om te komen tot betere grondslagen en methoden van berekening voor het ontwerpen van dijken en deze voor zover mogelijk experimenteel te toetsen.

BIBLIOTHEEK
Dienst Weg- en Waterbouwkunde
Van der Burghweg
Postbus 5044, 2600 GA Delft
Tel. 015 - 699111

15 JAN. 1992

Par. 2. De commissie werd ingesteld naar aanleiding van een op 9 maart 1955 gehouden bespreking en verkreeg daarna de volgende samenstelling:

Van de Rijkswaterstaat:

Prof. Ir. P.Ph. Jansen, Voorzitter

Ir. H.A. Ferguson, Waarnemend Voorzitter

Ir. T. Edelman

Ir. W.C. Bischoff van Heenskerk, Secretaris

Van de Technische Hogeschool:

Prof. Ir. N. Nanninga

Van het Laboratorium voor Experimenteel Spanningsonderzoek:

Prof. Ir. C.G.J. Vreedenburgh

Ir. F.K. Ligtenberg

Ir. H.W. Loof

Ir. G.A.F. van der Sande

Van het Laboratorium voor Grondmechanica

Prof. Ir. E.C.W.A. Geuze

Ir. W.C. van Mierlo

Ir. G. de Josselin de Jong

Ir. A.W. van IJsseldijk

Ir. K. Joustra

Ir. H.J. Formsma

Par. 3. Beschikbare gegevens

Bij de aanvang van haar werkzaamheden beschikte de Commissie over enige literatuur betreffende de oorzaken van dijkdoorbraken hier te lande van vóór 1951; (1) (2) (3) (4). Voorts waren enige publicaties verschenen met betrekking tot de ramp () () () () () en werden een tweetal interne nota's ter beschikking gesteld door de Rijkswaterstaat () ().

Aan het Laboratorium voor Grondmechanica was op 22 mei 1955, op verzoek van de Delta-Commissie, door de directie Algemene Diensten van de Rijkswaterstaat opdracht gegeven een onderzoek in te stellen naar de oorzaken van de dijktreken en de dijksbeschadigingen in het rampgebied, als voortzetting van een reeds door de Provinciale Waterstaat van Zuid-Holland opgedragen onderzoek.

Dit onderzoek was begonnen met het vaststellen van de toestand, waarin de dijken zich na de ramp bevonden. Een zeer uitvoerige documentatie, in de vorm van fotografische opnamen van dijksbeschadigingen, beschrijvingen van resultaten van profielonderzoekingen en vele andere gegevens stonden de Commissie bij het aanvangen van haar taak ter beschikking ().

In september 1956 werd na een uitvoerige bestudering van de aldus verkregen resultaten door het Laboratorium voor Grondmechanica een rapport uitgebracht over de oorzaken van doorbraken en beschadigingen ().

Par. 4. De uitgangspunten voor de onderzoekingen der Commissie

Als uitgangspunt voor haar onderzoekingen koos de Commissie aanvankelijk de materie, waarnaar in de vorige paragraaf is verwezen. De interpretatie der waargenomen verschijnselen geschiedde in hoofdzaak langs de weg der kwalitatieve analyse, waarbij grote aandacht werd geschonken aan de correlaties tussen uitwendige factoren (waterstand, golfbeweging, windrichting, wateroverslag) en de aantasting (geheel of gedeeltelijke verdwijning) der dijken.

Bij de discussies over de kwantitatieve betekenis van deze correlaties bleken verschillen van opvatting over de aard en het gewicht der factoren, welke tot het geheel of gedeeltelijk bezwijken der dijken hadden geleid, het trekken van conclusies te bemoeilijken.

De voornaamste redenen van het bestaan dezer tegenstellingen waren: de (vaak onbekende) uitermate inhomogene en variabele samenstelling der dijkprofielen, de betrekkelijk grote tijdsruimte tussen het tijdstip van de ramp en het daarop gevolgde onderzoek naar de bodemeigenschappen en tenslotte de onzekerheden met betrekking tot de uitwendige omstandigheden welke een voldoende exacte beoordeling op kwantitatieve basis voor ieder geval van beschadiging of bezwijken afzonderlijk nagenoeg uitsloten.

Desalniettemin is het mogelijk gebleken uit de beschikbare materie een conclusie te trekken, welke voor de constructie van dijken van zeer groot belang is te achten. In par. 5 zal deze conclusie worden besproken in samenhang met de correlaties (en het ontbreken daarvan) bij een groot aantal gevallen van beschadiging en doorbraak van dijken.

Intussen was bij vele leden de overtuiging ontstaan, dat de grondslagen voor de berekening van geheel nieuwe dijken, dan wel van de versterking van bestaande dijken niet aan de eisen voldeden, welke hieraan uit het oogpunt van de beoordeling der veiligheid en de economie van deze constructies diende te worden gesteld.

