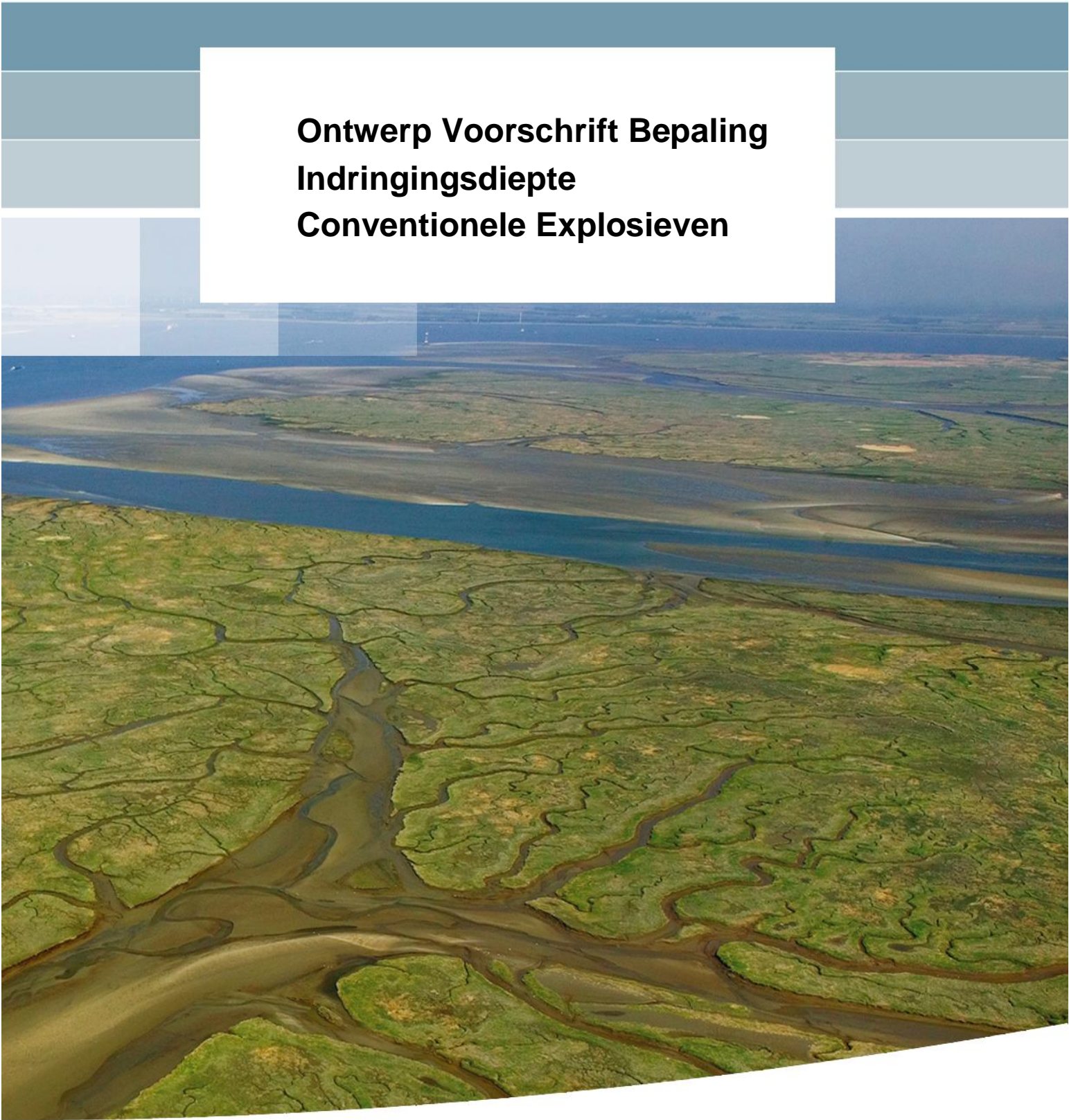


**Ontwerp Voorschrift Bepaling
Indringingsdiepte
Conventionele Explosieven**



Ontwerp Voorschrift Bepaling Indringingsdiepte Conventionele Explosieven

Dirk de Lange

1210497-000

Titel
Ontwerp Voorschrift Bepaling Indringingsdiepte Conventionele Explosieven

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Vereniging voor Explosieven Opsporing (VEO)	1210497-000	1210497-000-GEO-0002-gbh	13

Trefwoorden
Afwerpmunitie, bommen, berekeningsvoorschrift, penetratie bij impact, wegzakken, dynamische weerstand.

Samenvatting
Dit rapport biedt een ontwerp voor een methode om de maximale indringingsdiepte van conventionele explosieven (CE) te berekenen. Dit heeft onder meer als doel om bij het opsporen van CE onnodige inspanning te voorkomen. De beschreven methode is in 2012 door Deltares ontwikkeld in opdracht van de gemeente Katwijk (project Vliegveld Valkenburg) en neemt naast de statische weerstand van de grond ook de dynamische weerstand in rekening. De methode beoogt een realistische benadering te zijn en is bruikbaar voor de Nederlandse bodem. In de bijlagen zijn een catalogus voor twee typen CE en een uitgewerkt rekenvoorbeeld opgenomen.

- Referenties**
- 1205623-000 'Bepaling indringingsdiepte afwerpmunitie, projectlocatie Valkenburg' (Deltares, januari 2012)
 - 1208802-000 'Analyse indringingsdiepte afwerpmunitie (vervolg)' (Deltares, februari 2014)
 - Luger, H.J., Lubking, P. & Nieuwenhuis, J.D. (1982). Aspects of penetrometer tests in clay. *Proc. ESOPT-II*, Amsterdam, Vol. 2, p:683-687.
 - Chu P.C., Ray G., Fan C. and Gefken P. (2010). Underwater Bomb Trajectory Prediction for Stand-off Assault (Mine/IED) Breaching Weapon Fuse Improvement (SOABWFI)

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	Maart 2015	Ir. D.A. de Lange		Ir. H.J. Luger		Ing. A.T. Aantjes	

Status
definitief

Inhoud

1	Algemeen	1
1.1	Onderwerp en toepassingsgebied	1
1.2	Referenties	1
1.3	Aannamen	1
1.3.1	Statische en dynamische weerstand	1
1.3.2	Bepaling dynamische weerstandscoefficiënt	1
1.3.3	Afgelegd traject in ondergrond	2
1.4	Definities	2
1.5	Symbolen (en afkortingen)	3
2	Benodigde gegevens	5
2.1	Karakteristieken CE	5
2.1.1	Benodigde gegevens	5
2.1.2	Massa	5
2.1.3	Diameter	5
2.1.4	Volume en vorm	5
2.1.5	Weerstandscoefficiënt	5
2.2	Trefsnelheid en tijdstip	5
2.2.1	Trefsnelheid	5
2.2.2	Tijdstip van bombardement	6
2.3	Geotechnische gegevens	6
2.3.1	Benodigde gegevens	6
2.3.2	Conusweerstand	6
2.3.3	Grondwaterspiegel	6
2.3.4	Soortelijke massa grond	7
2.3.5	Benodigd aantal sonderingen	7
3	Berekening maximale indringingsdiepte	9
3.1	Stappenplan	9
3.2	Penetratiediepte bij impact van CE	9
3.2.1	Grondslag	9
3.2.2	Berekening	9
3.2.3	Speciale gevallen	10
3.3	Langzaam wegzakken bom (kruip)	12
3.3.1	Grondslag	12
3.3.2	Berekening	13
3.4	Bepaling maximale indringingsdiepte en bijbehorende nauwkeurigheid	13
	Bijlage(n)	
A	Catalogus twee typen CE (250 en 500 lbs)	A-1
B	Voorbeeld berekening in Microsoft Excel	B-1

1 Algemeen

1.1 Onderwerp en toepassingsgebied

Dit voorschrift biedt een methode om de maximale indringingsdiepte van conventionele explosieven (CE) te berekenen. Dit heeft onder meer als doel om bij het opsporen van CE (detecteren, lokaliseren, laagsgewijs ontgraven) onnodige inspanning te voorkomen. De beschreven methode is gebaseerd op een eerder, in opdracht van de gemeente Katwijk, voor het project Vliegkamp Valkenburg opgezette aanpak en is op sommige punten licht gewijzigd om tot een consistentere en eenvoudiger geheel te komen. De methode beoogt een realistische benadering te zijn (niet te veel te overschatten) en is bruikbaar voor de Nederlandse bodem. De methode levert informatie over de maximaal mogelijke indringdiepte en niet over de horizontale verplaatsing van een bom in de grond. Er wordt daarom niet aangegeven tot op welke horizontale afstand van het intredepunt gezocht dient te worden.

