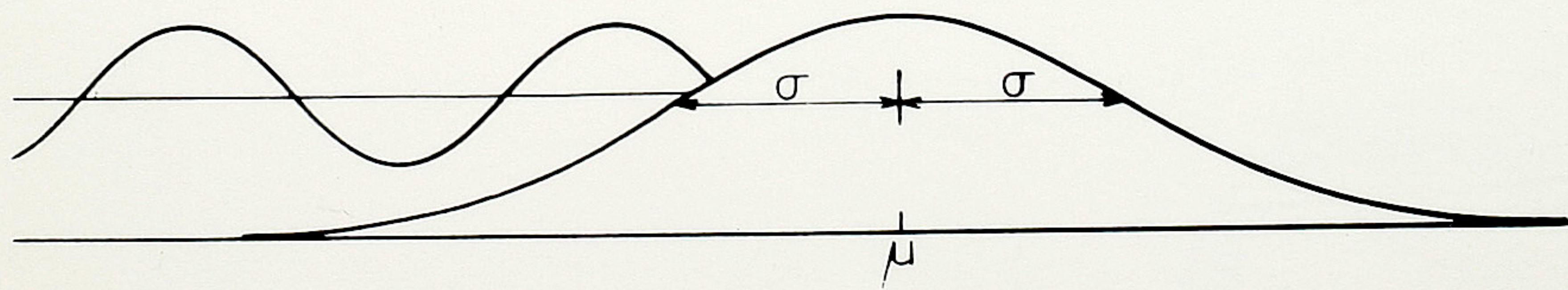


1980

Veiligheid en Monte Carlo

Prof.ir. P.A. van de Velde



1930255

TRES Red. 1980

Veiligheid en Monte Carlo



Velde_
red_
1980

Veiligheid en Monte Carlo

*College
gegeven bij het afscheid
als gewoon hoogleraar in de Waterbouwkunde
aan de afdeling der Civiele Techniek
op vrijdag 19 september 1980
door prof.ir. P.A. van de Velde*



Dames en Heren

De Amerikaanse schrijver Thornton Wilder vertelt in zijn boekje "The Bridge of San Luis Rey" hoe een Franciscaner missionaris getuige was van het bezwijken van de mooiste brug van geheel Peru.

De brug overspande een diepe bergkloof, en was meer dan een eeuw tevoren op kundige wijze door de Inca's gebouwd uit lange, slanke, houten elementen.

Niemand had verwacht, dat deze brug het ooit zou kunnen begeven.

De Franciscaner broeder Juniper hoorde op de 20ste juli 1714 des middags om twaalf uur een geluid als van een springende snaar en zag hoe de in tweeën gereten brug met vijf mensen in het ravijn stortte.

Hij verwonderde zich niet alleen over het feit van het bezwijken, maar meer nog vroeg hij zich af waarom juist op dit moment, toen juist deze vijf mensen zich op de brug bevonden.

Broeder Juniper was geen ingenieur, hij had geen kennis van spanningen, sterkte en vermoedheid van bouwmaterialen. Voor hem stond het vast dat door een onbekende geheimzinnige samenhang in het heelal en zeker niet door een dom toeval deze vijf mensen op dit moment het leven lieten. En hij nam zich voor een grondig onderzoek in te stellen naar de levensgeschiedenissen van de vijf erbij betrokken mensen, vast overtuigd daarin het antwoord op zijn vraag te kunnen vinden.

Zonder verder op dit verhaal in te gaan, wil ik nog wel vermelden dat de religieuze mens Juniper het antwoord op zijn vraag: "waarom juist op dat moment" niet heeft gevonden.

Trouwens, geen enkele civiel-ingenieur, religieus of niet, acht ik in staat hierop antwoord te geven. Wat betreft het bezwijken op zich, dáárover zal de civiel-ingenieur zich echter niet verbazen, omdat hij weet dat geen enkele door mensenhersen en -handen geschapen constructie voor 100% veiligheid biedt.

Het begrip veiligheid, zoals dat hier naar voren komt, is sterk verwant aan het woord zekerheid. In de Franse taal dekt sureté beide begrippen evenals in het Duits het woord Sicherheit.

Wanneer men nu zou willen uitdrukken wat precies met veiligheid of zekerheid wordt bedoeld dan komt men, vrees ik, toch in moeilijkheden. Van een brug wordt verwacht dat men onder alle omstandigheden veilig de overkant kan bereiken, maar men weet uit ervaring dat, een heel enkele keer, ergens een brug bezwijkt. Van een dijk wordt verwacht dat het achterliggende land altijd beveiligd zal zijn tegen overstroming. Maar de geschiedenis leert dat vele dijken, soms onder buitengewone omstandigheden en soms ook zonder direct aanwijsbare oorzaak zijn bezweken.

Bij elke veiligheid behoort blijkbaar een zekere mate van onveiligheid en bij elke zekerheid een stukje onzekerheid. Veiligheid en zekerheid in relatie tot constructies zijn daarom relatieve begrippen.

Het is dan ook niet te verwonderen, dat de mens is gaan zoeken naar mogelijkheden om in een concrete situatie de veiligheid te meten. Om te proberen een objectieve maat te vinden en de veiligheid in een getal uit te drukken op dezelfde manier waarop iemands lengte in centimeters kan worden bepaald en iemands massa in kilogrammen.

Daarbij heeft men aansluiting gezocht en gevonden bij de kansrekening, een wetenschap die is ontstaan uit de beoefening van het kansspel.

De bedoeling van dit streven is nu de mate van veiligheid of onveiligheid uit te drukken in een getal dat de kans aangeeft op het in stand blijven of op het bezwijken van de constructie.

Het begrip kans wordt vaak gedefinieerd als het aantal uitkomsten met een bepaald kenmerk gedeeld door het totale aantal uitkomsten van een experiment.

Gooit men met een dobbelsteen dan is de kans voor elk van de uitkomsten één tot en met zes even groot. Men spreekt dan van een uniforme kansverdeling. Bij het werpen met twee dobbelstenen is de kansverdeling van de totalen ongelijk. Zo is de kans op het getal 2 als uitkomst slechts $1/36$ en die op het getal 7 is 6 maal zo groot ofwel $1/6$. Men heeft hier te maken met een driehoekige kansverdeling.

Zo kan bij continue veranderende grootheden worden gesproken van de kansdichtheidsverdeling of kansdichtheidsfunctie. Een veel voorkomende is de normale verdeling die vaak wordt genoemd de verdeling van Gauss of van De Moivre.

De uitkomst van een worp met dobbelstenen noemt men wel een stochastische grootte of kortweg een stochast.

Daarmee wordt aangeduid dat deze grootte verschillende waarden kan aannemen, die gegroepeerd zijn om een gemiddelde waarde. De mate van spreiding kan worden uitgedrukt in het begrip standaardafwijking, dit is de wortel uit de gemiddelde afwijkingskwadraten.