De moeilijkheden ondervonden bij de kwantitatieve interpretatie der waargenomen verschijnselen waren namelijk mede toe te schrijven aan de in onvoldoende mate beschikbare wetenschappelijke grondslagen. De Commissie besloot dan ook een aantal studies van fundamentele aard te doen verrichten om de waarde van reeds bestaande, dan wel in haar midden opgebouwde zienswijzen te toetsen.

Het heeft uiteraard enige tijd geduurd alvorens de resultaten daarvan ter beschikking kwamen; dank zij de bijzondere inspanning van enkele van haar leden is het echter gelukt voor een aantal specifieke, met de dijksconstructie samenhangende vraagstukken een voldoende exacte basis van berekening op te bouwen.

Zoals hiervoor reeds werd opgemerkt kunnen de beperkingen, welke aan een voldoende exacte beoordeling van de kansen van beschadiging of bezwijken der bestaande dijken in het rampgebied waren opgelegd, door het beschikbaar komen van deze resultaten niet worden weggenomen; de grondslagen voor het construeren van nieuw te maken, dan wel het verstevigen van bestaande dijken werden er echter door verbeterd.

De werkzaamheden der Commissie kunnen, al naar gelang van het gekozen uitgangspunt, worden verdeeld in drie groepen:

- A. De analyse van waargenomen verschijnselen bij de beschadiging en de doorbraak van bestaande dijken, waarbij in hoofdzaak correlaties tussen uitwendige factoren, de kwaliteit van de dijk en de mate van beschadiging werden bepaald.
- B. De analyse van elastische spanningstoestanden, welke bij een veronderstelde geometrie van het dijkslichaam kunnen voorkomen, mede in verband met de samenhang en de vervormingseigenschappen van het materiaal.
- C. De analyse van grenstoestanden van het inwendig evenwicht, welke bij een veronderstelde geometrie van het dijkslichaam en wrijvingseigenschappen van het dijksmateriaal, door uit- en inwendige belastingtoestanden kunnen worden veroorzaakt.

Hoofdstuk I

Par. 5. De resultaten van de onder A genoemde analyse, welke in par. 3 en par. 4 reeds werden aangeduid, kunnen als volgt worden samengevat.

De belangrijkste correlaties:

- 1e. dat de beschadigingen van de dijken in vrijwel alle gevallen zijn geconstateerd aan het binnentalud op plaatsen waar het water over de kruin was geslagen;
- 2e. dat de algehele doorbraken eveneens zijn geconstateerd op plaatsen waar het water over de kruin was geslagen,

leidden tot de belangrijke conclusie:

De schade, ingevolge de stormvloed van 1 februari 1953 toegebracht aan de zeedijken in het zuidwesten van ons land, is in hoofdzaak te wijten aan het over deze dijken gestroomde of geslagen water.

Daarnaast werden enige verschijnselen geconstateerd, welke voor de dijksbouw van belang zijn en welke in de volgende punten kunnen worden samengevat:

- a. Er zijn afschuivingen van de binnentaluds voorgekomen in gevallen waarbij geen wateroverslag was opgetreden, het binnentalud van een dichte bekleding was voorzien, doch de dijkskern en het buitentalud uit doorlatende materialen waren opgebouwd.
- b. In het algemeen is er geen correlatie gebleken tussen afschuiving van het binnentalud en de kwaliteit van de daarop aangebrachte grasmat.
- c. In gevallen van uitschuring van zandige taluds door overstromend water is echter het belang van een goede grasmat gebleken.
- d. Indien de binnentaluds een geringe helling hadden (flauwer dan $1:2\frac{1}{2}$) en van een dichte bekleding waren voorzien, is schade door overstromend water beperkt gebleven.

- e. Afschuivingen van taluds zijn vaak ingeleid door langsscheuren in de kruin.
- f. Betonmuurtjes op de dijkskruin hebben in het algemeen goed voldaan.

Op grond van de voorafgaande vaststellingen en gevolgtrekkingen, was het voor het verdere onderzoek in het bijzonder van belang na te gaan:

1. In hoeverre bij een onvoldoend waterdichte afsluiting van het binnentalud, het water bij overslag in het dijkslichaam kan dringen en daarin een stroming kan veroorzaken, welke tot afschuiving van het talud kan leiden.
2. In hoeverre bij een voldoende waterdichte afsluiting van het binnentalud, de afschuiving kan worden veroorzaakt door een stroming, welke de kruin heeft aangetast en daarna onder de bekleding is doorgedrongen.

In het algemeen kan worden vastgesteld, dat het water bij overstroming in het dijkslichaam kan dringen, bij een afneming van de beschermende functie van de bekledingslaag op de kruin en op het talud. In hoeverre de eroderende werking van het water hierbij primair is, dan wel de indringing van het water in het talud, kon niet nader worden vastgesteld; in ieder geval staat vast, dat de stabiliteit er door in gevaar is gebracht.

