

centrum voor onderzoek waterkeringen

EXPLOSIES IN DE NABIJHEID VAN
WATERKERINGEN.

A-73.036

December 1978

INHOUDSOPGAVE

- 1 Doel van het rapport
- 2 Inleiding
- 3 De explosies
- 4 Het medium, waarin de explosie plaatsvindt
- 5 De lokatie van de explosies
- 6 De waterkeringen
- 7 Gevaren voor de waterkeringen
 - 7.1 Algemeen
 - 7.2 De explosiekrater met breuk-en plastische zone ten gevolge van explosies op het land
 - 7.3 De explosiekrater met breuk- en plastische zone ten gevolge van explosies vanaf het water
 - 7.4 De bodemverweking en zettingsvloeiingen ten gevolge van explosies op het land
 - 7.5 De bodemverweking en zettingsvloeiingen ten gevolge van explosies vanaf het water
 - 7.6 Trillingen in de bodem
 - 7.7 De schokgolf
- 8 Overzicht van de vereiste afstanden explosie-waterkering
 - 8.1 Explosies op het land, op/boven maaiveld bij droge grond
 - 8.2 Explosies op het land, op/boven maaiveld bij waterverzadigde grond
 - 8.3 Explosies op het land onder maaiveld bij droge grond
 - 8.4 Explosies op het land onder maaiveld bij waterverzadigde grond
 - 8.5 Explosies in het water, op/boven de bodem
 - 8.6 Explosies in het water onder de bodem

Appendix

Explosies in de nabijheid van waterkeringen

1. Doel van het rapport

Verscheidene omstandigheden hebben ertoe geleid dat waterkeringbeheerders de laatste tijd in toenemende mate worden geconfronteerd met de vraag of het voorkomen van explosies in de nabijheid van waterkeringen gevaar kan opleveren voor deze keringen.

De vragen spitsten zich hierbij toe op:

- a) wat is de maximale ladinggrootte (hoeveelheid explosieven), die op een zekere afstand van de waterkering tot ontploffing mag worden gebracht, of
- b) wat is de minimum afstand, waarop een zekere lading tot ontploffing mag worden gebracht.

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

Hierbij moet echter direct worden aangetekend dat enerzijds mogelijk niet alle beschikbare literatuur over de verschillende aspecten betreffende explosies nabij waterkeringen is achterhaald en anderzijds de geraadpleegde werken soms niet volledig waren.

Bovendien kon in een aantal gevallen de waarde van de gegeven informatie niet worden gecontroleerd.

De in dit rapport bijeenvergaarde gegevens kunnen daarom op sommige punten een uitbreiding of een aanpassing behoeven. Dit kan tevens noodzakelijk zijn als nieuwe relevante informatie beschikbaar komt.

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 experimenteel bepaalde "schaalwetten" opgesteld, die de verschillende uitwerkingen van een explosie globaal voorspellen en waarmee omrekenen voor explosies van verschillende ladinggrootte onder soortgelijke omstandigheden mogelijk gemaakt is.

Het zal echter duidelijk zijn dat op deze wijze uitgevoerde berekeningen, bijvoorbeeld toegepast voor het bepalen van de vereiste afstand tussen een explosie van een zekere ladinggrootte en een 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 "hoofdregel" 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 - ladinggrootte van een explosie, aan te geven bij de verschillende omstandigheden waaronder de explosie kan plaatsvinden en waarbij geen schade aan de waterkering wordt veroorzaakt.

3. De explosies

Het merendeel van de explosies, die zich voordoen, wordt doelbewust veroorzaakt ten behoeve van voornamelijk seismische onderzoeken. Een enkele maal echter komen explosies voor ten gevolge van ongevallen, zoals explosies van munitie-opslagplaatsen en van gasleidingen.

In dit rapport wordt alleen ingegaan op explosie-verschijnselen bij detonatie van daarvoor bestemde explosieven. De aspecten betreffende explosies van gasleidingen bij waterkeringen worden behandeld in de door de Technische Adviescommissie voor Waterkeringen opgestelde "Leidraad voor constructie en beheer van gasleidingen in en nabij Waterkeringen" [lit. 16] , waarnaar voor de problemen dienaangaande wordt verwezen.

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 T.N.T., met de motivering:

- puntladingen worden in de praktijk veel gebruikt, terwijl ze een

grotere invloed op de omgeving hebben dan gestrekte ladingen met dezelfde totale hoeveelheid springstof;

- het is gebruikelijk T.N.T. als "referentie springstof" te gebruiken;
- bij seismische onderzoeken wordt veelvuldig gebruik gemaakt van explosieven die nagenoeg dezelfde uitwerking hebben als T.N.T., zodat deze hoeveelheden springstof rechtstreeks vergelijkbaar zijn.

Een en ander houdt echter in, dat bij toepassing van "zwaardere" explosieven dan T.N.T., de in dit rapport genoemde afstanden niet zonder meer mogen worden aangehouden.

4. Het medium, waarin de explosie plaatsvindt.

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 γ) zijn bekend [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 een geringe diepte daaronder manifesteert. Voorts zijn de snelheden waarmede 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 de 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 lagscheiding zal namelijk door reflectie en breking in totaal vier nieuwe golven in het medium veroorzaken. Onder bepaalde omstandigheden kunnen zich bovendien op de lagscheidingen 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.

5. De lokatie van de explosies

In verband met verschillen in de wijze, waarop de bij een explosie vrijkomende energie aan de omgeving wordt medegedeeld(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 ziet er als volgt uit:

- a) explosies op het land, onder te verdelen in
 - explosies boven het maaiveld
 - explosies onder het maaiveld
- b) explosies vanaf het water, eveneens onder te verdelen in:
 - explosies in het water
 - explosies in de bodem onder het water.

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. (zie paragraaf 7.6.)

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.

Bij 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.

6. 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.

Verschillende 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 én in de explosieven én 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 moet 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 essentieel 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.