Het feit dat bij het kansspel met twee dobbelstenen de zeven als uitkomst een grotere kans heeft dan enige andere uitkomst, geeft geen enkele garantie dat U die 7 ook werkelijk gooit. Kans geeft geen enkele garantie op realisatie. Slechts bij een groot aantal herhalingen mag U daar in de praktijk bijna op rekenen.

Het lijkt mij goed dit aspect bij het vervolg van mijn voordracht in gedachten te houden.

In ons land met zijn rijke en dramatische historie van overstromingsrampen spreekt ons dit begrip het meest aan met betrekking tot veiligheid biedende waterkeringen. Het zijn de zee- en rivierdijken, de duinen en de boezemkaden waaraan wij Nederlanders ons vertrouwen hebben gegeven, gezien het feit, dat wij rustig in dit lage landje blijven wonen, afgezien dan van enkelingen die de hogere Belgische gronden als woongebied hebben verkozen.

In de dertiger jaren van deze eeuw kwam men in Nederland echter tot de conclusie dat de hoogte van vele dijken niet in overeenstemming was met de overigens nog vage eisen op het gebied van de veiligheid tegen overstroming.

Het is de grote verdienste geweest van Wemelsfelder om in zijn publikatie van 1939 de aandacht te vestigen op de statistische wetmatigheden bij het optreden van stormvloed. Hij heeft duidelijk gemaakt dat de toen nog gebruikelijke praktijk om de hoogte van een dijk te bepalen aan de hand van de hoogst bekende waterstand, niet langer verantwoord was.

Op grond van een studie van de geregistreeerde hoogwaterstormvloedstanden te Hoek van Holland toonde hij aan dat veel hogere waterstanden mogelijk zijn dan de hoogst bekende stand. En tevens liet hij zien dat des te hogere stand men beschouwt des te kleiner de kans is dat deze zal worden overschreden. De statistische verdeling van de hoogwaterstanden bleek goed overeen te komen met de exponentiële verdelingsfunctie.

Men had nu een middel gevonden om de veiligheid tegen overstroming, veroorzaakt door het overlopen van een dijk, te bepalen en uit te drukken in een frequentie.

Zo kon men zeggen dat een bepaalde waterstand bijvoorbeeld gemiddeld één maal per honderd jaar zou worden overschreden, of éénmaal per duizend jaar. Nu kunnen in een periode van 100 of 1000 jaar de omstandigheden, die de frequentieverdeling beïnvloeden, veranderen. Daarom spreekt men liever van de gemiddelde frequentie per jaar, dus respectievelijk van $1/100$ of $1/1000$ maal per jaar.

Het bleek ook dat de overlooffrequentie van een dijk door een betrekkelijk geringe verhoging belangrijk kon worden verkleind. Op grond van de exponentiële verdeling geldt voor Hoek van Holland dat bij een verhoging met 0,75 m de overlooffrequentie tot $1/10$ en bij verhoging met 1,50 m zelfs tot $1/100$ van de oorspronkelijke waarde wordt teruggebracht. Wanneer men nu zou mogen afzien van een mogelijke dijkdoorbraak dan zou een dijkverhoging met 1,50 m een 100-voudige vergroting van de veiligheid met zich brengen. Wij zullen straks zien dat deze beschouwingwijze tot ernstige misverstanden kan leiden.

Veertien jaar later, op 1 februari 1953, werden alle tot dan bekende hoogwaterrecords in Z.W. Nederland met meer

dan een halve meter geslagen.

U kent allen het droeve resultaat van deze stormnacht waarin de dijken bij tientallen doorbraken.

Het hieruit geboren deltaplan eiste de versterking van alle waterkeringen langs de Nederlandse kust. Deze versterking zou moeten worden gebaseerd op een hoogwaterstand met een overschrijdingsfrequentie van $1/10.000$ per jaar voor de Randstad en van $1/4000$ voor de rest van Nederland. Dit komt overeen met aanzienlijk hogere waterstanden dan die van 1953.

Wij leven nu ruim 20 jaar later, de afsluiting van de zee-armen is, met uitzondering van de Oosterschelde, waar de werken nog aan de gang zijn, voltooid. Vele dijken langs de kust zijn op z.g. deltahogte gebracht.

Een begin is gemaakt met de versterking van de rivierdijken langs de Waal, Rijn en Gelderse IJssel, en verschillende boezemkaden vragen om verbetering. Op verschillende plaatsen zullen ook de duinen moeten worden versterkt. Kortom, er is in de afgelopen 20 jaar veel werk aan de waterkeringen tot stand gekomen, maar in de komende 20 jaar zullen nog vele dijken en kaden moeten worden versterkt.

De vraag moet nu worden gesteld of deze dijken op wetenschappelijke wijze zijn ontworpen en gemaakt zodat we zeker zijn van de veiligheidsgraad.

En een tweede vraag is of we thans genoeg kennis in huis hebben om met gerechtvaardigd vertrouwen die honderden kilometers rivierdijken en kaden te gaan verbeteren.

Hoewel in de rapporten van de Deltacommissie een schat van wetenschappelijke kennis werd bijeengebracht, gaven zij slechts in beperkte mate aanbevelingen voor het ontwerpen van dijken. Belangrijk in dit opzicht was het hanteren van een ontwerpwaterstand met de genoemde frequentie van overschrijden.

Dit getal heeft wel een veel belangrijker betekenis gekregen dan de bedoeling van de Deltacommissie is geweest.

Eén van de redenen hiervan is dat het niet alleen werd ge-

bruikt voor de bepaling van een ontwerp-waterstand, maar dat dit zelfde getal van 1/10.000 of 1/4000 ook werd vereenzelvigd met de bezwijkkans of de faalkans van de dijk. En dit is bepaald niet juist, alleen al omdat ook op andere manieren bezwijken mogelijk is. En van deze andere bezwijkvormen zou men ook de kansen moeten bepalen. Nu is dit misverstand wel begrijpelijk, want bij de ramp van 1953 werden vrijwel alle doorbraken en ernstige beschadigingen primair veroorzaakt door wateroverslag. Er is geen geval bekend waarbij in 1953 een andere bezwijkvorm zou zijn voorgekomen.

Maar dit betekent niét dat nieuwe dijken of verbeterde oude dijken bijvoorbeeld tijdens een toekomstige storm op dezelfde wijze stuk zouden gaan.

Intussen maakten velen, zowel beroepsmensen als amateurs, gretig gebruik van deze welhaast magische getallen. Vele economische berekeningen werden er op gebaseerd voor de financiële vergelijking van verschillende plannen in het deltagebied. Maar ook voor de vergelijking van verschillende alternatieven betreffende de verbetering van de rivierdijken. U kent het foefje, dat gebaseerd is op de berekeningen van verzekeringsmaatschappijen.