Het rekenvoorschrift dekt niet alle denkbare omstandigheden onder welke een bom kan penetreren. Handreikingen voor enkele gevallen zijn wel gegeven. De methode is momenteel toepasbaar voor twee typen CE (een type 250 lbs en een type 500 lbs). Voor afwijkende typen zijn aanvullende dynamische eindige-elementenberekeningen nodig om de weerstandscoefficienten te bepalen.

1.2 Referenties

Voor de beschrijving van de methode is gebruik gemaakt van de rapportages 1205623-000 (Deltares, januari 2012) en 1208802-000 (Deltares, februari 2014), opgesteld in opdracht van de gemeente Katwijk.

1.3 Aannamen

1.3.1 Statische en dynamische weerstand

De penetratie van CE in de ondergrond is een dynamisch vraagstuk. Een berekeningsmethode die alleen de statische weerstand van de grond in rekening brengt, biedt een te conservatieve benadering. In het voorliggende voorschrift wordt daarom ook de dynamische weerstand van de ondergrond meegenomen. Dit is de (extra) weerstand die een voorwerp ondervindt ten gevolge van massastraagheid-effecten bij het snel bewegen door grond of water. Deze weerstand is evenredig met de soortelijke massa van het medium waar de bom zich doorheen beweegt en evenredig met het kwadraat van de snelheid van de bom. Dit resulteert in een aanpak waarin bij hoge snelheden de weerstand voornamelijk bepaald wordt door de dynamische weerstand, terwijl bij lage snelheden slechts de statische weerstand overblijft.

1.3.2 Bepaling dynamische weerstandscoefficiënt

De reactiekrachten (weerstand) zijn bepaald voor twee typen CE. De bommen zijn als starre lichamen gemodelleerd in de eindige-elementen-software Abaqus en met diverse snelheden (tot snelheden van 350 m/s) door de bodem getrokken. De grond is daarbij gemodelleerd als een puur cohesief materiaal, met de volgende eigenschappen:

- Ongedraineerde schuifsterkte $c_u = 15$ kPa.
- E -modulus = 1 MPa.
- Poisson's ratio $\nu = 0,48$ (-).
- Soortelijke massa $\rho = 1200$ kg/m³.

Bij de bepaalde c_d -waarden (zie bijlage A) zijn de volgende opmerkingen te plaatsen:

- De waarde hangt af van de gemaakte keuze van het constitutieve grondmodel en de daarin gebruikte parameters.
- De grootte van de elementen en de tijdstappen is zo gekozen, dat zij het resultaat beperkt beïnvloeden.
- De waarde varieert enigszins met de snelheid.
- De waarde blijkt niet te variëren met de soortelijke massa van het medium.
- Bij de overgang van lucht naar grond wordt een grotere reactiekracht uitgerekend, dan geldt voor dieper penetreren (zelfde snelheid van de bom). Dit komt voornamelijk doordat een ander mechanisme optreedt, en deels door de verandering van het medium. De reactiekracht is buiten de invloedzone van deze overgang constant, daarom zijn de c_d -waarden afgeleid over dit (diepere) traject. Dit is een conservatieve benadering.

Het lijkt niet zinvol om voor alle mogelijke parametercombinaties de weerstandscoefficiënt te bepalen. Vanwege de vele factoren die een rol spelen, is gekozen om een conservatieve waarde aan te houden. Aangenomen is dat dit een redelijke schatting is voor een relatief slappe Nederlandse ondergrond.

1.3.3 Afgelegd traject in ondergrond

Er wordt uitgegaan van puur verticale impact. In het veld wordt vaak waargenomen dat CE is geroteerd om hun as (J-vormige baan), toch is het fysisch zeker mogelijk dat CE verticaal penetreert. De aanname van puur verticale penetratie is conservatief als het gaat om de maximale penetratiediepte, maar niet conservatief wanneer het gaat om de grootte van het te doorzoeken gebied (het zijdelings zoeken van CE). Paragraaf 3.2.3.1 behandelt hoe kan worden omgegaan met bommen die onder een bepaalde hoek zijn ingedrongen.

1.4 Definities

Conventionele Explosieven (CE)

Het betreft elk explosief dat niet als geïmproviseerd, nucleair, biologisch of chemisch kan worden aangemerkt. Een geïmproviseerd explosief is een voorwerp dat explosief materiaal bevat en dat op een zelf bedachte wijze is geplaatst of aangemaakt en normaliter is vervaardigd uit niet militaire middelen. Onder conventionele explosieven worden begrepen: geschutsmunitie, mortiermunitie, hand- & geweergranaten, raketten, klein kaliber munitie, vliegtuigbommen (afwerpmunitie), landmijnen, hulzen, explosieve stoffen, pyrotechnische middelen/munitie, zeemijnen, torpedo's, dieptebommen en strategisch schroot. Bij het opsporingsproces wordt aan CE gelijkgesteld en als zodanig behandeld:

- CE die geen explosieve stoffen (meer) bevatten.
- Restanten van CE die door leken als zodanig herkenbaar zijn.
- Voorwerpen die door leken worden aangemerkt als CE.
- Wapens of onderdelen daarvan.

Weerstandscoefficiënt of "drag-coëfficiënt" (C_d)

De weerstandscoefficiënt is een natuurkundige grootheid die gebruikt wordt bij het berekenen van de weerstand die een voorwerp ondervindt in een stromend medium, bijvoorbeeld lucht of water. De weerstandscoefficiënt is onder andere afhankelijk van de vorm van een voorwerp en van de structuur van het oppervlak. Als vuistregel geldt dat een ronde vorm die het stromende medium goed gestroomlijnd afvoert een lage coëfficiënt heeft en dat bij hoekige vormen de coëfficiënt hoger is. De exacte hoogte van de weerstandscoefficiënt kan

niet beredeneerd worden maar moet voor ieder object worden gemeten. Omdat de mechanische eigenschappen van het medium waar het beschouwde voorwerp zich door heen beweegt een invloed (kunnen) hebben op de weerstandscoefficiënt, verschillen de waarden per medium. Wanneer een voorwerp een geheel andere snelheid krijgt dan tijdens het bepalen van de weerstandscoefficiënt werd aangenomen, kan een geheel ander stromingspatroon rondom het voorwerp ontstaan, in vloeistoffen of gassen bijvoorbeeld turbulent in plaats van laminair. Voor vaste materialen, zoals grond, zijn deze afhankelijkheden minder goed bekend en dient de weerstands- of drag-coefficiënt bij meerdere snelheden te worden geverifieerd.

Conusweerstand (q_c)

De conusweerstand of puntweerstand is het quotiënt van de kracht die nodig is om een sondeerconus naar beneden te verplaatsen en het oppervlak van de basis van de conus. Het gaat hierbij om dat gedeelte van de bij het sonderen gemeten reactie dat veroorzaakt wordt door de druk van de grond tegen de kegelvormige punt van de sondeerstang.