7. Gevaren voor de waterkering

7.1 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.)
- welk 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:

1. 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 als gevolg van het ontstaan van een breuk- en plastische zone in de grond.
2. Bezwijken van de kering door vermindering van de draagkracht (opneembare schuifspanning) in een waterverzadigde bodem (bodemverweking, zettingsvloeiing)
3. Het verlies van stabiliteit van de kering of onderdelen daarvan door trillingen in de bodem.
4. Het verlies van stabiliteit van de kering of onderdelen daarvan door een schokgolf in de lucht of het water.

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

7.2 De explosiekrater met breuk-en plastische zone ten gevolge van explosies op het land.

7.2.1 De explosiekrater

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 lading-grootte 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 (gewicht)

p en q zijn experimenteel bepaalde coëfficiënten,

afhankelijk van grondsoort, watergehalte en dergelijke.

In het verslag 204DG^{1x} van het Adviesbureau der Genie, (ABG) [lit. 10], is een overzicht gegeven van de coëfficiënten p bij maaiveldexplosies^{2x} voor de verschillende bodemcondities. De p-waarden in dit verslag zijn gemiddelden. De grootte van de spreiding is niet vermeld. Uit buitenlandse literatuur [4, 6, 7 en 8] blijkt echter dat deze aanzienlijk is. Gezien ook de globale indeling van de grondsoorten en de overige omstandigheden is eveneens een grote spreiding te verwachten in de waarnemingen bij concrete gevallen ten opzichte van de in het verslag 204 gegeven getallen.

Uit de buitenlandse literatuur blijkt bovendien dat de gemiddelde waarden van p voor vergelijkbare grondsoorten aanzienlijk hoger zijn dan de in verslag 204 genoemde. Het verdient ons inziens dan ook aanbeveling de coëfficiënten p uit het verslag 204 ABG te verdubbelen, daar de veiligheid van de waterkeringen voorop moet staan.

De waarde van de coëfficiënt q zal, evenals de waarde van p, afhankelijk zijn van de grondcondities.

Het blijkt echter dat de grootte van deze variatie in q veel kleiner is dan die van p. Veelal wordt een waarde $q = 1/3$ of $q = 1/3,4$ gehanteerd, waarbij het eerst genoemde getal soms voor ladingen kleiner

- 1x Dit verslag betreft schadeverwachtingen bij nucleaire explosies. Uit literatuur 8 blijkt dat afmetingen van kraters e.d. door explosie van conventionele springstoffen hiermede direct vergelijkbaar zijn.
- 2x Onder een maaiveldexplosie wordt verstaan een explosie juist boven, op, of juist beneden het maaiveld. De grensdiepte wordt wel aangegeven met $d = 0,05 W^{1/3}$ (W in kg springstof, d in meters).

dan 1 kt. wordt aanbevolen. In het verslag 204 wordt $q = 1/3$ gehanteerd voor de berekening van de kraterstraal.

Uit een en ander lijkt het verantwoord voor de berekening van de kraterafmetingen ten gevolge van maaiveldexplosies (en van explosies boven het maaiveld) voorlopig uit te gaan van de gegevens uit het verslag 204 van het ABG [10], waarbij echter de coëfficiënten p verdubbeld moeten worden. In tabel 1 zijn de te gebruiken coëfficiënten p weergegeven.

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 (soms de optimumdiepte genoemd) is afhankelijk van de ladinggrootte en de bodemgesteldheid ter plaatse.

Volgens [4] en [8] worden de grootste kraterstralen verkregen bij explosies op een diepte $d = 0,5 \text{ à } 0,8 \cdot W^{1/3}$ (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 explosie-diepte, een bovengrens voor de kraterstraal gehanteerd kunnen worden die tweemaal zo groot is als die bij de maaiveldexplosies, zoals vermeld in tabel 1.

7.2.2 De breuk- en plastische zone

Bij de explosies zal, buiten de vorming van een krater, in een bepaalde zone de grondstructuur volledig worden verstoord; de zogenoemde breukzone.

Rond dit gebied bevindt zich de plastische zone; hierin hebben zich ten gevolge van de explosie plastische vervormingen voorgedaan.

Tijdens explosies in vlak terrein zal in deze zones een hoog spanningsniveau hebben geheerst, dat (gedurende korte tijd) het grensniveau bereikte of zeer dicht benaderde. Een (kleine) extra spanning in de grond, bijvoorbeeld veroorzaakt door een dijklichaam, zal hierbij niet meer kunnen worden opgenomen. Met andere woorden: De plastische zone van een explosie moet buiten de waterkering vallen. In feite moet deze afstand zelfs nog groter zijn, omdat het spanningsniveau juist buiten de plastische zone ook nog hoog is en extra spanning van de waterkering mogelijk ook daar tijdens de explosie nog niet zonder zeer grote deformaties opgenomen kan worden.

De grootte van de breuk- en plastische zone zijn, naar analogie van de kraterafmetingen, met behulp van "schaalwetten" in de vorm van $R_{b,p} = p' w^{q'}$ te bepalen.

In het verslag 204 van het ABG [10] worden voor de coëfficiënten p' en q' de waarden bij maaiveldexplosies gegeven afhankelijk van de bodemcondities. Voor de toepassing bij waterkering zijn ook hier de getallen p' , evenals bij de bepaling van de kraterafmetingen, weer verdubbeld in verband met de spreiding die ook bij deze verschijnselen zeker zullen voorkomen. Hierbij wordt dan tevens bereikt dat in het merendeel van de gevallen het gebied met het hoge spanningsniveau juist rond de plastische zone, bij deze waarschijnlijk te ruime schatting van de plastische zone, binnen de als onveilig aangeduide afstand valt. Voor de waarden van p' te gebruiken voor de bepaling van de breuk- en plastische zone bij maaiveldexplosies en te hanteren als veilige grens voor explosies boven het maaiveld: zie tabel 1.