Men schat de schade bij een overstroming, vermenigvuldigt deze met het magische getal en deelt dit door een gereduceerde rentevoet van b.v. 2%. De uitkomst is de gekapitaliseerde of actuele waarde van de toekomstige schadeverwachting. Hiermede is echter slechts een deel van het totale risico in rekening gebracht.

Na het opheffen van de Deltacommissie werd wederom een commissie ingesteld, en wel de "Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen" die door de minister met een meer blijvende, hem adviserende taak werd belast. In deze commissie, die de beschikking heeft over een permanent werkorgaan, het "Centrum Onderzoek Waterkeringen", werken ook een aantal docenten en medewerkers van de afdeling Civiele Techniek mee.

Toen evenwel de verbetering van de rivierdijken op gang kwam bleken de ingrepen door ophoging, verbreding en ver-

flauwing van de dijkbelopen voor vele mensen en instanties aanleiding tot protesten. Men vond dat er voorzichtiger met de landschappelijke, culturele en natuurwetenschappelijke waarden in het rivierengebied zou moeten worden omgegaan. Teneinde na te gaan in hoeverre het mogelijk zou zijn aan de wensen tegemoet te komen werd, hoe kan het anders, een commissie ingesteld die onder de naam "Commissie Rivierdijken" buitengewoon nuttig werk heeft gedaan. Bij vele natuur- en milieu-organisaties vindt men nog de opvatting dat in een bestaand landschap niets mag worden veranderd; elke ingreep in de natuurlijke toestand is dan verwerpelijk, dus ook het verhogen van de dijken.

Als nuchter mens doet mij dit vreemd aan. Er bestaat in ons land nauwelijks nog een plek waar de mens niet heeft ingegrepen en toch heeft de natuur zich ontplooid in vele variëteiten. Niet in het minst daar waar de mens in het verleden belangrijke werken heeft uitgevoerd.

Wat te zeggen van de dijkellingen waar zich juist zeer bijzondere stroomdalflora heeft ontwikkeld. Hoe kijkt men aan tegen afgedamde riviertakken of afgedamde zeegaten zoals de Lauwerszee of het Brouwershavense Gat? Zijn het geen unieke natuurgebieden geworden?

Ik dacht van wel, en daarom zou wat minder angst voor veranderingen niet misplaatst zijn.

Toch is grote voorzichtigheid bij het uitvoeren van waterbouwkundige werken, om zo mogelijk echt bijzondere flora of vegetatie of gebouwen van culturele of landschappelijke waarde te kunnen behouden, uiteraard noodzakelijk.

Van de aanbevelingen die door de Commissie Rivierdijken zijn gedaan zou ik er hier twee willen noemen.

Als overschrijdingsfrequentie die de waterstand bepaalt waarop de hoogte en de stabiliteit van de rivierdijken wordt berekend is 1/1250 per jaar voorgesteld. Dit is duidelijk hoger dan hetgeen voor de zeedijken geldt, en ook hoger dan de oorspronkelijk voor de rivieren gesuggereerde waarde van 1/3.000. Het voordeel van deze verlaging van ontwerpwaterstand is, dat de totale lengte van te verhogen of te versterken dijken enigszins kan worden verminderd, terwijl de ingrepen over het algemeen iets minder

kunnen zijn.

De commissie is nog iets verder gegaan met de versoepeling door voor incidentele dijkvakken, waar een eventuele overstroming minder rampzalig zou zijn, een nog verdergaande verlaging van ontwerp-waterstanden in overweging te geven.

Als tweede zou ik willen noemen het geïntroduceerde begrip "uitgekiend ontwerp", dat wordt aanbevolen voor die plaatsen, waar de omstandigheden zo bijzonder zijn, dat slechts een minimale ingreep mag worden toegestaan.

De commissie noemt dit woord met enige schroom om de indruk weg te nemen dat meer gebruikelijke ontwerpen voor versterking niet zorgvuldig zouden worden ontworpen en berekend.

De uitdrukking "uitgekiend ontwerp" is een vondst geweest die wellicht een aantal mensen van natuur- en milieugroepen enigszins heeft gerustgesteld. Maar het vinden van een oplossing voor zo'n ontwerp, hier en daar, steeds bij andere omstandigheden, is minder eenvoudig. Vooral als men er vanuit gaat dat de kans op bezwijken door toepassing van zo'n ontwerp, niet mag worden vergroot.

Hier ontstaat nu de behoefte een veel duidelijker inzicht te krijgen in deelkans en totale kans van bezwijken van verschillende dijkconstructies.

Ook bij het ontwerpen van zeedijken en dijken langs de zee-armen mist men een duidelijk inzicht in de gevolgen van allerlei onzekerheden, die de kans op overstroming beïnvloeden.

Dames en Heren, ik hoop nu geleidelijk wat dichterbij te komen bij de kern van het probleem dat aan de orde is.

Iedereen beseft dat het leven vol risico's is en dat elk risico uit twee factoren bestaat. De ene is het effect van een ongewenste gebeurtenis. De andere is de kans dat deze gebeurtenis optreedt.

Iedereen accepteert vrijwillig een groot aantal risico's zonder dat velen zich rekenschap geven van de grootte van de kans op enig ongeluk. Wij stappen rustig in de auto en

gaan ermee in het verkeer of wij blijven even gemakkelijk thuis om ons bloot te stellen aan de grote risico's van het werk van huisvrouw of tegenwoordig ook wel van huisman.

Toen ik als jong ingenieur bij de Rijkswaterstaat in dienst kwam werd mij verteld dat een oudere collega, gegrepen als hij was door de kansrekening, had vastgesteld dat de kans om met zijn auto op een onbewaakte spoorwegovergang met een trein in botsing te komen verwaarloosbaar klein was. Hij trok daaruit de consequentie, dat het niet nodig was bij zo'n overweg te stoppen en het bleek, aldus het verhaal, dat hij inderdaad altijd doorreed.

Nu kan het best zijn dat deze man een stuk van het spoorboekje uit zijn hoofd kende, waardoor de aanrijdingskansen met de trein vrijwel tot nul zouden zijn teruggebracht, althans in die vooroorlogse tijd.

Degenen die thans de risico-analyse beoefenen zouden kunnen worden beschouwd als de leerlingen van deze waterstaatsingenieur.

Meer en meer wordt getracht bij beleidsbeslissingen op het gebied van nieuwe projecten de risico's voor de bevolking en de materiële zaken in de omgeving zo goed mogelijk te berekenen. Dit gebeurt bijvoorbeeld bij plannen voor hogedrukleidingen, aanlandingen voor vloeibaar gas, olieplatforms in zee en kerncentrales.

Ook voor het ontwerp van dijken zou men eigenlijk moeten proberen een integrale aanpak voor de bepaling van de risico's te ontwikkelen.

