



De effecten van explosies
op waterkeringen
A-73.036

*pag. 32 van BL 81-34.
neevallen?*

gubertsen pag. 22 en 23.

Centrum voor Onderzoek
Waterkeringen
April 1982.

De effecten van explosies op waterkeringen

A-73.036

Inhoud:

1. Doel van het rapport
2. Inleiding
3. Explosies
 - 3.1. Medium
 - 3.2. Lokatie
4. Waterkeringen
5. Criteria voor explosies ten aanzien van waterkeringen
 - 5.1. De explosiekrater en plastische zone
 - 5.2. Bodemverweking en zettingsvloeiing
 - 5.3. De schokgolf
 - 5.3.1. De schokgolf in de lucht
 - 5.3.2. De schokgolf in het water
6. Consequenties van de lokatie-medium relatie
 - 6.1. Explosies op/boven maaiveld, droge grond
 - 6.2. Explosies op/boven maaiveld, (partieel) verzadigde grond
 - 6.3. Explosies onder maaiveld, droge grond
 - 6.4. Explosies (in water) onder maaiveld/bodem, (partieel) verzadigde grond
 - 6.5. Explosies in het water op/boven de grond

APPENDIX

7. Literatuur

1. Doel van het rapport

Verscheidene omstandigheden hebben ertoe geleid, dat waterkeringbeheerders de laatste tijd worden geconfronteerd met de vraag in welke mate (potentiële) explosies een gevaar kunnen opleveren voor waterkeringen.

De vragen spitsten zich hierbij onder andere toe op welke criteria te moeten hanteren, en problemen als:

- a. Wat is de maximaal toelaatbare ladinggrootte in gewichtshoeveelheden explosief die op zekere afstand van de waterkering tot ontploffing kan komen of tot ontploffing kan worden gebracht?
- b. Wat is de minimum afstand en diepte waarop een zekere lading tot een ontploffing kan komen of mag worden gebracht?

Het onderhavige rapport is bedoeld om door middel van bestaande gegevens een voorlopig antwoord te geven op deze vragen, waarbij als uitgangspunt het niet aantasten van de waterkeringen voorop zal staan.

Hierbij moet direct worden aangetekend, dat in de beschikbare literatuur nog geen sprake is van systematisch gericht onderzoek. Daar bovendien een aantal verzamelde gegevens niet betrekking heeft op waterkeringen kan het zijn dat deze gegevens correctie of uitbreiding behoeven.

2. Inleiding

De uitwerking van een explosie op de omgeving is zeer moeilijk mathematisch te beschrijven en voor een deel zelfs nog onopgelost. Een voorspelling van de bij explosies optredende verschijnselen zal voor een belangrijk deel moeten worden gebaseerd op waarnemingen bij eerdere explosies. Hiertoe zijn "schaalwetten" opgesteld, die de verschillende uitwerkingen van een explosie globaal voorspellen en waarmee de omrekenen voor explosies van verschillende ladinggrootte onder soortgelijke omstandigheden mogelijk gemaakt is.

Het zal echter duidelijk zijn dat op deze wijze uitgevoerde berekeningen, bijvoorbeeld voor het bepalen van de vereiste afstand tussen een explosie van een zekere ladinggrootte en een op zichzelf ingewikkelde discontinuïteit als de waterkering, slechts een indicatief karakter kunnen hebben.

Het is uit een oogpunt van waterkeringbelang dan ook gewenst dat men zich niet afvraagt hoe groot (lees: klein) de minimale afstand tussen een explosie en de waterkering moet zijn, maar eerder hoe ver men van de waterkering verwijderd kan blijven met de explosies, zonder in ernstig conflict te geraken met ander belangen. Als in de geest van deze "hoofregel" gehandeld zou worden, zouden zeer waarschijnlijk een groot aantal problemen met betrekking tot explosies bij waterkeringen bij voorbaat zijn opgelost.

Aangezien er echter in de praktijk zich altijd wel situaties voordoen, waarbij het optreden van explosies in de nabijheid van waterkeringen moeilijk te voorkomen is, zal getracht moeten worden de relatie:

afstand tot de waterkering - explosiediepte - ladinggrootte van het explosief aan te geven bij de verschillende omstandigheden waaronder de explosie kan plaatsvinden en waarbij geen schade aan de waterkering wordt veroorzaakt.

X

3. De explosies

Het merendeel van de explosies, die zich voordoen, wordt doelbewust veroorzaakt ten behoeve van voornamelijk seismische onderzoeken. Explosies kunnen echter ook voorkomen ten gevolge van ongevallen, zoals explosies van munitie-opslagplaatsen, gasleidingen en gastanks.

In dit rapport wordt hoofdzakelijk gedacht aan explosieverschijnselen bij detonatie (incidenteel deflagratie). Voor de aspecten betreffende explosies van gasleidingen bij waterkeringen kan men de door de Technische Adviescommissie voor Waterkeringen opgestelde "Leidraad voor constructie en beheer van gasleidingen in en nabij Waterkeringen" lit. 16 raadplegen.

Ten aanzien van het gevaar voor een waterkering kan een onderscheid worden gemaakt tussen de doelbewust veroorzaakte explosies en die ten gevolge van een ongeval. Immers bij explosies, die doelbewust worden veroorzaakt heeft men de vrije keuze van het tijdstip van de ontploffing, zodat men daarbij eventueel kan wachten tot de omstandigheden gunstig zijn en een geschikte waterstand voor de kering aanwezig is. Dit laatste geldt uiteraard alleen voor dijken, die een niet permanente waterstand moeten keren, zoals rivier- en zeedijken, en niet voor de dijken rond het IJsselmeer en de randmeren, langs kanalen en de boezemkaden.

Zonder al te uitvoerig in te gaan op de verschillende soorten explosieven, moet volledigheidshalve hieraan enige aandacht worden besteed in verband met de verschillen in uitwerking bij ontploffing.

Bij beschouwing van een zekere hoeveelheid (massa) explosief materiaal zal bij detonatie de totale hoeveelheid energie die vrijkomt en de energie per tijdseenheid in de eerste plaats afhankelijk zijn van de soort springstof.

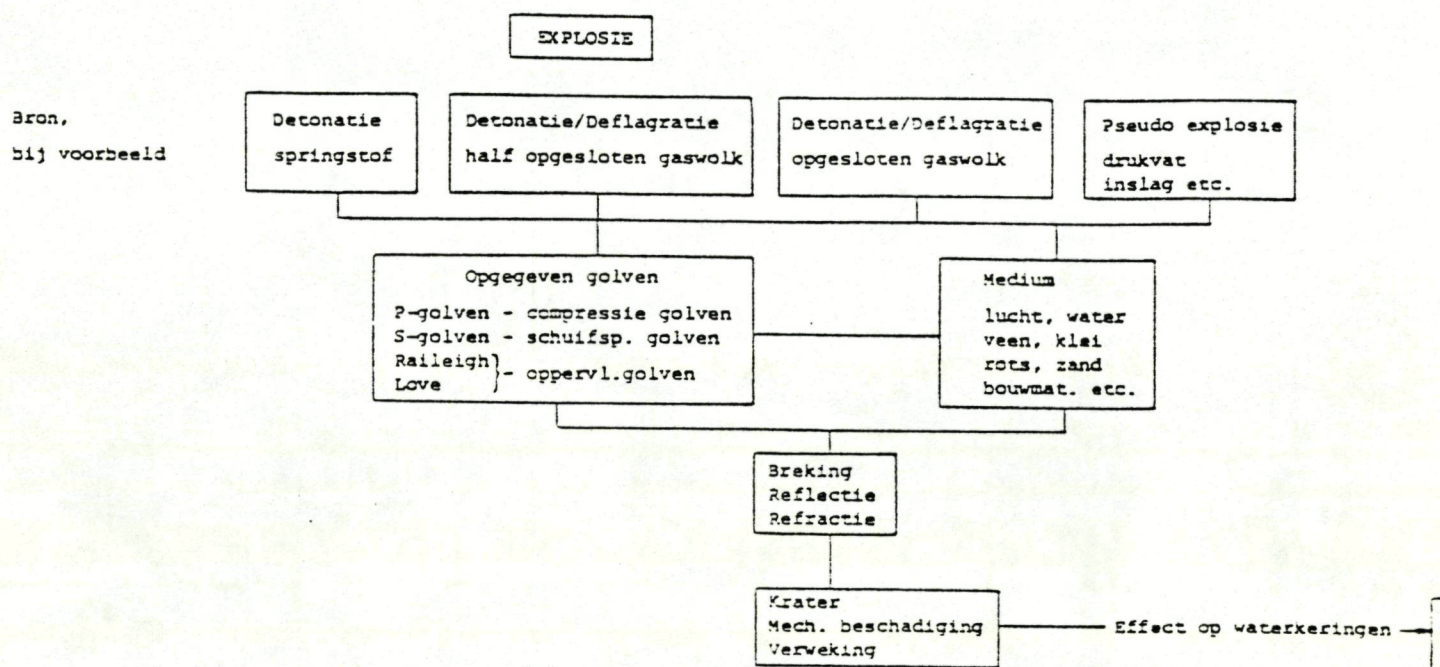
Voorts zullen deze ondermeer worden beïnvloed door de dichtheid van de springstof, de vorm van de lading (puntlading of gestrekte lading) en de diameter van de deeltjes bij korrelvormige springstoffen.