Evenals het geval was voor de kraterafmetingen, zal bij een explosie op zekere diepte in de bodem de breuk- respectievelijk plastische zone een grotere omvang hebben dan bij een maaiveldexplosie, doordat in het eerste geval meer energie in de bodem wordt opgenomen. In de literatuur is vrij weinig te vinden over de omvang van de breuk- en plastische zones bij dit soort explosies. Naar analogie van de afmetingen van de kraterstraal zou een schatting van deze zones gemaakt kunnen worden door vermenigvuldiging van de afmetingen van de breuk- en plastische zone bij maaiveldexplosies met dezelfde factor als geldig bleek voor de krater-afmetingen. Hierbij werd, zoals bekend

een verhouding twee gevonden tussen de stralen bij maaiveld-explosies en die bij explosies op de optimumdiepte in de grond

Ter vergelijking diene voorts nog het volgende:

Het Advies Bureau der Genie houdt voor het bepalen van het gebied met bodemverweking ^{*}) bij maaiveldexplosies en dat bij explosies in de bodem een verhouding aan van 4/3.

Toepassing van een factor 2 voor de berekening van de breuk- en plastische zone bij explosies in de bodem uit die van maaiveldexplosies zal zeer waarschijnlijk een veilige waarde geven voor de afmetingen van deze zones.

De aldus verkregen coëfficiënten zijn weer vermeld in tabel 1.

*) Zie voor dit begrip paragraaf 7.4.

7.3. De explosiekrater met breuk- en plastische zone ten gevolge van explosies vanaf het water.

Het in voorgaande paragraaf gestelde geldt uitsluitend voor explosies, waarbij het bodemoppervlak in contact is met de atmosfeer.

Het blijkt, [5, 10] dat explosies op en in een bodem onder water nagenoeg dezelfde kraterstraal veroorzaken als die in een bodem van waterverzadigde grond van dezelfde samenstelling op het land. Eenzelfde tendens wordt aangenomen voor de afmetingen van de breuk- en plastische zone.

Een ruwe schatting van de maximum afmetingen van de kraterstraal, breuk- en plastische zone ten gevolge van explosies op en in de bodem onder water wordt verkregen door toepassing van de respectievelijke waarden bij explosies in waterverzadigde bodem (zie tabel 1).

7.4. De bodemverweking en zettingsvloeiingen ten gevolge van explosies op het land.

7.4.1. Bodemverweking

Bij een explosie in of op een waterverzadigde bodem zullen deformaties optreden als gevolg van wijziging in normaal- en schuifspanning door trillingen. Door de zeer korte stijgtijd van de "belasting" zal de korrelspanning zich niet kunnen aanpassen en zal de grondspanningsverhoging tevens een verhoging van de grondwater-spanning veroorzaken. Na het passeren van de schokgolf zal de grond-druk weer tot de oorspronkelijke waarde terugkeren. De overspanning in het grondwater echter zal (gedeeltelijk) blijven bestaan als gevolg van opgetreden structuurveranderingen in de grond.

Uit waarnemingen is gebleken dat deze structuurveranderingen zowel in een bodem van cohesieve grond als van cohesieloze grond voorkomen. 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, wordt meestal uitgedrukt in een percentage van de oorspronkelijke conusweerstand.

In het verslag 204 van het AGB [10] zijn bij maaiveldexplosies op horizontale bodem ook voor dit verschijnsel de afstanden gegeven waarop een zeker percentage draagkracht van de bodem resteert. De algemene uitdrukking die het verband tussen de ladinggrootte en de afstand met zekere mate van bodemverweking vastlegt is ook hier weer van de vorm $R_v = p''W^q''$.

In verband met de reeds eerder genoemde oorzaken worden ook voor deze afstanden de p'' -coëfficiënten verdubbeld.

Het AGB geeft in verslag 204 [10] de afstanden, waarbij een draagkracht van de bodem van 0% respectievelijk 50% resteert. Bij de waterkering is een draagkrachtvermindering tot 50% in het algemeen niet aanvaardbaar. Uit een relatie tussen de mate van bodemverweking en de afstand tot de explosie, gegeven in literatuur [11] kan echter worden vastgesteld dat op een afstand van ongeveer 1,5 maal de gegeven afstand van 50% bodemverweking nog slechts een draagkrachtvermindering van rond 5% optreedt.

In tabel 1 zijn de afstanden tot waar deze bodemverweking van 5% optreedt, gespecificeerd naar de omstandigheden, gegeven.

Opgemerkt wordt dat het onderscheid tussen losse en vaste pakking niet nader gedefinieerd is in lit. [10].

Bij een explosie in de bodem zal meer energie in de grond worden gebracht dan bij een maaiveldexplosie. Verwacht mag worden dat dientengevolge de bodemverweking een grotere omvang heeft dan ingeval van een maaiveldexplosie.

In literatuur 11 wordt gesteld dat de straal van het gebied waarbinnen bodemverweking optreedt bij deze explosies ca 4/3 maal de straal van dat gebied bij maaiveldexplosie met dezelfde lading is. Deze waarden zijn aangehouden en verwerkt in tabel 1.

7.4.2. Verweking op grotere afstand en zettingsvloeiingen.

In de nabijheid van waterkeringen komen soms zeer losgepakte zandgronden voor. De geldigheid van de hierboven genoemde afmetingen van de verwekingszone is in die gevallen twijfelachtig. Er zijn echter redenen om aan te nemen dat op grotere afstanden de verweking slechts tot een geringe diepte optreedt. Wel kan in een dergelijke grondsoort deze verweking 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.

In hoofdstuk 4 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 ontstaat, die soms een grotere belastingwisseling veroorzaakt dan die welke veroorzaakt wordt door de R-wave.

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 uit de literatuur is getracht 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 een zettingsvloeiing) optreedt. Hierbij moet echter worden opgemerkt, dat door de complexiteit van dit verschijnsel en de onvermijdelijke variatie in de eerder genoemde factoren die dit proces beïnvloeden, slechts gekomen kan worden tot een zeer globale afstand. Op plaatsen waar in het verleden zettingsvloeiingen zijn voorgekomen, dus waar de omstandigheden gunstig zijn gebleken voor het ontstaan van dit verschijnsel, moet daarom uiterste voorzichtigheid betracht worden bij het toestaan van explosies.