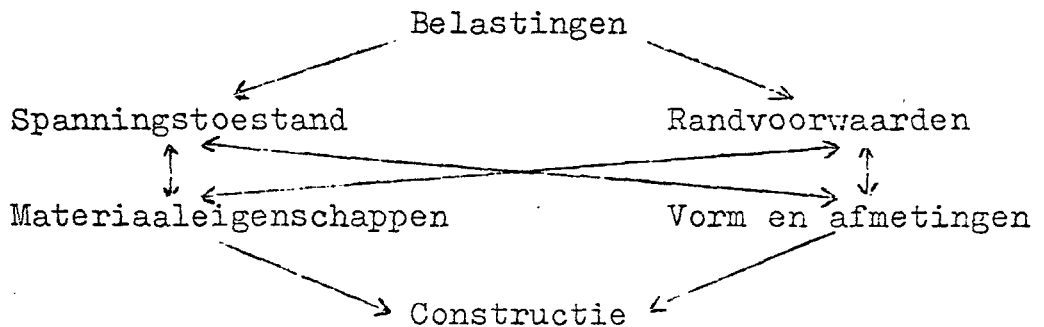
De onder ten le. genoemde vorm van evenwichtsverlies was het onderwerp van een speciale studie, welke in bijlage () is opgenomen.

Hoofdstuk II

Par. 6. Grondslagen voor de berekening van een grondconstructie.

Een dijklichaam is een grondconstructie onderworpen aan belastingen. De factoren, welke haar vorm, afmetingen en samenstelling bepalen, worden op overeenkomstige wijze beoordeeld als bij constructies samengesteld uit andere materialen.

In het schema is een opsomming van deze factoren gegeven, waarin tevens hun onderlinge samenhang tot uiting komt.



De spanningstoestand in een dijklichaam wordt bepaald door de krachten, welke aan haar totstandkoming hebben bijgedragen. Een voorzichtige stapeling van gronddeeltjes, zoals bij bezinking in diep water kan voorkomen, leidt tot een spanningstoestand, welke dichter bij de toestand van bezwijken ligt, dan bij een opbouw van de massa in grote hoeveelheden (spuiten in ondiep water). Tegelijkertijd verkrijgt de korrelige massa een pakkingsdichtheid, welke van deze krachtworeringen en tevens van de eigenschappen van het korrelmateriaal afhangt (korrelgrootteverdeling, korrelvorm). Is het dijkslichaam gevormd, dan bevindt het zich in zijn initiële of aanvangsspanningstoestand. Wordt het daarna aan belastingen onderworpen, dan wijzigen zich deze spanningen.

De nieuwe spanningstoestand wordt bepaald door belastingen op het dijklichaam (golfdrukken op het buitentalud, stromingskrachten in het invendige veroorzaakt door grondwaterstroming, capillaire krachten langs de randen, enz.). Bovendien moet aan de randvoorwaarden worden voldaan; d.w.z. aan de verdeling van de spanningen, welke door de belastingen aan de omtrek van het dijklichaam (met inbegrip van het ondersteunende vlak) aangrijpen.

Bij een grondconstructie zijn de materiaaleigenschappen (verband tussen vervormingen en spanningen) afhankelijk van de initiële spanningstoestand, zodat voor een berekening van de spanningen, welke daarin door belastingen worden opgewekt, de bekendheid met deze toestand wordt vereist.

Deze complicatie is in hoofdzaak verantwoordelijk voor de bij toepassingen van de grondmechanica aan de dag tredende tendens, de beoordeling van de veiligheid van een grondconstructie te baseren op de grenstoestand van het inwendig evenwicht der spanningen. In de bezwijktoestand van het korrelmateriaal spelen de vervormingen geen rol, aangezien de weerstand uitsluitend berust op de grootste wrijving, welke bij onbeperkt toenemende verschuiving in het inwendige worden opgewekt. Deze optimale wrijving blijkt in hoofdzaak te worden bepaald door de materiaaleigenschappen: pakingsdichtheid en aard van het korrelmateriaal. De aanvankelijke spanningstoestand heeft dan slechts indirecte betekenis, doordat zij de dichtheid van de korrelmassa bepaalt.

Als een nadeel van de methode ter beoordeling van de veiligheid van een grondconstructie met behulp van het criterium van de bezwijktoestand zoals hiervoor werd geformuleerd, moet worden gesteld, dat bij het bezwijken van met water verzadigde korrelmassa's de wrijving tussen de korrels

vaak mede wordt bepaald door de spanningstoestand, welke tengevolge van de deformaties in het korrelstelsel in het water wordt opgewekt. De oplossing van dit vraagstuk is thans nog niet mogelijk, hoewel als bekend mag worden verondersteld, dat met water verzadigde korrelmassa's van geringe dichtheid een begin van evenwichtsverstoring van geringe omvang in de hand werken en vloeïngen van grote uitgebreidheid tengevolge kunnen hebben, terwijl bij grotere pakkingsdichtheden - nog afgezien van de gunstige wrijvingseigenschappen - een begin van evenwichtsverstoring vaak tot een klein gebied beperkt blijft.

