

WBC

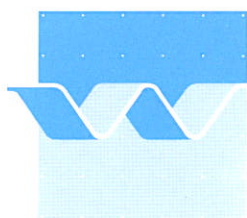
Opdrachtgever:
Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Probabilistische analyse stabiliteitsvoorspellers

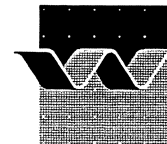
Bureaustudie
juni 1998

Probabilistische analyse stabiliteitsvoorspellers

Gert Jan Akkerman en Henk Verheij



wL | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde

TITEL: Probabilistische analyse stabiliteitsvoorspellers

SAMENVATTING:

In het kader van het samenwerkingsproject STEENSTABILITEIT worden diverse deelprojecten uitgevoerd. Het onderhavige deelproject (Q2395.20) betreft het uitvoeren van een probabilistische analyse van stabiliteitsvoorspellers, met als doel na te gaan hoe de doorwerking is van onzekerheden in de diverse van belang zijnde parameters. Interesse gaat met name uit naar de rol van turbulentie. Aan de hand van de bevindingen kan dan een prioritering worden aangegeven voor het nader vaststellen van de parameters.

Uit de studie komt naar voren dat de belastingparameters (turbulentie en stroomsnelheid) van overheersend belang bij de bepaling van de steenstabiliteit, meer dan de sterkteparameters (binnen de in Nederland gangbare steenklassen). Met name de onzekerheid in de grootte van de turbulentie werkt zeer sterk door; verdere inspanning moet worden gericht op het beter voorspellen van turbulentie, naast het verder uitwerken van het effect van turbulentie op steenstabiliteit en -transport. Deze inspanning was overigens reeds voorzien en zal in deelproject Q2395.30 worden geleverd.

REFERENTIES: Samenwerkingsverband DWW / WL | DELFT HYDRAULICS, overeenkomst DWW-1382

| REV. | AUTEUR | DATUM | OPMERKINGEN | REVIEW | GOEDKEURING |
|---|--------------------------------|-------------------------|---|--------------------|-------------|
| 1 | G.J. Akkerman/ H.J. Verheij | 25 juni 1998 25-6-98 | | L.C. van Rijn | H.J. Opdam |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| TREFWOORDEN | | | INHOUD | | STATUS |
| stroombestendigheid, materiaaltransport, korrelstabiliteit, begin van beweging, turbulentie, probabilistiek | | | TEKST: 23 TABELLEN: 6 FIGUREN: 2 APPENDICE 3 | Definitief rapport | |
| PROJECTNUMMER: Q2395.20 | | | | | |

Lijst van Symbolen

| | | |
|----------------|---|--|
| c_b | - | constante (vervangt C bij overgang naar belasting nabij bodem) ($m^{1/2}/s$) |
| c_s | - | geometrie-afhankelijke bijdrage in variatiecoëfficiënt stroomsnelheidsfluctuatie r_u (-) |
| C | - | Chézy-coëfficiënt ($m^{1/2}/s$) |
| D | - | kenmerkende korreldiameter (m) |
| D_n | - | = D_{n50} = nominale korreldiameter (m) |
| g | - | zwaartekrachtsversnelling (m/s^2) |
| h | - | waterdiepte (m) |
| k | - | invloedsfactor op de kritieke stroomsnelheid i.v.m. turbulentie (-) |
| m_R | - | modelonzekerheid in R (variabel) |
| m_S | - | modelonzekerheid in S (variabel) |
| L_b | - | afstand van plaats van zwaarste aanval tot kruin drempel (m) |
| $P(Z<0)$ | - | kans dat betrouwbaarheidsfunctie $Z<0$ |
| R | - | sterktefunctie (variabel) |
| r_u | - | variaticoëfficiënt op de optredende stroomsnelheid (-) |
| $r_{u,b}$ | - | variaticoëfficiënt op de optredende stroomsnelheid nabij de bodem (-) |
| r_τ | - | variaticoëfficiënt op de optredende schuifspanning (= 0.4 voor uniforme stroming) (-) |
| $r_{\tau r}$ | - | variaticoëfficiënt op de weerstand biedende schuifspanning (-) |
| S | - | belastingfunctie (variabel) |
| u | - | stroomsnelheid (m/s) |
| u_c | - | kritieke stroomsnelheid (m/s) |
| α_e | - | factor die een maat is voor de extremititeit van de optredende turbulente schuifspanning (-) |
| α_{er} | - | factor die een maat is voor de extremititeit van de weerstand biedende turbulente schuifspanning (-) |
| γ | - | overlappingsfactor belastings- en weerstandsverdelingen gerelateerd aan respectievelijk de optredende en weerstand biedende schuifspanning (-) |
| Δ | - | relatieve dichtheid (-) |
| $\mu(x_i)$ | - | verwachtingswaarde van de variabele x_i (variabel) |
| $\mu(Z)$ | - | verwachtingswaarde van de betrouwbaarheidsfunctie Z (variabel) |
| $\mu(R)$ | - | verwachtingswaarde van de sterktefunctie R (variabel) |
| $\mu(S)$ | - | verwachtingswaarde van de belastingfunctie S (variabel) |
| ρ | - | dichtheid van water (kg/m^3) |
| ρ_s | - | dichtheid van korrels (kg/m^3) |
| σ_τ | - | standaardafwijking van de momentane bodemschuifspanning (N) |
| σ_u | - | standaardafwijking van de instantane dieptegemiddelde longitudinale stroomsnelheid (m/s) |
| $\sigma_{u,b}$ | - | standaardafwijking van de instantane longitudinale stroomsnelheid nabij de bodem (m/s) |
| $\sigma(x_i)$ | - | standaardafwijking van de variabele x_i (variabel) |

- τ - schuifspanning (N/m^2)
- τ_c - kritieke bodemschuifspanning (N/m^2)
- Ψ - kritieke stabiliteitsparameter (-)
- Ψ^I - kritieke gemodificeerde stabiliteitsparameter (-)
- Ψ^{II} - kritieke gemodificeerde stabiliteitsparameter (-)

voor grootheden als coëfficiënten $c_1 \dots c_6$, $k_{3.10}$ etcetera zie Bijlage A en/of betreffende tekstdeel

I Inleiding

In het kader van de Samenwerkingsovereenkomst STEENSTABILITEIT tussen Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde (hierna aangeduid met DWW) en WL | DELFT HYDRAULICS (contract nr. DWW-1382) wordt de stabiliteit van steenachtig materiaal nabij constructies onderzocht via bureaustudies, experimenteel en numeriek onderzoek. Een belangrijke katalysator is daarbij de steeds toenemende simulatiekracht van rekenmodellen, die het stroombeeld thans al in redelijk nauwkeurige mate kunnen voorspellen. Deze voorspelkracht zal in de nabije toekomst verder toenemen. Daarbij is het wel nodig dat een geëigende stabiliteitsvoorspeller wordt ontwikkeld die een goede beschrijving geeft van de steenstabiliteit in termen van overschrijding van een belastingniveau(s), dan wel (bij voorkeur) in termen van overschrijding van een zekere steenverplaatsing.

Omdat stroomaanval (nog) niet in alle gevallen goed door rekenmodellen kan worden voorspeld, zijn schaalmodellen hiervoor soms nog onontbeerlijk.

De stabiliteitsvoorspeller zal dus, zo mogelijk, zowel aansluiting moeten vinden bij rekenmodellen als bij schaalmodellen.

Met name de rol van verhoogde turbulentie, zoals die benedenstrooms van constructies optreedt, zal in de stabiliteitsvoorspeller goed moeten worden ingebracht.

In het kader van de Samenwerkingsovereenkomst is een fasering in het onderzoek voorzien: relatief lage en hoge drempels (1998), onderstroomde constructies en uitlaten (1999), rivierwerken (2000), en scheepsgeluceerde waterbeweging (2001).

Binnen het dit jaar uitgewerkte projectplan 1998 met betrekking tot drempelconstructies (hoge en lage stuwdrempels, backward-facing steps, stroombrekers, overlaten) worden de volgende deelstudies onderscheiden:

| | |
|---------------------------|--|
| literatuurinventarisatie | (Q2395.10) |
| probabilistische analyse | (Q2395.20) |
| schematisatie turbulentie | (Q2395.30) |
| k-ε-berekeningen | (is reeds uitgevoerd in ander kader (Q2369, 1998)) |
| gidsproef | (Q2395.40) |
| evaluatie | (Q2395.50) |

Dit rapport heeft betrekking op de probabilistische analyse (deelproject Q2395.20): deze analyse zal de gevoeligheid aangeven van de diverse parameters die van belang bij het voorspellen van steenstabiliteit. Indien in later stadium alsnog overgegaan zou worden op een transportvoorspeller (waar de voorkeur voor bestaat) kan een analoge aanpak worden gevolgd; het overstappen op een transportvoorspeller is van belang in verband met het kwantitatief bepalen van de "toestand" van verdedigingen met het oog op eventueel benodigd onderhoud.

Als uitkomst van deze probabilistische analyse wordt beoogd beter inzicht te hebben in het belang van de diverse parameters bij de stabiliteitsvoorspellers.

Achtereenvolgens komen aan de orde: Aanpak en uitwerking van de studie (Hoofdstuk 2), selectie en uitschrijven van de stabiliteitsconcepten (Hoofdstuk 3), Berekeningsresultaten (Hoofdstuk 4) en Conclusies (Hoofdstuk 5). Referenties zijn in Hoofdstuk 6 gegeven.

Details ten aanzien van de voorspellers zijn in Bijlage A aangegeven. In Bijlage B zijn enkele voorbeelden van uitvoer van niveau II berekeningen met het AFDA rekenmodel opgenomen. Bijlage C bevat een gedetailleerde beschrijving van de berekeningsresultaten.

Binnen het Samenwerkingsverband werd voor dit deelproject de Dienst Weg- en Waterbouwkunde (DWW) van Rijkswaterstaat vertegenwoordigd door ir. P.K. Klok (projectleider) en dr.ir. G.J.C.M. Hoffmans (adviseur). Bij WL | DELFT HYDRAULICS is de studie uitgevoerd door ir. G.J. Akkerman (projectleider en rapportage), ir. H.J. Verheij (uitvoering en rapportage), ir. F. den Heijer (specialist probabilistiek) en prof. dr. ir. L.C. van Rijn (adviseur en kwaliteitsborging).

2 Aanpak en uitwerking

2.1 Stabiliteitsvoorspellers en transportvoorspellers

Hoofddoel van het samenwerkingsproject STEENSTABILITEIT is te komen tot een stabiliteitsvoorspeller die kan worden gekoppeld aan stroombeeldkenmerken, inclusief turbulentie. In de Inventarisatiestudie (deelproject Q2395.10) zijn daartoe stabiliteitsconcepten uitgewerkt, welke in het onderhavige deelproject Q2395.20 worden onderzocht op de gevoeligheid van het eindantwoord voor de bijdrage van en onzekerheden in de afzonderlijke parameters. Hierbij wordt gebruik gemaakt van probabilistische technieken waarmee de overschrijdingkans van een stabiliteitscriterium kan worden berekend en ook de procentuele bijdragen aan die faalkans van de afzonderlijke parameters. Dit maakt het mogelijk een volgorde op te stellen van de variabelen naar hun relatieve invloed op de benodigde steenafmetingen. Bij verdere uitwerking van stabiliteitsvoorspellers kan dan aandacht worden geschonken aan het verkleinen van de onzekerheid van die variabelen met de grootste invloed en vervolgens met kleinere invloed (prioritering).

Op de lange termijn is het wenselijk dat een erosieve transportmodellering kan worden ingezet in plaats van een stabiliteitsmodellering, zodat dan de werkelijke faalkans (de kans op functieverlies van de bodemverdediging) kan worden vastgesteld. Daartoe is het nodig dat een stochastische transportvoorspeller wordt ontwikkeld die met name geschikt is voor bodem- en oeververdedigingen, dat wil zeggen voor zeer lage transportniveau's. Het ontwikkelen van zo'n voorspeller ligt nog buiten de huidige scope van de studie, maar het is denkbaar dat dit onderzoekspunt in latere instantie, bijvoorbeeld door herallocatie van budgetten dan wel in de latere programmering alsnog wordt ingebracht. Bij voorkeur zou het transportconcept ook een fractiemodellering moeten kunnen bevatten, waarbij de kans op transport van de afzonderlijke fracties (bij gegradeerde korrelsamenstellingen) kan worden vastgesteld. De vergroving of de verfijning van korrelsamenstellingen kan dan worden voorspeld. Ten aanzien van een probabilistische analyse van dergelijke transportvoorspellers kan te zijner tijd een vergelijkbare aanpak als hier voor de stabiliteitsvoorspellers is gepresenteerd, worden gevolgd.