In literatuur [12] wordt aannemelijk gemaakt dat het al of niet optreden van een volledige verweking bij een explosie het best kan worden aangegeven met een snelheids criterium voor de bodemdeeltjes.

Bij deeltjessnelheden groter dan 0,04 à 0,08 m/s zou dit verschijnsel in waterverzadigde zandgrond optreden.

Hoewel dit criterium slechts een benadering kan zijn en in een juiste maatstaf hiervoor de plaatselijke omstandigheden tot uitdrukking moeten komen, lijkt het toepassen van deze snelheidsgrens op dit ogenblik toch de enige oplossing.

Elk ander, beter criterium zou immers per geval uitgebreide terreinonderzoekingen vragen en bovendien een veel betere beschrijving van de seismische golven (vooral Raileigh-golven) onder de plaatselijke omstandigheden vereisen.

De in [12] gegeven waarden van de bodemdeeltjes snelheid zijn grenzen, waarbij een volledige verweking optreedt, en hebben dus betrekking op een totale opheffing van de korrelspanningen door wateroverspanning als gevolg van de explosie. Evenals bij de bodemverweking kan ook hier geen totale opheffing van de schuifweerstand bij de waterkering worden getolereerd maar zou bijvoorbeeld een vermindering van 5% kunnen worden geaccepteerd. Bij deze schuifweerstandverandering wordt verondersteld dat het optreden van een zettingsvloeiing is uitgesloten. Er is echter geen relatie bekend tussen een zekere vermindering van de schuifweerstand en de daarbij behorende bodemdeeltjessnelheid.

Als wordt uitgegaan van de laagste in 12 genoemde snelheid komt men door een vergelijking met de optredende gronddrukken bij bodemverweking tot een ruwe, veilige schatting van een toelaatbare deeltjessnelheid van 0,004 m/s.

Uit proeven van het ABG [11, 17] en bewerkingen daarvan door Trense [13] zou blijken, dat voor een waterverzadigde zandbodem, zoals deze werd aangetroffen in een proefterrein te Harderwijk, bij explosies onder het maaiveld de relatie

$$\hat{v} = \frac{0,018 W^{1/3}}{\sqrt{R}} \text{ zou gelden, waarin}$$

W = lading in kilogrammen springstof

R = afstand in meters

\hat{v} = maximale deeltjessnelheid in m/s

Hoewel deze formule slechts een beperkte geldigheid heeft is ze bij gebrek aan beter toegepast om tenminste een indicatie te verkrijgen van de bodemdeeltjessnelheid.

Tezamen met de zojuist genoemde grens van 0,004 m/s

deze snelheid levert dit voor explosies onder maaiveld $R_z = 20 W^{2/3}$

Voor de bepaling van de vereiste afstand bij explosies boven maaiveld zijn geen nadere gegevens bekend. Naar analogie van de afmetingen van de bodemverweking bij explosies boven respectievelijk onder maaiveld, waarvoor een verhouding van 0,75 werd aanbevolen; zou ook voor de zettingsvloeiingen dit getal gehanteerd kunnen worden.

We krijgen dan voor de explosie boven maaiveld de relatie:

$$R_z = 15 W^{2/3}.$$

Bovenstaande relaties afstand -maximale ladinggrootte gelden uitsluitend voor die gevallen waarbij een min of meer ongestoorde voortplanting van de oppervlakte golf is gewaarborgd. Bij duidelijke discontinuïteiten in het oppervlak, bijvoorbeeld stroomgeulen e.d. zal deze golf sterk vervormen, zodat de vermelde rekenregels beperkt geldig zijn. Overigens zal in die gevallen aandacht moeten worden besteed aan de mogelijkheid van zettingsvloeiingen, die beginnen in de geul en eventueel een bedreiging kunnen vormen voor de waterkering.

7.5 Bodemverweking ten gevolge van explosies vanaf het water.

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 orde grootte als die bij vergelijkbare explosies in waterverzadigde bodem op het land. Als goede benadering kunnen de gegeven afstanden voor explosies in waterverzadigde bodem worden gebruikt (zie tabel 1). Eveneens is het denkbaar dat door de bodembewegingen op zekere afstand zettingsvloeiingen zouden kunnen optreden. Uit [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. Ook voor de zettingsvloeiingen kunnen dus de eerder gegeven afstanden worden gebruikt: $R_z = 20 W^{2/3}$.

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 (zie paragraaf 7.7.2).

7.6. Trillingen in de bodem

De basis voor de beschouwingen over trillingen in de bodem ten gevolge van explosies wordt gevormd door de in de verslagen 109 en 122 van het ABG [11, 17] genoemde veldproeven. Deze verslagen beschrijven explosies op enige diepte onder het maaiveld, waarbij de bodem bestaat uit klei (te Lopik) of zand (te Harderwijk).

In literatuur [14] wordt aan de hand van metingen in Friesland en Groningen geconcludeerd dat er geen verschil in trillingen wordt gevonden voor explosies in de bodem onder water of onder maaiveld, terwijl ook de trillingen van explosies op de bodem onder water hieraan nagenoeg gelijk waren. Zeer waarschijnlijk zullen de trillingen in de bodem bij een maaiveldexplosie minder hevig zijn. Aangezien slechts gegevens ter beschikking staan over trillingen bij explosies onder maaiveld zullen deze ook worden toegepast voor maaiveldexplosies.

De stabiliteit van een dijk, of een onderdeel daarvan kan worden aangetast door de extra krachten die ten gevolge van de bodemversnellingen door de trillingen op de constructie werken. Bovendien kunnen trillingen een achteruitgang van de wrijvingseigenschappen van de grond veroorzaken. De grens bij welke bodemversnelling schade zal ontstaan is niet eenduidig vast te leggen, omdat deze sterk afhankelijk is van de mate van stabiliteit van de dijk zonder de invloed van een explosie, van de constructie en van de eigenschappen van de materialen waaruit ze is opgebouwd.