Afgezien van dit nadeel, waardoor de dichtheid van pakking van de korrelmassa dus van grote betekenis wordt bij de beoordeling van de stabiliteit van daaruit opgebouwde grondconstructies, vormt de bovengenoemde methode een zeer nuttig middel om van een ontworpen dijkconstructie de gebieden, waar het bezwijken onder extreem ongunstige belastingen (optimale, langdurige buitenwaterstand) zou kunnen optreden, te bepalen en de constructieve maatregelen ter verbetering een goede basis te verschaffen.

Op grond van bovenstaande overwegingen besloot de Commissie zich bij het onderzoek naar de veiligheid van dijkconstructies te beperken tot de beoordeling van de kansen van bezwijken onder bepaalde, als zeer ongunstig aangenomen belastingtoestanden.

Hiermede werd de aanvankelijk ingeslagen weg, welke in par.4 onder B is aangegeven, verlaten.

Alvorens op de consequenties van deze stap nader in te gaan zal het nuttig zijn de conclusies van uitvoerige onderzoekingen door het Laboratorium voor Experimenteel Spanningsonderzoek te dier zake vermeld, te vermelden.

Par. 7. De onderzoeken naar in dijkslichamen mogelijke spanningstoestanden.

Uitgaande van de vergelijkingen, welke het probleem beheersen, moest in de eerste plaats worden voldaan aan de eisen van evenwicht, terwijl de voorwaarden van samenhang en de vervormingseigenschappen van de gebezigde materialen mede de spanningstoestand bepalen. Zoals reeds hiervoor werd opgemerkt worden deze voorwaarden in hoge mate bepaald door de aard van het materiaal en van de wijze, waarop het dijklichaam is opgebouwd.

Het bleek zeer moeilijk te zijn willekeurige spanningstoestanden te bepalen, welke tevens aan de eisen van het evenwicht voldoen. Hieruit blijkt, dat het evenwicht alleen reeds strenge beperkingen aan de in het dijklichaam mogelijke spanningstoestanden opleggen. Gezien deze conclusie en de bestaande mogelijkheden om op betrekkelijk eenvoudige wijze de "elastische" spanningstoestand te vinden (die uiteraard ook aan het evenwicht voldoet) werd deze voor een aantal profielen van dijkslichamen onderzocht.

De daarmee verkregen resultaten werden gebruikt om:

- 1e. daaruit "tendenzen" af te leiden, welke nagenoeg zeker iedere spanningstoestand kenmerken.
- 2e. door superpositie van correctie-termen op het verkregen resultaat de vervormingen aan te passen aan de bijzondere vervormingseigenschappen van zand, zonder afbreuk te doen aan het evenwicht.

In verband met de zeer grote hoeveelheid werk verbonden aan de laatste werkwijze, is dit tot één enkel geval beperkt gebleven.

De Commissie heeft het zeer betreurd, dat praktische overwegingen ertoe hebben geleid het onderzoek naar de "elastische" spanningstoestanden te beperken, vooral omdat hier voor de eerste maal een verantwoorde poging werd gedaan de invloed van de uitzonderlijke vervormingseigenschappen van korrelig materiaal na te gaan op spanningstoestanden, welke voldoende ver van de grens van het inwendig evenwicht van het materiaal verwijderd blijven. Aangezien bij dijklichamen de vervormingen, welke aan het bezwijken voorafgaan - met uitzondering van het hiervoor geschreven geval van een met water verzadigd, los gepakt korrelig materiaal - in het algemeen voor de constructeur van ondergeschikt belang zijn, kon de beoordeling van de stabiliteit worden vereenvoudigd door het criterium van onbeperkt toenemende vervormingen (het bezwijken) als grenstoestand voor de spanningen te aanvaarden.

Het belang van de onderzoekingen, door het Laboratorium voor Experimenteel Spanningsonderzoek verricht, komt daardoor beter tot zijn recht indien de spanningstoestand wordt bepaald door de aanwezigheid in een dijkslichaam van constructies van afwijkende stijfheid, zoals bij toepassing van caissons e.d. elementen.

De verkregen uitkomsten en tendenzen kunnen als volgt worden samengevat:

1e. Spanningen door eigen gewicht bij normale uitvoering (b.v. opbouw door bezinking of opspuiting). De verticale spanning is ongeveer evenredig met de hoogte van de dijk. De horizontale spanning is in het midden ca 0,6 maal de grootste verticale spanning en blijft tot ongeveer halverwege de taluds constant.