Een en ander zal voor extrema grote verschillen te zien geven.

In dit rapport is echter steeds uitgegaan van puntladingen van een zekere hoeveelheid equivalent T.N.T., met de motivering:

- puntladingen worden in de praktijk veel gebruikt, en zijn rekentechnisch eenvoudiger dan bijvoorbeeld gestrekte ladingen.
- het is gebruikelijk T.N.T. als "referentie springstof" te gebruiken;
- Bij seismische onderzoeken wordt veelvuldig gebruik gemaakt van explosieven die een zelfde uitwerking kunnen hebben als T.N.T., zodat deze hoeveelheden springstof na omrekening vergelijkbaar zijn.

Een en ander houdt echter in, dat bij toepassing van andere dan explosieve stoffen dan T.N.T., de in dit rapport genoemde afstanden niet zonder meer behoeven te worden aangehouden of dat omrekening naar equivalenten TNT moet plaatsvinden. Ter oriëntatie is een schema A gegeven waarop eenvoudig valt af te lezen welke verschijnselen en effecten er bij explosie optreden en respectievelijk in de volgende hoofdstukken aan de orde zullen komen.



Schema A

3.1. Het medium

De verschijnselen op een zekere afstand van het explosiepunt zullen sterk afhankelijk zijn van het medium, waarin de explosie plaatsvindt.

Om enkele begrippen duidelijk te maken eerst het volgende. De bewegingsvergelijkingen bij een dynamische belasting op het oppervlak van een half-oneindig, homogeen, isotroop, elastisch medium (eigenschappen vastgelegd door een elasticiteitsmodulus E en constante van Poisson ν) zijn bekend lit.2. Hieruit blijkt dat onder die omstandigheden de bewegingen van het medium kunnen worden beschreven door een onderverdeling van de totale beweging in een aantal golven met een verschillend karakter, namelijk:

- een longitudinale golf of compressie golf (P-wave), waarbij de bewegingsrichting van de deeltjes van het medium in de richting van de golfvoortplanting is:
- een transversale golf of schuifgolf (S-wave), waarbij de beweging van de deeltjes loodrecht op de golfvoortplantingsrichting staat.
- een z.g. Raileigh golf (R-wave), waarbij de deeltjes een min of meer rollende beweging maken.

Naast de reeds genoemde zijn nog een aantal kenmerkende verschillen tussen deze golven aan te wijzen. Zo planten de beide eerstgenoemde golven zich door het gehele medium voort, terwijl de Raileigh golf zich slechts aan het oppervlak en op een geringe diepte daaronder manifesteert. Voorts zijn de snelheden waarmee de verschillende golven zich door het medium voortplanten ongelijk; de snelheden en de verhouding tussen de snelheden van de golven zijn afhankelijk van de eigenschappen van het materiaal. De demping, die optreedt in het medium bij toenemende afstand tot de belastingbron is eveneens voor de verschillende golven ongelijk; de Raileigh golf dempt minder snel uit dan de beide andere. Bovendien zal deze R-wave een relatief groot deel van de totale energie bevatten, zodat zeker op enige afstand de sterkste bewegingen aan de oppervlakte veroorzaakt worden door deze golf.

Een bijzonder geval doet zich voor als een ontploffing zich voordoet in een medium, waarin geen schuifspanningen kunnen worden opgenomen. Hieraan voldoen bij benadering water en lucht. In deze gevallen zal er alleen sprake zijn van een compressie golf.

In de praktijk echter zullen ten opzichte van deze geïdealiseerde toestanden zich steeds complicaties voordoen, die een voorspelling van de uitwerking van een explosie bemoeilijken. Dit komt vooral naar voren bij explosies in de grond; grond is noch elastisch, noch homogeen en zal vrijwel altijd min of meer gelaagd zijn.

Vooraf bij een sterke gelaagdheid van de bodem kunnen de golfpatronen zeer ingewikkeld worden, waardoor de grondbeweging en spanningsveranderingen nauwelijks of in het geheel niet meer te voorspellen zijn. Elke invallende golf op een

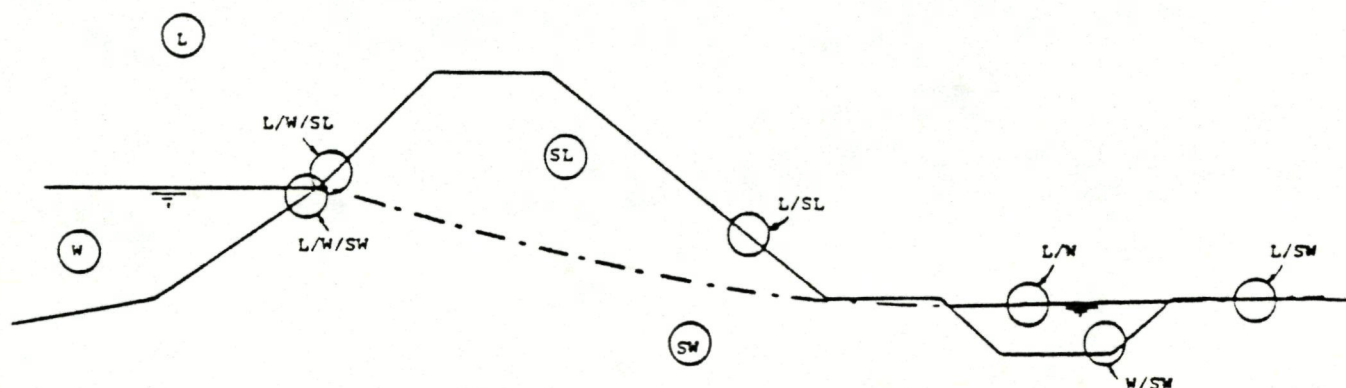
lagenscheiding zal namelijk door reflectie en breking in totaal vier nieuwe golven in het medium veroorzaken. Onder bepaalde omstandigheden kunnen zich bovendien op de laagscheidingen golven voortplanten. Ook de oppervlakte golven zullen bij discontinuïteiten reflecteren, waarbij behalve een nieuwe oppervlakte golf, ook golven in het medium worden gereflecteerd.

De bovengenoemde verschijnselen zullen er dan ook de oorzaak van zijn dat de uitkomsten van de berekeningen volgens de "schaalwetten" slechts een vrij grove benadering kunnen zijn, doordat zelfs bij "op het oog" soortgelijke omstandigheden, waarin de explosie plaatsvindt, toch nog verschillen aanwezig zullen zijn. De uitkomsten van metingen geven ook in die gevallen altijd een vrij grote spreiding in de resultaten te zien.

Een zekere ingebouwde reserve ten aanzien van de vereiste afstand tussen een explosie en de waterkeringen moet ook uit dit oogpunt als beslist noodzakelijk worden beschouwd.

3.2. De lokatie

In verband met verschillen in de wijze, waarop de bij een explosie vrijkomende energie aan de omgeving wordt medege-deeld (en dus de verschillen in belasting op de waterkering) is het nuttig een indeling te maken van de typen explosies die nabij de waterkeringen kunnen voorkomen. Deze indeling kan er als volgt uitzien:



Lokatie, medium en grensvlakken waar explosies kunnen plaatsvinden

Figuur B

Naast deze indeling naar de plaats van de explosies moet ook onderscheid worden gemaakt naar de grondsoort (of eigenschappen van de grond), waaruit de bodem is opgebouwd. Grofweg zijn hierbij drie hoofdtypen te onderscheiden, namelijk bodems van zand, klei of veen.

In het algemeen werd in de literatuur slechts informatie aangetroffen over explosies in zand- en kleigrond.

Materiaal betreffende explosies in veen was schaars.

Slechts in één publikatie werd melding gemaakt van trillingsmetingen in veengebieden lit. 19.

Op grond van uitspraken van het Adviesbureau der Genie zou kunnen worden vastgesteld dat de uitwerking van een explosie in waterverzadigde veengrond vergelijkbaar is met explosies in waterverzadigde klei. Bij gemis aan voldoende gegevens zou de uitwerking van explosie in veen voorlopig globaal gelijkgesteld kunnen worden aan die in klei.