Voor beide componenten van het risico, de totale kans op ongewenste gebeurtenissen en de totale schade daarvan geldt, dat ze moeilijk kunnen worden bepaald. Bij de schade kan het materiële nadeel nog het beste worden geschat. De immateriële effecten of imponderabele factoren zijn zeer moeilijk objectief te waarderen. Het gaat bij de schade overigens niet alleen om de gevolgen van overstroming, maar ook om de schade die wordt toegebracht zuiver en alleen door het uitvoeren van werken aan waterkeringen.

Het moeilijkst lijkt wel het in rekening brengen van verlies aan mensenlevens en het menselijk leed dat daarop

volgt.

In de Verenigde Staten durft men het blijkens recente publicaties nog steeds aan een mensenleven in dollars te waarderen. Men beperkt zich daarbij uitsluitend tot materiële factoren. De waarde van een mensenleven is dan het gekapitaliseerde geldsbedrag van het totale salaris dat een mens in de rest van zijn leven kan verdienen. Men komt zo tot waarden van 200.000 tot 300.000 dollar per persoon, waarbij het opvalt dat voor vrouwen zonder kinderen lagere en voor vrouwen met kinderen hogere bedragen worden berekend dan voor mannen.

Op deze wijze wordt toch wel schromelijk tekort gedaan aan de onbetaalbare waarde die mensen voor anderen kunnen bezitten.

De vraag is echter wat het alternatief is. Wanneer een regering of een volksvertegenwoordiging of een ander tot beslissing bevoegd lichaam een besluit moet nemen over één of ander project waarmee risico's voor mensenlevens of ziekten of invaliditeit worden vergroot of verkleind, dan moet een keuze worden gemaakt voor een aanvaardbaar risico. Men zal dan in ieder geval moeten weten hoe groot het extra of het resterende risico van overstroming zal zijn. En bij de keuze neemt men dan bewust verantwoordelijkheid op zich voor verlies van een aantal mensenlevens met een zekere kans per eeuw of per jaar.

De kansberekening is dus nodig en dit houdt heel wat meer in dan het berekenen van de frequentie of de kans op overschrijding van hoogwaterstanden.

Het is al eerder gezegd dat een dijk op verschillende manieren kan falen of bezwijken. Er kunnen een tiental bezwijkvormen worden onderscheiden, waarvan ik twee voorbeelden wil noemen. Het eerste is evenwichtsverlies door afschuiving van een gedeelte van het dijklichaam in binnenwaartse richting. Het tweede voorbeeld is de vernieling van het buitenbeloop door golfaanval.

Een aantal van deze bezwijk- en faalmechanismen kunnen, statistisch gezien, wellicht als onafhankelijke verschijnselen worden beschouwd. Tussen enkele echter bestaat wel

degelijk een onderlinge beïnvloeding, een correlatie.

Wanneer het mogelijk zou zijn voor het optreden van elke bezwijktoestand de afzonderlijke kansen te berekenen, kan men derhalve niet stellen dat de totale of integrale bezwijkkans van een dijk gevonden wordt door de afzonderlijke kansen op bezwijken of falen statistisch bij elkaar op te tellen. Deze statistische optelling komt neer op het aaneengeschakelde produkt van de complementaire bezwijkansen, dat zijn de kansen op het niet bezwijken, dus op het blijven functioneren van de beschouwde dijk. Voor kleinere kanswaarden van bijvoorbeeld 1/100 komt deze procedure praktisch neer op een algebraïsche optelling van deelkansen.

Vanwege het niet onafhankelijk zijn van alle bezwijkmechanismen zal de totale bezwijkkans in ieder geval kleiner zijn dan de kans die men uit de "optelling" zou vinden.

Tot nu toe is het niet mogelijk deze som op een goede manier te berekenen. Trouwens, voor de berekening van alle afzonderlijke bezwijkansen ontbreekt momenteel nog ontstellend veel aan kennis.

Ik mag hier nog wel opmerken dat bij waterkeringen bezwijkansen uitsluitend door middel van sterkteberekeningen kunnen worden bepaald, dat wil zeggen, langs deductieve weg. Vanwege het geringe aantal praktijkgegevens is het niet mogelijk een inductieve methode te volgen en uiteraard moeten we hier blij om zijn.

Wat dit betreft is de risicoanalyse van bijvoorbeeld olie- en gasleidingen sterk in het voordeel omdat de praktijk zeer vele gevallen van lekkage heeft geregistreerd, waaruit reële lekkagekansen kunnen worden afgeleid en waaraan door sterkteberekening gevonden kansen kunnen worden getoetst.

Om een bezwijkkans te kunnen berekenen is op zijn minst een rekenmodel nodig, één of ander stelsel van wiskundige formules, waarmee de sterkte, of de weerstand tegen de beschouwde vorm van bezwijken kan worden berekend. Daarnaast moet iets dergelijks worden gevonden voor de grootte van de aanval, of de belasting.

nistische berekening, waarin de basisparameters als vaste, eenduidig bepaalde grootheden fungeren.

Tot voor kort werden alle sterkteberekeningen voor civiele constructies deterministisch uitgevoerd. De onzekerheid die men aanwezig wist werd overbrugd door invoering van veiligheidscoëfficiënten. Voor deze veiligheidscoëfficiënten konden geleidelijk, op grond van praktijkervaring en experimenten, voorschriften en aanbevelingen worden gegeven. Maar het onbevredigende is dat op deze wijze niemand bij benadering iets kan zeggen over de werkelijke betrouwbaarheid van een uitgevoerde constructie. Daarom, nogmaals, wordt er thans erg veel werk verzet om de probabilistische methode tot ontwikkeling te brengen.

Voor één van de bezwijkvormen van dijken zou ik nu gaarne een indruk willen geven van een mogelijke probabilistische behandeling.

Ik heb daarvoor gekozen het bezwijken door afschuiving van een deel van het dijklichaam in binnenwaartse richting, omdat voor deze vorm een praktische stabiliteitsberekening mogelijk is. Kort samengevat komt die erop neer dat volgens een verondersteld gebogen, cirkelvormig glijvlak de mobiliseerbare schuifkracht wordt berekend. Deze kracht vermenigvuldigd met de hefboomsarm ten opzichte van het rotatiecentrum levert een moment dat het evenwichtsverlies, bestaande uit de veronderstelde rotatie, tegengaat. Dit moment stelt de sterkte voor. De belasting wordt gevormd door het moment van het totale gewicht van het beschouwde, eventueel afschuivende grondlichaam. Er bestaan verschillende berekeningsmethoden, maar bij de meeste wordt het grondlichaam in denkbeeldige verticale moten verdeeld om de verdeling van de normaalspanning in het gebogen vlak te kunnen benaderen.

De schuifweerstand in dit vlak wordt dan bepaald door de cohesie c en de korrelwrijving die gelijk is aan het produkt van de effectieve normaalspanning σ en de tangens van de wrijvingshoek ϕ ; $\tau = c + \sigma \tan \phi$.