2.2 Aanpak en uitwerking probabilistische analyse

Probabilistisch ontwerpen

Bodem- en oeververdedigingen dienen om waterwegen te beschermen tegen ongewenste erosie, bijvoorbeeld als gevolg van stromingen, dan wel om waterwegen te beïnvloeden/corrigeren. Bij rivieren spreekt men dan van "river training works". Verder kunnen steenconstructies worden toegepast als bodemverdediging bij waterbouwkundige

werken. De stortsteenconstructies kunnen dus onderdeel zijn van andersoortige waterbouwkundige werken (stuwen, sluisen, brugpijlers, stormvloedkeringen), maar kunnen ook zelfstandige constructies zijn (afsluitdammen, kribben, geleidedammen, bodem- en oeverfixaties). Met betrekking tot de te stellen veiligheidseisen kan het een groot verschil maken of het om zelfstandige dan wel om deelconstructies gaat. Bij deelconstructies zal de totale veiligheid van de hoofdconstructie moeten worden gewaarborgd.

In de voorliggende studie worden alleen die steenconstructies beschouwd die zijn blootgesteld aan stroomaanval.

Stortsteenconstructies in de vorm van bodemverdedigingen worden ook met “vaste laag” aangeduid, bestaande uit een breukstenen toplaag en één of meerdere filterlagen eronder. De primaire functie is het in stand houden van de onderliggende bodem. Daartoe dient de filteropbouw goed te zijn ontworpen en dienen de betreffende lagen dusdanig stabiel te blijven

dat de beschermende functie gehandhaafd blijft. Een losgestorte toplaag zal doorgaans een laagdikte hebben van circa 2 maal de (gemiddelde) steendiameter. Functieverlies zal nog (juist) niet plaats hebben wanneer 1 laag stenen is verdwenen uit de toplaag. Bij 2 lagen stenen is er sprake van blootkomen van filtermateriaal, welke vervolgens kan wegspoelen, etcetera (progressieve erosie).

Traditioneel wordt de toplaag vaak ontworpen op nauwelijks of geen steenverplaatsing voor de ‘maatgevende’ conditie(s). Bij de *deterministische* benadering wordt de maatgevende conditie geschat (ontwerpconditie) en wordt vervolgens de minimaal benodigde steenafmeting bepaald aan de hand van een geëigende stabiliteitsrelatie. In deze laatste wordt doorgaans een laag stabiliteitscriterium ($\Psi = 0.03$ bijvoorbeeld, tegenover de Shieldswaarde $\Psi_c = 0.06$) genomen en worden de karakteristieke waarden van de maatgevende parameters toegepast; de spreiding in de parameters is impliciet meegenomen, en geldt feitelijk alleen voor uniforme stroming. De invloed van excessieve spreiding, zoals bijvoorbeeld in de stroomsnelheid als gevolg van zware turbulentie benedenstrooms van constructies, wordt dan verdisconteerd in een “ervaringsfactor” (vaak aangeduid met k-factor) welke op de stroomsnelheid wordt gezet. Dergelijke ervaringsfactoren kunnen worden bepaald met experimenten. Het is te verwachten dat de experimenten in de toekomst vervangen kunnen worden door rekenmodellen.

Bij de *probabilistische benadering* wordt het ontwerp gebaseerd op de gesommeerde bijdrage van alle mogelijke voorkomende belastingen en de kans op schade dan wel de kans op het overschrijden van een zeker verplaatsingscriterium. Hierbij wordt ook rekening gehouden met spreidingen in de sterkte (steenafmetingen, steenvorm, imbricatie (= voorkeursrichting stenen) en dergelijke). Onderscheiden kunnen worden: *lange termijn* veranderingen (bijvoorbeeld combinaties van snelheid u en waterdiepte h tijdens hoogwaters) en *korte termijn* veranderingen (bijvoorbeeld fluctuaties in snelheden als gevolg van turbulentie, translatiegolven etcetera). Deze laatste kunnen als onzekerheid (spreiding) in de parameters worden meegenomen.

Een schadeverwachting zou bij voorkeur gebaseerd moeten zijn op het verminderen van de effectieve laagdikte van de toplaag. Bij het verdwijnen van 1 laag stenen uit de toplaag kan dan gesproken worden van een faalkans van 1.0. Tot dusverre is de vertaling van een zeker stabiliteitscriterium naar een dergelijke schade nog niet goed mogelijk als in detail naar het

feitelijke falen wordt gekeken. Er kunnen hiervoor weliswaar schattingen worden gemaakt (bijvoorbeeld Leeuwenstein, 1996), maar deze zijn vooralsnog als (te) schematisch te beschouwen. Beter zou het zijn om via transportgradiënten, die in rekenmodellen kunnen worden berekend, het erosief transport te berekenen voor alle mogelijke voorkomende belastingen (transportbenadering in plaats van stabiliteitsbenadering).

In de onderhavige studie gaat het om de invloed van verschillende parameters, zowel qua gemiddelde grootte als qua spreiding, op de stabiliteit. Voor de onderhavige studie is de koppeling van een stabiliteitscriterium aan de schadeverwachting (al dan niet via transportgradiënten) te prematuur. Het gevoeligheidsonderzoek wordt dan ook gedaan met formules waarin aan een stabiliteitscriterium (Ψ) is gerelateerd.

Probabilistisch gereedschap

Het vaststellen van het gereedschap dat geschikt is om tot een handzame prioriteitenvolgorde te komen begint bij de wijze waarop de eis aan het vervullen van de functie wordt gesteld. Wanneer deze is aangegeven in termen van toelaatbare kansen op functieverlies zal de wijze waarop de prioriteitenvolgorde wordt afgeleid hierbij moeten aansluiten. Er kan dan bijvoorbeeld worden aangegeven hoe zwaar een component bijdraagt aan de gerealiseerde kans.

Internationaal wordt gebruik gemaakt van een niveau-indeling van probabilistische methoden. Niveau III betreft de exacte probabilistische rekenwijzen. Niveau II betreft een aantal benaderende methoden. Niveau I betreft eenvoudige ontwerpmethoden, met (partiële) veiligheidscoëfficiënten, die soms gecalibreerd worden aan berekeningen op hogere niveau's. De voornoemde eis om tot een prioriteitenvolgorde te komen vergt tenminste een niveau II benadering. Hier wordt hierna verder op ingegaan.

Bij een probabilistische analyse kan van een gegeven constructie de kans op functieverlies worden aangegeven als:

$$P(Z < 0) \quad \text{met} \quad Z = R - S$$

met

| | | |
|------------|---|--|
| $P(Z < 0)$ | = | kans dat betrouwbaarheidsfunctie $Z < 0$ |
| Z | = | betrouwbaarheidsfunctie |
| R | = | sterktefunctie |
| S | = | belastingfunctie |

Aan de variabelen x_i in de sterkte en belastingfunctie wordt een verwachtingswaarde $\mu(x_i)$ en standaardafwijking $\sigma(x_i)$ opgegeven. Van de betrouwbaarheidsfunctie wordt vervolgens de gemiddelde waarde $\mu(Z)$ en standaardafwijking $\sigma(Z)$ berekend volgens:

$$\mu(Z) = \mu(R) - \mu(S)$$

$$\sigma(Z) = \left\{ \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Z}{\partial x_i} \sigma(x_i) \right)^2 \right\}^{0.5}$$

waarbij de variabelen x_i onafhankelijk zijn verondersteld.

Aansluitend kan de betrouwbaarheidsindex β worden bepaald:

$$\beta(Z) = \frac{\mu(Z)}{\sigma(Z)}$$

waarna $P(Z < 0)$ is vast te stellen. Deze kans is op te vatten als de kans op bereiken van het stabiliteitscriterium (vaak ten onrechte met faalkans aangeduid; dit is alleen het geval als de constructie ook daadwerkelijk zou kunnen falen bij dat criterium).

Het doorwerken van de spreiding $\sigma(x_i)$ van de afzonderlijke parameters is vrij complex omdat in $\sigma(Z)$ ook $\partial Z / \partial x_i$ voor komt. Hierdoor kan de gevoeligheid van spreiding in afzonderlijke grootheden afwijken van wat op het eerste gezicht lijkt te kunnen worden verwacht.

Enkele methoden op het probabilistische niveau II lenen zich goed voor het hier gegeven vraagstuk: het bepalen van de volgorde van welke variabelen het meest bijdragen aan het eindantwoord. Deze relatieve bijdrage is naast een benadering van de kans op functieverlies, een belangrijk resultaat dat inzicht biedt in relevante en minder relevante variabelen.

In de onderhavige analyse is gekozen voor een niveau II berekening met het bij de Bouwdienst van Rijkswaterstaat in gebruik zijnde pakket AFDA (BD AFDA versie 5.02). Bij de AFDA methodiek vindt linearisatie plaats rondom het ontwerp punt, is het mogelijk ook andere verdelingen dan alleen Gauss-verdelingen te gebruiken, en wordt direct het gewenste resultaat verkregen wat betreft de relatieve bijdragen van de verschillende onzekerheden. Een Monte Carlo methode (niveau III) is een mogelijk alternatief, maar hiervoor is niet gekozen: deze methode vereist namelijk het maken van een groot aantal berekeningen, waarna de interpretatie veelal lastig blijkt; de opzet en het maken van de berekeningen is doorgaans wel relatief eenvoudiger.

Onzekerheden

Stabiliteits- en transportrelaties voor verdedigingsconstructies geven het verband aan tussen de belasting op en de sterkte van de constructie. Hierin zijn als fysische invloeden te onderscheiden:

belasting (stroomsnelheid en turbulentie nabij de verdedigingsconstructie)

sterkte (soortelijke massa, steendiameter en -vorm, imbricatie, vlakheid)

De belasting kan naar tijd en plaats variëren terwijl de sterkte van plaats tot plaats varieert (effecten als slijtage en/of vergruizing in de tijd kunnen doorgaans worden verwaarloosd).

Behalve onzekerheden in belasting en sterkte is er ook onzekerheid in de stabiliteits- en transportmodellering. De stabiliteits- en transportrelaties zijn vaak afgeleid van een denkmodel (dat voor bepaalde situaties geldig wordt geacht) en experimenten (onder geconditioneerde omstandigheden) en natuurmetingen (vaak zeer beperkt, vanwege meetproblematiek van steenstabiliteit). In een bepaalde situatie in de werkelijkheid is men dus

niet geheel zeker of de relatie geldig is en hoe de daar aan te treffen omstandigheden zich verhouden tot de geschematiseerde werkelijkheid die aan de relaties ten grondslag ligt.

Resumerend zijn er drie groepen onzekere parameters:

1. belastingparameters;
2. sterkteparameters;
3. modelparameters.

Wat betreft de belasting- en sterkteparameters kan onderscheid worden gemaakt naar de volgende typen onzekerheid:

- natuuronzekerheid, te onderscheiden naar onzekerheid in tijd en ruimte (hierna aan te geven met N-onzekerheid);
- statistische onzekerheid, te onderscheiden naar parameteronzekerheid en naar onzekerheid over het verdelingstype (hierna aan te geven met S-onzekerheid).

De eerder genoemde onzekerheid in de modelparameters (hierna aan te geven met M-onzekerheid) is ook nader onder te verdelen:

- onzekerheid in het modelleringsconcept;
- onzekerheid in de opzet van experimenten die ten grondslag liggen aan het modelleringsconcept;
- onzekerheid door meetfouten bij experimenten en natuurmetingen.

Het is van belang dat, alvorens te beginnen met rekenen, per variabele wordt vastgesteld van welk type onzekerheid sprake is.

Achtereenvolgende stappen

Zoals eerder gesteld hebben de probabilistische berekeningen in deze studie tot doel een volgorde te bepalen wat betreft de procentuele bijdrage van afzonderlijke variabelen aan de grootte en de onnauwkeurigheid van het eindantwoord en de kans op functieverlies. De volgorde kan worden gebruikt om vervolgonderzoek te richten op die parameters waar de grootste winst te behalen valt als het gaat om het verkleinen van de kans op functieverlies.

Om dit te kunnen bepalen zijn de volgende stappen uitgevoerd.