Bi explosies op het land zijn bovendien aanmerkelijke verschillen te constateren bij explosies op, respectievelijk in waterverzadigde en niet waterverzadigde grond. In het rapport zal de nadruk liggen op explosies in waterverzadigde grond, omdat deze nabij waterkeringen veel worden aangetroffen.

4. De waterkeringen

Onder de verzamelnaam waterkeringen wordt, zoals de naam reeds aanduidt, elke constructie verstaan, die een blijvende scheiding tussen land en water moet vormen.

Verskillende onderverdelingen van deze keringen zijn te geven:

- a) naar de functie
 - eerste waterkeringen
 - tweede waterkeringen
- b) naar de ligging
 - keringen aan zee
 - keringen om meren
 - keringen langs rivieren en beken
 - keringen langs kanalen en boezems
- c) naar te keren water
 - waterstanden; permanent, periodiek of incidenteel hoog
 - water; zout, zoet of brak
- d) naar het type waterkering
 - dijken
 - duinen
 - kunstwerken

Bij het opstellen van richtlijnen voor de vereiste afstand tussen een explosie en de waterkering zou elk van bovengenoemde factoren een rol kunnen spelen ten aanzien van het aanvaarden van een zeker (gering) risico.

Zo zou een primaire waterkering met een constant groot verval een grotere (statistische) zekerheid behoeven voor de maatgevende uitwerking van de explosie dan bijvoorbeeld een rivierdijk in de perioden van lage afvoeren. Aangezien echter en in de explosieven en in de terreinomstandigheden zoveel onzekerheden voorkomen, is deze aanpak in de praktijk nauwelijks te verwezenlijken.

Er zal genoeg moeten worden genomen met een vaststelling van de vereiste afstand explosie-waterkering, waarbij het risico voor de waterkering onder ongunstige omstandigheden zo klein mogelijk gehouden is.

In dit rapport zal dan ook getracht worden uiteindelijk te komen tot een relatie tussen de ladinggrootte van een explosie, die plaatsvindt onder bepaalde omstandigheden en de afstand die daarbij tot de waterkering in acht moeten worden genomen, waarbij het risico van schade aan de waterkering tot een minimum beperkt is.

De grootte van dit risico is hierbij helaas niet te geven. Een onderscheid van waterkeringen in enerzijds de grondlichamen (dijken en duinen) en anderzijds kunstwerken lijkt echter door het geheel andere constructie-type wel zinvol.

Blijft nog de vraag wat in een concrete situatie tot de waterkering is te rekenen.

Voor een kunstwerk ligt dit vrij duidelijk, zeker ten opzichte van een grondlichaam. Bij deze laatste is het terrein aan weerszijden van dit lichaam tot een zekere breedte es-

sentieel voor de stabiliteit en moet derhalve worden beschouwd als behorend tot de waterkering. De grootte van deze afstand is afhankelijk van de omstandigheden en in principe niet in een algemene regel vast te stellen. Wel is er een relatie te onderkennen tot de hoogte van het grondlichaam. Uit een onderzoek van het Laboratorium voor Grondmechanica, zoals dit vermeld is in de leidraden voor constructie en beheer van vloeistof- en gasleidingen in en nabij waterkeringen van de T.A.W., zou een veiligheidsstrook met een breedte van viermaal het hoogteverschil tussen de kruin en het aangrenzende terrein onder normale omstandigheden voldoende zijn om de invloed van een buiten deze strook optredende verstoring (b.v. ontgronding) op de stabiliteit van de kering te elimineren.

Hantering van deze breedte van de veiligheidszone lijkt ook bij de beoordeling van explosies bij dijken het meest eenvoudig. Als echter wordt getwijfeld aan de geldigheid van het door het Laboratorium voor Grondmechanica uitgevoerde onderzoek voor een zeker geval, bijvoorbeeld doordat extreem slappe lagen in de ondergrond voorkomen, of als een kleinere breedte van de veiligheidszone wordt gewenst, dient met een grondmechanisch onderzoek de minimale breedte nader te worden vastgesteld.

5. Criteria voor explosies ten aanzien van waterkeringen

Bij een explosie kunnen een aantal daarbij optredende verschijnselen een gevaar voor de waterkering vormen. Welke van deze verschijnselen in een bepaalde situatie de maatgevende zal zijn, hangt af van een aantal factoren, zoals:

- vindt de explosie in de lucht, in water of in de grond plaats en op welke hoogte, respectievelijk diepte;
- hoe is de grondgesteldheid ter plaatse; (grondsoort en eigenschappen watergehalte e.d.)
- welke soort waterkering is aanwezig (dijk, duin of kunstwerk) en welke mate van stabiliteit is aanwezig zonder invloeden van een explosie.

In principe vormen bij een explosie de volgende verschijnselen een directe bedreiging voor de waterkering:

- a. Het geheel of gedeeltelijk vernielen van de waterkering door de vorming van een explosiekrater in de grond met verlies van stabiliteit (van het restant) van de waterkering als gevolg van de kratervorming en de breuk- en plastische zone in de grond.
- b. Bezwijken van de kering door vermindering van de draagkracht (opneembare schuifspanning) in een waterverzadigde bodem (bodemverwerking, zettingsvloeiing)

In het navolgende zullen deze gevaren nader worden toegelicht en uitgewerkt, waarbij getracht zal worden een relatie tussen de ladinggrootte en de vereiste afstand van het explosiepunt tot de waterkering te geven voor de verschillende omstandigheden waaronder de explosie plaatsvindt. Naast de bovengenoemde directe gevaren voor de stabiliteit van de waterkering kan door explosies ook indirect het waterkerend vermogen achteruit gaan, bijvoorbeeld door grotere zakkingen. Deze laatste zijn in dit rapport niet nader gekwantificeerd.

5.1. De explosiekrater en plastische zone

Bij explosies kan een krater in de bodem worden gevormd, doordat door de zeer hoge plaatselijke belastingen op of in de grond, bodemmateriaal wordt weggeslingerd.

Experimenteel zijn relaties vastgelegd tussen de ladinggrootte van de explosie en de blijvende kraterafmetingen bij verschillende grondsoorten en omstandigheden.

Deze relaties hebben doorgaans de vorm:

$R = p \cdot W^q$, waarin

R = kraterstraal,

W = springstofhoeveelheid (massa)

p en q zijn experimenteel bepaalde coëfficiënten, afhankelijk van grondsoort, watergehalte en dergelijke.

X

De afmetingen van kraters ten gevolge van explosies onder het maaiveld zullen toenemen met toenemende diepte van de explosie tot dat een zekere maximale waarde wordt bereikt. Bij verdere toename van de explosie-diepte zullen de afmetingen allengs afnemen en zullen bij een zekere diepte slechts resulteren in een geringe zakking van de bodem. De diepte waarop de explosie moet plaatsvinden om de grootste afmetingen te veroorzaken (door militairen de optimumdiepte genoemd) is afhankelijk van de ladinggrootte, de grondsoort en dergelijke, waarin de explosie plaatsvindt.

Volgens lit. 4 en lit. 8 worden de grootste kraterstralen verkregen bij explosies op een diepte $d = 0,5 \text{ à } 0,8 W^{1/3}$ (W in kg springstof, d in meters).

Deze stralen bedroegen dan ruim het dubbele van die verkregen bij maaiveldexplosies.

Voor de bepaling van de kraterstraal als gevolg van explosies in de bodem zou eenvoudigheidshalve, zonder te letten op de explosiediepte, een bovengrens voor de kraterstraal gehanteerd kunnen worden die tweemaal zo groot is als die bij de maaiveldexplosies, zoals vermeld in tabel 1.

5.2. De bodemverweking en zettingsvloeiingen

Bij een explosie met voldoende energie-inhoud in of op een waterverzadigde bodem zullen deformaties optreden als gevolg van wijziging in normaal- en schuifspanning. Uit waarnemingen is gebleken dat deze structuurveranderingen zowel in een bodem van cohesieve grond als van cohesieloze grond voorkomen. Soms kunnen daarbij wateroverspanningen optreden ten gevolge van het heroriënteren van zandkorrels, hetgeen veelal optreedt bij losgepakte zanden.

Door het overspannen water zal de korrelspanning in de bodem ten opzichte van de toestand voor de explosie zijn verminderd of zelfs geheel wegvallen, waardoor de schuifweerstand van de grond eveneens verminderd of zelfs tot nul gereduceerd wordt.

Deze vermindering van de schuifweerstand in de grond rond het explosiepunt wordt bodemverweking genoemd. De mate waarin het draagvermogen van de grond in de nabijheid van de explosie afneemt kan worden uitgedrukt als:

$$\frac{\Delta u}{\sigma'} = a + b \ln \frac{W}{R} \quad (\text{lit.20})$$

Δu = wateroverspanning in Pa

σ' = korrelspanning in Pa

W = ladingmassa in kg TNT equiv.