De buitenste laag verkeert over een dikte van ongeveer 1 meter in de passieve spanningstoestand; hier is dus de horizontale spanning groter dan de verticale.

2e. Slappe of stijve gedeelten in de kern van de dijk (7).

Door een slappe plek in het midden nemen de verticale en de horizontale spanningen daarboven sterk af, evenals de erin optredende verticale spanningen. In het daaronder gelegen gedeelte nemen de horizontale spanningen belangrijk toe.

Deze slappe plekken kunnen een gevolg zijn van de wijze van opbouw; een stijve plek (b.v. een caisson) heeft in mindere mate het omgekeerde effect.

3e. Slappe plekken in teen en hiel van de dijk (7).

In dit geval nemen de loodrechte spanningen in het midden slechts weinig toe; de horizontale spanningen nemen in het bovenste dijkgedeelte weinig af en in het onderste gedeelte weinig toe.

4e. Wisselingen van de belasting naar plaats en grootte (7) (8).

Het is niet uitgesloten, dat tengevolge van herhaalde wisselingen (naar plaats en grootte) van de belastingen grote vervormingen gaan optreden, waardoor de toestand van bezwijken bij kleinere waarden zou kunnen intreden dan in het geval van enkelvoudige, langzaam aangroeiende belastingen.

Par. 8. Methoden ter bepaling van de veiligheid van een dijkconstructie, gebaseerd op de grenstoestand van het evenwicht.

De onder C genoemde methoden worden ontwikkeld voor het bepalen van de glijdlijnen, indien bekend is dat de grondmassa in de grenstoestand van het evenwicht verkeert. Indien de randvoorwaarden van de spanningstoestand bekend zijn, kan het beeld van de glijdlijnen worden vastgesteld.

Indien het gewicht van de grondmassa de enige volumekracht is en indien de grond geen water bevat, is de maximaal mogelijke hellingshoek van het talud gelijk aan de inwendige wrijvingshoek van het korrelmateriaal. Is de grondmassa gedeeltelijk in een in rust verkerende watermassa gedompeld, dan is de maximaal mogelijke hellingshoek kleiner.

Wordt het talud van de grondmassa blootgesteld aan een doorstroming van water, dan treedt een volumekracht op, welke evenals de zwaartekracht van een potentiaal afhangt. Het samengaan van deze beide volumekrachten is gelijkwaardig aan een rotatie van het zwaartekrachtveld, waardoor de hellingshoek van het talud vermeerderd met de rotatie ten hoogste gelijk kan worden aan de inwendige wrijvingshoek van het korrelmateriaal. Dit effect kan dus zowel ten gunste als ten ongunste van de stabiliteit van het talud uitvallen, afhankelijk van de zin der rotatie.

Een voorbeeld van een ongunstig effect is de stroming door een talud evenwijdig aan haar oppervlak (bijlage).

Aangezien taluds een eindige lengte hebben en overgaan in horizontale vlakken, vormt zich op de overgang een gebied waarin de stroming van richting verandert, waardoor plaatselijk grotere snelheden voorkomen. Een dergelijke toestand treedt eveneens op in de kwelzone (d.i. de zone waar het water uit het talud treedt).

In alle gevallen van een discontinuïteit in het stroombeeld door de grondmassa blijkt het evenwichtsverlies nabij het oppervlak in te treden, aangezien de snelheid van het grondwater daar het grootst is.

Voor een drietal gevallen van discontinuïteit werd het stromingsbeeld bepaald en de omvang van het gebied van bezwijken bepaald als functie van de randcondities en de inwendige wrijvingshoek van het korrelmateriaal (bijlage).

De uitkomsten van deze berekeningen geven aan waar maatregelen met het oog op de veiligheid van de dijkconstructie dienen te worden aangetroffen.

Indien het water uit het talud treedt kan met behulp van een drainage de kans op het verlies van evenwicht worden voorkomen, geschiedt dit ter plaatse van een discontinuïteit der begrenzing (overgang van het talud naar een horizontaal vlak), dan kan voor de bescherming de afronding van de overgang voldoende zijn.

Indien een vlak talud zich onder water voortzet zijn dergelijke maatregelen uiteraard moeilijker constructief te verwezenlijken. De oplossing moet dan worden gezocht in een verbetering van de materiaaleigenschappen (het vergroten van de dichtheid van het korrelmateriaal en/of het vergroten van de samenhang; het gebruik van grofkorrelig materiaal e.d.).

In het algemeen betreft het hier het treffen van maatregelen, welke in constructieve zin reeds toepassingen in de waterbouwkunde hebben gevonden. Bij een goede vormgeving van het dijksprofiel en van de bekledingsconstructies kunnen zij tot gebieden van betrekkelijk geringe omvang rondom de discontinuïteit beperkt blijven.