1. De geselecteerde stabiliteitsvoorspellers zijn ontrafeld tot variabelen op het laagste niveau teneinde inzicht te krijgen in alle onzekerheden. De voorspellers bevatten veelal namelijk "verborgen" variabelen, zoals "constante" coëfficiënten. Ook getallen dienen te worden beschouwd als variabelen met een mogelijke onzekerheid.
2. Van alle variabelen is vastgesteld wat het type onzekerheid is (N-, S- of M-onzekerheid), en wat naar verwachting het verdelingstype is. Overigens is in de voorliggende studie de M-onzekerheid niet meegenomen omdat dit voor de gevoeligheidsanalyse van minder belang is.
3. Vervolgens heeft clustering plaats gevonden, dat wil zeggen: bij elkaar horende groepen parameters zijn gecombineerd tot steeds één nieuwe parameter. In de Chézy-parameter worden bijvoorbeeld samengenomen: waterdiepte h , bodemruwheid k_s en Von Karman factor κ .
4. Daarna zijn voor alle gecombineerde parameters waarden geschat voor de van toepassing zijnde verdelingsfunctie (bij normale verdeling: gemiddelde en standaardafwijking). Hierbij wordt uitgegaan van een vooraf gekozen door te rekenen case.
5. De berekeningen vonden plaats van grof naar fijn, dat wil zeggen: er is een eerste benaderende formule met weinig variabelen doorgerkend, daarna een tweede

stabiliteitsbenadering waarbij één of meer variabelen nader zijn uitgewerkt, en tenslotte in sommige gevallen een derde stabiliteitsbenadering met nog meer variabelen. Alleen als een bepaalde variabele relevant bleek is een hogere benadering van belang. Hier is steeds uitgegaan van de hoofdformule (2e benadering) die omwille van de overzichtelijkheid werd vereenvoudigd (1e benadering); eventueel werd een verfijning van de hoofdformule toegepast (3e benadering).

6. Voor iedere 1e benadering, 2e benadering en eventueel 3e benadering van een stabiliteitsvoorspeller zijn diverse berekeningen gemaakt met het AFDA pakket. Gestart is met zo goed mogelijk gekozen waarden voor de variabelen in een bepaalde situatie, zie Hoofdstuk 4, waarna de gevoeligheid wordt onderzocht voor relevante variabelen door de standaardafwijking (en soms ook de gemiddelde waarde) van die variabele te wijzigen. Het aantal berekeningen is hierbij beperkt gehouden omdat al gauw het overzicht over de uitkomsten verloren gaat. De indeling in 1e, 2e en 3e stabiliteitsbenadering komt de overzichtelijkheid ten goede, zodat het aantal berekeningen groter kon zijn dan wanneer uitsluitend de stabiliteitsbenadering zonder gecombineerde parameters zou zijn toegepast.

De rekenresultaten zijn tenslotte per geïdentificeerde stabiliteitsvoorspeller bijeengebracht in tabellen. De punten 1 t/m 3 zijn uitgewerkt in het volgende hoofdstuk en in Bijlage A. Stappen 4 tot en met 7 worden in Hoofdstuk 4 besproken.

3 Selectie en uitschrijven stabiliteitsvoorspellers

In de inventarisatiestudie Q2395.10 zijn diverse voorspellers geïdentificeerd en zijn er vier voor verder onderzoek geselecteerd. Deze zijn (het formulenummer is conform aan dat in de inventarisatiestudie):

- Van de voorspellers gerelateerd aan de verticaal gemiddelde stroomsnelheid:

$$\text{formule 3.10} \quad \frac{0.7 \left(c_s + 1.45 \frac{g}{C^2} \right) u^2}{g \Delta D} = \psi$$

$$\text{formule 3.13} \quad \frac{(1 + r_r \gamma) u^2}{C^2 \Delta D (1 - r_r \gamma)} = \psi^1$$

- Van de voorspellers gerelateerd aan de lokale stroomsnelheid nabij de bodem:

$$\text{formule 3.20} \quad \frac{\left(\frac{1 + \alpha_e r_{u,b}}{1.45} \right)^2 u_b^2}{c_b^2 \Delta D} = \psi$$

$$\text{formule 3.21} \quad \frac{\left(1 + \frac{\alpha_e}{3} r_r \gamma \right) u_b^2}{c_b^2 \Delta D \left(1 - \frac{\alpha_{er}}{3} r_r \gamma \right)} = \psi^{11}$$

Voor het uitvoeren van de berekeningen is het handig de formules te splitsen in een belastingdeel S en een sterkte deel R . Immers, de kans wordt berekend dat de betrouwbaarheidsfunctie Z kleiner dan nul is (= overschrijding stabiliteitscriterium). In formulevorm kan worden geschreven met meeneming van modelonzekerheid m_R in de sterkte R en m_S in de belasting S :

$$P(Z < 0) \quad \text{met} \quad Z = m_R R - m_S S$$

Voor de gevoeligheidsanalyse in deze studie is het meenemen van de modelonzekerheden van minder belang, omdat het hier gaat om doorwerking van onzekerheden in de stabiliteitsparameters waarin deels ook de modelonzekerheid is verwerkt. Daarom zijn m_R en m_S gelijkgesteld aan 1.0. Bij stabiliteitsvoorspellingen is dit vanzelfsprekend wel van belang (dit punt zal tijdens de evaluatie Q2395.50) dus wel in beschouwing worden genomen).

Overigens is bij de gevoeligheidsanalyse niet vereist dat alle variabelen uitsluitend in het R-deel dan wel het S-deel mochten voorkomen; zodoende kan bijvoorbeeld de kenmerkende steendiameter D in zowel het R-deel als in het S-deel voorkomen.

Na de uiteenrafeling heeft clustering plaats gevonden, wat leidt tot: 1e benadering, 2e benadering, en (eventueel) 3e benadering.

Bij alle formules is de eerste benadering er een met een "overall" turbulentiefactor, die in de 2e benadering verder is uitgewerkt; daarmee wordt in de 2e benadering de hoofdformule verkregen. De eventuele 3e benadering is daar weer een verfijning van.

De 1e, 2e en eventueel 3e benadering van de voorgaande hoofdformules, voor zover daarmee is gerekend, zijn hierna weergegeven (voor details en verklaring coëfficiënten zie Bijlage A).

- hoofdformule 3.10
$$\frac{0.7 \left(c_s + 1.45 \frac{g}{C^2} \right) u^2}{g \Delta D} = \psi$$

- 1e benadering
$$\frac{0.7 r_u^2 u^2}{g \{ (\rho_s - \rho) / \rho \} D} = \psi$$

- 2e benadering
$$\frac{0.7 \left(c_s + 1.45 \frac{g}{C^2} \right) u^2}{g \{ (\rho_s - \rho) / \rho \} D} = \psi$$

- 3e benadering
$$\frac{0.7 \left(c_s + 1.45 \frac{g}{C^2} \right) u^2}{g \{ (\rho_s - \rho) / \rho \} D} = \psi$$

- met
$$c_s = \frac{0.0225}{\left(1 - \frac{D_{sill}}{h} \right)^2} \left(\frac{L_b - 6D_{sill}}{6.67 h} + 1 \right)^{-1.08}$$

- en
$$C = c_3 \log \left(\frac{c_4 h}{c_5 D} \right)$$

- hoofdformule 3.13
$$\frac{(1 + r_r \gamma) u^2}{C^2 \Delta D (1 - r_r \gamma)} = \psi^1$$

- 1e benadering
$$\frac{k_{3.13} u^2}{C^2 \{ (\rho_s - \rho) / \rho \} D} = \psi^1$$

- 2e benadering
$$\frac{(1 + r_r \gamma) u^2}{C^2 \{ (\rho_s - \rho) / \rho \} D (1 - r_r \gamma)} = \psi^1$$

- hoofdfomule 3.20
$$\frac{\left(\frac{1 + \alpha_e r_{u,b}}{1.45}\right)^2 u_b^2}{c_b^2 \Delta D} = \psi$$

1e benadering
$$\frac{k_{3,20}^2 u_b^2}{c_b^2 \{(\rho_s - \rho) / \rho\} D} = \psi$$

2e benadering
$$\frac{\left(\frac{1 + \alpha_e r_{u,b}}{1.45}\right)^2 u_b^2}{c_b^2 \{(\rho_s - \rho) / \rho\} D} = \psi$$

- hoofdfomule 3.21
$$\frac{\left(1 + \frac{\alpha_e}{3} r_r \gamma\right) u_b^2}{c_b^2 \Delta D \left(1 - \frac{\alpha_{er}}{3} r_{rr} \gamma\right)} = \psi^{11}$$

1e benadering
$$\frac{k_{3,21}^2 u_b^2}{c_b^2 \{(\rho_s - \rho) / \rho\} D} = \psi^{11}$$

2e benadering
$$\frac{\left(1 + \frac{\alpha_e}{3} r_r \gamma\right) u_b^2}{c_b^2 \{(\rho_s - \rho) / \rho\} D \left(1 - \frac{\alpha_{er}}{3} r_{rr} \gamma\right)} = \psi^{11}$$

In Tabel 3.1 is een overzicht gepresenteerd van het type onzekerheid van alle relevante parameters. Daarbij is ook aangegeven voor een aantal variabelen of die onzekerheid al dan niet wordt meegenomen. Het gaat hier veelal om type N variabelen, waarbij niets aan de onzekerheid kan worden gedaan.

In Tabel 3.2 zijn aan alle variabelen geschatte waarden toegekend verband houdende met de verdelingsfunctie van de variabelen. In het onderhavige geval is voor alle variabelen gekozen voor een normale verdeling, met bijbehorende gemiddelde en standaardafwijking.

De gekozen waarden houden verband met de later in Hoofdstuk 4 nader aangegeven case.

Alternatieve formule

De formules 3.20 en 3.21 hebben beide het nadeel dat zij niet bruikbaar zijn in het reattachement point waar geldt $u_b = 0$. Om dit probleem te ondervangen zou in plaats van bovenstaande formules ook kunnen worden uitgegaan van een formulering met de schuifspanning τ en de bijbehorende standaardafwijking σ_τ . Een meer algemene formulering van de stabiliteitsrelatie kan worden geschreven als:

$$\frac{\tau(1+r_\tau\gamma)}{\rho g \Delta D(1-r_\tau\gamma)} = \psi^1 \quad \text{ofwel} \quad \frac{\tau + \sigma_\tau \gamma}{\rho g \Delta D(1-r_\tau\gamma)} = \psi^1$$

Zowel de gemiddelde schuifspanning τ als de bijbehorende standaardafwijking σ_τ kunnen worden geschreven als functie van de turbulente energie aan de bodem $k_{0,b}$:

$$\tau = \rho u_*^2 = \rho \sqrt{c_\mu} k_{0,b}$$

$$\sigma_\tau = \rho r_\tau \sqrt{c_\mu} k_{0,b}$$

waarbij $c_\mu = k\text{-}\epsilon\text{-constante}$ (= 0.09 voor uniforme stroming).

De parameter r_τ is een constante voor een bepaalde turbulentieverdeling (uniforme stroming: $r_\tau = 0.4$).

Opgemerkt wordt dat de standaardafwijking σ_τ eigenlijk bestaat uit een geometrische term samenhangend met de bovenstrooms aanwezige constructie en een bronterm (zie Hoffmans, 1992).

De turbulente energie aan de bodem $k_{0,b}$ volgt uit stromingsberekeningen met een turbulentiemodel of uit metingen in een schaalmodel en is gedefinieerd als:

$$k_{0,b} = \frac{1}{2} (\sigma_{u,b}^2 + \sigma_{v,b}^2 + \sigma_{w,b}^2) = \eta \sigma_{u,b}^2$$

met $\eta = \text{constante}$ (uniforme stroming: $\eta = 0.9$).

Bij een $k\text{-}\epsilon$ rekenmodel gaat dit overigens niet zonder meer goed omdat $k_{0,b}$ uit u_* wordt afgeleid en derhalve nul is in het reattachment point. Hieraan zal bij de deelstudie "Schematisatie turbulentie" (Q2395.30) aandacht worden besteed.

Substitutie van de formules voor τ en σ_τ resulteert in de volgende stabiliteitsrelatie:

$$\frac{\sqrt{c_\mu} k_{0,b} (1+r_\tau\gamma)}{g \Delta D (1-r_\tau\gamma)} = \psi^1$$

Door Hoffmans (1997) is eerder de volgende formule gepresenteerd:

$$\frac{\sqrt{c_\mu} k_{0,b}}{g \Delta D} = \psi^1$$

Feitelijk gaat het om dezelfde formule, maar dan exclusief het door middel van γ geïmplementeerde concept van Grass.