1.5 Symbolen (en afkortingen)

A	[m ²]	Oppervlakte
a	[m/s ²]	Versnelling
CE		Conventionele explosieven
C_d	[-]	Drag-coëfficiënt
c_u	[kPa]	Ongedraineerde schuifsterkte
D	[m]	Diameter
E	[kPa]	Young's modulus
E_{kin}	[kJm]	Kinetische energie
E_{pot}	[kJm]	Potentiële energie
F	[kN]	Kracht
g	[m/s ²]	Valversnelling (9,81 m/s ²)
h	[m]	Afwerphoogte
m	[kg]	Massa
mv		Huidig maaiveld
mv_{oud}		Oorspronkelijk maaiveld
q_c	[kPa]	Conusweerstand
R_f	[-]	Wrijvingsgetal, verhouding tussen kleef en conusweerstand
t	[s]	Tijd
V	[m ³]	Volume
v	[m/s]	Snelheid
z	[m]	Diepte
z_{oud}	[m]	Diepte t.o.v. oorspronkelijk maaiveld
ν (ν)	[-]	Poisson's ratio
ρ (ρ)	[kg/m ³]	Dichtheid / soortelijke massa

2 Benodigde gegevens

2.1 Karakteristieken CE

2.1.1 Benodigde gegevens

Voor het uitvoeren van de voorgestelde berekeningsmethodiek zijn de volgende karakteristieken van het te beschouwen type CE benodigd:

- Totale massa m .
- Diameter D .
- Volume V en vorm.
- Weerstandscoefficiënt C_d .

Deze karakteristieken worden hierna afzonderlijk kort toegelicht.

2.1.2 Massa

Hoewel de naamgeving van de CE in veel gevallen het gewicht lijkt te verraden, gaat het in veel gevallen om het 'nominale gewicht'. Het eigenlijke gewicht van elk afzonderlijk type CE kan variëren. Het feitelijke gewicht van een U.S. M117-bom is bijv. typisch ca. 370 kg, terwijl het nominale gewicht gelijk is aan 340 kg. Dit kan dus gemakkelijk een verschil van 10% inhouden.

2.1.3 Diameter

De diameter van het type CE is van invloed op de grootte van de weerstand. Het geprojecteerde oppervlak in het vlak die wordt gedefinieerd door de bewegingsvector als normaalvector is bepalend voor zowel de statische als de dynamische weerstand. (Er dient gerekend te worden met het minimale geprojecteerde oppervlak van het type CE.)

2.1.4 Volume en vorm

De dichtheid of soortelijke massa is gedefinieerd als het quotiënt van de massa en het volume. Deze informatie is benodigd om na te gaan of het langzaam wegzakken van de CE überhaupt kan optreden. De vorm van de CE bepaalt in grote mate de hieronder beschreven weerstandscoefficiënt.

2.1.5 Weerstandscoefficiënt

De weerstandscoefficiënt is onder andere afhankelijk van de vorm van een voorwerp, van de structuur van het oppervlak en de mechanische eigenschappen van het medium rond het voorwerp. Deze kan benaderd worden door het probleem te modelleren met eindige-elementen-software dat om kan gaan met dynamica, plasticiteit en grote vervormingen (zoals Abaqus of Material Point Method (MPM)). Hiertoe dienen de vorm van het type CE, de karakteristieken van de ondergrond (stijfheid, sterkte, drainage, dichtheid) en de interactie tussen het type CE en de ondergrond goed te worden gemodelleerd.

2.2 Trefsnelheid en tijdstip

2.2.1 Trefsnelheid

Voor de bepaling van de maximale penetratiediepte is de verticale component van de trefsnelheid van belang. Deze bepaalt de grootte van de energie die door de weerstand van de ondergrond moet worden geabsorbeerd. Des te groter de initiële snelheid, des te dieper zal de CE kunnen penetreren.

Hoewel dit voorschrift niet handelt over hoe deze trefsnelheid v [m/s] te bepalen, kan wel een ruwe eerste schatting worden gemaakt op basis van een energiebalans. Hiervoor is de afwerphoogte h [m] van het type CE benodigd:

$$v_{h=0} = \sqrt{2 * g * h_{v=0}}$$

Hierin is g de valversnelling (9,81 m/s²). Deze schatting verwaarloost de invloed van luchtwrijving en overschat daarmee de trefsnelheid (conservatieve benadering). Trefsnelheden hoger dan de geluidssnelheid (ca. 343 m/s) worden niet zinvol geacht.

2.2.2 Tijdstip van bombardement

Om te kunnen bepalen hoever het type CE na impact mogelijkwijze nog verder is weggezak, is het tijdstip van impact van belang. Ook kunnen in de tussentijd veranderingen in grondwaterspiegel en maaiveldhoogte zijn opgetreden (zie ook paragraaf 2.3).

2.3 Geotechnische gegevens

2.3.1 Benodigde gegevens

Voor het uitvoeren van de voorgestelde berekeningsmethodiek zijn de volgende geotechnische gegevens nodig:

- De conusweerstand over de diepte q_c .
- De hoogte van de grondwaterspiegel.
- De soortelijke massa van de grond ρ .

Deze drie onderdelen worden hieronder afzonderlijk behandeld.

2.3.2 Conusweerstand

De weerstand van de ondergrond wordt bepaald aan de hand van de conusweerstand q_c over de diepte (volgens NEN-EN-ISO 22476-1).

Gelet dient te worden op de volgende zaken:

- Homo-/heterogeniteit van het terrein (voldoende sonderingen).
- Hoogte maaiveld (is er voorgegraven om de sondering te maken?).
- Is het terrein recent opgehoogd? Als dit het geval is, dient de weerstand die de ophoging levert niet te worden meegenomen en de conusweerstand te worden gecorrigeerd met de formule (conform NEN 9997-1):

$$q_{c,oud} = q_c \left(\frac{\sigma_{v,oud}'}{\sigma_v'} \right)^{0.67}$$

met:

$q_{c,oud}$ de te in rekening te brengen conusweerstand

q_c de gemeten conusweerstand

$\sigma_{v,oud}'$ de verticale korrelspanning (effectief) zonder ophoging en

σ_v' de huidige verticale korrelspanning (effectief)

2.3.3 Grondwaterspiegel

De hoogte van de grondwaterstand beïnvloedt onder andere de soortelijke massa van de grond en de grootte van de korrelspanningen. Nagegaan dient te worden of er een significante verandering van de grondwaterspiegel plaats heeft gevonden. Wanneer geen

grondwaterspiegel bekend is, dient er gekozen te worden voor een relatief lage grondwaterstand, want in droge grond (droog zand) zal afwerpmunitie verder indringen.

2.3.4 Soortelijke massa grond

Voor de bepaling van de dynamische weerstand is ook de soortelijke massa ρ van belang. Deze hangt af van de samenstelling van de ondergrond, de mate van verzadiging en de relatieve dichtheid. Tabel 2.1 geeft een goede schatting van de soortelijke massa ρ op basis van het wrijvingsgetal R_f (de verhouding tussen kleef en de conusweerstand uit de sondering)¹. In oude sonderingen is deze soms niet gemeten/weergegeven. In dat geval kan een lage, conservatieve, waarde voor ρ worden aangehouden.

Wrijvingsgetal (%)	Grondsoort	$\rho_{\text{droog}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$\rho_{\text{nat}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$
<1,5%	zand	1700	2000
>5%	veen	1100	1100
anders	klei	1400	1600

Tabel 2.1 Schatting van de soortelijke massa op basis van het wrijvingsgetal

2.3.5 Benodigd aantal sonderingen

De dichtheid van het grondonderzoek dient te worden afgestemd op de variatie in de bodemgesteldheid over het terrein. Een mogelijke benadering is hieronder aangereikt. Hierbij wordt aangesloten bij de stelregel vanuit de praktijk om één sondering per 2.500 m² te maken. De benadering is gelijk aan de geldende norm voor grondonderzoek en terreinproeven zoals deze is opgenomen in NEN 6740, waarbij de onderlinge afstand wordt gerelateerd aan de variabiliteit van de ondergrond.