De gemeten versnellingen tijdens aardbevingen zijn volgens het K.N.M.I. in ons land nauwelijks groter dan 0,02 g geweest. Na een dergelijke beving is nooit schade aan dijken gemeld. Als uitgangspunt voor het vaststellen van de toelaatbare bodemversnelling zou dan ook deze versnelling tijdens aardbevingen kunnen dienen, hoewel hierbij moet worden opgemerkt, dat het niet waarschijnlijk wordt geacht, dat deze in het westen en noorden zijn voorgekomen. Bij gebrek aan een beter criterium zal als schadegrens voor de versnellingen 0,02 g worden gebruikt.

We hebben gezien, dat op enige afstand van het explosiepunt in een homogeen medium de Rayleigh-golf de belangrijkste bodembeweging veroorzaakt. Ook bij een niet homogene opbouw van de ondergrond zal dit in het algemeen het geval zijn, hoewel uitzonderingen hierop voorkomen [14]. We zullen ons voor de bepaling van de afstand

explosie - waterkering beperken tot dit verschijnsel.

In de eerder genoemde literatuur [11, 13] zijn beschouwingen hieraan gewijd, waarvan hier de conclusies naar voren worden gebracht.

Bij explosies in waterverzadigde kleigrond worden de formules voor de maximale versnellingen als volgt voorgesteld:

$$\hat{a}_v = \frac{0,10 W^{1/6}}{\sqrt{R}} \cdot g. \quad , \quad \hat{a}_h = \frac{0,079 W^{1/6}}{\sqrt{R}} \cdot g.$$

a_v = verticale versnelling

a_h = horizontale versnelling

Voor waterverzadigde zandgrond zijn de uitdrukkingen voorlopig:

$$\hat{a}_v = \frac{0,04 W^{1/6}}{\sqrt{R}} \cdot g. \quad \hat{a}_h = \frac{0,032 W^{1/6}}{\sqrt{R}} \cdot g.$$

Met de zojuist genoemde grens $a = 0,02 g$ komen we dan tot een vereiste afstand - ladinggrootte relatie

$$\begin{array}{l} \text{voor klei} \quad R_t = 40 W^{1/3} \\ \text{voor zand} \quad R_t = 7 W^{1/3} \end{array}$$

In afwijking van bovenstaande, waarbij voor de beoordeling van een bodemtrilling en de schadegrens voor de waterkeringen versnellingen werden gehanteerd, wordt in veel literatuur de deeltjessnelheid van de bodem als maatstaf gebruikt. Ook wordt wel een maximale amplitude als beoordelingscriterium gebruikt. In [14] wordt een overzicht gegeven van de gebruikelijke grenswaarden.

Een criterium voor "waterkeringen" wordt echter niet genoemd

Voor waterbouwkundige kunstwerken kan als veilige grens worden aangehouden:

maximale deeltjessnelheid $V = 0,01 \text{ m/s}$

maximale amplitude $a = 0,5 \text{ m}$

Als deze criteria worden toegepast op de waterkeringen vinden we bij gebruikmaking van de gegevens in [13] (waarbij $W < 100 \text{ kg}$):

Deeltjessnelheid criterium

$$\text{klei} : R_t = 20 W^{2/3} ; \text{ zand} : R_t = 4 W^{2/3}$$

Amplitude criterium

klei : $R_t = 10W$; zand: $R_t = 2 W$

Voor het geval van explosies in veengebieden werd in [19] een relatie aangegeven tussen de maximale deeltjessnelheid, de ladinggrootte en de afstand tot het explosiepunt:

$$v = 5,5 W^{2/3} \cdot R^{-3/2} \quad (W < 100 \text{ kg})$$

Deze relatie werd proefondervindelijk bepaald en zou 99% zekerheid geven dat de berekende maximale snelheid niet wordt overschreden.

Uitgaande van het hiervoor aangegeven snelheids criterium van $v = 0.01 \text{ m/s}$ kan de relatie ladinggrootte - afstand tot het explosiepunt, waarbij er slechts 1% kans bestaat dat deze snelheid wordt overschreden, op $R = 67 W^{4/9}$ worden berekend.

Bij het bepalen van de vereiste afstand tot een explosie in zand en klei werd echter uitgegaan van de gemiddelde afstand waarop de maximale snelheid $v = 0,01 \text{ m/s}$ werd bereikt. Wordt dit ook als uitgangspunt gekozen voor de explosies in de veengebieden van lit. [19] dan kan op grond van de daar gepresenteerde informatie worden bepaald dat de vereiste afstand kan worden teruggebracht tot $R \approx 30 W^{4/9}$.

Bij een vergelijking van de vereiste afstanden in klei en veen blijkt dan dat voor ladinggrootten van 5 - 100 kg de afstanden ongeveer even groot of in veen iets kleiner kunnen zijn. In elk geval kan worden vastgesteld dat de informatie uit [19] geen aanleiding geeft het gestelde in par. 5 ten aanzien van de onderlinge vergelijkbaarheid van explosies in klei en veen te verwerpen.

In het voorgaande is alleen gelet op de trillingen van de R-wave; in het merendeel van de gevallen zal deze op enige afstand inderdaad verantwoordelijk zijn voor de grootste trillingen. Uit [14] blijkt echter dat bij een bepaalde opbouw van de ondergrond in sommige gevallen de deeltjessnelheden, resp. versnellingen veroorzaakt door een gereflecteerde P- of S-golf belangrijker zijn. Het is echter onmogelijk voor deze gevallen een afstandscriterium vast te stellen.

Een bijzonder geval doet zich voor als de eigen frequentie van de waterkering overeenkomt met de frequentie van de bodemtrilling. In dat geval zal door opslingering de trilling van de waterkering sterk kunnen worden vergroot.

7.7. De schokgolf

7.7.1. De schokgolf in de lucht

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 éézelfde lading het grootst is.