Tenslotte wordt opgemerkt dat bovenstaande formule niet meer kon worden meegenomen bij de probabilistische analyse, omdat deze in later stadium werd 'ingebracht' als interessante formule.

| Tabel 3.1 Overzicht variabelen | | type onzekerheid | | Statistische onzekerheid | | verdelingstype onzekerhd | | Modelonzekerheid | | onzekerheid door meetfouten | | formule | | 3.10 | | 3.13 | | 3.20 | | 3.21 | |
|--|------------------------------|-------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|-----------------------------|---------|---------|------|------|------|------|--|------|--|------|--|
| variabele | omschrijving | Natuuronzekerheid | in de ruimte | in de tijd | in de ruimte | parameter onzekerhd. | verdelingstype onzekerhd | Modelonzekerheid | onzekerheid door proeven | onzekerheid door meetfouten | formule | 3.10 | 3.13 | 3.20 | 3.21 | | | | | | |
| M_{50} | karakt. steenmassa | - | X | - | X | X | X | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| ρ_s | dichtheid steen | -* | -* | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| ρ | dichtheid water | -* | -* | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| g | versnelling zwaartekracht | - | - | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| h | watervloei diepte | X | - | - | X | X | X | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| u | stroomsnelheid | X | - | - | X | X | X | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| ψ | Shields-parameter | - | - | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | | | | | | |
| c_{t1} | turb. coefficient | -* | -* | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| η | turb. coefficient | -* | -* | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| ζ | turb. coefficient | -* | -* | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| γ_u | turb. coefficient | -* | -* | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| D_{s10} | hoogte drempel | - | X | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| L_b | lengte bodembescherming | - | X | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| ν | kin. viscositeit | -* | - | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| k | von Karman coefficient | - | - | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| e | grondiaal nat.log | - | - | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| c_g | coefficient | - | X | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| c_g | coefficient | - | - | - | X | X | X | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| α_c | scheefheidspar. belasting | -* | -* | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| $t_{u,b}$ | turbulentie bij bodem | X | X | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | | | | | | |
| ψ^1 | Shields par. in formule 3.13 | - | - | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | | | | | | |
| ψ^{11} | Shields par. in formule 3.21 | - | - | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | | | | | | |
| γ | mate van erosie | - | - | - | X | X | - | - | - | - | X | X | X | X | - | | | | | | |
| r_r | var. coeff. sterkte | X | X | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | | | | | | |
| r_t | var. coeff. belasting | X | X | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | | | | | | |
| u_b | stroomsnelheid nabij bodem | X | X | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | | | | | | |
| c_p | par. bij bodemvoorspellers | - | - | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | | | | | | |
| e_{r1} | scheefheidspar. sterkte | -* | -* | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | | | | | | |
| e_{r2} | scheefheidspar. sterkte | -* | -* | - | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | - | | | | | | |
| betekenis symbolen: | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| X = bij de variabele is sprake van deze onzekerheid | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| - = bij de variabele is geen sprake van deze onzekerheid | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| -* = de variabele heeft deze onzekerheid wel, maar die wordt niet meegenomen | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabel 3.1 Overzicht variabelen

| Tabel 3.2 Parameterwaarden algemeen | | | | | | |
|-------------------------------------|------------------------------|--------------------|------|------------------------------|----------------------|-----------|
| parameter | omschrijving | eenheid | type | verdelings- onzek.hd type | gemidd. | stand.afw |
| D ₅₀ | karakt.steendiameter | m | NS | norm. | 0.345 | 0.015 |
| ρ _s | dichtheid steen | kg/m ³ | S | norm. | 2650 | 100 |
| ρ | dichtheid water | kg/m ³ | S | norm. | 1000 | 0 |
| g | versnelling zwaartekracht | m/s ² | S | norm. | 9.81 | 0 |
| h | waterdiepte | m | NS | norm. | 5 | 0 |
| u | stroomsnelheid | m | NSM | norm. | 2.5 | 0.1 |
| ψ | Shields-parameter | - | SM | norm. | 0.04 | 0.005 |
| c _u | turb.coefficient | - | S | norm. | 0.09 | 0 |
| η | turb.coefficient | - | S | norm. | 0.9 | 0 |
| ζ | turb.coefficient | - | S | norm. | 1.6 | 0 |
| γ _u | turb.coefficient | - | S | norm. | 1.92 | 0 |
| D _{sill} | hoogte drempel | m | NS | norm. | 2.5 | 0.1 |
| L _b | lengte bodembescherming | m | NS | norm. | 25 | 0 |
| ν | kin.viscositeit | m ² /s | S | norm. | 1.1*10 ⁻⁶ | 0 |
| κ | von Karman coefficient | - | S | norm. | 0.4 | 0 |
| e | grondtal nat.log | - | S | norm. | 2.72 | 0 |
| c ₅ | coefficient | - | NS | norm. | 2.5 | 0.5 |
| c _{6ref} | coefficient | - | S | norm. | 1.45 | 0 |
| α _e | scheefheidspar.belasting | - | S | norm. | 5 | 1 |
| r _{u,b} | turbulentie bij bodem | - | NS | norm. | 0.55 | 0.1 |
| ψ ¹ | Shields par. in formule 3.13 | - | SM | norm. | 0.062 | 0.005 |
| ψ ¹¹ | Shields par. in formule 3.21 | - | SM | norm. | 0.062 | 0.005 |
| γ | mate van erosie | - | SM | norm. | 0.625 | 0.2 |
| r _{tr} | var.coeff. sterkte | - | NS | norm. | 0.3 | 0.1 |
| r _t | var.coeff.belasting | - | NS | norm. | 12.5/7.5 | 1 |
| u _b | stroomsnelheid nabij bodem | m/s | S | norm. | 2.1 | 0.1 |
| c _b | par. bij bodemvoorspellers | - | S | norm. | 28 | 3 |
| e _{er} | scheefheidspar.sterkte | - | S | norm. | 3 | 1 |
| C | Chezy-coefficient | m/s ^{0.5} | S | norm. | 33 | 3 |
| k ₃₁₃ | coefficient in formule 3.13 | - | S | norm. | 10.8 | 0.5 |
| k ₃₂₀ | coefficient in formule 3.20 | - | S | norm. | 2.85 | 0.5 |
| k ₃₂₁ | coefficient in formule 3.21 | - | S | norm. | 10.8 | 1 |

Tabel 3.2 Parameterwaarden algemeen

4 Berekeningsresultaten

4.1 Definitie case

Gekozen is voor een case waarbij sprake is van sterk niet-uniforme stroming en waarvoor gegevens bestonden van belasting en sterkte (Akkerman et al., 1985), zie bijgaande Figuur 4.1. Deze case bestaat uit een drempelconstructie die een waterloop, in verticale zin, voor de helft vernauwt ten opzichte van de benedenwaterstand. Het benedenstrooms talud van de drempel is daarbij dusdanig steil dat de stroming loslaat; de mate van steilheid doet er dan niet erg toe, de drempel kan zelfs een verticale beëindiging hebben. Als afmetingen werden gekozen: waterdiepte van 5 m en drempelhoogte van 2,5 m. Benedenstrooms van de drempel is een bodembescherming aanwezig over een lengte van 25 m. De stroomsnelheid bedraagt 2,5 m/s. De case heeft betrekking op de stabiliteit van de elementen van de bestorting 40-200 kg ($D_n = 0.345$ m) benedenstrooms van de bodembescherming. Dit is de meest dichtbij gelegen sortering bij de uit de experimenten bepaalde kritieke steenaafmeting. Uit andere literatuur (Akkerman, 1981) blijkt dan dat de zone van zwaarste aanval zich op circa 10 maal de drempelhoogte benedenstrooms van de drempel bevindt. In de navolgende Figuur 4.2 is de situatie schetsmatig weergegeven.

Om het inzicht te vergroten zijn enkele varianten doorgerkend. Het gaat dan om varianten waarbij bovenstaande (gemiddelde) waarden zijn veranderd, bijvoorbeeld een drempelhoogte van slechts 2,5 m bij een waterdiepte van 10 m.

4.2 Overzicht berekeningen

Per formule zijn berekeningen uitgevoerd. De invoergegevens staan per formule vermeld in de Tabellen 4.1 t/m 4.4. In Bijlage B zijn voorbeelden van uitvoer gepresenteerd, terwijl een gedetailleerde beschrijving van elke afzonderlijke berekening is gegeven in Bijlage C.

Ten aanzien van de fasering van de berekeningen worden enige opmerkingen gemaakt. In zijn algemeenheid moesten variabelen bij voorkeur als continue functies worden gedefinieerd. Verder zijn standaardafwijkingen ontleend aan ervaringsgegevens (D_{n50} , ρ_s), meetresultaten, (turbulentie), of op nul gezet (g).

Vervolgens zijn de eerste berekeningen uitgevoerd met de 1e benadering, daarbij is de standaardafwijking van een of meerdere variabelen gevarieerd.

Daarna zijn berekeningen gemaakt met de 2e en eventueel de 3e benadering (zie ook Hoofdstuk 3).

Per formule worden de resultaten in het navolgende besproken. Iedere berekening heeft een eenduidige code meegekregen bijvoorbeeld:

S310-001

S310

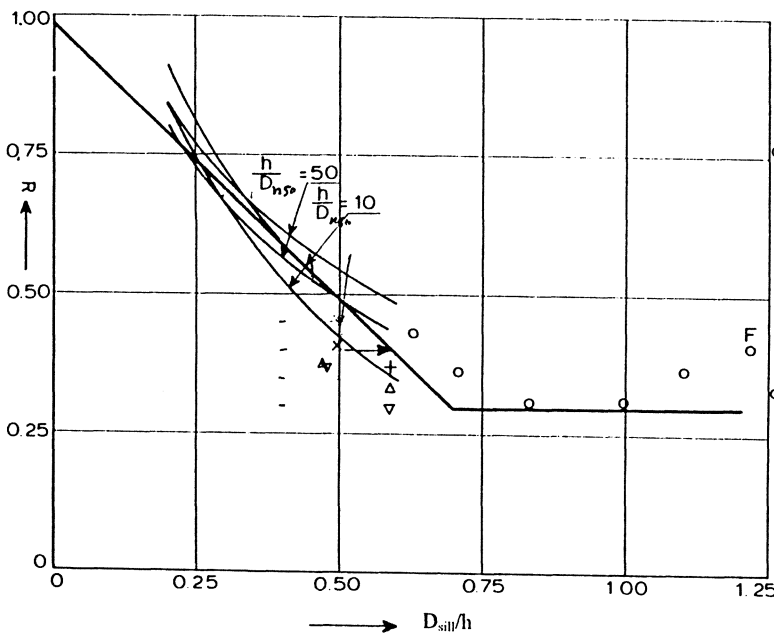
code voor type voorspeller
 S = stabiliteitsvoorspeller
 T = transportvoorspeller (bv eventuele toekomstige berekeningen)
 310 = betreffende formulenummer

0

code voor type benadering
 0 = 1c benadering
 1 = 2c benadering
 2 = 3c benadering

01..99 rangnummer

01...49 = variëren in standaardafwijkingen
 50...99 = variëren in gemiddelde waarden



$$\frac{u}{\sqrt{\Delta g D_{nsc}}} = R 1.15 \log \left(\frac{5h}{D_{nsc}} \right) \quad (\psi = 0.04)$$

u and h refer to downstream, undisturbed, conditions
 ——— proposed curve for rough design

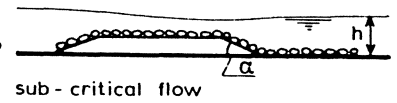
D_{sill} = height of sill

D_{nsp} = characteristic riprap diameter

M 711 - IV

— $tg \alpha = 0.50$

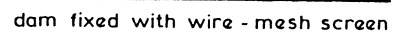
- - $tg \alpha = 0.125$



M 1741 - IV

o

F = failure



M 1329 (WLB - 67)

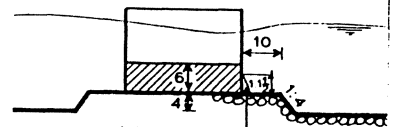
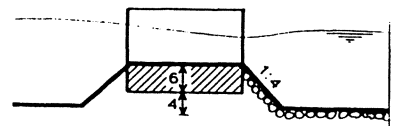
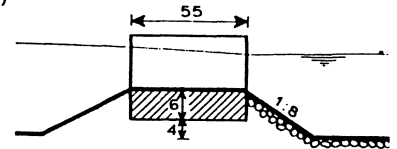
sill - type

x 1

+ 2

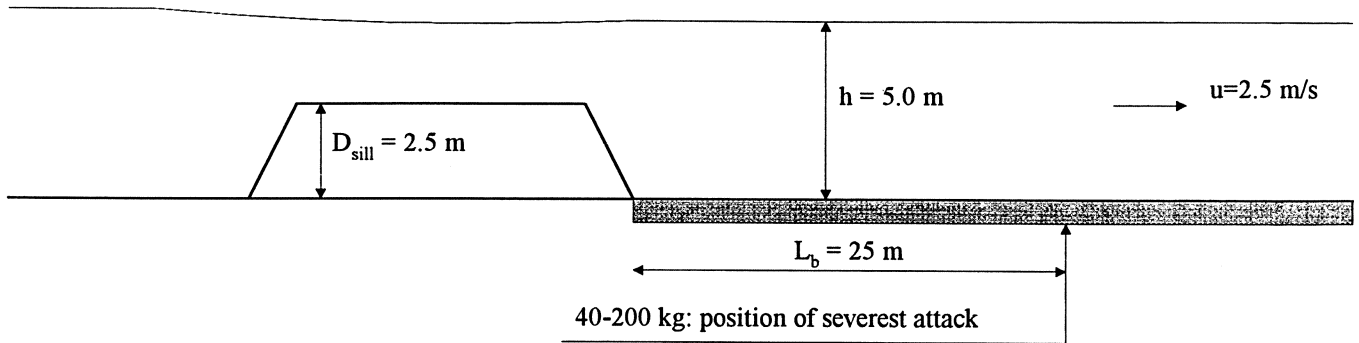
Δ 3

▽ 4



additional sill

Figuur 4.1 Stabiliteitsanalyse voor bodemverdediging benedenstrooms van een drempel



Figuur 4.2 Schets van de situatie voor de onderzochte case (basisvariant)

4.3 Resultaten

Voor gedetailleerde resultaten wordt verwezen naar Bijlage C. Hier wordt volstaan met een overzicht van de belangrijkste uitkomsten.