Bij deze mogelijke benadering kan in eerste instantie worden uitgegaan van één sondering per 2.500 m². Wanneer een te grote variatie wordt aangetroffen, dient het raster verdicht te worden, door tussen de gemaakte sonderingen sondeerlocaties toe te voegen. Afhankelijk van de geologie kan aanvullend grondonderzoek eventueel beperkt worden tot die gebieden waar variaties (in indringdiepte) worden gevonden. Hierbij gelden de volgende twee richtlijnen:

- a) Voor de gemiddelde onderlinge afstand van de onderzoekspunten, a_{gem} :
- als $Z_{\text{impact};\text{max}} - Z_{\text{impact};\text{min}} \leq 0,3 * Z_{\text{impact};\text{gem}}$, dan is $a_{\text{gem}} \leq 50$ m en wordt per terreinproef een oppervlakte bestreken van ten hoogste 50 m x 50 m;
 - als $Z_{\text{impact};\text{max}} - Z_{\text{impact};\text{min}} \leq 0,4 * Z_{\text{impact};\text{gem}}$, dan is $a_{\text{gem}} \leq 35$ m en wordt per terreinproef een oppervlakte bestreken van ten hoogste 35 m x 35 m;
 - als $Z_{\text{impact};\text{max}} - Z_{\text{impact};\text{min}} \leq 0,5 * Z_{\text{impact};\text{gem}}$, dan is $a_{\text{gem}} \leq 25$ m en wordt per terreinproef een oppervlakte bestreken van ten hoogste 25 m x 25 m.

waarbij:

$Z_{\text{impact};\text{max}}$ is de grootst berekende penetratiediepte bij impact voor het te beschouwen type CE
 $Z_{\text{impact};\text{min}}$ is de kleinst berekende penetratiediepte bij impact voor het te beschouwen type CE

¹ "Een relatief lage waarde [van het wrijvingsgetal] (1 à 2%) duidt op zand, voor klei is het wrijvingsgetal 3 à 5%, nog hogere waarden (8 à 10) duiden op veen (Verruijt, A. (2001/2010). Grondmechanica. TU Delft).

$Z_{impact;gem}$ is de gemiddelde berekende penetratiediepte bij impact voor het te beschouwen type CE

- b) De totale te onderzoeken oppervlakte moet volledig zijn afgedekt door de onder a) aangegeven gebieden met de locaties van de sonderingen als middelpunt.

Door het terrein op te delen in gebieden waarbinnen de variaties kleiner zijn, kan onnodige inspanning worden voorkomen. Wel dienen in dit geval de overgangen tussen de gebieden goed in kaart gebracht te worden.

3 Berekening maximale indringingsdiepte

3.1 Stappenplan

Voor het berekenen van de maximale indringingsdiepte van CE is een methodiek ontwikkeld die bestaat uit twee onderdelen: (1) penetratie bij impact van de bom en (2) evt. langzaam wegzakken van de bom. Dit wordt hieronder verder uitgewerkt.

3.2 Penetratiediepte bij impact van CE

3.2.1 Grondslag

De penetratiediepte bij impact wordt bepaald aan de hand van de eerste wet van Newton: de resultante van alle krachten op een voorwerp is gelijk aan het product van de massa en de versnelling van het voorwerp ($F = m * a$). Deze formule is omgewerkt tot:

$$ma(t) = mg - A * q_c(z) - \frac{1}{2} * C_d(v) * \rho(z) * A * v^2$$

met:

mg	de zwaartekracht op de CE
$A * q_c(z)$	de statische weerstand van de ondergrond en
$\frac{1}{2} * C_d(v) * \rho(z) * A * v^2$	dynamische weerstand van de ondergrond

Noot: Merk op dat hier de uitdrukking $C_d(v)$ gebruikt wordt. Dat is gedaan omdat de drag-coëfficiënt in principe enigszins snelheid-afhankelijk is. Ook andere grondparameters (sterkte, stijfheid, soortelijke massa) kunnen de waarde van de drag-coëfficiënt beïnvloeden. Omdat die invloeden in de praktijk beperkt zullen zijn, zal in het vervolg van dit rapport gewoon over c_d worden gesproken en niet met een variabele drag-coëfficiënt gerekend worden.

3.2.2 Berekening

De indringdiepte kan worden gevonden door bovenstaande vergelijking in kleine tijdstappen op te lossen. Dit kan eenvoudig met een spreadsheet gedaan worden, zoals in de bijlage aan de hand van een voorbeeld zal worden geïllustreerd.

Allereerst dienen de beginvoorwaarden opgesteld te worden. Dit betreffen:

- $t_0 = 0$ s (tijdstip van treffen)
- $v_0 =$ trefsnelheid (in m/s)
- $z_0 = 0$ m (t.o.v. het oorspronkelijke maaiveld)

Op basis van de geotechnische gegevens (q_c en ρ) voor $z_0 = 0$, de karakteristieken van het type CE (m , A en C_d) en de beginvoorwaarde (trefsnelheid $v(t = 0)$), kan de versnelling (in dit geval vertraging) die de bom ondervindt in de toplaag van de ondergrond worden uitgerekend met:

$$a_0 = \frac{m * g - A * q_c(z_0) - \frac{1}{2} * C_d * \rho(z_0) * A * v_0^2}{m}$$

Zorg ervoor dat alle krachten in dezelfde eenheid bij/van elkaar worden opgeteld/afgetrokken, wat eenvoudig kan worden bereikt door de conusweerstand in [Pa] mee te nemen.

Aanbevolen wordt om een voldoende kleine tijdstap te gebruiken om tot een oplossing te komen, bijv. $\Delta t = 0,0001$ s. Op ieder volgend tijdstip $t_i = t_{i-1} + \Delta t$ kunnen de snelheid v_i en de diepte z_i worden bepaald met de volgende formules (uitgaande van een eenparig versnelde beweging gedurende het tijdsinterval):

$$v_i = v_{i-1} + a_{i-1} \Delta t$$

$$z_i = z_{i-1} + v_{i-1} * \Delta t + \frac{1}{2} * a_{i-1} * \Delta t^2$$

Wanneer diepte en snelheid bekend zijn, kan opnieuw de versnelling (vertraging) op de bom worden berekend met:

$$a_i = \frac{m * g - A * q_c(z_i) - \frac{1}{2} * C_d * \rho(z_i) * A * v_i^2}{m}$$

Dit proces dient doorgezet te worden totdat $v_i \leq 0$ m/s. Op het tijdstip dat voor het eerst aan deze voorwaarde wordt voldaan, kan de bijbehorende diepte z_i worden bepaald. Deze diepte is de maximale indringingsdiepte bij impact van de CE, z_{impact} .

De juistheid van de gekozen tijdstap kan eenvoudig gecontroleerd worden door ter controle een berekening te maken met een nog kleinere tijdstap. Indien de bereikte indringing niet significant afwijkt van de eerder berekende indringing was de tijdstap klein genoeg.

In de volgende stap wordt een methode aangereikt om de orde grootte van het wegzakken in de tijd te bepalen. Samen met de maximale indringingsdiepte bij impact vormt dit de totale maximale indringingsdiepte.

3.2.3 Speciale gevallen

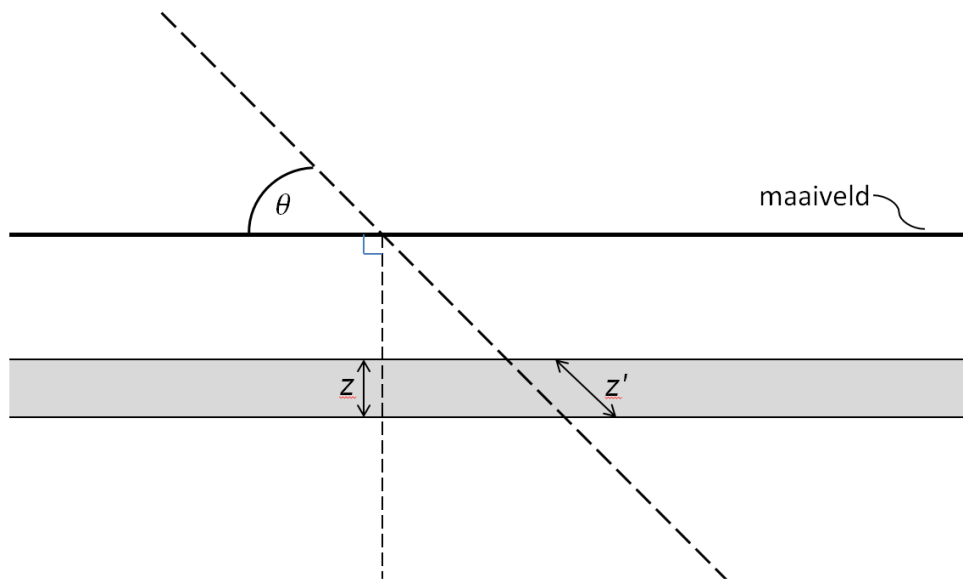
Dit rekenvoorschrift dekt niet alle denkbare omstandigheden onder welke een bom kan penetreren. Handreikingen voor enkele gevallen worden hieronder gegeven (indringing onder een hoek, het doorkruisen van een watermassa en invloed van een harde toplaag).