Bij het beschikbaar komen van een zo groot aantal mogelijkheden voor de berekening van kritieke gebieden in het dijksprofiel lag het voor de hand de stabiliteit van een ontworpen dijkslichaam daaraan te toetsen. Hiertoe werd een zgn. raamprofiel gekozen (bijlage ...) en werd een type van een ongunstige belastingtoestand aanvaard, waarbij de buitenwaterstand tot een extreem veronderstelde hoogte zou stijgen.

Bovendien werd als richtlijn voor de berekening aangenomen, dat de functies van de waterdichte bekleding op het buitentalud en van de drainage aan de binnentoeen tengevolge van een schromelijke verwaarlozing zodanig zouden zijn ontwaardigd, dat zij in

hun tegendeel zouden zijn verkeerd. Met een doorlatende buitenbekleding en een verstopte drainage zouden voor de stijging van de grondwaterstand aan de buitenteen de meest ongunstige veronderstellingen zijn gedaan.

Het resultaat van de berekening voor deze stijging bij het gekozen raamprofiel onder ongunstige veronderstellingen voor een langdurige, hoge buitenwaterstand en voor een korrelmateriaal van normale gradatie (zeezand) was gunstig; de optimale stijging zou dan niet meer dan 26 cm bedragen.

Als een tweede punt van onderzoek werd nagegaan aan welke krachten een waterdichte bekleding op het buitenbeloop wordt blootgesteld, indien bij een langdurige hoge buitenwaterstand gevolgd door een snelle daling zich een groot drukverschil tussen de onderzijde en de bovenzijde van de waterdichte bekleding instelt. Het resultaat van de daartoe ingestelde berekening biedt tevens de mogelijkheid de omvang van de gebieden van bezwijken te bepalen, welke ingevolge de discontinuïteit in de overgang van het beklede en het onbeklede gedeelte van het talud te bepalen en de daarvoor nodige constructieve maatregelen te treffen (zwaarte en omvang van de bekleding; vereiste samenhang van het zand).

Het laatste punt van onderzoek van het raamprofiel gold de aanval van het buitenwater op gedeelten van de dijk, welke daarop niet zijn berekend. De gevaren van het overstromend water voor de kruin en het binnentalud zijn in Hoofdstuk en bijlage reeds uitvoerig behandeld. Hiervoor geldt dus de conclusie, dat een waterdichte bekleding de aantasting van dit beloop zal moeten verhinderen.

Bij het waarden van de hiervoor in beknopte vorm aangeduide resultaten dient men voor ogen te houden, dat deze studies op de eerste plaats waren bedoeld om als richtlijn te dienen voor de constructie van nieuwe dijken, waarbij gedacht is aan een samenstelling van het dijklichaam uit homogeen korrelig materiaal (zeezand). Een gelijke veronderstelling gold het funderingsmateriaal, zodat het dijklichaam met inbegrip van de ondergrond een nagenoeg homogene stromingsweerstand zou bezitten. Zoals reeds werd opgemerkt behoeft dit nog niet het geval te zijn met de mechanische eigenschappen (inwendige wrijvingshoeken) van dit korrelmateriaal.

Er kunnen zich uiteraard gevallen voordoen, dat het stromingsbeeld zich belangrijk zal wijzigen ingevolge afwijkende verhoudingen in de doorlatendheid van de ondergrond (ondoorlatende laag op geringe diepten e.d.), waardoor voor de stabiliteit ongunstiger condities kunnen ontstaan. De beschreven methoden van onderzoek der stabiliteit zijn dan evenzeer van toepassing, mits deze verhoudingen à priori door middel van bekende methodieken bepaald worden. De constructie van het profiel zal dan aan deze, van het gekozen voorbeeld afwijkende, omstandigheden moeten worden aangepast. Aangezien hierover nog geen overzicht bekend was, heeft de Commissie er vanaf gezien bepaalde typen van condities als varianten in te voeren en zich bepaald tot het berekenen van het vermoedelijk als meest frequent voorkomende geval van een homogeen doorlatende ondergrond.

Par. 9. Intussen bood de bouw van de dijk voor de werkhaven te Veere een welkome gelegenheid ervaringen op te doen met het verrichten van metingen aan een "proefdijk", welke vele punten van overeenkomst had met die van de daarna te bouwen Veeregat-dam.

- 1e. Een dijk verkregen door opspuiting van zand.
- 2e. Een ligging in een getijdegebied, waardoor waterbewegingen in de dijk zouden optreden.

De omstandigheden voor het verrichten van de metingen waren vaak ongunstig, omdat deze grotendeels samenvielen met de bouw van de dijk. Desondanks werd een groot aantal metingen van zeer uiteenlopende aard verricht, waarvoor naar het verslag in bijlage moge worden verwezen.