R = afstand tot de lading in m

a,b = coëfficiënten afhankelijk van grondsoort en dichtheid

De verhouding $\Delta u / \sigma'$ kan gezien worden als een criterium voor bodemverweking, waarden $\leq 0,1$ kunnen als veilig gelden, terwijl waarden vanaf 0,8 als volledig verweekt kunnen wor-

den aangemerkt. Waarden tussen deze extrema geven aanleiding tot een nadere beschouwing om te zien of die in gegeven omstandigheden toelaatbaar zijn.

	a	b
los gepakt zand	2,15	0,74
gemiddeld	1,65	0,64
vast gepakt zand	1,53	0,77

Zie ook figuur C

In de nabijheid van waterkeringen komen soms zeer losgepakte zandgronden voor. In een dergelijke grondsoort kan deze verweking gemakkelijk tot een zettingsvloeiing leiden als de bodem onder een helling ligt. Overigens moet erop worden gelet dat verweking met kans op een zettingsvloeiing op grotere afstand ook kan voorkomen als de grond er daar relatief gevoelig voor is, terwijl de explosie plaatsvindt in daarvoor ongevoelige bodem.

Eerder is aangegeven dat in een (elastisch) medium de Raileigh-golf het minst gedempt wordt in de afstand en de meeste energie bevat, zodat verondersteld mag worden dat op grotere afstanden deze R-wave verantwoordelijk is voor verwekingen en het eventuele begin van een zettingsvloeiing. Uitzonderingen kunnen zich voordoen in gevallen waar door reflectie van de P- of S-wave op grote afstand een trilling ontstaan, die soms een grotere belastingwisseling veroorzaken kan.

Het optreden van een zettingsvloeiing als gevolg van een verweking door een explosie hangt in het algemeen af van:

- de oorspronkelijke spanningstoestand ter plaatse;
- de erop gesuperponeerde spanningen;
- het aantal belastingwisselingen en vooral van
- de grondeigenschappen (voornamelijk het poriënvolume).

Het zal duidelijk zijn dat door de veelheid van variaties in deze factoren tezamen met de variërende plaatselijke omstandigheden een algemene voorspelling van het al of niet optreden van een zettingsvloeiing een uitermate moeilijke zaak is.

Met behulp van gegevens van lit.20 is een criterium voor de vereiste afstand van een explosie tot de waterkering te vinden, waarbij geen gevaar voor ontoelaatbare vermindering van de schuifweerstand (als begin van zettingsvloeiingen) optreedt.

Daarbij geldt bijvoorbeeld voor los gepakt zand:

$$\frac{\Delta u}{\sigma_1} = 2,15 + 0,74 \ln \frac{W^{1/3}}{R}$$

Als $\frac{\Delta u}{\sigma_1} \leq 0,1$ veilig is, dan volgt indien $\frac{\Delta u}{\sigma_1} = 0$

$$R_{\text{veilig}} = \exp (\ln W^{1/3} + 2,91)$$

X

X

Voor een lading van 20 kg TNT bedraagt $R_{\text{veilig}} = 50 \text{ m}$.

Ook bij explosies in of op de bodem onder water zal door de grondschok bodemverweking rond het explosiepunt kunnen optreden. De omvang hiervan ligt in dezelfde ordegrrootte als die bij vergelijkbare explosies in waterverzadigde bodem op het land. Het is denkbaar dat door de bodembewegingen op zekere afstand zettingsvloeiingen zouden kunnen optreden. Uit lit. 14 blijkt dat de trillingen van explosies op een bodem onder water nagenoeg overeenkomen met die bij explosies onder vergelijkbare omstandigheden in de (waterverzadigde) bodem.

De bodemverweking door de directe grondschok en de mogelijke zettingsvloeiingen door de bodembeweging worden bij explosies op of niet al te diep in de bodem waarschijnlijk op enige afstand van het explosiepunt echter overtroffen door de invloeden van de schokgolf in het water.

5.3. De schokgolf

5.3.1. De schokgolf in de lucht (L)

Bij een explosie boven maaiveld zal in de lucht een schokgolf worden veroorzaakt. De piekoverdruk van deze schokgolf op het maaiveld is afhankelijk van de hoogte waarop de explosie in de lucht plaatsvindt. Er is een zekere explosie-hoogte, waarbij op een vaste afstand de piekoverdruk bij éénzelfde lading het grootst is.

Uit gegeven in het verslag 204 van het ABG lit. 10 zou kunnen worden afgeleid dat de piekdruk ten gevolge van explosies op de zogenoemde optimumhoogte ongeveer anderhalf maal zo groot is als die bij maaiveldexplosies. In hetzelfde verslag wordt ook het verband tussen de waarde van de piekdruk en de afstand tot een explosie van een zekere lading-grootte gegeven. Bij een explosie op het maaiveld van 1 kg springstof kan dit worden omgerekend tot:

piekdruk(bar)	Afstand(m)
5	1,20
2,5	1,60
2,0	1,80
1,0	2,50
0,5	3,60
0,1	10,00
0,05	15,00
0,02	30,00
0,01	55,00

Voor het berekenen van de afstand, waarop bij de explosie van W kg springstof een zekere piekdruk optreedt, moeten de in de tabel vermelde afstanden worden vermenigvuldigd met $W^{1/3}$. Voor een explosie boven het maaiveld moeten deze afstanden nog worden vergroot. Gemakshalve zou voor elk van deze explosies de piekdruk 1,5 maal zo groot genomen kunnen worden, zonder dat erop gelet wordt of de explosie werkelijk op de optimumhoogte plaatsvindt.

De schokgolf kan in een waterverzadigde bodem een bodemverweking veroorzaken door de inductie van een grondschok. De relatie tussen draagkrachtvermindering op een afstand (R) en een lading (W) kan berekend worden volgens

$\frac{\Delta u}{\sigma_1} = a + b \ln \frac{W^{1/3}}{R}$ zoals beschreven in het hoofdstuk 5.2 Bodemverweking en zettingsvloeiing.

Naast het gevaar van bodemverweking zou in principe instabiliteit van een waterkering kunnen ontstaan door de optredende (reflectie)drukken van de invallende schokgolf. Dit gevaar lijkt om meerdere redenen echter niet reëel. Wel zou onder speciale omstandigheden de door de schokgolf veroorzaakte luchtdeeltjessnelheid (wind) van belang kunnen zijn. Een verband tussen de piekdruk in een schokgolf en de daarbij optredende stuwdrukken is in lit. 10 gegeven. Hoe groot deze stuwdruk maximaal mag zijn zonder instabiliteit te veroorzaken, is ook hierbij weer sterk afhankelijk van de stabiliteit zonder invloed van de explosie. Een vergelijking met de maximale stuwdrukken ten gevolge van windstoten, tijdens stormen ligt echter voor de hand. Daarbij kunnen stuwdrukwaarden voorkomen van 1kPa(0,01bar) (windsnelheid ca. 40 m/s). Bij zogenaamde airblast is de relatie ladinggrootte vereiste afstand tot de waterkering onzeker. Dit omdat bij de explosie van gaswolken veelal deflagratie optreedt en daarbij relatief lagere drukken ontstaan dan bij detonatie, maar ook omdat de uitwerking van een exploderende gaswolk slecht in een ladinggrootte valt uit te drukken.

5.3.2. De schokgolf in het water (W).

Evenals bij een explosie in de lucht zal bij een explosie in water in dit medium een schokgolf ontstaan, die zich als een kortstondige drukverhoging manifesteert.

In literatuur 3 worden een drietal theorieën genoemd, die gebruikt zouden kunnen worden bij de voorspelling van de piekdruk op een zekere afstand (bij een bolsymmetrische voortplanting van de schokgolf) door een explosie van een zekere ladinggrootte.

Van deze theorieën voorspelt die van Kirkwood-Bethe de grootste drukken, terwijl proefondervindelijk is aangetoond, dat deze drukken nagenoeg werden bereikt. De uitdrukking voor het berekenen van de piekdruk van een schokgolf in water luidt hierbij:

$p = \frac{k(W^{1/3})^a}{(R)^a}$, waarin k en a afhankelijk zijn van de gebruikte springstof.

In het in literatuur 15 genoemde U.S. Navy Diving Manual wordt voor trotyl en T.N.T. een eenvoudiger relatie gegeven die bij toepassing voor grotere afstanden een wat grotere piekdruk geeft:

$p = \frac{370 \cdot W^{1/3}}{R}$, waarin p = piekdruk in bar
W = lading in kilogram springstof
R = afstand in meters.