3.2.3.1 Indringing onder een hoek

Indien een bom onder een hoek is gepenetreerd (i.p.v. verticaal) kan in principe dezelfde rekenmethodiek worden toegepast als beschreven onder paragraaf 3.2.2. Door er vanuit te gaan dat de richting van de bom in de ondergrond niet meer verandert, kan het traject worden beschreven. De sondering dient te worden geprojecteerd op dit traject. Dit kan worden gedaan door alle waarden van de sondeerdiepte z te vervangen met een equivalente lengte z' :

$$z' = \frac{z}{\sin(\theta)}$$

waarin θ de hoek is waaronder de bom het maaiveld heeft getroffen, zie Figuur 3.1. Met deze input kan de penetratielengte worden berekend.



Figuur 3.1 Toelichtende illustratie bij aanpak penetratie onder een hoek

Nadat de penetratielengte is uitgerekend, kan met de volgende formule de penetratiediepte worden berekend:

$$z_{\text{impact}} = z'_{\text{impact}} * \sin(\theta)$$

Des te kleiner de invalshoek θ , des te groter de kans op instabiliteit van de bom. Deze zal eerder worden afgebogen, waardoor de nauwkeurigheid van de methode in dergelijke gevallen zal afnemen (overschatting van de penetratiediepte).

3.2.3.2 Doorkruisen watermassa

Wanneer de bom eerst een watermassa doorkruist alvorens de bodem te raken zal de bom ook vertraagd worden door het water. Dit kan worden berekend wanneer de dragcoëfficiënt van het type CE in water en de toenmalige waterdiepte bekend zijn. Vanuit praktisch oogpunt mag er worden gerekend met het onder-watergewicht van de bom en een conusweerstand gelijk aan nul. De versnelling (vertraging) die de bom door het water ondervindt wordt nu beschreven met:

$$ma(t) = (m - V * \rho_{\text{water}}) * g - \frac{1}{2} * C_d * \rho_{\text{water}} * A * v^2$$

waarin:

ρ_{water} de soortelijke massa van water (1000 kg/m³)

V het volume van het type bom

Wanneer de weerstandscoefficiënt van het type CE onder water niet onderbouwd voorhanden is, wordt geadviseerd te rekenen met een waarde gelijk aan 0,02 [-]. Deze waarde is afgeleid voor een spits / ballistisch vormgegeven projectiel door Chu et al. (2010).

De rekenmethodiek beschreven in paragraaf 3.2.2 (probleem opdelen in kleine tijdstappen) kan worden gebruikt om de vertraging van de bom onder invloed van de watermassa uit te rekenen.

3.2.3.3 Invloed van een harde toplaag

Een harde toplaag kan bestaan uit een bijvoorbeeld wegdek of een bevroren toplaag. Indien een bom door een dergelijke laag dringt, zal deze een aanzienlijke weerstand ondervinden en hierdoor worden afgeremd (en eventueel worden afgebogen). Deze invloed kan worden meegenomen door te rekenen met een equivalente conusweerstand die geldt voor deze laag. De waarde van deze weerstand dient mechanisch onderbouwd te worden. Hieromtrent levert dit voorschrift geen richtlijnen. Ook de dikte van de laag dient onderbouwd te worden. In geval van een bevroren toplaag kan worden gedacht aan relaties tussen de mate vorstindringing en het gemeten temperatuurverloop. Tevens wordt opgemerkt dat de weerstand van een wegdek bestaande uit klinkers lager zal zijn dan de sterkte van de afzonderlijke klinkers.

Wanneer een bom inslaat in een constructie (bebouwing), zal een mechanische afschatting gemaakt moeten worden van het energieverlies. Dit valt buiten de scope van dit voorschrift.

3.3 Langzaam wegzakken bom (kruip)

3.3.1 Grondslag

Het al of niet langzaam wegzakken van de CE wordt berekend aan de hand van de conusweerstand in de laag die is bereikt bij impact (berekening paragraaf 3.2) en het netto gewicht van de CE. Dit zal alleen plaatsvinden als de bom zich in een dikke, extreem slappe laag bevindt. Onderzoek bij Deltares (Luger et al., 1982) heeft aangetoond dat de conusweerstand als volgt afhangt van de sondeersnelheid:

$$q_c' = q_c^0 * \left(\frac{v * D^0}{v^0 * D} \right)^\gamma$$

met:

- q_c' de conusweerstand bij sondeersnelheid v en conusdiameter D
- q_c^0 de referentie-conusweerstand met snelheid v^0 (2 cm/s) en diameter D^0
- γ empirisch bepaalde constante (tussen 0,05 en 0,15)

Deze relatie vormt de basis voor de berekening van het later langzaam wegzakken van de CE. Dit betreft een eerste benadering (schatting) van de snelheid.

Voor de berekening voor het verder wegzakken wordt gerekend met het netto gewicht van de bom, omdat wanneer de bom drijft (gelijke soortelijke massa als de omgevende grond), de bom niet zal wegzakken. Deze kan worden bepaald met de formule:

$$F_{netto} = m_{CE} * g - V_{CE} * \rho(z) * g$$

met:

- F_{netto} het gewicht CE gecorrigeerd voor opdrijven [N]
- m_{CE} de massa van het type CE [kg]
- g de valversnelling (9,81 m/s²)
- V_{CE} het volume van het type CE [m³]
- ρ de soortelijke massa van de omringende grond [kg/m³]

Noot: bij het bepalen van het volume kan worden gekozen om het volume van de staart niet mee te nemen, omdat deze kan afbreken. Voor de gepresenteerde volumes in bijlage A is dit het geval.

3.3.2 Berekening

Voor $F_{netto} > 0$ kan de snelheid van het verder wegzakken worden bepaald met:

$$v_{kruip} = v^0 * \frac{D}{D^0} * \left(\frac{F_{netto}}{A * q_c} \right)^{\frac{1}{\gamma}}$$

waarin:

v_{kruip} de snelheid van het verder wegzakken [m/s]

v^0 de sondeersnelheid, 0,02 m/s

D de diameter van het type CE

D^0 de conusdiameter, veelal 0,036 of 0,044 m

F_{netto} het gewicht van het type CE gecorrigeerd voor opdrijven

A de minimale geprojecteerde oppervlakte van de CE (in m²)

q_c de conusweerstand van de laag onder z_{impact} ('engineering judgement')

γ empirisch bepaalde constante, 0,1 [-]

Wanneer de datum van het bombardement bekend is (aantal jaren dat is gepasseerd), kan de afgelegde weg tijdens het langzaam wegzakken worden benaderd met:

$$z_{later\ wegzakken} = v_{kruip} * t$$

waarin het aantal jaar omgerekend dient te worden naar het aantal seconden.

Geen significant wegzakken (<1 mm/jaar) treedt op in de volgende gevallen:

- $q_c \geq 0,2$ MPa voor het type 250 lbs-bom;
- $q_c \geq 0,3$ MPa voor het type 500 lbs-bom.