Door voor een groot aantal verschillende glijvlakken deze

berekening te herhalen, vindt men het ongunstigste en de veiligheidsfactor F die daarbij behoort wordt als juist aanvaard.

Een dergelijk rekenmodel is verre van ideaal omdat niet wordt voldaan aan de evenwichtsvoorwaarden voor elke moot. En die zou in de toestand van grensevenwicht toch wel moeten gelden. Een gelukkige omstandigheid is dat de vergelijking van verschillende rekenpraktijken laat zien dat de verschillen in uitkomst zich beperken tot ongeveer 10%. Het is De Josselin de Jong geweest, die met zijn exact ingestelde wetenschappelijke en artistieke geest altijd deze methode heeft veroordeeld omdat ze geen sluitende oplossing geeft en bovendien een te hoge waarde voor de veiligheidsfactor oplevert. Hij heeft altijd gepleit voor het zoeken naar statisch toelaatbare toestanden waarbij overal in het grondmassief evenwicht heerst om van daaruit een ondergrens van de sterkte en dus van de veiligheidscoëfficiënt te vinden.

Zelfs in zijn meesterlijk afscheidscollege heeft hij door middel van een spectaculair experiment nog eens laten zien hoe weinig respect hij heeft voor de glijvlakberekeningen. In dit verband wil ik ook memoreren een studiedag in het voorjaar gehouden, waar Verruijt liet zien dat hij geen oplossing zag voor de ondergrensmethode bij grond met zowel cohesie als korrelwrijving.

Dus bij gebrek aan beter zijn we nog gedwongen de theoretisch onjuiste methode met glijvlakken te hanteren, die bovendien altijd te optimistische resultaten geeft.

Dit houdt in dat ons gebruikte rekenmodel een onbekende, systematische onzekerheid bevat.

De andere onzekerheden in de stabiliteitsberekening bestaan uit een drietal groepen. Dit zijn ten eerste de grondparameters cohesie, hoek van inwendige wrijving en volumegewicht.

De tweede groep heeft betrekking op de schematisering van de geometrie die bepaald wordt door de hellingen van binnen- en buitenbeloop, de kruinbreedte, de kruinhoogte en de hoogte van het maaiveld aan binnen- en buitenzijde en de diepte van de geul. Voorts de gelaagdheid van de onder-

grond. De derde groep is die van het buitenwater dat samen met de doorlatendheid en de verzadigingsgraad van water en lucht, de ligging van de freatische lijn en van de grondwaterspanningen bepaalt. Het bepalen van de grondparameters vindt meestal plaats door het steken van monsters en het beproeven daarvan in een laboratorium. Deze werkwijze levert ook een aantal onzekerheden op. Uiteraard gaat het hier om een steekproef van een aantal monsters uit een gehele populatie. Wij vinden daarom slechts een benadering van de werkelijke gemiddelde waarde en de standaardafwijking. Maar daarnaast houdt het steken van betrekkelijk kleine monsters van bijvoorbeeld 65 x 100 mm de mogelijkheid in dat de invloed van grove structuren in de grond niet wordt onderkend. Bekend is bijvoorbeeld de bepaling van doorlatendheid van de klei in het binnentalud van een dijk op Schouwen Duiveland, waar de doorlatendheid behalve uit monsters ook in het terrein werd gemeten. Hier bleken de monsterresultaten een factor 100 fout te zijn omdat de invloed van scheuren in de klei daar bijzonder groot bleek te zijn. Wanneer de raaien waarin monsters worden gestoken betrekkelijk ver uiteenliggen, ziet men heel gemakkelijk discontinuïteiten over het hoofd. Zeer plaatselijke klei-, slib- of veenlenzen kunnen alleen worden ontdekt als het meetnet bijzonder dicht is, maar dat kost veel tijd en geld. Ook de beproeving van de monsters bevat onzekerheden. Ik wijs alleen op de invloeden van de middelste hoofdspinning, het aanwezig zijn van anisotrope toestanden en het verschil in resultaat van celproeven en triaxiaalproeven. Dit laatste betekent een onzekerheid in de schuifweerstand van de grond, zowel in de cohesie als in de wrijvingshoek. Daar de geometrie van plaats tot plaats kan variëren, bijvoorbeeld de hoogteligging van het maaiveld of de dikte en het aantal lagen van verschillende grondsoort, zal het nodig zijn voor een dijkvak van zekere lengte één of meer karakteristieke dwarsprofielen vast te stellen. Deze profielen zijn dan geschematiseerde of geïdealiseerde model-

len van de werkelijkheid, maar zij wijken daar wel van af. Er is, wat dat betreft, weinig verschil met het idealiseren van mensen.

Ook de berekening van de freatische lijn en de grondwaterspanningen zit vol onzekerheden. Het begint al met de buitenwaterstand wat betreft de hoogte en de duur tijdens een hoogwaterperiode. Voorts de reeds gesignaleerde moeilijkheden bij het bepalen van de doorlatendheid, het verschil daarbij in horizontale en in verticale richting, wellicht verschil bij omhoog of omlaag gaande stroming.

Ook de consolidatiefactoren zijn niet exact bekend. Het rekenmodel geeft hier geen problemen. Er bestaan enkele welhaast ideale rekenmethoden voor grondwaterstroming.

De vraag komt nu op hoe de eigenlijke berekening van de bezwijkkans kan worden uitgevoerd. Daartoe zal men voor elk van de basisparameters allereerst de kansdichtheidsfunctie moeten zoeken. Voor sommige van die parameters zal een normale of Gauss-verdeling kunnen worden aangehouden, zodat een gemiddelde waarde en een standaardafwijking volledige informatie over de stochastische grootte verschaffen. Bij andere variabelen zal een andere, eventueel niet-symmetrische kansdichtheidsfunctie beter aansluiten bij de werkelijkheid, bijvoorbeeld een Weibull-functie, waarvan ook de Rayleigh-verdeling een vorm is.

Wanneer ik nu in eerste instantie veronderstel dat de buitenwaterstand constant mag worden beschouwd, dan geldt nog niet dat het grondwaterstromingspatroon eenduidig bekend is. De doorlatendheid is immers een stochastische variabele, zodat ook elke karakteristiek voor de freatische lijn als een stochastische grootte moet worden beschouwd.

De andere stochastische variabelen die in een glijvlakberekening moeten worden ingevuld zijn de cohesie, de wrijvingshoek, het volumegewicht, de waterspanning, de hoogte van de kruin en de helling van het binnenbeloop.

Dit zijn nog eens zes stochastische variabelen.

Echter, dit aantal neemt toe tot elf als er twee grondlagen met verschillende grondparameters in beschouwing moeten worden genomen. Voor elk van deze variabelen zal de

kansdichtheidsfunctie moeten worden benaderd, waaruit de gemiddelde waarden en de standaardafwijkingen kunnen worden afgeleid.