Uit gegevens in het verslag 204 van het ABG [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 ladinggrootte gegeven. Bij een explosie op het maaiveld van 1 kg springstof kan dit worden omgerekend tot:

Piekdruk kN/m ²	Afstand m
500	1,20
250	1,60
200	1,80
100	2,50
50	3,60
10	10,00
5	15,00
2	30,00
1	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 afstand 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. Het verslag 204 van het ABG [10] geeft de grenzen van de gronddrukken waarbij 100 % bodemverweking zou optreden.

klei: ca 300 kN/m^2

zand: ca 250 kN/m^2

Er zijn geen gegevens bekend die de relatie tussen een zeker mate van draagkrachtvermindering aangeven en de daarbij behorende grondschok. Uit gegevens van de bodemverweking rond kraters zou echter afgeleid kunnen worden dat bij een draagkrachtvermindering van 5% de gronddruk veroorzaakt door de grondschok ongeveer 1/10 van de waarde bij volledige verweking zou mogen zijn.

De relatie afstand explosiepunt tot de waterkering is dan globaal voor maaiveldexplosies $R_s = 10 W^{1/3}$.

voor explosies boven het maaiveld $R_s = 15 W^{1/3}$.

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 [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 een 1 kN/m^2 (windsnelheid ca 40 m/s).

Bij deze grens is de relatie ladinggrootte vereiste afstand tot de waterkering voor explosie op het maaiveld: $R_s = 8 W^{1/3}$.

en voor explosies boven het maaiveld $R_s = 10 W^{1/3}$.

Overigens lijkt het criterium voor dijken wel erg veilig. Voor kunstwerken kan het een reëler uitgangspunt zijn.

7.7.2 De schokgolf in het water.

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:

$$\bar{p} = k \left(\frac{W}{R} \right)^{\alpha},$$
 waarin k en α 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 wat eenvoudiger relatie gegeven die bij toepassing voor grotere afstanden een wat grotere piekdruk geeft:

$$\bar{p} = \frac{37.000 W^{1/3}}{R},$$
 waarin p = piekdruk in kN/m^2
 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.

8. Overzicht van de vereiste afstanden explosie-waterkering

Een overzicht van de in hoofdstuk 7 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.

8.1. Explosies op het land op/boven maaiveld bij droge grond.

- De gegeven kraterstraal en de straal van breuk- en plastische zone zijn geldig voor maaiveldexplosies ^x.
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 bodemtrillingen, 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 zeer waarschijnlijk kleiner zijn dan in waterverzadigde grond door een grotere demping. Hierover waren echter geen gegevens voorhanden en is als veilige grens die van explosies in waterverzadigde bodem opgenomen.
- De vereiste afstand in verband met de in de lucht optredende schokgolf zijn gegeven voor explosies boven maaiveld (op optimumhoogte). De afstanden vereist bij explosie op maaiveld zijn ongeveer 1/3 kleiner.

8.2. Explosies op het land op/boven maaiveld bij waterverzadigde bodem.

- Kraterstraal, breuk- en plastische zone: als bij 8.1.
- De bodemverweking door de directe grondschok met een draagkrachtsvermindering van 5% is bepaald voor maaiveldexplosies. Voor explosies boven maaiveld zijn deze waarden te zien als veilige grenzen.

x zie opmerking op bladzijde 12

- Zettingsvloeiingen komen bijna uitsluitend voor in losgepakte zandformaties. Veiligheidshalve is onder "vaste pakking" (niet nader gedefinieerd) hetzelfde getal tussen haakjes opgenomen. De waarden zijn geldig voor maaiveldexplosies en veilige grenzen voor explosies boven maaiveld.
- De vereiste afstanden voor de bodemtrillingen zijn bepaald voor explosies in waterverzadigde bodem. Voor explosies boven maaiveld zijn ze veilige grenzen.
- De afstanden voor stuwdruk en bodemverweking ten gevolge van de schokgolf zijn bepaald voor explosies op optimumhoogte. Explosies op maaiveld vereisen ongeveer 2/3 van de gegeven afstanden.

8.3. Explosies op het land onder maaiveld bij droge grond:

- De afmetingen van de krater en breuk- 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. Zie voorts 8.1.
- Onder bodemtrillingen zijn weer veilige grenzen gegeven. De gegeven waarden behoren in principe bij explosies in waterverzadigde bodem.
- 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.

8.4. Explosies op het land onder maaiveld bij waterverzadigde bodem.

- De afmetingen van de krater, breuk- en plastische zone: zie 8.3.
- De afmetingen van de bodemverweking: geen opmerkingen.
- De zettingsvloeiing in "vastgepakt" zand is weer als waarschuwing (tussen haakjes) opgenomen.
- De gegeven afstanden betreffende de bodemtrillingen zijn voor explosies onder maaiveld in waterverzadigde bodem afgeleid.
- De schokgolf : zie 8.3.

8.5. Explosies vanaf het water op/boven de bodem

- 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 identiek aan explosies in waterverzadigde bodem.

- De trillingen komen ook overeen met die bij explosies in waterverzadigde bodem.
- de vereiste afstanden door de schokgolf in water zijn door gebrek aan informatie niet bepaald. Waarschijnlijk zal dit echter wel een bepalende factor zijn.

8.6. Explosies vanaf het water onder de bodem

- betreffende de kraterstraal, breuk- en plastische zone, bodemverweking, zettingvloeiingen en trillingen: zie 8.5.
- bij explosies 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 ondiep water echter worden uitgebreid.

De in de tabel opgenomen vereiste afstanden tussen explosie 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 dan wat nauwkeuriger kunnen worden bepaald, wat zeer waarschijnlijk een verkleining daarvan zal betekenen.

Anderzijds zijn de huidige vereiste afstanden aan de ruime kant, doordat de mogelijke extra belasting op de waterkering door een explosie niet volledig is bekend.

Bovendien moet door de verscheidenheid aan typen en constructie van de waterkeringen wel een conservatieve schatting gemaakt worden.

Samenvattend kan worden gesteld dat de vereiste afstanden tussen een explosie en een waterkering zoals in dit rapport aangegeven in tabel 1 zeer waarschijnlijk 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.

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 zijn verzameld in tabel 2. De maatgevende afstanden zijn in de tabel onderstreept. Het blijkt dat bij explosies van 4 kg springstof op of boven de bodem de vereiste afstand op het land maximaal 58 meter en in het water 75 meter bedraagt. Een voorbehoud moet worden gemaakt bij explosies in het water voor de onbekende afstand, nodig vanwege de schokgolf, die mogelijk nog groter is. Bij explosies van 20 kg springstof in de bodem zijn de vereiste afstanden zowel op het land als in het water maximaal 200 meter.