Als uitgangspunt voor de berekeningen is formule 3.10 gekozen, omdat deze formule een relatie bevat voor constructie-afhankelijke turbulentie die is gebaseerd op metingen. De waarden van parameters in de andere formules zijn vervolgens aan formule 3.10 gerelateerd om consistentie in de antwoorden te verkrijgen.

Formule 3.10 kan worden geschreven als (Bijlage A):

$$k_{3.10} \frac{u^2}{C^2 \Delta D} = \psi \quad \text{met} \quad k_{3.10} = 0.7 r_u^2 \frac{C^2}{g} \quad (4.1)$$

Op analoge wijze kan formule 3.13 worden geschreven als:

$$k_{3.13} \frac{u^2}{C^2 \Delta D} = \psi^1 = 1.54 \psi \quad (4.2)$$

$$\text{met } k_{3.13} = \left(\frac{1 + r_\tau \gamma}{1 - r_{\tau} \gamma} \right).$$

De factor 1.54 is bepaald uit de relatie tussen Shields en Grass voor uniforme stromingscondities, waarbij geldt: $r_\tau = 0.4$, $r_{\tau} = 0.3$ en $\gamma = 0.625$ wat resulteert in 1.54.

Opgemerkt wordt dat in uniforme condities dus geldt: $k_{3.13} = 1.54$ en voor niet-uniforme condities: $k_{3.13} \neq 1.54$.

Vergelijken van de formules 4.1 en 4.2 geeft een relatie tussen $k_{3.13}$ en $k_{3.10}$:

$$k_{3.13} = 1.54 k_{3.10}$$

Analoog kan voor de formules 3.20 en 3.21 worden afgeleid (zie voor details Bijlage C):

$$k_{3,20} = (k_{3,10})^{0.5}$$

$$k_{3,21} = 1.54 k_{3,10}$$

Alle formules zijn dus naar elkaar te herleiden.

Substitutie van $r_{\tau} = 0.3$, $C = 33 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ en $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ in vgl.(4.1), resulteert in $k_{3,10} = 7.0$. Met de factor 1.54 volgt dan $k_{3,21} = k_{3,13} = 10.8$ en $k_{3,20} = 2.64$.

Deze waarden voor $k_{3,10}$, $k_{3,13}$, $k_{3,20}$ en $k_{3,21}$ lijken hoog maar zijn qua orde van grootte overeenkomstig de waarde van de k-factor zoals die voorkomt in de formule (zie formule 3.6 in Q2395.10):

$$\frac{k^2 u^2}{C^2 \Delta D} = \psi \quad (4.3)$$

Een waarde van 2.64 voor de k-factor in (4.3) betekent een waarde van 7.0 voor $k_{3,10}$.

formule 3.10

Uit de berekeningen kan worden geconcludeerd dat de onzekerheden in de belasting in hoge mate bepalend zijn voor de onzekerheid in het eindantwoord. De sterkte gaat pas een rol spelen als de onzekerheden in belastingvariabelen klein zijn.

Als we het totale resultaat beschouwen dan kan de volgende prioriteitsvolgorde worden opgesteld:

* 1e en 2e benadering: $r_u/c_s - u - \psi$

* 3e benadering: $u - D_{\text{sill}} - \psi$

Opgemerkt wordt dat het gaat om de doorwerking van standaardafwijkingen, uitgezonderd in geval van D_{sill} waar het de invloed van de verwachtingswaarde betreft.

Een andere conclusie is dat formule 3.10 in deze vorm met een factor $c_1 = 0.7$ alleen toepasbaar is voor uniforme stromingscondities. De waarde van c_1 zal globaal tussen de 0.4 en 0.6 kunnen liggen bij niet-uniforme condities en experimenteel (of aan de hand van eerdere meetresultaten) moeten worden bepaald.

formule 3.13

Analoog aan de conclusies bij formule 3.10 geldt ook hier dat de grootste bijdragen aan de onzekerheid voortkomen uit de onzekerheden in de belasting, dat wil zeggen: mate van turbulentie en in mindere mate in de stroomsnelheid. Echter ook de onzekerheid in γ blijkt belangrijk te zijn.

In volgorde:

* 1e benadering: $k_{3,13} - u - C$

* 2e benadering: $r_{\tau} - \gamma - u$

Verder wordt opgemerkt dat kritisch moet worden gezien of met formule 3.13 in de toekomst wordt verder gegaan. De reden hiervoor is dat α_e in de formule ontbreekt, terwijl deze parameter relevant zou kunnen zijn bij sterk niet-uniforme stroming (zie bij formule 3.21).

formule 3.20

Deze formule (maar ook formule 3.21) bevat de parameters u_b en c_b . Voor uniforme condities is de volgende gelijkheid op te stellen:

$$\frac{u^2}{C^2 \Delta D} = \frac{u_b^2}{c_b^2 \Delta D} \quad (4.4)$$

waaruit is af te leiden:

$$c_b = C \frac{u_b}{u} \quad (4.5)$$

Als referentieniveau is hier als voorbeeld gekozen een hoogte van 1.0 m boven de bodem.

Voor $u_b(z=1)$ geldt dan:

$$u(1) = \kappa^{-1} \sqrt{ghi} \ln(z / z_0) \quad (4.6)$$

Uit de gegevens kan worden afgeleid: $i = 0.00115$. Met $z_0 = 0.033 k_s = 0.0033(2.5 D_{n50})$ volgt dan $u_b = 2.1$ m/s. Met vgl(4.5) volgt dan: $c_b = 28$ (voor de standaardafwijking is een waarde van 3 aangehouden).

Wat de resultaten betreft blijken opnieuw de grootste bijdragen aan de onzekerheid voort te komen uit de onzekerheden in de belasting: in de mate van turbulentie en (in mindere mate) in de stroomsnelheid. Nu speelt ook de onzekerheid in c_b een rol. De volgende volgorde kan worden aangegeven:

- * 1e benadering: $k_{3,20} - c_b - u_b$
- * 2e benadering: $\alpha_e / r_{u,b} - c_b - u_b$

Opgemerkt wordt dat deze formule niet de mogelijkheid biedt rekening te houden met spreiding in de sterkte. Uit de resultaten blijkt dit aspect overigens minder relevant.

formule 3.21

De uitgevoerde gevoeligheidsanalyse laat zien dat de belastingparameters wederom de meeste onzekerheid veroorzaken, in volgorde:

- * 1e benadering: $k_{3,21} - u_b$
- * 2e benadering: $\alpha_e / r_\tau - \gamma / c_b$

Formule 3.21 is de meest complete voorspeller waarmee lokale stromingscondities worden gerelateerd aan sterkteparameters.

| Tabel 4.1 Parameterwaarden formule 3.10 | | | | | | | | |
|---|---------------------------|--------------------|----------|------------|---------|-----------|----------------------|--|
| parameter | omschrijving | eenheid | type | verdelings | gemidd. | stand.afw | opmerking | |
| | | | onzek.hd | type | | | | |
| D ₅₀ | karakt.steendiameter | m | NS | norm. | 0.345 | 0.015 | sortering 40-200 kg | |
| ρ _s | dichtheid steen | kg/m ³ | S | norm. | 2650 | 100 | | |
| ρ | dichtheid water | kg/m ³ | S | norm. | 1000 | 0 | | |
| g | versnelling zwaartekracht | m/s ² | S | norm. | 9.81 | 0 | | |
| ψ | Shields-parameter | - | SM | norm. | 0.04 | 0.005 | | |
| u | stroomsnelheid | m | NSM | norm. | 2.5 | 0.1 | | |
| r _u | turb.coefficient | - | NS | norm. | 0.3 | 0.025 | alleen 1e benadering | |
| c _s | constr.afh.turb.factor | - | NS | norm. | 0.068 | 0.015 | alleen 2e benadering | |
| C | Chezy-coefficient | m/s ^{0.5} | NS | norm. | 33 | 3 | alleen 2e benadering | |
| h | waterdiepte | m | NS | norm. | 5 | 0.1 | alleen 3e benadering | |
| D _{sill} | hoogte drempel | m | NS | norm. | 2.5 | 0.1 | alleen 3e benadering | |
| L _b | lengte bodembescherming | m | NS | norm. | 25 | 0 | alleen 3e benadering | |
| κ | von Karman coefficient | - | S | norm. | 0.4 | 0 | alleen 3e benadering | |
| e | grondtal nat.log | - | S | norm. | 2.72 | 0 | alleen 3e benadering | |
| c _s | coefficient | - | NS | norm. | 2.5 | 0.5 | alleen 3e benadering | |

Tabel 4.1 Parameterwaarden formule 3.10

| Tabel 4.2 Parameterwaarden formule 3.13 | | | | | | | | |
|---|----------------------|--------------------|----------|------------|---------|-----------|---------------------------|--|
| parameter | omschrijving | eenheid | type | verdelings | gemidd. | stand.afw | opmerking | |
| | | | onzek.hd | type | | | | |
| D ₅₀ | karakt.steendiameter | m | NS | norm. | 0.345 | 0.015 | sortering 40-200 kg | |
| ρ _s | dichtheid steen | kg/m ³ | S | norm. | 2650 | 100 | | |
| ρ | dichtheid water | kg/m ³ | S | norm. | 1000 | 0 | | |
| ψ ¹ | Shields-parameter | - | SM | norm. | 0.062 | 0.005 | | |
| u | stroomsnelheid | m | NSM | norm. | 2.5 | 0.1 | | |
| C | Chezy-coefficient | m/s ^{0.5} | NS | norm. | 33 | 3 | 1e benad.en 2e benadering | |
| k _{3,13} | turb.coefficient | - | NS | norm. | 10.8 | 1 | alleen 1e benadering | |
| γ | coefficient | - | SM | norm. | 0.625 | 0.2 | 2e benadering | |
| r _t | var.coeff.belasting | - | NS | norm. | 12.5 | 1 | 2e benadering | |
| r _{cr} | var.coeff.sterkte | - | NS | norm. | 0.3 | 0.1 | 2e benadering | |

Tabel 4.2 Parameterwaarden formule 3.13

| Tabel 4.3 Parameterwaarden formule 3.20 | | | | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------|----------|------------|---------|-----------|---------------------------|--|
| parameter | omschrijving | eenheid | type | verdelings | gemidd. | stand.afw | opmerking | |
| | | | onzek.hd | type | | | | |
| D ₅₀ | karakt.steendiameter | m | NS | norm. | 0.345 | 0.015 | sortering 40-200 kg | |
| ρ _s | dichtheid steen | kg/m ³ | S | norm. | 2650 | 100 | | |
| ρ | dichtheid water | kg/m ³ | S | norm. | 1000 | 0 | | |
| ψ | Shields-parameter | - | SM | norm. | 0.04 | 0.005 | | |
| u _b | stroomsnelheid | m | NSM | norm. | 2.1 | 0.1 | | |
| c _b | Chezy-coefficient | m/s ^{0.5} | S | norm. | 28 | 3 | 1e benad.en 2e benadering | |
| k _{3,20} | turb.coefficient | - | S | norm. | 2.85 | 0.5 | alleen 1e benadering | |
| r _{u,b} | turbulentie bij bodem | - | NS | norm. | 0.55 | 0.1 | 2e benadering | |
| α _e | scheefheidspar.belasting | - | S | norm. | 5 | 1 | 2e benadering | |

Tabel 4.3 Parameterwaarden formule 3.20

| Tabel 4.4 Parameterwaarden formule 3.21 | | | | | | | | |
|---|--------------------------|--------------------|----------|------------|---------|-----------|---------------------------|--|
| parameter | omschrijving | eenheid | type | verdelings | gemidd. | stand.afw | opmerking | |
| | | | onzek.hd | type | | | | |
| D ₅₀ | karakt.steendiameter | m | NS | norm. | 0.345 | 0.015 | sortering 40-200 kg | |
| ρ _s | dichtheid steen | kg/m ³ | S | norm. | 2650 | 100 | | |
| ρ | dichtheid water | kg/m ³ | S | norm. | 1000 | 0 | | |
| ψ ¹¹ | Shields-parameter | - | SM | norm. | 0.062 | 0.005 | | |
| u _b | stroomsnelheid | m | NSM | norm. | 2.1 | 0.1 | | |
| c _b | Chezy-coefficient | m/s ^{0.5} | S | norm. | 28 | 3 | 1e benad.en 2e benadering | |
| k _{3,21} | turb.coefficient | - | S | norm. | 10.8 | 1 | alleen 1e benadering | |
| γ | coefficient | - | SM | norm. | 0.625 | 0.1 | 2e benadering | |
| r _t | var.coeff.belasting | - | NS | norm. | 7.5 | 1 | 2e benadering | |
| r _{tr} | var.coeff.sterke | - | NS | norm. | 0.3 | 0.1 | 2e benadering | |
| α _e | scheefheidspar.belasting | - | S | norm. | 5 | 1 | 2e benadering | |
| α _{er} | scheefheidspar.sterke | - | S | norm. | 5 | 1 | 2e benadering | |