Het gaat er nu om met behulp van het rekenmodel de kansdichtheidsfunctie van de veiligheidsfactor te bepalen.

Zou het rekenmodel een lineaire functie van alle variabelen zijn, dan zou men volgens zeer eenvoudige regels de gemiddelde waarde van de veiligheidsfactor en de standaardafwijking kunnen vinden.

Als de variabelen alle een normale verdeling bezitten, is de kansdichtheidsfunctie van de veiligheidsfactor eveneens een normale.

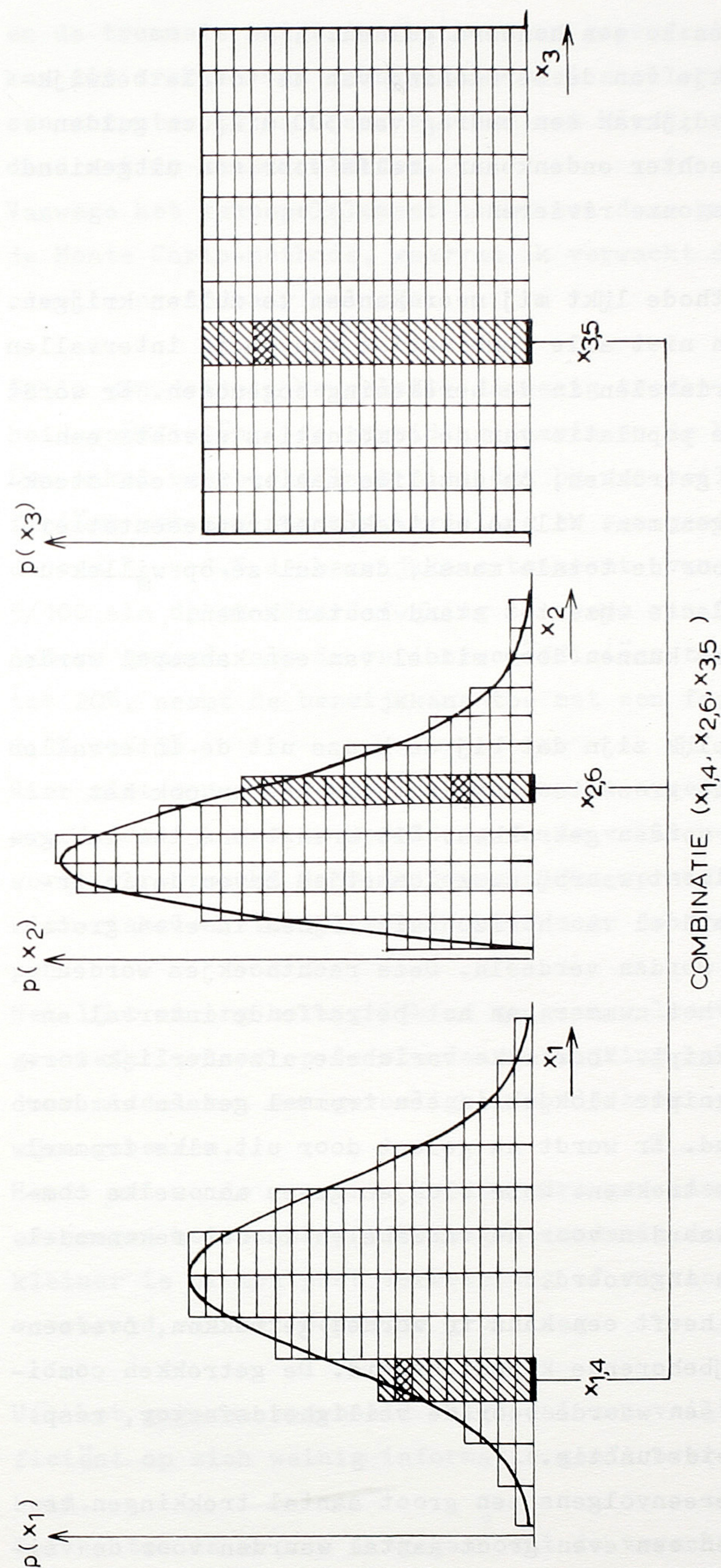
In ons geval, en dat geldt vrijwel altijd, is het rekenmodel niet lineair. Daardoor is een volledig analytische oplossing praktisch onmogelijk wanneer de functie meer dan drie variabelen bevat.

Er zijn dan tenminste drie methoden om de kansrekening van de veiligheidsfactor F of van de eerdergenoemde betrouwbaarheidsfunctie Z te berekenen.

De eerste is het lineariseren van deze functie met behulp van de reeks van Taylor. Zoals Bouma en anderen onlangs hebben getoond kan deze methode soms wel tot redelijk betrouwbare resultaten leiden.

Als tweede kan worden genoemd de numerieke integratie. Door elke kansdichtheidsfunctie in een aantal intervallen te verdelen kan men voor elke combinatie van deze intervallen de kans uitrekenen als aaneengeschakeld produkt van de intervalekansen. Met behulp van het rekenmodel vindt men dan alle mogelijke waarden van de veiligheidsfactor met hun respectievelijke kansen. Hieruit is een kansdichtheidskromme te construeren.

Het voordeel is een zeer goed benaderde oplossing, maar daar staat tegenover het welhaast onoverkomelijke nadeel dat de veiligheid zeer vele malen moet worden uitgerekend. Voor onze stabiliteitsberekening met bijvoorbeeld 6 variabelen en een verdeling van elke kansdichtheidsfunctie in 12 intervallen zijn 12^6 ofwel 3 miljoen berekeningen nodig. Elke berekening, die op zich reeds verschillende glijvlakken behandelt, kost bij het Laboratorium voor Grondmecha-



nica misschien zo een honderd gulden.

Voor een stukje van de berekening van de totale bezwijkkans van een dijkvak een bedrag van 300 miljoen gulden uitgeven is echter ondenkbaar, zelfs voor een uitgekniend ontwerp langs onze rivieren.

Een derde methode lijkt mij meer kansen te zullen krijgen. Daarbij worden niet alle combinaties van de in intervallen verdeelde variabelen in de berekening opgenomen. Er wordt uit de totale populatie van de combinaties slechts een beperkt deel getrokken, op dezelfde manier als een steekproef wordt genomen. Wil zo'n steekproef representatief kunnen zijn voor de totale massa, dan zal ze op willekeurige, op aselechte wijze tot stand moeten komen.

De combinaties kunnen door middel van een kansspel worden geselecteerd.

Het zal duidelijk zijn dat bij de keuze uit de intervallen diegene die de grootste kansdichtheid hebben ook het meest moeten worden getrokken. Dit brengt ons tot een gedachtenexperiment waarbij de kolommetjes boven de intervallen door middel van horizontale lijnen in even grote rechthoekjes worden verdeeld. Deze rechthoekjes worden voorzien van het nummer van het betreffende interval en daarna uitgeknipt. Voor elke variabele afzonderlijk worden de uitgeknipte blokjes in een trommel gedaan en door elkaar geschud. Er wordt nu geloot door uit elke trommel één blokje te trekken. Deze blokjes geven aan welke combinatie van waarden voor de variabelen in het rekenmodel moeten worden ingevoerd.