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" [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 drooggeval wad wordt 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 Onderzoekingen" 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

Tabel 1

Overzicht explosie-verschijnselen met bijbehorende vereiste afstanden tot waterkeringen 1)

	op het land op/boven maaiveld					
	droge grond		waterverzadigde grond			
			vastgepakt		losgepakt	
	zand	klei	zand	klei	zand	klei
kraterstraal	0,4 W ^{1/3}	0,4 W ^{1/3}	0,6 W ^{1/3}	0,6 W ^{1/3}	0,8 W ^{1/3}	0,8 W ^{1/3}
straal breukzone	0,6 W ^{1/3}	0,6 W ^{1/3}	0,9 W ^{1/3}	0,9 W ^{1/3}	1,2 W ^{1/3}	1,2 W ^{1/3}
straal plastische zone	1,2 W ^{1/3}	1,2 W ^{1/3}	1,8 W ^{1/3}	1,8 W ^{1/3}	2,4 W ^{1/3}	2,4 W ^{1/3}
bodemverweking grond- schok (draagkrachts- vermindering 5%)	-	-	9,0 W ^{1/3}	7,2 W ^{1/3}	12,0 W ^{1/3}	9,6 W ^{1/3}
zettingsvloeiing	-	-	(15 W ^{2/3})	-	15 W ^{2/3}	-
bodemtrilling						
- a < 0,02 g.	(7 W ^{1/3})	(40 W ^{1/3})	(7 W ^{1/3})	(40 W ^{1/3})	(7 W ^{1/3})	(40 W ^{1/3})
- v < 0,01 m/s	(4 W ^{2/3})	(20 W ^{2/3})	(4 W ^{2/3})	(20 W ^{2/3})	(4 W ^{2/3})	(20 W ^{2/3})
- A < 0,05 cm } 3)	(2 W)	(10 W)	(2 W)	(10 W)	(2 W)	(10 W)
schokgolf						
- druk 2)	10 W ^{1/3}	10 W ^{1/3}	10 W ^{1/3}	10 W ^{1/3}	10 W ^{1/3}	10 W ^{1/3}
- bodemverweking 5%	-	-	15 W ^{1/3}	15 W ^{1/3}	15 W ^{1/3}	15 W ^{1/3}

1) exclusief veiligheidszone (hoofdstuk 6)

W in kg springstof

2) van belang bij kunstwerken

3) W < 100 kg

Tabel 1 VERVOLG 1

Overzicht explosie-verschijnselen met bijbehorende vereiste afstanden tot waterkeringen ¹⁾

	op het land onder maaiveld					
	droge grond		waterverzadigde vastgepakt		grond losgepakt	
	zand	klei	zand	klei	zand	klei
kraterstraal	0,8 W ^{1/3}	0,8 W ^{1/3}	1,2 W ^{1/3}	1,2 W ^{1/3}	1,6 W ^{1/3}	1,6 W ^{1/3}
straal breukzone	1,2 W ^{1/3}	1,2 W ^{1/3}	1,8 W ^{1/3}	1,8 W ^{1/3}	2,4 W ^{1/3}	2,4 W ^{1/3}
straal plastische zone	2,4 W ^{1/3}	2,4 W ^{1/3}	3,6 W ^{1/3}	3,6 W ^{1/3}	4,8 W ^{1/3}	4,8 W ^{1/3}
bodemverweking grond-schok (draagkrachtsvermindering 5%)	-	-	12,0 W ^{1/3}	9,6 W ^{1/3}	16,0 W ^{1/3}	12,8 W ^{1/3}
zettingsvloeiing	-	-	(20 W ^{2/3})	-	20 W ^{2/3}	-
bodemtrilling						
-a < 0,02 g.	(7 W ^{1/3})	(40 W ^{1/3})	(7 W ^{1/3})	(40 W ^{1/3})	7 W ^{1/3}	40 W ^{1/3}
-v < 0,01 m/s	(4 W ^{2/3})	(20 W ^{2/3})	(4 W ^{2/3})	(20 W ^{2/3})	4 W ^{2/3}	20 W ^{2/3}
-A < 0,05 cm	(2 W)	(10 W)	(2 W)	(10 W)	2 W	10 W
schokgolf						
- druk ²⁾	-	-	-	-	-	-
- bodemverweking 5%	-	-	-	-	-	-

1) exclusief veiligheidszone

2) van belang bij kunstwerken

3) W 100 kg

W in kg springstof

Tabel 1 VERVOLG 2 Overzicht explosie-verschijnselene met bijbehorende vereiste afstanden tot waterkeringen ¹⁾

	in het water op/boven de bodem				in het water onder de bodem			
	vastgepakt		losgepakt		vastgepakt		losgepakt	
	zand	klei	zand	klei	zand	klei	zand	klei
kraterstraal	1,2 W ^{1/3}	1,2 W ^{1/3}	1,6 W ^{1/3}	1,6 W ^{1/3}	1,2 W ^{1/3}	1,2 W ^{1/3}	1,6 W ^{1/3}	1,6 W ^{1/3}
straal breukzone	1,8 W ^{1/3}	1,8 W ^{1/3}	2,4 W ^{1/3}	2,4 W ^{1/3}	1,8 W ^{1/3}	1,8 W ^{1/3}	2,4 W ^{1/3}	2,4 W ^{1/3}
straal plastische zone	3,6 W ^{1/3}	3,6 W ^{1/3}	4,8 W ^{1/3}	4,8 W ^{1/3}	3,6 W ^{1/3}	3,6 W ^{1/3}	4,8 W ^{1/3}	4,8 W ^{1/3}
bodemverweking grond- schok(draagkrachts- vermindering 5%)	12,0 W ^{1/3}	9,6 W ^{1/3}	16,0 W ^{1/3}	12,8 W ^{1/3}	12,0 W ^{1/3}	9,6 W ^{1/3}	16,0 W ^{1/3}	12,8 W ^{1/3}
zettingsvloeiing	(20 W ^{2/3})	-	20 W ^{2/3}	-	(20 W ^{2/3})	-	20 W ^{2/3}	-
bodemtrilling -a < 0,02 g.	7 W ^{1/3}	40 W ^{1/3}	7 W ^{1/3}	40 W ^{1/3}	7 W ^{1/3}	40 W ^{1/3}	7 W ^{1/3}	40 W ^{1/3}
-v < 0,01 m/s	4 W ^{2/3}	20 W ^{2/3}	4 W ^{2/3}	20 W ^{2/3}	4 W ^{2/3}	20 W ^{2/3}	4 W ^{2/3}	20 W ^{2/3}
-A < 0,05 cm } 3)	2 W	10 W	2 W	10 W	2 W	10 W	2 W	10 W
schokgolf - druk ²⁾	?	?	?	?	-	-	-	-
- bodemverweking 5%	?	?	?	?	-	-	-	-