Tabel 4.4 Parameterwaarden formule 3.21

5 Conclusies

Voor geselecteerde stabiliteitsvoorspellers (Hoofdstuk 3) zijn probabilistische niveau II berekeningen uitgevoerd. De uitkomsten van die berekeningen zijn aanleiding tot de volgende conclusies (zie Hoofdstuk 4 en voor details Bijlagen B en C):

1. De grootste bijdragen aan de grootte en de onzekerheid in het eindantwoord bij de hier gehanteerde voorbeelden, worden veroorzaakt door de onzekerheden in de variabelen die de belasting karakteriseren: turbulentie, stroomsnelheid, en scheefheid van de verdeling.
2. Onzekerheden in sterktevariabelen zijn minder van belang. Hierbij is overigens wel uitgegaan van de kleine variabiliteit binnen de gebruikelijke steensorteringen. Bij sterk gegradeerde mengsels zal dit wel van belang (kunnen) zijn.
3. Afhankelijk van de toegepaste formule kunnen ψ en γ een significante bijdrage leveren, evenals c_b .
4. De onzekerheid in de turbulentie wordt bepaald door het constructie-afhankelijke deel van de turbulentie. Bij formule 3.10 is deze gespecificeerd en gerelateerd aan constructieparameters; dit is niet zo bij de andere formules.
5. Formule 3.10 bevat een factor 0.7 die bij niet-uniforme stromingscondities aantoonbaar minder juist is. De werkelijke waarde zal eerder liggen tussen 0.4 en 0.6. Dit blijkt ook uit een analyse van deze formule met experimentele gegevens van de stabiliteit van verdedigingsconstructies benedenstrooms van drempels, etc; daarbij (Hoffmans et al, 1998) wordt een factor 0.55 gevonden.

Het voorgaande is aanleiding aan te bevelen nader onderzoek vooral te richten op de belastingparameters bij het verkleinen van de onzekerheid.

Opgemerkt wordt dat alle hier onderzochte formules naar elkaar zijn te herleiden via de relaties $k_{3,21} = k_{3,13} = 1.54 k_{3,10}$ en $k_{3,20} = (k_{3,10})^{0.5}$.

6 Referenties

- Akkerman, G.J., J.L.M. Konter (1985): Hydraulic design criteria for rockfill closure of tidal gaps, vertical closure method, WL | DELFT HYDRAULICS, report M1741 part IV.
- Akkerman, G.J. (1981): steenstabiliteit bij afsluitdammen bij stroomaanval, methode van verticale opbouw, Compartimenteringswerken Oesterdam, WL | DELFT HYDRAULICS, verslag M1741 deel I.
- Akkerman, G.J., Verheij, H.J. (1998): Literatuurinventarisatie stabiliteitsvoorspellers en -gegevens, WL | DELFT HYDRAULICS in samenwerking met DWW, rapport Q2395.10.
- Hoffmans, G.J.C.M. (1992): Two-dimensional mathematical modelling of local-scour holes. Delft University of Technology, Ph.D.Thesis, Delft.
- Hoffmans, G.J.C.M, Booij, R. (1993): Two dimensional mathematical modelling of local-scour holes, Journal of Hydraulic Research, Vol. 31, 1993, No5.
- Hoffmans, G.J.C.M. (1997): Startnotitie steenstabiliteit, Rijkswaterstaat, DWW, informele notitie 16 september 1997, Delft.
- Hoffmans, G.J.C.M., G.J.Akkerman (1998): Influence of turbulence on stone stability, To be presented at the 7th International Symposium on River Sedimentation, HongKong, December 1998
- Leeuwenstein, W. (1996): Ontwerp-methodiek toplagen, Rijkswaterstaat Directie Oost Nederland, rapport W-DWW-96.040.

A **Details uitschrijven stabiliteitsvoorspellers**

Formule 3.10:

$$\frac{0.7 \left(c_s + 1.45 \frac{g}{C^2} \right) u^2}{g \Delta D} = \psi$$

Z = R - S met

$$R = \psi \Delta D \quad \text{en} \quad S = c_1 \left(c_s + c_2 \frac{g}{C^2} \right) \frac{u^2}{g}$$

Verder geldt bij R:

$$\psi = f\{D_*\} = f\left\{ \left(\frac{\Delta g}{v^2} \right)^{1/3} D_{50} \right\}$$

$$\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$$

$$D = D_{n50} = \left(\frac{M}{\rho_s} \right)^{1/3}$$

Verder geldt bij S:

$$c_1 = \sqrt{c_\mu} \eta \zeta^2 \quad \text{met } c_\mu = 0.09, \eta = 0.9 \text{ en } \zeta = 1.6 \quad (c_1 = 0.6912)$$

$$c_s = f\{D_{sill}, h, L_b\}$$

$$c_2 = \left\{ (1 - \exp(-1)) \gamma_u \right\}^2 \quad \text{met } \gamma_u = 1.92 \quad (c_2 = 1.471)$$

$$C = c_3 \log \left(\frac{c_4 h}{k_s} \right)$$

$$c_3 = \frac{g^{0.5}}{\kappa} \ln(10) \quad (c_3 = 18.03)$$

$$c_4 = \frac{1}{e/33} \quad \text{met } e = 2.72 \quad \text{NB. } z_0 = k_s/0.030 \quad (c_4 = 12.13)$$

$$k_s = c_5 D \quad \text{met } c_5 = 2.5 \quad (c_5 = 2 \text{ à } 3; 2 \text{ geldt voor netjes gestorte verdedigingen})$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

u volgt uit de log.snelheidsverdeling of is anderszins bekend

1e benadering met: $c_1 = 0.7$

$$\frac{0.7 r_u^2 u^2}{g \{ (\rho_s - \rho) / \rho \} D} = \psi$$

2e benadering: $r_u^2 = c_s + c_2 \frac{g}{C^2}$ met $c_2 = 1.45$

$$\frac{0.7 \left(c_s + 1.45 \frac{g}{C^2} \right) u^2}{g \{ (\rho_s - \rho) / \rho \} D} = \psi$$

3e benadering: $c_s = f \{ D_{sill}, h, L_b \}$

$$c_s = \frac{0.0225}{\left(1 - \frac{D_{sill}}{h} \right)^2} \left(\frac{L_b - 6D_{sill}}{6.67h} + 1 \right)^{-1.08} \quad (\text{voorwaarde: } L_b \geq 6D_{sill})$$

$$C = c_3 \log \left(\frac{c_4 h}{k_s} \right)$$

$$c_3 = \frac{g^{0.5}}{\kappa} \ln(10)$$

$$c_4 = \frac{1}{e/33} \text{ met } e = 2.72$$

$$k_s = c_5 D \text{ met } c_5 = 2.5$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Formule 3.13:

$$\frac{(1+r_{\tau}\gamma)u^2}{C^2\Delta D(1-r_{\sigma}\gamma)} = \psi^1$$

Z = R - S met

$$R = \psi^1 \Delta D (1 - r_{\sigma} \gamma) \quad \text{en} \quad S = (1 + r_{\tau} \gamma) \frac{u^2}{C^2}$$

Verder geldt bij R:

ψ^1 invoeren als stochast

algemeen geldt: $\psi^1 = \psi \frac{(1+r_{\tau}\gamma)}{(1-r_{\sigma}\gamma)}$ bij normale verdeling resulteert dit in $\psi^1 = 1.54 \psi$

normale verdelingen: $r_{\tau} = 0.3$, anders: $r_{\tau} = \sigma_{\tau}/\tau$

$\gamma = f(\psi)$

$$\psi = f\{D_*\} = f\left\{\left(\frac{\Delta g}{\nu^2}\right)^{1/3} D_{50}\right\}$$

$$\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$$

$$D = D_{n50} = \left(\frac{M}{\rho_s}\right)^{1/3}$$

Verder geldt bij S:

normale verdelingen: $r_{\tau} = 0.4$, anders: $r_{\tau} = \sigma_{\tau}/\tau$

$$C = c_3 \log\left(\frac{c_4 h}{k_s}\right)$$

$$c_3 = \frac{g^{0.5}}{\kappa} \ln(10)$$

$$c_4 = \frac{1}{e/33} \quad \text{met} \quad e = 2.72$$

$$k_s = c_5 D \quad \text{met} \quad c_5 = 2.5$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

u volgt uit de log.snelheidsverdeling of is anderszins bekend

1e benadering met:
$$\frac{k_{3.13} u^2}{C^2 \{(\rho_s - \rho) / \rho\} D} = \psi^1$$

2e benadering:
$$k_{3.13} = \left(\frac{1 + r_i \gamma}{1 - r_w \gamma} \right)$$

$$\frac{(1 + r_i \gamma) u^2}{C^2 \{(\rho_s - \rho) / \rho\} D (1 - r_w \gamma)} = \psi^1$$

3e benadering:
$$C = c_3 \log \left(\frac{c_4 h}{k_s} \right)$$

$$c_3 = \frac{g^{0.5}}{\kappa} \ln(10)$$

$$c_4 = \frac{1}{e/33} \text{ met } e = 2.72$$

$$k_s = c_5 D \text{ met } c_5 = 2.5$$

Formule 3.20:

$$\frac{\left(\frac{1 + \alpha_e r_{u,b}}{1.45}\right)^2 u_b^2}{c_b^2 \Delta D} = \psi$$

Z = R - S met

$$R = \psi \Delta D \quad \text{en} \quad S = \left(\frac{c_6}{c_{6ref}}\right)^2 \frac{u_b^2}{c_b^2}$$

Verder geldt bij R:

$$\psi = f\{D_*\} = f\left\{\left(\frac{\Delta g}{v^2}\right)^{1/3} D_{50}\right\}$$

$$\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$$

$$D = D_{n50} = \left(\frac{M}{\rho_s}\right)^{1/3}$$

Verder geldt bij S:

$$c_{6ref} = 1.45 \quad \text{NB.} \quad 1.45 = 1 + \alpha_e r_{u,b} \quad \text{met} \quad \alpha_e = 3 \quad \text{en} \quad r_{u,b} = 0.15$$

$$c_6 = 1 + \alpha_e r_{u,b}$$

normale verdeling $r_{u,b} = 0.15$

$$\alpha_e = 3, \text{ anders } \alpha_e > 3$$

c_b is stochast

u_b volgt uit de gemeten log.snelheidsverdeling of is anderzins bekend

1e benadering met:
$$\frac{k_{3,20}^2 u_b^2}{c_b^2 \{(\rho_s - \rho) / \rho\} D} = \psi$$

2e benadering:
$$k_{3,20} = \left(\frac{c_6}{c_{6ref}}\right)$$

$$\frac{\left(\frac{c_6}{c_{6ref}}\right)^2 u_b^2}{c_b^2 \{(\rho_s - \rho) / \rho\} D} = \psi$$

Formule 3.21:

$$\frac{\left(1 + \frac{\alpha_e}{3} r_{\tau} \gamma\right) u_b^2}{c_b^2 \Delta D \left(1 - \frac{\alpha_{er}}{3} r_{\tau} \gamma\right)} = \psi^{11}$$

Z = R - S met

$$R = \psi^{11} \Delta D \left(1 - \frac{\alpha_{er}}{3} r_{\tau} \gamma\right) \quad \text{en} \quad S = \left(1 + \frac{\alpha_e}{3} r_{\tau} \gamma\right) \frac{u_b^2}{c_b^2}$$

Verder geldt bij R:

ψ^1 invoeren als stochast

$$\text{algemeen geldt: } \psi^{11} = \psi \frac{\left(1 + \frac{\alpha_e}{3} r_{\tau} \gamma\right)}{\left(1 - \frac{\alpha_{er}}{3} r_{\tau} \gamma\right)}$$

bij normale verdeling resulteert dit in $\psi^{11} = 1.54 \psi$

normale verdelingen: $r_{\tau} = 0.3$, anders: $r_{\tau} = \sigma_{\tau} / \tau$

$\gamma = f(\psi)$

$$\psi = f\{D_*\} = f\left\{\left(\frac{\Delta g}{v^2}\right)^{1/3} D_{50}\right\}$$

$$\Delta = (\rho_s - \rho) / \rho$$

$$D = D_{n50} = \left(\frac{M}{\rho_s}\right)^{1/3}$$

normale verdeling $\alpha_{er} = 3$, anders $\alpha_{er} > 3$

Verder geldt bij S:

normale verdelingen: $r_{\tau} = 0.4$, anders: $r_{\tau} = \sigma_{\tau} / \tau$

$\alpha_e = 3$, anders $\alpha_e > 3$

c_b is stochast

u_b volgt uit de gemeten log.snelheidsverdeling of is anderszins bekend

1e benadering met: $\frac{k_{3,21} u_b^2}{c_b^2 \{(\rho_s - \rho) / \rho\} D} = \psi^{11}$

2e benadering: $k_{3,21} = \left(\frac{1 + \frac{\alpha_e}{3} r_{\tau} \gamma}{1 - \frac{\alpha_{er}}{3} r_{\pi} \gamma} \right)$

$$\frac{\left(1 + \frac{\alpha_e}{3} r_{\tau} \gamma\right) u_b^2}{c_b^2 \{(\rho_s - \rho) / \rho\} D \left(1 - \frac{\alpha_{er}}{3} r_{\pi} \gamma\right)} = \psi^{11}$$

B Voorbeelden van uitvoer met AFDA

TER TOELICHTING

In deze bijlage zijn voorbeelden gepresenteerd van de uitkomsten van berekeningen met het AFDA pakket. Per berekening resulteren 2 bladzijden.