Deze uitdrukkingen voor de piekdruk gelden in principe voor een bolsymmetrische voortplanting van een schokgolf in het water. Vindt de explosie plaats in water met beperkte diepte dan zal enerzijds de schokgolf tegen de bodem reflecteren, terwijl anderzijds energie verloren gaat aan het oppervlak. Vooral dit laatste zal de schokgolf sterk beïnvloeden en een verandering van de piekdruk veroorzaken ten opzichte van de bolsymmetrische toestand in een uitgebreid medium. Er zijn echter geen meetgegevens aangetroffen die de relatie tussen de piekdruk van de schokgolf in water met beperkte diepte en de afstanden vastleggen.

Het is daarom op dit ogenblik niet mogelijk de vereiste afstand van de explosie tot een waterkering te geven. Het uitvoeren van een aantal metingen zou zijn te overwegen om ook voor dit verschijnsel te komen tot een indicatie van de relatie tussen ladinggrootte en optredende drukken op zekere afstand tot het explosiepunt. Daarna kunnen dan de eisen worden vastgelegd betreffende de minimale afstand tussen explosies in water en de waterkering.

6. Consequenties van de lokatie-medium relatie

Een overzicht van de in hoofdstuk 5 bepaalde afstanden, die vereist zijn tot een waterkering uit hoofde van verschijnselen, die bij een explosie optreden is gegeven in tabel 1.

In de tabel is een globale onderverdeling gemaakt naar de condities, waaronder de explosie kan plaatsvinden en de terreinomstandigheden. Zowel de terreinomstandigheden als de locatie van de explosies in de praktijk kunnen mogelijk niet volledig aansluiten aan de onderverdeling die in de tabel is gebruikt. In die grensgevallen zou de grootste vereiste afstand aangehouden kunnen worden die volgt uit één van beide naastliggende condities.

Als toelichting op de tabel kan nog het volgende worden opgemerkt.

6.1. Explosies op het land op/boven maaiveld bij droge grond. (L/SL)

- De gegeven kraterstraal en de straal van plastische zone zijn geldig voor maaiveldexplosies.
Explosies boven het maaiveld zullen een kleinere krater, enz. geven.
- Bodemverweking en zettingsvloeiingen komen in droge grond niet voor. Opgemerkt moet worden dat een explosie op droge grond door de opgewekte schokgolven, op enige afstand waar de bodem wel waterverzadigd is in principe wel een zettingsvloeiing kan veroorzaken.
- De bodemtrillingen in droge grond zullen op enige afstand kleiner zijn dan in waterverzadigde grond door een grotere demping.

6.2. Explosies op het land op/boven maaiveld bij waterverzadigde bodem. (L/SW)

- Kraterstraal, en plastische zone.
- Voor explosies boven maaiveld zijn deze waarden te zien als veilige grenzen.
- Zettingsvloeiingen komen vooral voor in losgepakte zandformaties. De waarden zijn geldig voor maaiveldexplosies en veilige grenzen voor explosies boven maaiveld.

6.3. Explosies op het land onder maaiveld bij droge grond: (SL)

- De afmetingen van de krater en plastische zone zijn gegeven voor explosies op de optimum-diepte.
Deze afmetingen zijn de maximale, die mogelijk zijn bij explosies in de bodem en zouden als veilige grens voor elke explosie onder maaiveld kunnen worden gebruikt.
- Bodemverweking en zettingsvloeiingen zijn niet mogelijk in droge grond.
- Bij explosies in de bodem zal geen of nagenoeg geen

schokgolf in de lucht optreden. Slechts bij relatief ondiepe explosies, bijvoorbeeld tot de optimum-diepte $d = 0,8 W^{1/3}$, zouden de waarden bij de explosies boven maaiveld als veilige grens kunnen worden gebruikt.

XX

6.4. Explosies op het land onder maaiveld/water bij waterverzadigde bodem (SW).

- De afmetingen van de krater, plastische zone: zie 6.3
- De afmetingen van de bodemverweking: geen opmerkingen.

Bij explosies vanaf het water onder de bodem (SW) niet te diep in de bodem, bijvoorbeeld boven $d = 0,8 W^{1/3}$ moet worden gerekend op een zekere schokgolf in het water met de daarbij behorende verschijnselen. Voordat dit uitgedrukt kan worden in een zekere vereiste afstand moet de kennis betreffende schokgolven van explosies in ondiepe water echter worden uitgebreid.

De vereiste afstanden tussen explosies en waterkering zijn bepaald met behulp van de huidige in de literatuur bekende gegevens. Aangezien echter in de uitermate moeilijke materie van explosies in water en grond in de toekomst een voortgaande ontwikkeling is te verwachten, moeten de huidige getallen niet als absoluut vaststaande gegevens worden beschouwd.

Het is mogelijk dat door het bekend worden van meer proefresultaten en door een theoretische voortgang de vereiste afstanden nauwkeuriger kunnen worden bepaald.

De huidige vereiste afstanden zijn aan de ruime kant, doordat de mogelijke extra belasting op de waterkering door een explosie niet volledig is bekend en aangezien de verscheidenheid aan typen en constructie van de waterkeringen.

Samenvattend kan worden gesteld dat de vereiste afstanden tussen een explosie en een waterkering zoals in dit rapport aangegeven aan de ruime kant zijn. Latere ontwikkelingen, zowel op het gebied van de explosies in water of grond als op het gebied van de voorspelling van schadeverwachtingen aan waterkeringen ten gevolge van explosies kunnen tot een wijziging van de huidige vereiste afstanden nopen.

6.5. Explosies vanaf het water op/boven de bodem (W), (W/SW)

- de gegeven kraterstraal en breuk- en plastische zone zijn gelijk aan die bij explosies in waterverzadigde bodem.
- de vereiste afstanden voor bodemverweking en zettingsvloeiingen zijn eveneens indientiek aan explosies in waterverzadigde bodem.
- de vereiste afstanden voor de schokgolf in water zijn door gebrek aan informatie niet bepaald. Waarschijnlijk zal dit echter wel een bepalende factor zijn.

Appendix

Een van de voornaamste aanleidingen tot het opstellen van deze nota waren de veelvuldig voorkomende aanvragen voor seismische onderzoeken nabij waterkeringen van ondermeer de Waddenzee en het IJsselmeer.

Bij deze seismische onderzoeken wordt gelijktijdig een (punt) lading van maximaal 20 kilogram springstof op meer dan 10 meter diepte in de bodem of een (gestrekte) lading met een totale lading van maximaal 4 kg springstof op de bodem gesprongen.

Voor deze gevallen kunnen nu met de beschikbare relaties, afstand van een explosie tot een waterkering en de ladinghoeveelheid, de minimaal vereiste afstand tot de kering worden bepaald onder de verschillende bodemcondities.

De waarden van de vereiste afstanden kunnen afgelezen worden uit de grafieken C en D.

Voor het verkrijgen van de vereiste afstand van de explosie tot de teen van de dijk moeten de getallen in tabel 2 nog worden vermeerderd met een bedrag, gelijk aan 4 maal de hoogte van de dijk.