Enkele van de verkregen resultaten verdienen in het bijzonder vermelding wegens hun betekenis voor de voorafgaande beschouwingen.

- 1e. De doorlatendheid van het zand werd zowel door directe meting in de opspuiting bepaald, als uit het stromingsbeeld ingevolge de getijdebeweging gemeten met behulp van waterspanningsmeters. Hierbij werd een zeer goede overeenstemming gevonden, zodat de toepassing van de theorie voor deze niet-stationnaire stroming een nagenoeg exact resultaat opleverde.
- 2e. De dichtheid van het gespoten zand (korrelvolume als percentage van het totaal volume van korrels en poriën) bedroeg van 59-61 %. Het gespoten zand heeft dus een relatief dichte pakking in tegenstelling tot het droog verwerkte zand, waarvan de dichtheid varieerde van 54-58½ %. Beide genoemde minimale grenzen van de dichtheid zijn beduidend hoger dan die van de kritieke waarde van de dichtheid van 52½ %, welke als een grens voor het gevaar van optreden van zettingsvloeiingen geldt.
- 3e. De metingen van de gronddrukken gaven als uitkomst, dat de loodrechte drukken op horizontale vlakken overeenkomen met het gewicht van het boven de drukdoos aanwezige zand en water (zie conclusie onder 1e., par. 7).

De verhoudingen tussen de horizontale en de verticale spanningen liepen sterk uiteen (van 0,2 tot 0,5). In de berm werden zelfs horizontale spanningen gemeten van gelijke grootte als de verticale spanningen. Deze resultaten zijn nog niet volledig geanalyseerd, doch vestigen de indruk dat in de door opspuiting verkregen dam de spanningsverhoudingen in de korrelmassa in bepaalde gebieden de bezwijktoestand nabij komen. Uit dien hoofde verdienen deze resultaten dan ook de aandacht.

Hoofdstuk III

Conclusies betreffende de mogelijkheden van berekening van dijksconstructies.

Bij het overwegen van deze mogelijkheden dient men zich rekenschap te geven van de doelstelling der Commissie, zoals deze in Par. 1. van dit rapport werd geformuleerd.

Aanvankelijk werd als basis voor de ontwikkeling van methoden ter bepaling van een dijksconstructie in hoofdzaak de weg der fenomenologische analyse van bezwijk-verschijnselen gekozen. Zoals in Hoofdstuk I werd beschreven, leverde deze studie een voor de dijksbouw zeer belangrijke conclusie op, welke kon worden samengevat in de correlaties tussen de waargenomen beschadigingen en vernielingen aan de binnenbelopen van bestaande dijken bij overstroming van de kruin en de hoedanigheid van de daarop aanwezige beschermde laag.

In dit verband gezien acht de Commissie het van belang, dat haar conclusies te zijner tijd zullen worden getoetst aan de resultaten verkregen door andere studiegroepen, welke zich in het bijzonder met de functies van bekledingen bezig houden.

Ofschoon de geconstateerde beschadigingen en vernielingen der dijkslichamen niet in tegenspraak zijn met de resultaten en gevolgtrekkingen verkregen uit de theoretische en experimentele onderzoekingen, vormde de onbekendheid met de feitelijke toestand waarin de getroffen dijkslichamen ten tijde van de ramp verkeerden een wel zeer grote hinderpaal bij de numerieke interpretatie van de waargenomen verschijnselen. Hiervoor was op de eerste plaats verantwoordelijk de zeer gevarieerde samenstelling van deze dijken en op de tweede plaats de betrekkelijke onbekendheid met de belastingtoestanden, welke aan de beschadiging (resp. het bezwijken) voorafgingen. Als typische voorbeelden van dergelijke onzekerheden kunnen worden genoemd, de mate waarin overslag of overstroming was opgetreden en het voorkomen van plaatselijke, sterke wisselingen in de doorlatendheid van het dijkslichaam.

Een verdergaand onderzoek naar bezwijkingsoorzaken zou in ieder geval de bekendheid met plaatselijke afwijkingen hebben vereist. Gezien de hiervoor geschetste tekortkomingen meende de Commissie zich te moeten beperken tot het vaststellen van de oorzaken van bezwijken in grote lijnen, om daarna te komen tot het ontwikkelen van methoden van berekening gebaseerd op geschematiseerde materiaaleigenschappen van het dijksmateriaal, waardoor het vaststellen van de plaats en de omvang van kritieke gebieden mogelijk wordt bij aangenomen extreme condities (langdurig hoge buitenwaterstand, doorlatende bekleding van het buitentalud en verstopte drainage van de binnenteen). Deze kritieke gebieden komen in het dijklichaam voor rondom discontinuïteiten in de begrenzingen (overgang van het binnentalud naar een berm) en van constructie-elementen (uiteinden van een waterdichte bekleding).