Op de eerste bladzijde staan twee tabellen, beide bevattende waarden die karakteristiek zijn voor de variabelen:

- Een tabel met stochastische variabelen per parameter:
A = gemiddelde waarde (in de onderhavige studie)
B = standaardafwijking (in de onderhavige studie)
C = niet gebruikt (in de onderhavige studie)
- Een tabel met ingevoerde beginwaarden en minimum en maximum waarden per parameter.

De tweede bladzijde bevat informatie over het rekenproces en de resultaten:

- Het iteratieproces geeft gewenste en bereikte toleranties voor betrouwbaarheidsfunctie Z en betrouwbaarheidsindex β (gedefinieerd als $\sigma(Z)/\mu(Z)$).
- Daarna wordt het aantal uitgevoerde iteraties aangegeven.
- Vervolgens een tabel geldend voor het ontwerppunt met voor iedere parameter een aantal waarden:
type = verdelingsfunctie (N = normale verdeling)
X = waarde in het ontwerppunt
Alfa = bijdrage aan de onzekerheid
Epsilon = niet relevant in deze studie
Gem. = verwachtingswaarde van de vervangende normale verdeling
St.Afv. = standaardafwijking van de vervangende normale verdeling
- Tenslotte informatie over de betrouwbaarheidsfunctie: gemiddelde waarde en standaardafwijking van Z , waarde van β , en de faalkans.

OPDRACHTNAAM : Voorbeeld gepresenteerde uitvoer
 DATUM : 23 april 1998
 TIJD : 14:32:11 uur
 REKENDUUR : 0:00:06 uur

Demping: 0.50 Maximale sprong: 1.00
 Delta demping: 0.00 Delta sprong: 0.10

Stochastische variabelen:

| Naam | Type | A | B | C |
|------------|------|----------|---------|-------|
| rho_s | N | 2650.000 | 100.000 | 0.000 |
| Diameter | N | 0.345 | 0.015 | 0.000 |
| psi | N | 0.040 | 0.005 | 0.000 |
| Snelheid u | N | 2.500 | 0.100 | 0.000 |
| turb.coeff | N | 0.300 | 0.025 | 0.000 |

| Naam | Startwaarde | Minimum | Maximum |
|------------|-------------|----------|----------|
| rho_s | 2650.000 | 2000.000 | 3000.000 |
| Diameter | 0.345 | 0.050 | 0.500 |
| psi | 0.040 | 0.005 | 0.060 |
| Snelheid u | 2.500 | 0.000 | 10.000 |
| turb.coeff | 0.300 | 0.000 | 10.000 |

Het iteratieproces:

Gewenste tolerantie tav. Z = 0: 5.0000E-05
 Bereikte tolerantie tav. Z = 0: 2.7522E-05
 Gewenste tolerantie tav. beta: 1.0000E-02
 Bereikte tolerantie tav. beta: 5.0041E-07

Het aantal iteraties in de laatste herhaling: 11
 Het aantal herhalingen: 0
 Het totale aantal iteraties: 11

Het ontwerp punt:

| Naam | type | X | Alfa | Epsilon | Vervangende Norm. Verdeling | |
|------------|------|----------|------|---------|-----------------------------|----------|
| | | | | | Gem. | St. Afw. |
| rho_s | N | 2704.465 | 0.05 | -0.09 | 2650.000 | 100.000 |
| Diameter | N | 0.351 | 0.03 | -0.05 | 0.345 | 0.015 |
| psi | N | 0.045 | 0.19 | -0.31 | 0.040 | 0.005 |
| Snelheid u | N | 2.423 | 0.11 | -0.18 | 2.500 | 0.100 |
| turb.coeff | N | 0.254 | 0.61 | -1.00 | 0.300 | 0.025 |

De betrouwbaarheidsfunctie:

Z in het ontwerp punt (Z*): -0.000
 Gemiddelde van Z: -0.016
 Standaardafwijking van Z: 0.007
 Beta: -2.347
 Faalkans: 9.90529E-01

 OPDRACHTNAAM : Berekening S310-001
 DATUM : 23 april 1998
 TIJD : 14:32:11 uur
 REKENDUUR : 0:00:06 uur

 Demping: 0.50 Maximale sprong: 1.00
 Delta demping: 0.00 Delta sprong: 0.10

Stochastische variabelen:

| Naam | Type | A | B | C |
|------------|------|----------|---------|-------|
| rho_s | N | 2650.000 | 100.000 | 0.000 |
| Diameter | N | 0.345 | 0.015 | 0.000 |
| psi | N | 0.040 | 0.005 | 0.000 |
| Snelheid u | N | 2.500 | 0.100 | 0.000 |
| turb.coeff | N | 0.300 | 0.025 | 0.000 |

| Naam | Startwaarde | Minimum | Maximum |
|------------|-------------|----------|----------|
| rho_s | 2650.000 | 2000.000 | 3000.000 |
| Diameter | 0.345 | 0.050 | 0.500 |
| psi | 0.040 | 0.005 | 0.060 |
| Snelheid u | 2.500 | 0.000 | 10.000 |
| turb.coeff | 0.300 | 0.000 | 10.000 |

Het iteratieproces:

Gewenste tolerantie tav. Z = 0: 5.0000E-05
 Bereikte tolerantie tav. Z = 0: 2.7522E-05
 Gewenste tolerantie tav. beta: 1.0000E-02
 Bereikte tolerantie tav. beta: 5.0041E-07

Het aantal iteraties in de laatste herhaling: 11
 Het aantal herhalingen: 0
 Het totale aantal iteraties: 11

Het ontwerp punt:

| Naam | type | X | Alfa | Epsilon | Vervangende | |
|------------|------|----------|------|---------|-------------|----------|
| | | | | | Gem. | St. Afw. |
| | | | 2 | | | |
| rho_s | N | 2704.465 | 0.05 | -0.09 | 2650.000 | 100.000 |
| Diameter | N | 0.351 | 0.03 | -0.05 | 0.345 | 0.015 |
| psi | N | 0.045 | 0.19 | -0.31 | 0.040 | 0.005 |
| Snelheid u | N | 2.423 | 0.11 | -0.18 | 2.500 | 0.100 |
| turb.coeff | N | 0.254 | 0.61 | -1.00 | 0.300 | 0.025 |

De betrouwbaarheidsfunctie:

Z in het ontwerp punt (Z*): -0.000
 Gemiddelde van Z: -0.016
 Standaardafwijking van Z: 0.007
 Beta: -2.347
 Faalkans: 9.90529E-01

 OPDRACHTNAAM : Berekening S310-051
 DATUM : 15 april 1998
 TIJD : 12:02:47 uur
 REKENDUUR : 0:00:07 uur

 Demping: 0.50 Maximale sprong: 1.00
 Delta demping: 0.00 Delta sprong: 0.10

Stochastische variabelen:

| Naam | Type | A | B | C |
|------------|------|----------|---------|-------|
| rho_s | N | 2650.000 | 100.000 | 0.000 |
| Diameter | N | 0.345 | 0.015 | 0.000 |
| psi | N | 0.040 | 0.005 | 0.000 |
| Snelheid u | N | 2.500 | 0.100 | 0.000 |
| turb.coeff | N | 0.200 | 0.025 | 0.000 |

| Naam | Startwaarde | Minimum | Maximum |
|------------|-------------|----------|----------|
| rho_s | 2650.000 | 2000.000 | 3000.000 |
| Diameter | 0.200 | 0.050 | 0.400 |
| psi | 0.040 | 0.005 | 0.060 |
| Snelheid u | 1.000 | 0.000 | 10.000 |
| turb.coeff | 0.300 | 0.000 | 10.000 |

Het iteratieproces:

Gewenste tolerantie tav. Z = 0: 5.0000E-05
 Bereikte tolerantie tav. Z = 0: 3.4203E-05
 Gewenste tolerantie tav. beta: 1.0000E-02
 Bereikte tolerantie tav. beta: 1.2790E-05

Het aantal iteraties in de laatste herhaling: 35
 Het aantal herhalingen: 0
 Het totale aantal iteraties: 35

Het ontwerp punt:

| Naam | type | X | Alfa ² | Epsilon | Vervangende Norm. Verdeling | |
|------------|------|----------|-------------------|---------|--------------------------------|----------|
| | | | | | Gem. | St. Afw. |
| rho_s | N | 2632.078 | 0.05 | 0.07 | 2650.000 | 100.000 |
| Diameter | N | 0.343 | 0.02 | 0.04 | 0.345 | 0.015 |
| psi | N | 0.038 | 0.21 | 0.33 | 0.040 | 0.005 |
| Snelheid u | N | 2.521 | 0.08 | 0.11 | 2.500 | 0.100 |
| turb.coeff | N | 0.217 | 0.65 | 1.00 | 0.200 | 0.025 |

De betrouwbaarheidsfunctie:

Z in het ontwerp punt (Z*): 0.000
 Gemiddelde van Z: 0.005
 Standaardafwijking van Z: 0.006
 Beta: 0.833
 Faalkans: 2.02557E-01

```

-----
OPDRACHTNAAM : Berekening S310-201
DATUM       : 23 april 1998
TIJD       : 14:35:27 uur
REKENDUUR  : 0:00:17 uur
-----

```

```

-----
Berekening nr.: 1
-----

```

Constanten:

```

          C-1          C-2
          2.0000E+00  2.5000E+01
-----

```

```

-----
Demping:           0.50           Maximale sprong:       1.00
Delta demping:    0.00           Delta sprong:         0.10
-----

```

Stochastische variabelen:

| Naam | Type | A | B | C |
|------------|------|----------|---------|-------|
| rho_s | N | 2650.000 | 100.000 | 0.000 |
| Diameter | N | 0.345 | 0.015 | 0.000 |
| psi | N | 0.040 | 0.005 | 0.000 |
| Snelheid u | N | 2.500 | 0.100 | 0.000 |
| h | N | 5.000 | 0.100 | 0.000 |
| Var_D_sill | N | 0.000 | 0.100 | 0.000 |
| c5 | N | 2.500 | 0.500 | 0.000 |

| Naam | Startwaarde | Minimum | Maximum |
|------------|-------------|----------|----------|
| rho_s | 2650.000 | 2000.000 | 3000.000 |
| Diameter | 0.345 | 0.100 | 0.500 |
| psi | 0.040 | 0.005 | 0.060 |
| Snelheid u | 1.000 | 0.000 | 10.000 |
| h | 5.000 | 4.000 | 10.000 |
| Var_D_sill | 0.100 | -1.000 | 1.000 |
| c5 | 2.500 | 1.000 | 4.000 |

Het iteratieproces:

```

-----
Gewenste tolerantie tav. Z = 0:      5.0000E-05
Bereikte tolerantie tav. Z = 0:      4.0851E-05
Gewenste tolerantie tav. beta:        1.0000E-02
Bereikte tolerantie tav. beta:        8.1449E-06
-----

```

```

-----
Het aantal iteraties in de laatste herhaling:  34
Het aantal herhalingen:  0
Het totale aantal iteraties:  34
-----

```

Het ontwerp punt:

| Naam | type | X | Alfa | Epsilon | Vervangende Norm. Verdeling | |
|------------|------|----------|------|---------|--------------------------------|----------|
| | | | | | Gem. | St. Afw. |
| rho_s | N | 2670.168 | 0.12 | -0.25 | 2650.000 | 100.000 |
| Diameter | N | 0.347 | 0.05 | -0.11 | 0.345 | 0.015 |
| psi | N | 0.042 | 0.47 | -1.00 | 0.040 | 0.005 |
| Snelheid u | N | 2.471 | 0.22 | -0.50 | 2.500 | 0.100 |
| h | N | 5.006 | 0.01 | -0.02 | 5.000 | 0.100 |
| Var_D_sill | N | -0.021 | 0.13 | -0.27 | 0.000 | 0.100 |
| c5 | N | 2.464 | 0.02 | -0.03 | 2.500 | 0.500 |