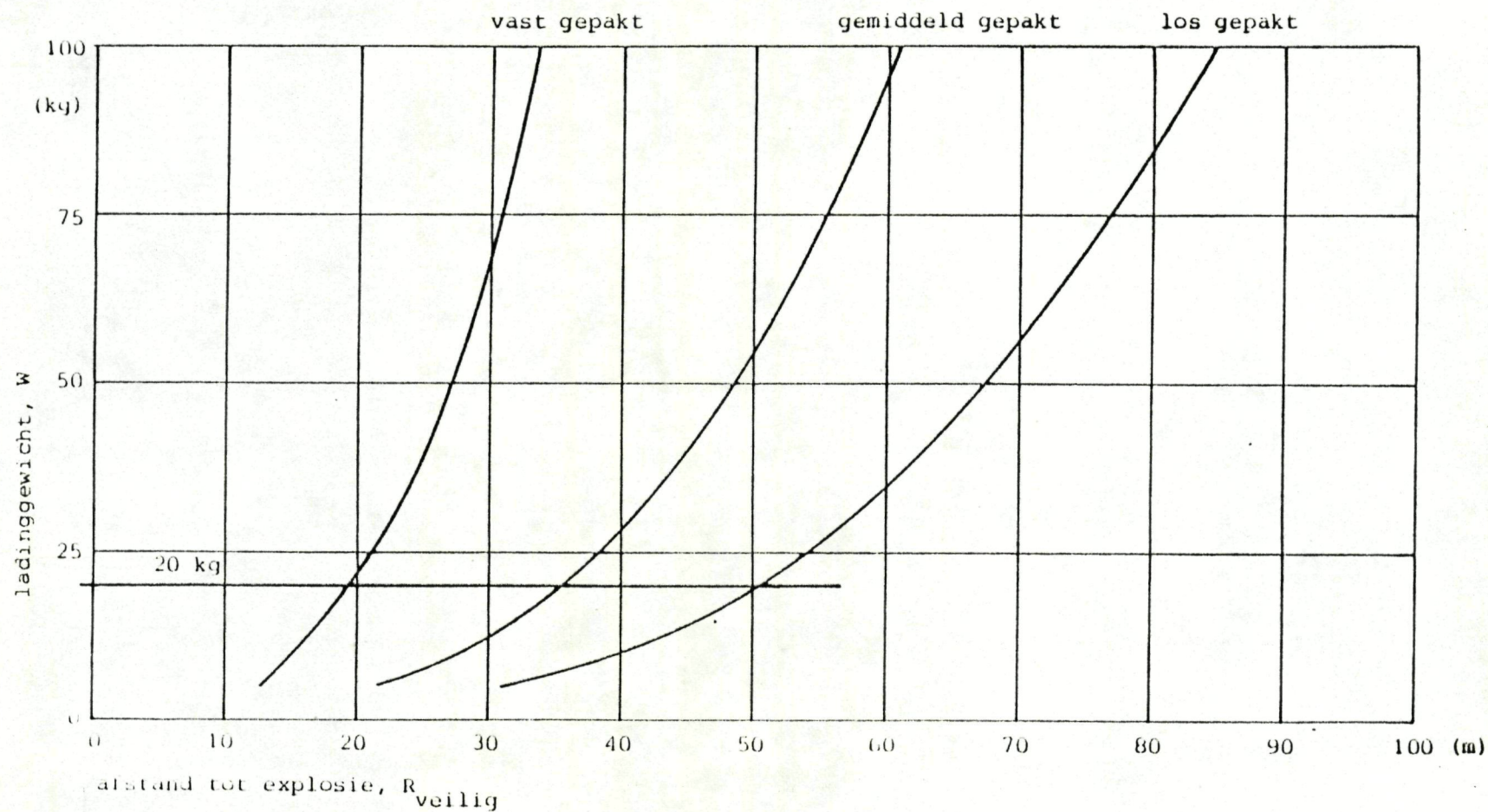
Een vergelijking met het tot nu toe gehanteerde voorschrift "Nadere regelen Mijnreglement Seismische Onderzoeken" lit. 18 levert het volgende:

- a) Bij de voorschriften voor explosies ten behoeve van mijnbouwkundige onderzoeken in oppervlakte-wateren worden geen minimale afstanden tot waterkeringen vermeld.
- b) Bij de voorschriften voor explosies ten behoeve van mijnbouwkundige onderzoeken op het land en een drooggevallen was worden gesteld: "Het onderzoek mag niet worden verricht binnen een afstand van 300 meter van waterkerende dijken"

Het zou overweging verdienen deze "Nadere regelen Mijnreglement Seismische Onderzoeken" ten aanzien van de waterkeringen aan te passen in die zin, dat:

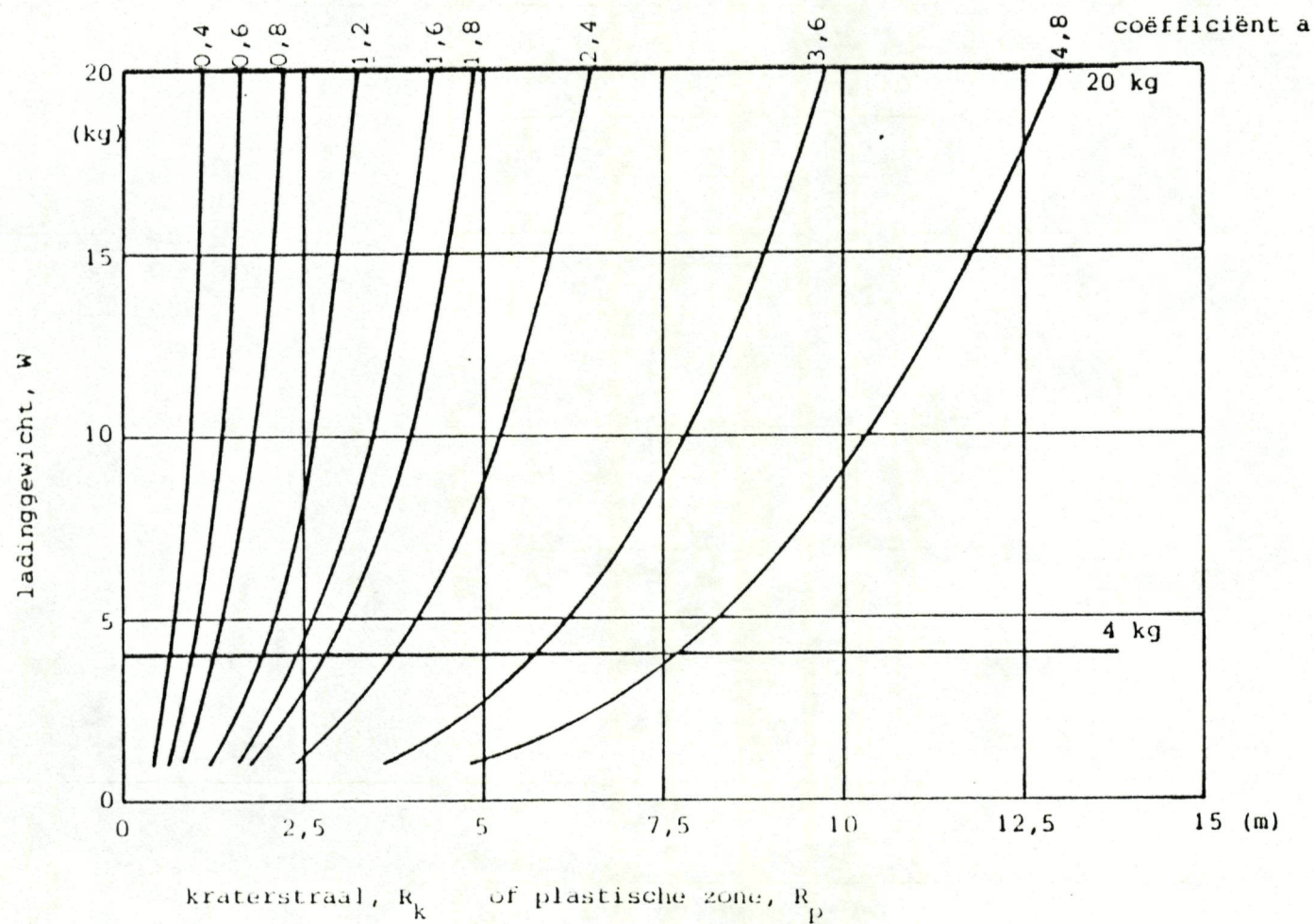
- bij a) afstanden worden genoemd die in acht moeten worden genomen tot een waterkering
- bij b) een maximale ladinggrootte wordt genoemd bij de genoemde afstand van 300 meter
 - in het voorschrift wordt opgenomen vanuit welke lijn de afstanden moeten worden gemeten
 - in plaats van "waterkerende dijken", de term waterkeringen wordt gebruikt, waaronder zowel dijken als waterkerende kunstwerken worden verstaan

Overzicht van afstanden verweking/zettingsvloeiing tot de waterkering
exclusief veiligheidszone tot 100 kg equivalent TNT



Grafiek C

Overzicht van afstanden voor krater en plastische zone tot de waterkering
exclusief veiligheidszone tot 20 kg equivalent TNT



Grafiek D

7. Literatuur

1. Johansson C.H. en Person P.A.,
Detonics of High Explosives (1970)
2. Richart F.E., Hall J.R. en Woods R.D.,
Vibrations of Soils and Foundations (1970)
3. Cole R.H.,
Underwater Explosions (1948)
4. Nordyke M.D.,
On Cratering (1961)
5. Glasstone S.,
The Effects of Nuclear Weapons (1964)
6. Hughes B.C.,
The Corps of Engineers Nuclear Explosives Studies
for Civil Constructions (1968)
7. Kruger P.,
Nuclear Civil Engineering (1966)
8. Wilson, Render en Carter,
Peaceful Uses of Nuclear Explosives (1963)
9. Trense R.W.,
Verslag no. 103 Advies Bureau der Genie, Schokgolven
in granulaire substanties (1968)
10. Mellegers J.P.,
Verslag no. 204 D.G., Advies Bureau der Genie, Ver-
zameling basisgegevens ten dienste van het opstellen
van schadeverwachtingen e.d. naar aanleiding van nu-
cleaire explosies (1969)
11. N.N.
Verslag no. 122, Advies Bureau der Genie.
Het gedrag van de bodem en het grondwater in Neder-
land bij dynamische belastingen, in het bijzonder
bij dynamische belastingen als gevolg van een kern-
wapen explosie (1965)
12. Trense R.W.,
Verslag no. 132 Advies Bureau der Genie, De Stand-
zekerheid van dijken onder invloed van Raileigh
golven opgewekt door nucleaire explosies (1966)
13. Schydlowski, G.P.
Trillingsmetingen aan waterkeringen in Friesland en
Groningen (1972)
14. Schydlowski, G.P.
Berekening van grond- en waterdruk ten gevolge van
springstofexplosies (1969)
15. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
Leidraad voor constructie en beheer van gasleidingen
in en nabij waterkeringen (1973)
16. Ketelaar P.,
Verslag no. 109, Advies Bureau der Genie, Veldproe-
ven te Lopik en Harderwijk (1963)
17. Nadere regelen Mijnreglement seismische onderzoe-
kingen (1967).