1) exclusief veiligheidszone

2) van belang bij kunstwerken

3) W < 100 kg.

W in kg springstof

Tabel 2

Afstanden tot de waterkering ¹⁾ bij explosie van 20 kg springstof in de bodem of 4 kg springstof op de bodem

	4 kg op het land, op/boven maaiveld						20 kg op het land, onder maaiveld					
	droge grond		waterverzadigde grond				droge grond		waterverzadigde grond			
	zand	klei	zand	klei	zand	klei	zand	klei	zand	klei	zand	klei
kraterstraal	0,65m	0,65m	0,95m	0,95m	1,30m	1,30m	2,20m	2,20m	3,25m	3,25m	4,35m	4,35m
straal breukzone	0,95m	0,95m	1,45m	1,45m	1,90m	1,90m	3,25m	3,25m	4,90m	4,90m	6,50m	6,50m
straal plastische zone	1,90m	1,90m	2,90m	2,90m	3,80m	3,80m	6,50m	6,50m	9,80m	9,80m	13,00m	13,00m
bodemverweking grondschock	-	-	14,20m	11,40m	19,00m	15,20m	-	-	32,50m	26,00m	43,40m	34,70m
zettingsvloeiingen	-	-	(40 m)	-	40 m	-	-	-	(150m)	-	150 m	-
bodemtrillingen												
-a < 0,02 g.	(1,10m)	(6,35m)	(1,10m)	(6,35m)	(1,10m)	(6,35m)	(19m)	(108m)	19m	108 m	19 m	108 m
-v < 0,01 m/s	(10m)	(50m)	(10m)	(50m)	(10m)	(50m)	(30m)	(148m)	30m	148 m	30 m	148 m
-A < 0,05 cm	(8m)	(40m)	(8m)	(40m)	(8m)	(40m)	(20m)	(200m)	20m	200 m	20 m	200 m
schokgolf												
- druk ²⁾	16m	16 m	16m	16m	16m	16m	-	-	-	-	-	-
- bodemverweking	-	-	24m	24m	24m	24m	-	-	-	-	-	-

1) exclusief veiligheidszone

2) van belang bij kunstwerken

Tabel 2 **VERVOLG**Afstanden tot de waterkering¹⁾bij explosie van 20 kg springstof in de bodem of
4 kg springstof op de bodem

	4 kg in het water op/boven de bodem				20 kg in het water, onder de bodem			
	vastgepakt		losgepakt		vastgepakt		losgepakt	
	zand	klei	zand	klei	zand	klei	zand	klei
kraterstraal	1,90m	1,90m	2,55m	2,55m	3,25m	3,25m	4,35m	4,35m
straal breukzone	2,90m	2,90m	3,80m	3,80m	4,90m	4,90m	6,50m	6,50m
straal plastische zone	5,80m	5,80m	7,60m	7,60m	9,80m	9,80m	13,00m	13,00m
bodemverweking grondschock	19,00m	15,20m	25,40m	20,30m	32,50m	26,00m	43,40m	34,70m
zettingsvloeiingen	(50 m)	-	50 m	-	(150 m)	-	150 m	-
bodemtrillingen								
-a < 0,02 g.	1,10m	6,35m	1,10m	6,35m	19 m	108 m	19 m	108 m
-v < 0,01 m/s	10 m	50 m	10 m	50 m	30 m	148 m	30 m	148 m
-A < 0,05 cm	8 m	40 m	8 m	40 m	20 m	200 m	20 m	200 m
schokgolf								
- druk	?	?	?	?	-	-	-	-
- bodemverweking	?	?	?	?	-	-	-	-

1) exclusief veiligheidszone

2) van belang bij kunstwerken

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, Verzameling
basisgegevens ten dienste van het opstellen van schadever-
wachtingen e.d. naar aanleiding van nucleaire explosies (1969)
11. N.N.
Verslag no. 122, Advies Bureau der Genie.
Het gedrag van de bodem en het grondwater in Nederland bij
dynamische belastingen, in het bijzonder bij dynamische
belastingen als gevolg van een kernwapen explosie (1965)
12. Puchkov S.V.
Correlation between the velocity of seismic oscillations of
particles and the liquefaction phenomenon of water saturated sand.

13. Trense R.W.,
Verslag no. 132 Advies Bureau der Genie, De standzekerheid van dijken onder invloed van Raileigh golven opgewekt door nucleaire explosies (1966)
14. Schydłowski, G.P.
Trillingsmetingen aan waterkeringen in Friesland en Groningen (1972)
15. Schydłowski, G.P.
Berekening van grond- en waterdruk ten gevolge van springstof-explosies (1969)
16. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen
Leidraad voor constructie en beheer van gasleidingen in en nabij waterkeringen (1973)
17. Ketelaar P.,
Verslag no. 109, Advies Bureau der Genie, Veldproeven te Lopik in Harderwijk (1963)
18. Nadere regelen Mijnreglement seismische onderzoeken (1967).
19. Korth D.,
"Ergebnissen von Schwingungsmessungen bei Sprengarbeiten in Moorgebieten", Die Strasse nov. 1975.