3.4 Bepaling maximale indringingsdiepte en bijbehorende nauwkeurigheid

De maximale indringingsdiepte van het type CE wordt nu gevonden met de volgende formule:

$$z_{impact} + z_{later\ wegzakken} = z_{totaal}$$

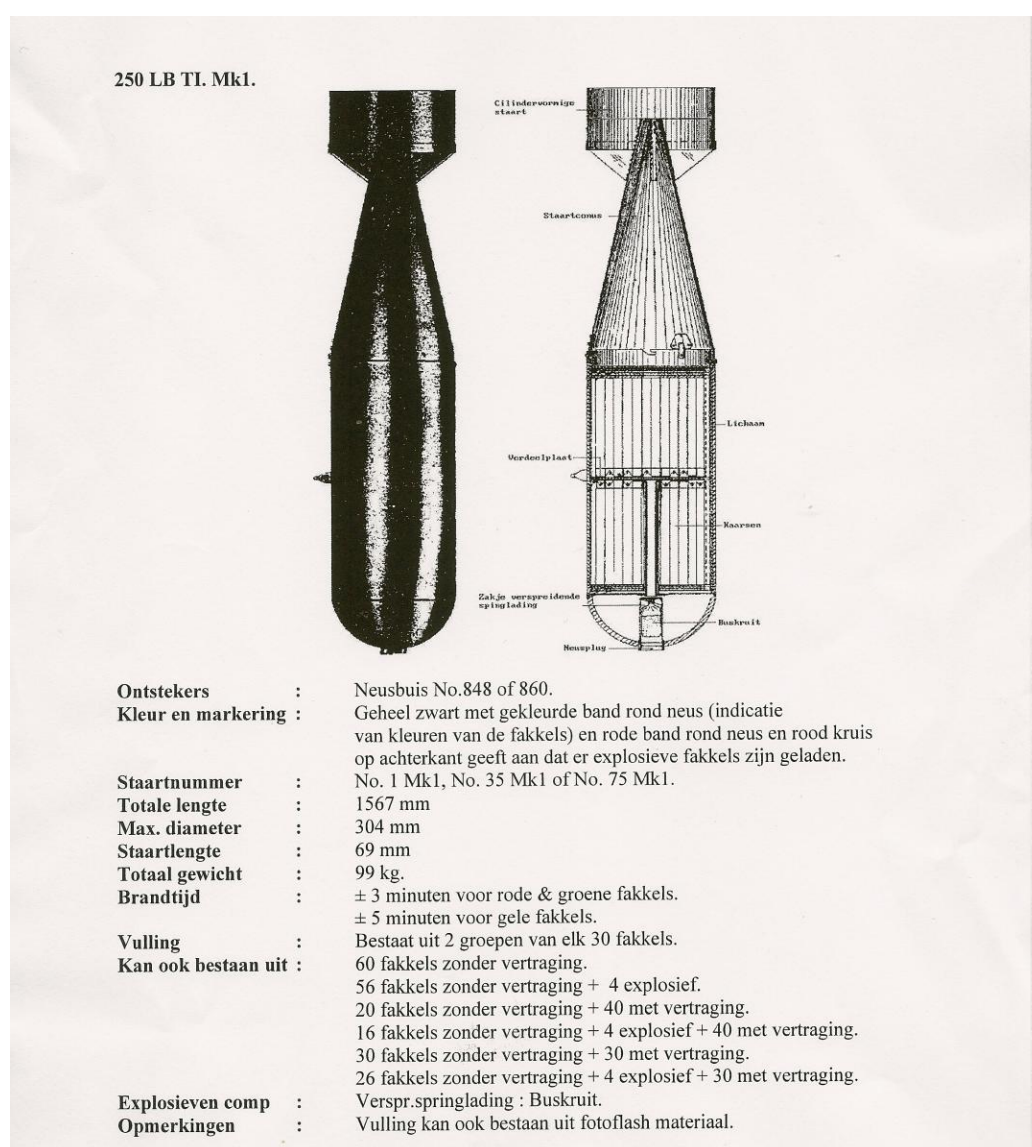
Het rekenvoorschrift heeft tot doel om te bepalen wat volgens de rekenmethode de maximale indringingsdiepte is. Het resultaat is dus de berekende maximale indringing en in zoverre is de afwijking 0%. De verwachting is dus dat het projectiel niet dieper dan de berekende diepte zal worden aangetroffen. Naar boven moet rekening worden gehouden met een nauwkeurigheid van 25% (mogelijk ondieper dan berekend).

A Catalogus twee typen CE (250 en 500 lbs)

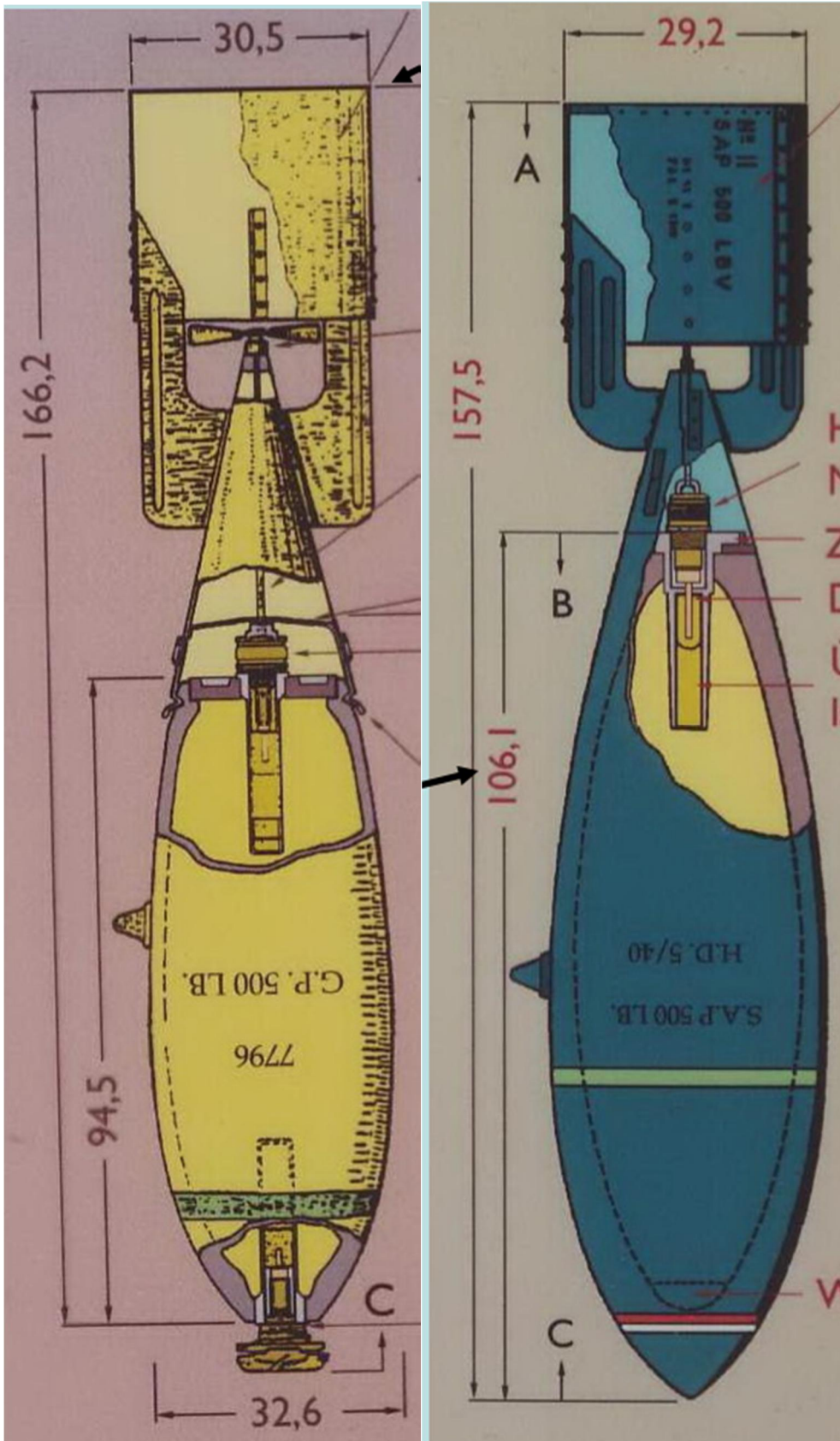
Deze bijlage presenteert de karakteristieken van twee typen CE die benodigd zijn voor de bepaling van de maximale indringingsdiepte, zie Tabel A.1. Het gaat om de 250- en 500-pounds-bommen die worden getoond in Figuur A.1 en Figuur A.2.