18. Korth D.,
"Ergebnissen von Schwingungsmessungen bei Spreng-
arbeiten in Moorgebieten", Die Strasse nov.1975.
19. Kok L. en Trense R.W.,
Blast-induces Soil Liquefaction, State-of-the-Art
MABS 6 Cahors



dienst openbare werken
amsterdam

Centrum voor Onderzoek Waterkeringen
T.a.v. de heer W.H.C. van Rooij
Postbus 20907
2500 EX DEN HAAG

BL 82 - 27
hoofdafdeling
technische staf
Bureau Grondmechanica
wibautstraat 3, kamer 0.019
1091 GH amsterdam
telex OWASD 13687
telefoon 5961678

Amsterdam, 27 september 1982

Betreft: De effecten van explosies op waterkeringen

Geachte heer Van Rooij,

Naar aanleiding van uw brief van 14 mei 1982, no. 569 en ons telefoongesprek op 24 september jl. bericht ik u het volgende.

.....
*waarke aan b
geven (Korabelt) 9
veilige overwegingen*

Zoals uit het rapport (blz.14) en de schriftelijke discussie blijkt, worden eenvoudige formules gehanteerd voor het berekenen van de verwekingsgraad. De spreidingsband zoals te zien is op bijgevoegde figuur, is ingesloten door 3 formules, die feitelijk verschillende coëfficiënten a en b hebben. De keuze van de coëfficiënten ligt vast aan relatieve criteria als los, gemiddeld en vastgepakt zand. Er zijn selecties van de criteria mogelijk, die een onveilig resultaat opleveren. Bij voorbeeld indien men vastgepakt zand veronderstelt en de feitelijkheid is losgepakt zand, dan is bij 20 kg equivalent de veilige afstand niet 20 m maar 50 m (zie grafiek C). Indien men niet op de hoogte is van de mate van dichtheid is het beter "losgepakt" aan te houden!

Een ander probleem dat door de discussie heen klinkt, is niet zo zeer statistisch als wel probabilistisch. Ik bedoel hiermede de bewering/situatie zoals bij voorbeeld "Een explosie in de nabijheid van een primaire waterkering na springtij ter plaatse van een slechte zandige plek in de dijk".

*conclusies
Rem.*

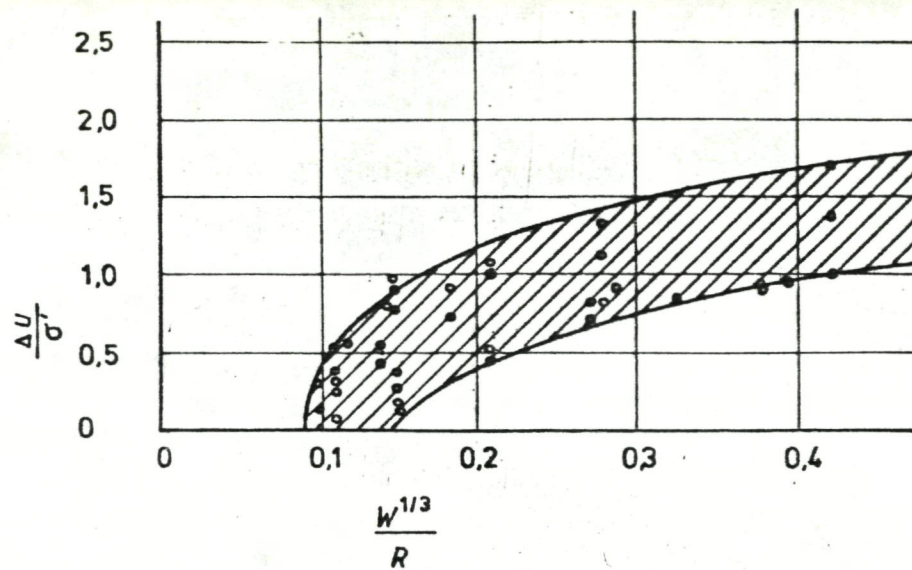
De uitkomst van de toevallige koppeling van een aantal van deze veronderstellingen kan niet gevat worden in de bovenstaande eenvoudige formules. Deze omstandigheden dienen of expliciet bekeken te worden door de dijkbeheerder of deskundige, of door middel van een veiligheidsfactor impliciet verwerkt te worden.

Ten slotte nog iets over de veiligheidsfactor. Er zijn verschillende overwegingen waarop nog een aanvullende veiligheidsfactor over de berekening heen ingevoerd kan worden. Wanneer ik mij beperk tot de technische overwegingen, dan zou het mogelijk zijn dat er zich andere zanden in Nederland in de bodem bevinden, dan die waarvan experimenteel de formules zijn afgeleid. In dat geval geeft een veiligheidsfactor van 2 voor 20 kg TNT (losgepakt zand) een veilige afstand van $50 \times 2 = 100$ m. Dit blijft nog ruimschoots onder het criterium "oude stijl" van 150 m. Wellicht zou dit nog verder in overeenstemming gebracht kunnen worden met een beleidscriterium van dijkbeheerders.

Met vriendelijke groeten,

L. Kok

b.a. *[Handwritten signature]*



Aanvullingen op: "De effecten van explosies op waterkeringen".
A-73.036 (BL 82-16).

P 4. Na 4^e rvb zin tussenvoegen:

"Hierbij moet worden gedacht aan opslag nabij waterkeringen van explosieven en het uitvoeren van seismisch bodemonderzoek in de nabijheid van waterkeringen".

Na laatste regel toevoegen:

" Dit rapport kan niet direct toegepast worden om effecten van gaswolkexplosies op waterkeringen vast te stellen".

" De in dit rapport genoemde criteria volgen alle uit reële verwachtingswaarden, er is nog geen veiligheidscoëfficiënt in verwerkt".

P 6. 8^e rvb:

"Explosies" veranderen in: "fysische explosies" (dus niet voor chemische of pyrogene explosies)".

P 9. 2^e rvb:

"In het medium veroorzaken" veranderen in: "veroorzaken , in beide media een P- en een S-golf".

P10. Bij de figuur hoort legenda:

W = water, L = lucht, S = grond, SW = verzadigde grond, SL = droge grond.

P12. 5^e, 6^e en 7^e rvo veranderen in:

"Als echter voor een zeker geval wordt getwijfeld aan de geldigheid van deze algemene regel, bijvoorbeeld doordat"

P13. Na par 5 toevoegen:

"Bovendien bestaat bij explosies het gevaar dat daardoor water-afsluitende lagen in de bodem geperforeerd worden met als mogelijke gevolgen een groter kwelbezwaar of zelfs welvorming".

P13. Na par 5.1 3^e r. toevoegen:

"Rond de kraterzône bevindt zich de plastische zône; hierin hebben zich ten gevolge van de explosie plastische vervormingen voorgedaan. In het overgangsgebied tussen de kraterzône en de plastische zône wordt de structuur volledig verstoord, dit gebied wordt breukzône genoemd."

P14. Aan par 5.1 toevoegen:

"De straal van de plastische zône is tweemaal zo groot als die van de kraterzône".

P15. Na 3^e rvb toevoegen:

"Grote voorzichtigheid is geboden daar waar "van nature" wateroverspanningen aanwezig zijn. In de formules wordt, waar het verschijnselen in verzadigde grond betreft, uitgegaan van een hydrostatische drukverdeling. Waterspanningen kunnen zowel van permanente als van tijdelijke aard zijn. Bij de dijken rond de IJsselmeerpolders is veelal sprake van wateroverspanningen in de ondergrond gepaard gaande met kwel en bij rivierdijken treedt een soortgelijke situatie op tijdens hoge rivierstanden.

In deze gevallen moet in het veilige criterium $\Delta u / \sigma' \leq 0,1$ voor Δu de Δu ten gevolge van de explosie opgeteld worden bij de aanwezige wateroverspanning.

Indien men van dit criterium wil afwijken is nader onderzoek nodig".