Elk interval heeft een kans te worden getrokken, overeenkomstig de bijbehorende kansdichtheid. De getrokken combinatie levert een waarde voor de veiligheidsfactor, resp. betrouwbaarheidsfunctie.

Door nu achtereenvolgens een groot aantal trekkingen te doen vindt men een even groot aantal waarden voor de veiligheidsfactor. Door deze te rangschikken kan een kansdichtheidskromme worden geconstrueerd en daaruit vindt men de bezwijkkans; dat is de kans dat F kleiner is dan 1. Nu spreekt het vanzelf dat dit experiment met de blokjes

en de trommels enigszins kan worden geperfectioneerd. Men kan dit trekken van combinaties veel sneller en beter door een computer laten doen, die aselekt kiest, rekening houdend met de kansdichtheden.

Vanwege het kansspelelement noemt men deze gang van zaken de Monte Carlo-methode, waarvan ik verwacht dat ze financieel aanvaardbaar zal zijn.

Er is een duidelijke relatie aanwezig tussen de veiligheidscoëfficiënt, de spreiding daarin en de bezwijkkans. Een enkel voorbeeld laat zien dat bij een veiligheidscoëfficiënt met een normale verdeling en een gemiddelde waarde van $F_m = 1,5$ de bezwijkkans toeneemt van 1/1000 tot 5/100 als de standaardafwijking toeneemt van 0,15 tot 0,3. Anders gezegd; als de variatiecoëfficiënt toeneemt van 10% tot 20%, neemt de bezwijkkans toe met een factor 50 van 0,1% tot 5%.

Hier ziet men de enorme invloed van de spreiding. Het is overduidelijk dat de spreiding in de veiligheidsfactor wordt veroorzaakt door de gezamenlijke spreiding in de basisvariabelen; in dit geval onder meer de grondeigenschappen.

Het lijkt nu erg belangrijk na te gaan welke variabelen de grootste invloed op de standaardafwijking hebben. Dit kan door middel van een gevoeligheidsonderzoek op eenvoudige wijze gebeuren.

Heeft men zo de grootste boosdoeners gevonden, dan kan men overwegen het ontwerp te wijzigen, zodanig dat hun invloed kleiner is of men past verbetering of vervanging toe, bijvoorbeeld van een bepaalde grondlaag.

Uit het gegeven voorbeeld volgt dat een veiligheidscoëfficiënt op zich weinig informatie geeft over de veiligheid.

Tot nu toe is er van uitgegaan dat de verschillende stochastische variabelen onafhankelijk van elkaar zijn. Is er echter correlatie tussen twee of meer parameters, dan moet dat uiteraard in de berekening tot uiting worden gebracht.

Een interessant probleem vormt de invloed van de lengte van een dijk op de bezwijkkans. Wanneer een dijk in de lengterichting bestaat uit statistisch homogeen materiaal, dat wil zeggen, dat zowel de gemiddelde sterkte als de spreiding daarin over de lengte constant zijn, dan moet men verwachten dat een lange dijk een grotere bezwijkkans heeft dan een korte, die overigens in dezelfde omstandigheden verkeert.

Van Marcke heeft in dit verband onderzoek gedaan naar de correlatie-afstanden van de schuifweerstand van grond. Verder heeft hij door middel van driedimensionale glijvlakberekeningen aangetoond dat de verwachtingswaarde van de lengte van een afschuivende dijkmoot kan worden berekend. De praktijk laat zien dat vaak lengtes van enige tientallen meters voorkomen. Uit de berekeningen blijkt dat de bezwijkkans van een dijk voor een belangrijk deel recht evenredig is met de lengte. Het probleem heeft enige overeenkomst met een ketting waarvan de zwakste schakel breekt.

Voor het ontwerp en het onderhoud van dijken is het belangrijk te weten dat een 20 km lange dijk ongeveer 20 maal zo onveilig is als eenzelfde dijk van 1 km lengte. Een interessant onderwerp van studie zou kunnen zijn de invloed die de werkwijze bij het opbouwen van de dijk heeft op de correlatie-afstanden.

Voor de gehouden beschouwing over het evenwicht van een dijk is uitgegaan van een constante buitenwaterstand, en, het zal U niet zijn ontgaan, ook van in de tijd constante grondparameters.

Dit zou betekenen dat er een absolute bezwijkkans bestaat tegen afschuiving van het binnentalud en ook dat de dijk, eenmaal gebouwd en de waterstand gedurende enige tijd weerstaan hebbend, nooit meer zou bezwijken.

Zo is het echter niet. Zelfs al zou de buitenwaterstand nimmer wijziging ondergaan, dan zal de sterkte van de dijk wel veranderen. Er kunnen zettingen ontstaan, waardoor hoogte, helling, volumegewicht en doorlatendheid kunnen wijzigen.

Verder kunnen planten en dieren wijziging in de sterkte teweegbrengen. Te denken valt hierbij aan mollen, konijnen, ratten, wormen en, de laatste tijd steeds meer opdringend, de muskusratten.

Voorzover de wijzigingen in de tijd systematisch zijn, is er sprake van een in de tijd variërende bezwijkkans. Men zou voor elke periode van bijvoorbeeld 5 jaar een andere kans kunnen aanduiden.

Voorzover de wijzigingen willekeurig in de tijd veranderen, dus op stochastische wijze, is de berekende kans wellicht zelf weer als een stochastische grootte te beschouwen met een gemiddelde waarde en een standaardafwijking.

Bezien wij nu de meer reële situatie, waarbij de buitenwaterstanden sterk variëren, dan lijkt het het eenvoudigst deze waterstand als een stochastische grootte te beschouwen. Omdat echter hier de tijd een rol speelt zal men niet over absolute kansen kunnen spreken, maar slechts over de kans per periode.

Zo kan men wellicht de hoogste stand per jaar als variabele kiezen. Maar het is ook mogelijk de hoogste stand per eeuw of per twee eeuwen te beschouwen.

Uit de overschrijdingsfrequentiekromme van de hoogwaterstanden is het mogelijk de overschrijdingskans-kromme af te leiden. En daaruit kan de kansdichtheidskromme voor maximum standen per periode worden bepaald. Deze maximum stand, bijvoorbeeld per eeuw, kan als stochast worden ingevoerd met een gemiddelde waarde en een standaardafwijking. Deze variabele heeft overigens geen normale verdeling. Hoe de invloed van deze hoogwaterstanden precies in rekening moet worden gebracht is nog niet duidelijk. Hierbij speelt niet alleen het zuiver statistische probleem, maar ook het fysische probleem van de grondwaterspanningen in relatie tot de duur van de hoogwaterperiodes.