	250lbs	500lbs
m (kg)	125	250
V (m ³)	0,06	0,07
D _{max} (m)	0,304	0,326
A (m ²)	0,0725	0,0886
C _d (-)	0,97	0,68

Tabel A.1 Karakteristieken van twee typen CE benodigd voor de bepaling van de maximale indringingsdiepte.



Figuur A.1 Beschouwde 250 lbs-bom



Figuur A.2 Beschouwde 500 lbs-bom

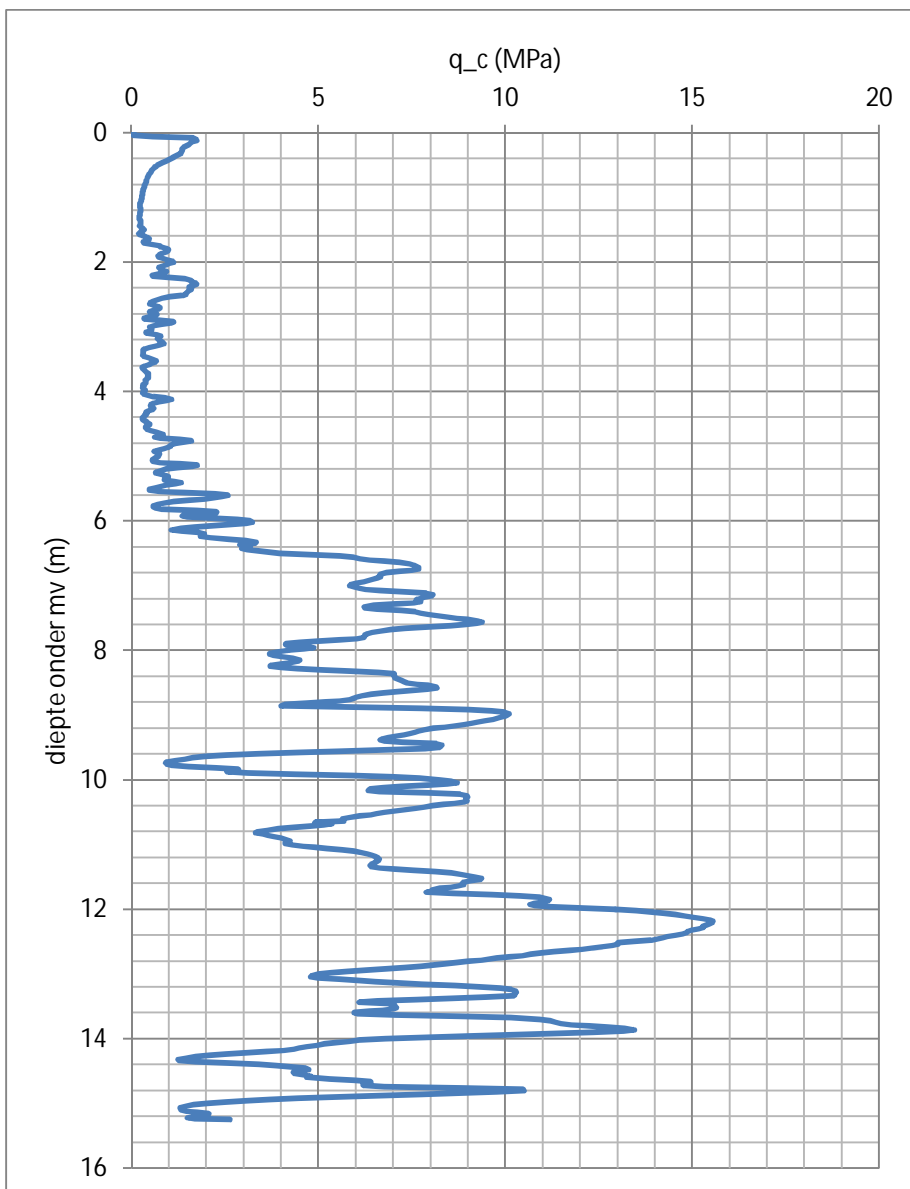
B Voorbeeld berekening in Microsoft Excel

Deze bijlage omvat een voorbeeldberekening in Microsoft Excel van de in de rapportage beschreven berekeningsmethode.

Input

De volgende gegevens vormen de input voor de berekening:

- Karakteristieken van de 250 lbs-bom (zie bijlage A).
- De sondering gepresenteerd in Figuur B.1.
- Een trefsnelheid $v_o = 250$ m/s.
- Een grondwaterspiegel ter hoogte van 1,5 m onder mv.



Figuur B.1 Sondering gebruikt in dit rekenvoorbeeld

Bepaling soortelijke massa

Door de conusweerstand (q_c) en het wrijvingsgetal (R_f) uit te zetten naast de diepte (dit kan eenvoudig worden gekopieerd uit de GEF-file van de sondering) kan de soortelijke massa bij iedere diepte worden bepaald. Dit kan worden gedaan op basis van het wrijvingsgetal (zie Tabel 2.1). Hiervoor kan de IF-functie worden gebruikt, in dit voorbeeld:

- Boven de grondwaterspiegel: =IF($R_f < 0; 1100; IF(R_f > 5; 1100; IF(R_f < 1.5; 1700; 1400))$)
- Onder de grondwaterspiegel: =IF($R_f < 0; 1100; IF(R_f > 5; 1100; IF(R_f < 1.5; 2000; 1600))$)

Zie ook onderstaande Figuur B.2.

H4		=IF(G4<0;1100;IF(G4>5;1100;IF(G4<1.5;1800;1400)))							
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Karakteristieken CE			Geotechnische gegevens					
2									
3	m (kg)	125		Diepte (m)	qc (MPa)	fs (MPa)	Rf (-)	Rho (kg/m³)	
4	A (m²)	0.0725		0	0.067	-99999	-99999	1100	
5	V (m³)	0.06		0.02	0.065	-99999	-99999	1100	
6	c_drag (-)	0.97		0.04	0.066	-99999	-99999	1100	
7				0.06	0.557	-99999	-99999	1100	
8				0.08	1.663	-99999	-99999	1100	
9	Trefsnelheid			0.1	1.728	0.048	-99999	1100	
10	v_0 (m/s)	250		0.12	1.74	0.056	-99999	1100	
11				0.14	1.612	0.063	-99999	1100	
12	v_sondering (m/s)	0.02		0.16	1.566	0.066	-99999	1100	
13	g (m/s²)	9.81		0.18	1.537	0.069	-99999	1100	
14	gws (m onder mv)	1.5		0.2	1.469	0.069	5.654	1100	
15				0.22	1.4	0.073	5.39	1100	
16	tijdstap (s)	0.0001		0.24	1.36	0.078	5.481	1100	
17	gamma	0.15		0.26	1.359	0.082	5.605	1100	
18				0.28	1.353	0.082	5.726	1100	
19				0.3	1.332	0.082	5.847	1100	
20				0.32	1.307	0.082	5.968	1100	
21				0.34	1.242	0.082	6.107	1100	
22				0.36	1.184	0.082	6.295	1100	
23				0.38	1.12	0.081	6.607	1100	
24				0.4	1.054	0.08	6.842	1100	

Figuur B.2 Print screen van een mogelijke opzet in Microsoft Excel

Berekening penetratiediepte bij impact

Na het verzamelen van de benodigde gegevens kan worden begonnen met de berekening van de maximale penetratiediepte bij impact. In het voorbeeld zijn hiertoe de volgende kolommen aangemaakt (van links naar rechts, zie ook Figuur B.3):

- Tijd.
- Snelheid.
- Diepte.
- Bijbehorende conusweerstand.
- Statische weerstand.
- Soortelijke massa (ook functie van de diepte).
- Dynamische weerstand.
- Totale versnelling.