De resultaten van deze berekeningen bieden de mogelijkheid door middel van geschikte constructieve maatregelen (drainage, verlenen van cohesie aan onsaamhangend zand, verdichting van zand, aanbrengen van steenbestortingen en damwanden) het ontstaan van dergelijke kritieke gebieden te voorkomen.

Een belangrijk vraagstuk van stabiliteit betrof voorts de bepaling van de eisen, waaraan de waterdichte bekleding van het buitentalud dient te voldoen bij de ongunstigst denkbare toestand van een langdurig hoge buitenwaterstand, gevolgd door een snelle daling. Het gewicht van deze bekleding dient dan voldoende te zijn, om aan het grootst mogelijke drukverschil tussen het water in het dijklichaam en daarbuiten weerstand bieden.

Tenslotte kan over het vraagstuk van de aantasting van het binnenbeloop bij overstromend water worden gesteld, dat een waterdichte bekleding de enige constructieve maatregel is, welke het optreden van beschadigingen of vermelingen vermag te voorkomen.

De in het voorafgaande gestelde grondslagen van berekening, getoetst aan een "raamprofiel" voor een te construeren dijklichaam, waarvan de kern uit zand bestaat, konden uiteraard betrekkelijk scherp worden gesteld, aangezien bij de bestudering van de wrijvingseigenschappen van het bewuste zand was gebleken, dat de "bezwijktoestand" door een zeer eenvoudig verband tussen de druk in het korrelmateriaal en de afschuifkracht wordt bepaald. De verhouding tussen deze beide grootheden wordt uitgedrukt door de "inwendige wrijvingshoek" van het korrelmateriaal. De grootte van deze hoek bleek bij korrelmaterialen (van voldoende dichtheid van pakking) nagenoeg onafhankelijk te zijn van de aanvankelijke spanningstoestand in het dijklichaam en vrijwel uitsluitend te worden bepaald door de pakkingsdichtheid op het oogenblik van bezwijken. De pakkingsdichtheid is daarom de voor het intreden van deze bezwijktoestand maatgevende materiaaleigenschap; de vervormingen van het materiaal hebben daarop geen invloed, tenzij het materiaal aanvankelijk een zeer losse pakking bezit en er bij de daarop volgende vervormingen het water in de poriën van het materiaal een gedeelte van de druk overneemt. Deze voor verzadigd zand uiterst gevaarlijke toestand is berucht geworden onder de naam van "zettingsvloeiing", welke vooral langs de oevers der zeearmen als "oevervallen" berucht zijn geworden.

De metingen aan de proefdijk in het Veeregat zijn in dit verband van groot belang, omdat zij hebben aangetoond, dat het opgespoten zand een grotere dichtheid bezat, dan de "kritieke waarde", welke voor het intreden van zettingsvloeiingen maatgevend wordt geacht. Toch moet dit resultaat nog als zeer voorlopig worden gesteld, omdat het hier een opspuiting in een geringe waterdiepte betrof, zodat een geringe dichtheid van pakking als gevolg van een geleidelijk bezinken der korrels hier nauwelijks zal zijn voorgekomen.

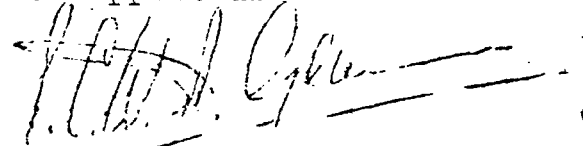
De Commissie is dan ook van oordeel, dat een voortzetting van haar studies, in het bijzonder ten aanzien van het bezwijken van los gepakte met water verzadigde zandmassa's en het bepalen van de grootte van pakkingsdichtheden bij het opbouwen van deze massa's in diep water, van belang moet worden geacht.

Dit geldt eveneens, zij het in mindere mate, voor de invloed van dynamische belastingen (golfklappen) op de stabiliteit van dijklichamen.

Tenslotte moge de Commissie opmerken, dat als uitgangspunt voor haar onderzoeken dijkconstructies hebben gediend in de vorm, waarin zij reeds tot stand waren gekomen (bestaande dijken), dan wel voorzover andere dan mechanische overwegingen (hydraulische factoren, factoren welke de wijze van uitvoering bepalen) deze vorm zullen bepalen. Ten aanzien van de laatstgenoemde factor dient men zich voor ogen te houden, dat vooral tijdens de uitvoering het dijklichaam in kritieker omstandigheden kan komen te verkeren, dan na haar totstandkoming het geval zal zijn, uiteraard met uitsluiting van de mogelijkheid van een ramptoestand en voorzover bij de constructie daarop niet zal worden voorzien.

Delft, 22 mei 1958

De Rapporteur



Prof. ir E.C.W.A. Geuze