P17. Na 10^e rvb tussenvoegen:

"Bij deze overdracht komt slechts een deel van de explosieenergie in de grond terecht. We blijven aan de veilige kant door deze reductie niet in rekening te brengen".

12^e rvb na "kan" tussenvoegen "in dat geval".

P18. 13^e rvo:

"Verandering" moet worden "verlaging".

11^e rvo:

"Geen" moet worden "weinig".

9^e rvo:

Toevoegen "(lit 16)".

8^e rvo:

Na "niet" tussenvoegen "exact".

7^e rvo:

Nieuwe zin tussenvoegen: "Wanneer echter voorlopig aan explosies in ondiepe wateren dezelfde eisen gesteld worden als in waterverzadigde grond blijft men daarbij aan de veilige kant".

Handwritten notes:
Bij de dijken rond de IJsselmeerpolders is veelal sprake van wateroverspanningen in de ondergrond gepaard gaande met kwel en bij rivierdijken treedt een soortgelijke situatie op tijdens hoge rivierstanden.

Handwritten note:
en na dijkevaluatie?

P21. 5^e rvb "wordt" veranderen in "werd".

Na 9^e rvb tussenvoegen:

"Tegenwoordig zijn meestal de hoeveelheden springstof per keer kleiner, vanwege de verbeterde opname technieken, terwijl op het water veelal de "airgun-methode" wordt toegepast. Bij deze methode worden met perslucht gevulde cilinders, welke in het water zwevende worden gehouden, plotseling geopend. De hierdoor voortgebrachte explosie heeft een veel lagere piekdruk, maar deze houdt wel langer aan".

19^e rvb toevoegen:

"Ten opzichte van het maaiveld".

**Centrum voor Onderzoek
Waterkeringen**

Hooftskade 1 - 's-Gravenhage
Telefoon (070) 88 93 70

Kantbrief

Datum 18-4-1983

Aan Voorzitter en leden van werk-
groep 7 "Bouwwerken en leidingen

Reg. nr.

Van Koos Saathof

Afd.

- ☐ Ingevolge Uw verzoek d.d.
- ☐ Ter kennisneming/behoud/doorzending
- ☐ Met verzoek om medeparaaf
- ☐ Ter (verdere) behandeling vóór
- ☐ Ter afdoening
- ☐ Om bericht en raad, gaarne vóór
- ☒ Voor de vergadering op 21 april a.s.
- ☐ Gaarne bespreken op/vóór
- ☐ Met verzoek om terugzending
- ☐ Met dank voor inzage
- ☐ Met verzoek voorgaande stukken bij te voegen
- ☐ Met verzoek om uitreiking aan belanghebbende
- ☐

Opmerkingen

BL 83-16 Explosie-effecten (aanvulling op BL 83-9 p.15).

Handtekening

572 - 2.000

Explosie-effecten (aanvulling op BL 83-9 p.15).

In de discussie in de vergadering van werkgroep op 11 februari j.l. bleek er onduidelijkheid te bestaan over de hantering van de gegeven formule voor de berekening van verwekingseffecten. De formule luidt

$$\frac{\Delta u}{\sigma'} = a + b \cdot \ln \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right),$$

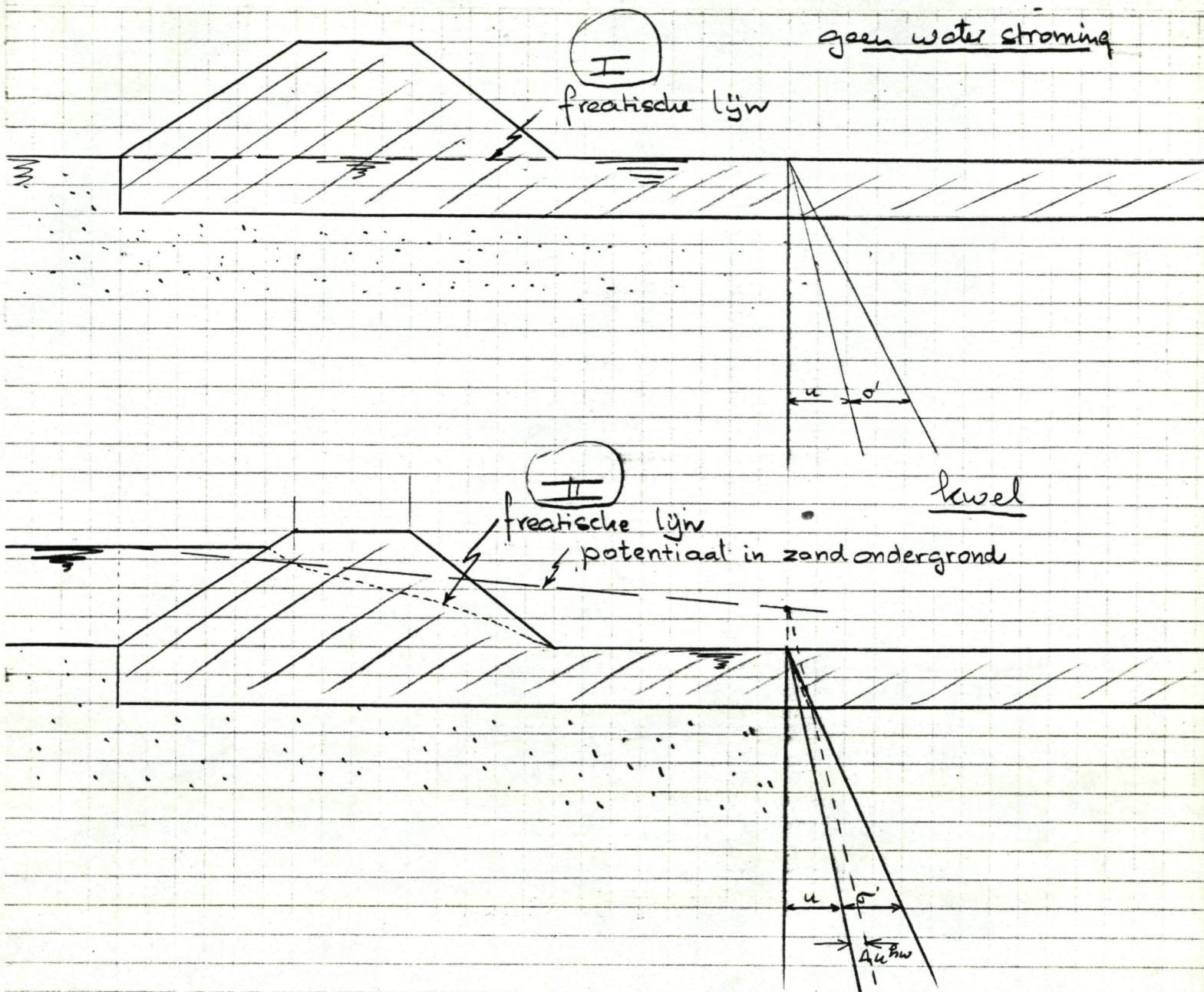
waarin W de ladingmassa in kg en R de afstand in m.

Het ging in de discussie met name over het toepassen van de formule en van het criterium voor een veilige situatie in een tweetal gevallen. Op de volgende bladzijde zijn deze nog eens weergegeven, geval I, een dijk waar de spanningen hydrostatisch verlopen en geval II met een dijk waar door een hoge buitenwaterstand de waterspanningen onder het kleipakket oplopen en de drukverdeling niet meer hydrostatisch is.

De gegeven formule levert voor een explosie met lading massa W op afstand R een waarde op voor $\Delta u / \sigma'$.

Hierin is Δu de toename in de waterspanning als gevolg van die explosie en σ' de oorspronkelijk aanwezige korrelspanning bij een hydrostatisch drukverloop.

Voor de σ' moet zowel in geval I als II dezelfde waarde gebruikt worden. Dus in beide gevallen levert deze explosie dezelfde waarde voor Δu op.



Kijken we nu naar het veilige criterium $\frac{\Delta u}{\sigma'} \leq 0,1$.

Hierin moet (zoals reeds in BL 83-9 werd vermeld) de waarde van Δu ten gevolge van de explosie worden opgeteld bij de wateroverspanning die aanwezig is, bijvoorbeeld door hoogwater zoals in geval II.

Voor σ' moet ook hier de oorspronkelijke korrelspanning worden gebruikt, dus die uit de situatie waar de spanningen hydrostatisch verlopen.

Dus voor geval II kan op dezelfde afstand R een kleinere lading worden toegestaan dan in geval I, want er is reeds een Δu aanwezig. Wanneer het zonder explosie reeds zo is dat $\frac{\Delta u}{\sigma'} \geq 0,1$ moet in het algemeen geen

explosie worden toegestaan.