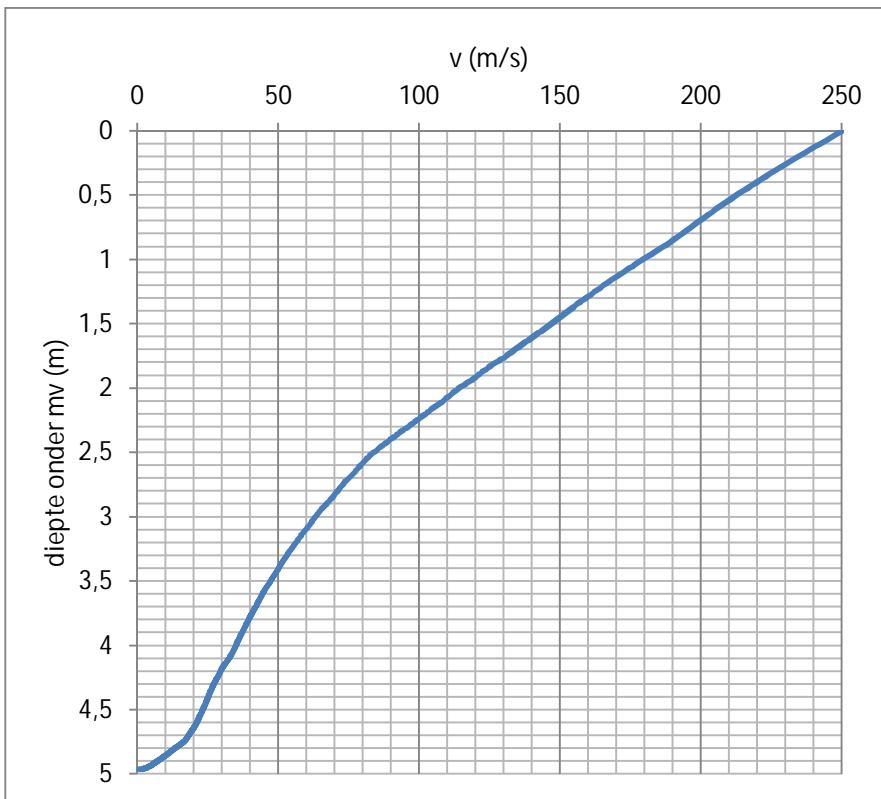
f _x =VLOOKUP(L6;\$D\$4:\$E\$767;2)									
I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Berekening maximale penetratiediepte (impact)									
	t (s)	v (m/s)	z (m)	qc (MPa)	F_statisch	rho (kg/m	F_dyn (kN	a (m/s^2)	
	0	250	0	0.067	4857.5	1100	2417422	-19368	
	0.0001	248.1	0.0249	0.065	4712.5	1100	2380110	-19069	
	0.0002	246.2	0.04961	0.066	4785	1100	2343658	-18778	
	0.0003	244.3	0.07414	0.557	40382.5	1100	2308038	-18778	
	0.0004	242.4	0.09847	1.663	120568	1100	2272691	-19136	
	0.0005	240.5	0.12261	1.74	126150	1100	2236949	-18895	
	0.0006	238.6	0.14657	1.612	116870	1100	2201936	-18541	
	0.0007	236.7	0.17034	1.566	113535	1100	2167848	-18241	
	0.0008	234.9	0.19392	1.537	111433	1100	2134570	-17958	
	0.0009	233.1	0.21732	1.469	106503	1100	2102059	-17659	
	0.001	231.4	0.24054	1.36	98600	1100	2070335	-17342	

Figuur B.3 Print screen van een mogelijke opzet in Microsoft Excel

Bij het vullen van de bovenste regel is het volgende gebruikt:

- In de bovenste regel worden de beginvoorwaarden ingevuld ($t = 0$ s; $v = 250$ m/s en $z = 0$ m).
- De conusweerstand (qc) en soortelijke massa (ρ) die bij de diepte horen, kunnen automatisch worden gevonden met de VLOOKUP-functie. Zorg er bij het selecteren van de te doorzoeken matrix voor dat de diepte in de meest linker kolom staat en de conusweerstand respectievelijk de soortelijke massa in de meest rechter kolom. Het getal dat aan het einde van de functie dient te worden ingevuld is in dat geval de breedte (aantal kolommen) van het geselecteerd gebied.
- De statische weerstand kan eenvoudig worden uitgerekend door de conusweerstand te vermenigvuldigen met de oppervlakte van het type CE. Let wel op de eenheden.
- Nu de snelheid en de dichtheid voor een bepaalde diepte bekend zijn, kan ook de dynamische weerstand en de versnelling worden uitgerekend met de formules die zij gepresenteerd in paragraaf 3.2.

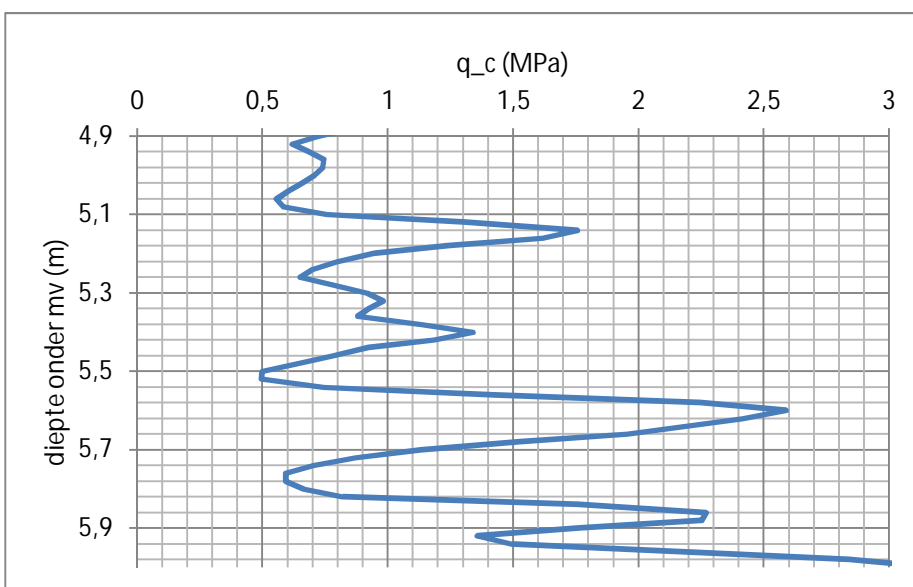
Na het vullen van deze bovenste regel, kan worden begonnen met de volgende regel(s). De tijd is steeds opgehoogd met de gekozen tijdstap (0,0001 s). De snelheid kan worden uitgerekend door de versnelling uit de vorige regel te vermenigvuldigen met de tijdstap en dit op te tellen bij de snelheid uit de vorige regel. Met de in paragraaf 3.2.2 getoonde formule kan ook de bijbehorende diepte worden uitgerekend. Nu de bovenste regel en de eerste drie cellen van de tweede regel gevuld zijn, kunnen alle kolommen eenvoudig worden "doorgetrokken". Door de diepte tegen de snelheid te plotten (zie Figuur B.4), kan eenvoudig de maximale indringingsdiepte bij impact worden bepaald. In ons rekenvoorbeeld is deze gelijk aan 5 m.



Figuur B.4 De snelheid van de bom als functie van de diepte (voorbeeldberekening)

Langzaam wegzakken

De kracht die nu nog op de bom werkt is alleen het netto gewicht. In ons geval is dit gelijk aan $9,81 \cdot (125 - 0,06 \cdot 1600) = 284,5$ N. De conusweerstand in de laag onder de penetratiediepte bij impact is geplot in Figuur B.5. De conusweerstand is ongeveer 0,6 MPa. Langzaam wegzakken zal dus geen (significante) rol spelen. Uit de berekening volgt een kruipsnelheid gelijk aan $2 \cdot 10^{-6}$ mm/jaar. De maximale indringingsdiepte is dus gelijk aan $5 + 0 = 5$ m.



Figuur B.5 Conusweerstand in de laag onder de penetratiediepte bij impact