In getijgebieden is deze altijd kort, maar bij rivierdijken kan de tijdsduur aanzienlijk zijn. Men zal hier dan niet alleen de hoogwaterstand zelf, maar ook het verloop in de tijd in rekening willen brengen. Ook dat lijkt, wat het

statistisch probleem betreft, moeilijk.

Ook voor elk van de andere bezwijkvormen bestaan soortgelijke problemen en groot gebrek aan kennis. Bijvoorbeeld op het gebied van de golfbeweging, de golfklappen en de golfop- en overloop. Ook de kennis van de onderloopsheid of piping is niet zo ver ontwikkeld dat enigszins betrouwbare kansberekeningen kunnen worden gemaakt.

Ik zou nu een paar conclusies willen trekken.

1. De deterministische denkwijze wijkt sterk af van de probabilistische. Bij het geleidelijk overschakelen van de ene naar de andere zal men daarom moeten rekening houden met het optreden van misverstanden, zowel bij ontwerpers en beheerders als bij bewoners van gebieden die door dijken worden beschermd.
2. De toepassing van de statistische wetenschap zal verder moeten worden ontwikkeld en steeds kritisch worden beschouwd als het bijvoorbeeld gaat om in de tijd variërende statistische eigenschappen van de verschillende variabelen. Hand in hand hiermee zal de invloed van de atmosferische toestand op deze variaties moeten worden bestudeerd. Daarbij zullen de systematische variaties moeten worden onderscheiden van de stochastische. Plaatselijke verstoringen door ingrepen van mensen, dieren en planten zullen eveneens moeten worden meegerekend. Ik denk dat over één en ander nog veel en diep zal moeten worden nagedacht. Kinderziekten in het probabilistische denkproces zullen, dunkt me, onvermijdelijk zijn.
3. Op grond van het tot nu toe uitgevoerde onderzoek en het vorderingstempo daarvan moet worden verwacht dat nog vele jaren nodig zullen zijn om het fysisch gebeuren in en op de dijk voldoende te leren kennen. Voldoende voor het maken van alle probabilistische sommen, nodig voor de bepaling van de integrale bezwijkkans; zelfs voor het bepalen van de afzonderlijke kansen voor het ontstaan van de diverse bezwijkvormen.

Ik denk onder meer aan de statistische beschrijving van de golven voor de dijk, de kennis van de golfklap naar intensiteit, duur en variatie daarvan in plaats en tijd.

Ook aan de ontwikkeling van rekenmodellen voor de sterkte van asfaltbekledingen en van bekledingen van gezette steen- of betonblokken.

Verder aan de bepaling van erosieweerstand van verschillende soorten grond onder verschillende omstandigheden, en van met gras begroeide grondbelopen.

Ik denk aan vele andere nog niet opgeloste problemen. Er mag dan ook worden verwacht dat de waarde van een bezwijkkansberekening gedurende de komende 10 à 15 jaar nog zeer beperkt zal zijn.

4. Doordat fouten kunnen worden gemaakt bij het bepalen van gemiddelde waarden en van spreidingen in de variabelen, en doordat er systematische fouten in het rekenmodel kunnen schuilen, en doordat bovendien eventuele positieve of negatieve correlaties tussen de parameters niet of onvoldoende kunnen worden vastgesteld, zal de per bezwijkvorm berekende bezwijkkans slechts binnen een ruime marge betrouwbaar zijn.

Een factor 10 à 100 lijkt hiervoor niet zo ondenkbaar. Bij velen zal dit misschien een gevoel van ongerustheid of onzekerheid veroorzaken. Het klinkt allemaal zo anders dan het vertrouwde getal van 1/10.000.

5. Op grond van de vorige punten denk ik dat publikatie van uitgerekende kansen of van gestelde eisen in dit opzicht bijzonder sceptisch moeten worden beoordeeld. Dit geldt bijvoorbeeld voor een mededeling in het driemaandelijks bericht van de deltawerken, waar wordt gesteld dat een bezwijkkans voor de stormvloedkering in de Oosterschelde wordt aangehouden van 10^{-7} per jaar.
6. Er wordt tegenwoordig veel gesproken over de noodzaak tot het creëren van gelijke kansen voor personen en groepen.

Zo komt ook de wens naar voren om mensen, wonend in overeenkomstige situaties, gelijke kansen op overstroming te gunnen.

Ik hoop dat uit het voorgaande duidelijk is geworden dat men voorlopig niet mag verwachten dat de bevolking van onze lage gebieden in dit opzicht gelijke kansen heeft.

Hierbij moet overigens wel worden bedacht dat zelfs bij gelijke kansen niet van gelijke uitkomsten kan worden gesproken: Het ene gebied zal in de komende eeuw wel en een ander met gelijke kans zal niet worden getroffen.

7. Als gevolg van het streven naar probabilistisch denken kunnen de kosten en de tijd van voorbereiding bij dijkontwerpen naar verwachting sterk stijgen. Vooral wanneer wordt gedacht aan zogenaamde uitgekende ontwerpen voor onze rivierdijken.

8. Nu de meeste dijken langs onze kust verhoogd zijn en van flauwer binnenbelopen zijn voorzien, kan bij een toekomstige superstorm een andere bezwijkvorm gaan overheersen dan het overlopen en bezwijken van het binnenbe-
loop.

Verwacht kan worden dat de bekleding van het buitenbe-
loop nu relatief het zwakke punt is geworden.

Daarom is studie en onderzoek op het gebied van bekledingen wel bijzonder urgent.

Dames en Heren, ik heb sinds kort de afdeling der Civiele Techniek van deze Technische Hogeschool verlaten.

Ik kan U allen zeggen dat het een goede afdeling is met een uitstekende sfeer onder collega's en medewerkers.

Ik ben hen allen dankbaar voor de hulp die zij mij hebben gegeven.

In het bijzonder wil ik de leden van de vakgroep Constructieve Waterbouwkunde voor hun inzet en trouw dankzeggen.

Alles is een zaak van geloof.

Men gelooft dat alle dingen louter door het toeval worden geregeerd; men kan geloven dat alle gebeuren vooraf is gedetermineerd, of men gelooft in persoonlijke ingrepen door de God van het heelal.

In alle gevallen blijft men in het onzekere over de rampen

die in onze eeuw nog zullen gebeuren.

Geschiedenissen als die van de mens Noach, die een waarschuwing kreeg, en daardoor de hoogst bekende vloed vermocht te overleven, zijn per slot uitzonderingen.

Bij alle onzekerheden die we hebben kunnen constateren is er misschien toch één zekerheid. Die van de grote voorganger van broeder Juniper van Peru; ik bedoel die van Paulus van Tarsus als hij met een vloed van woorden aan zijn vrienden in Rome schrijft:

Want ik ben verzekerd dat niets of niemand ons zal kunnen scheiden van de liefde van God.