De betrouwbaarheidsfunctie:

```

-----
Z in het ontwerp punt (Z*):          0.000
Gemiddelde van Z:                    -0.002
Standaardafwijking van Z:            0.004
Beta:                                 -0.587
Faalkans:                             7.21294E-01
-----

```

 OPDRACHTNAAM : Berekening S313-006
 DATUM : 14 mei 1998
 TIJD : 10:17:03 uur
 REKENDUUR : 0:00:09 uur

Demping: 0.50 Maximale sprong: 1.00
 Delta demping: 0.00 Delta sprong: 0.10

Stochastische variabelen:

| Naam | Type | A | B | C |
|------------|------|----------|---------|-------|
| rho_s | N | 2650.000 | 100.000 | 0.000 |
| Diameter | N | 0.345 | 0.015 | 0.000 |
| psi_1 | N | 0.062 | 0.005 | 0.000 |
| Snelheid_u | N | 2.500 | 0.100 | 0.000 |
| turb.coeff | N | 10.800 | 2.000 | 0.000 |
| Chezy | N | 33.000 | 3.000 | 0.000 |

| Naam | Startwaarde | Minimum | Maximum |
|------------|-------------|----------|----------|
| rho_s | 2650.000 | 2000.000 | 3000.000 |
| Diameter | 0.300 | 0.050 | 0.500 |
| psi_1 | 0.065 | -0.100 | 0.100 |
| Snelheid_u | 2.500 | 0.000 | 10.000 |
| turb.coeff | 10.000 | 0.000 | 20.000 |
| Chezy | 33.000 | 0.000 | 100.000 |

Het iteratieproces:

Gewenste tolerantie tav. Z = 0: 5.0000E-05
 Bereikte tolerantie tav. Z = 0: 2.9524E-05
 Gewenste tolerantie tav. beta: 1.0000E-02
 Bereikte tolerantie tav. beta: 7.4397E-07

Het aantal iteraties in de laatste herhaling: 12
 Het aantal herhalingen: 0
 Het totale aantal iteraties: 12

Het ontwerppunt:

| Naam | type | X | Alfa ² | Epsilon | Vervangende Norm. Verdeling | |
|------------|------|----------|-------------------|---------|-----------------------------|----------|
| | | | | | Gem. | St. Afw. |
| rho_s | N | 2683.005 | 0.03 | -0.06 | 2650.000 | 100.000 |
| Diameter | N | 0.348 | 0.02 | -0.03 | 0.345 | 0.015 |
| psi_1 | N | 0.064 | 0.06 | -0.10 | 0.062 | 0.005 |
| Snelheid u | N | 2.454 | 0.06 | -0.11 | 2.500 | 0.100 |
| turb.coeff | N | 8.015 | 0.57 | -1.00 | 10.800 | 2.000 |
| Chezy | N | 35.807 | 0.26 | -0.45 | 33.000 | 3.000 |

De betrouwbaarheidsfunctie:

Z in het ontwerppunt (Z*): -0.000
 Gemiddelde van Z: -0.023
 Standaardafwijking van Z: 0.012
 Beta: -1.839
 Faalkans: 9.67009E-01

```

-----
OPDRACHTNAAM : Berekening S313-101
DATUM       : 29 april 1998
TIJD       : 13:34:26 uur
REKENDUUR  : 0:00:04 uur
-----

```

```

-----
Demping:           0.50           Maximale sprong:      1.00
Delta demping:    0.00           Delta sprong:        0.10
-----

```

Stochastische variabelen:

| Naam | Type | A | B | C |
|------------|------|----------|---------|-------|
| rho_s | N | 2650.000 | 100.000 | 0.000 |
| Diameter | N | 0.345 | 0.015 | 0.000 |
| psi_1 | N | 0.062 | 0.005 | 0.000 |
| Snelheid_u | N | 2.500 | 0.100 | 0.000 |
| rtau | N | 12.500 | 1.000 | 0.000 |
| rtaur | N | 0.300 | 0.100 | 0.000 |
| gamma | N | 0.625 | 0.200 | 0.000 |
| Chezy | N | 33.000 | 3.000 | 0.000 |

| Naam | Startwaarde | Minimum | Maximum |
|------------|-------------|----------|----------|
| rho_s | 2650.000 | 2000.000 | 3000.000 |
| Diameter | 0.300 | 0.050 | 0.500 |
| psi_1 | 0.065 | -0.100 | 0.100 |
| Snelheid_u | 2.500 | 0.000 | 10.000 |
| rtau | 12.500 | 0.000 | 20.000 |
| rtaur | 0.300 | 0.000 | 1.000 |
| gamma | 0.200 | 0.000 | 3.000 |
| Chezy | 33.000 | 0.000 | 100.000 |

Het iteratieproces:

```

-----
Gewenste tolerantie tav. Z = 0:      5.0000E-05
Bereikte tolerantie tav. Z = 0:      2.7376E-05
Gewenste tolerantie tav. beta:       1.0000E-02
Bereikte tolerantie tav. beta:       8.2355E-06
-----

```

```

-----
Het aantal iteraties in de laatste herhaling: 10
Het aantal herhalingen: 0
Het totale aantal iteraties: 10
-----

```

Het ontwerp punt:

| Naam | type | X | Alfa ² | Epsilon | Vervangende Norm. Verdeling | |
|------------|------|----------|-------------------|---------|--------------------------------|----------|
| | | | | | Gem. | St. Afw. |
| rho_s | N | 2663.478 | 0.01 | -0.02 | 2650.000 | 100.000 |
| Diameter | N | 0.346 | 0.01 | -0.01 | 0.345 | 0.015 |
| psi_l | N | 0.063 | 0.02 | -0.03 | 0.062 | 0.005 |
| Snelheid u | N | 2.482 | 0.02 | -0.03 | 2.500 | 0.100 |
| rtau | N | 12.348 | 0.02 | -0.02 | 12.500 | 1.000 |
| rtaur | N | 0.290 | 0.01 | -0.01 | 0.300 | 0.100 |
| gamma | N | 0.409 | 0.80 | -1.00 | 0.625 | 0.200 |
| Chezy | N | 34.183 | 0.11 | -0.14 | 33.000 | 3.000 |

De betrouwbaarheidsfunctie:

```

-----
Z in het ontwerp punt (Z*):          -0.000
Gemiddelde van Z:                     -0.023
Standaardafwijking van Z:             0.019
Beta:                                  -1.200
Faalkans:                              8.84912E-01
-----

```

 OPDRACHTNAAM : Berekening S320-001
 DATUM : 19 mei 1998
 TIJD : 12:29:57 uur
 REKENDUUR : 0:00:05 uur

 Damping: 0.50 Maximale sprong: 1.00
 Delta demping: 0.00 Delta sprong: 0.10

Stochastische variabelen:

| Naam | Type | A | B | C |
|------------|------|----------|---------|-------|
| rho_s | N | 2650.000 | 100.000 | 0.000 |
| Diameter | N | 0.345 | 0.015 | 0.000 |
| psi | N | 0.040 | 0.005 | 0.000 |
| Snelheid u | N | 2.100 | 0.100 | 0.000 |
| turb.coeff | N | 2.850 | 0.500 | 0.000 |
| cb | N | 28.000 | 3.000 | 0.000 |

| Naam | Startwaarde | Minimum | Maximum |
|------------|-------------|----------|----------|
| rho_s | 2650.000 | 2000.000 | 3000.000 |
| Diameter | 0.300 | 0.050 | 0.500 |
| psi | 0.040 | 0.000 | 0.100 |
| Snelheid u | 2.100 | 0.000 | 10.000 |
| turb.coeff | 2.500 | 0.000 | 20.000 |
| cb | 28.000 | 0.000 | 100.000 |

Het iteratieproces:

Gewenste tolerantie tav. Z = 0: 5.0000E-05
 Bereikte tolerantie tav. Z = 0: 3.2902E-05
 Gewenste tolerantie tav. beta: 1.0000E-02
 Bereikte tolerantie tav. beta: 1.3394E-06

Het aantal iteraties in de laatste herhaling: 11
 Het aantal herhalingen: 0
 Het totale aantal iteraties: 11

Het ontwerp punt:

| Naam | type | X | Alfa ² | Epsilon | Vervangende Norm. Verdeling | |
|------------|------|----------|-------------------|---------|--------------------------------|----------|
| | | | | | Gem. | St. Afw. |
| rho_s | N | 2666.548 | 0.01 | -0.02 | 2650.000 | 100.000 |
| Diameter | N | 0.347 | 0.01 | -0.01 | 0.345 | 0.015 |
| psi | N | 0.042 | 0.05 | -0.07 | 0.040 | 0.005 |
| Snelheid u | N | 2.073 | 0.03 | -0.05 | 2.100 | 0.100 |
| turb.coeff | N | 2.223 | 0.74 | -1.00 | 2.850 | 0.500 |
| cb | N | 29.688 | 0.15 | -0.20 | 28.000 | 3.000 |

De betrouwbaarheidsfunctie:

Z in het ontwerp punt (Z*): -0.000
 Gemiddelde van Z: -0.018
 Standaardafwijking van Z: 0.013
 Beta: -1.455
 Faalkans: 9.27205E-01

```

-----
OPDRACHTNAAM : Berekening S320-101
DATUM       : 20 mei 1998
TIJD       : 12:35:00 uur
REKENDUUR  : 0:00:07 uur
-----

```

```

-----
Demping:           0.50           Maximale sprong:      1.00
Delta demping:    0.00           Delta sprong:        0.10
-----

```

Stochastische variabelen:

| Naam | Type | A | B | C |
|------------|------|----------|---------|-------|
| rho_s | N | 2650.000 | 100.000 | 0.000 |
| Diameter | N | 0.345 | 0.015 | 0.000 |
| psi | N | 0.040 | 0.005 | 0.000 |
| Snelheid u | N | 2.100 | 0.100 | 0.000 |
| rub | N | 0.550 | 0.100 | 0.000 |
| cb | N | 28.000 | 3.000 | 0.000 |
| alfae | N | 5.000 | 1.000 | 0.000 |

| Naam | Startwaarde | Minimum | Maximum |
|------------|-------------|----------|----------|
| rho_s | 2650.000 | 2000.000 | 3000.000 |
| Diameter | 0.300 | 0.050 | 0.500 |
| psi | 0.040 | 0.000 | 0.100 |
| Snelheid u | 2.000 | 0.000 | 10.000 |
| rub | 0.500 | 0.000 | 1.000 |
| cb | 28.000 | 0.000 | 100.000 |
| alfae | 5.000 | 0.000 | 10.000 |

Het iteratieproces:

```

-----
Gewenste tolerantie tav. Z = 0:      5.0000E-05
Bereikte tolerantie tav. Z = 0:     2.5409E-05
Gewenste tolerantie tav. beta:      1.0000E-02
Bereikte tolerantie tav. beta:      1.3532E-06
-----

```

```

-----
Het aantal iteraties in de laatste herhaling:  11
Het aantal herhalingen:  0
Het totale aantal iteraties:  11
-----

```

Het ontwerppunt:

| Naam | type | X | Alfa | Epsilon | Vervangende Norm. Verdeling | |
|------------|------|----------|------|---------|-----------------------------|----------|
| | | | | | Gem. | St. Afw. |
| rho_s | N | 2662.325 | 0.01 | -0.04 | 2650.000 | 100.000 |
| Diameter | N | 0.346 | 0.01 | -0.02 | 0.345 | 0.015 |
| psi | N | 0.041 | 0.06 | -0.15 | 0.040 | 0.005 |
| Snelheid u | N | 2.080 | 0.04 | -0.09 | 2.100 | 0.100 |
| rub | N | 0.493 | 0.31 | -0.78 | 0.550 | 0.100 |
| cb | N | 29.269 | 0.17 | -0.43 | 28.000 | 3.000 |
| alfae | N | 4.353 | 0.40 | -1.00 | 5.000 | 1.000 |

De betrouwbaarheidsfunctie:

```

-----
Z in het ontwerppunt (Z*):          -0.000
Gemiddelde van Z:                   -0.012
Standaardafwijking van Z:           0.012
Beta:                                -1.026
Faalkans:                            8.47529E-01
-----

```

 OPDRACHTNAAM : Berekening S321-001
 DATUM : 13 mei 1998
 TIJD : 16:05:27 uur
 REKENDUUR : 0:00:07 uur

 Demping: 0.50 Maximale sprong: 1.00
 Delta demping: 0.00 Delta sprong: 0.10

Stochastische variabelen:

| Naam | Type | A | B | C |
|------------|------|----------|---------|-------|
| rho_s | N | 2650.000 | 100.000 | 0.000 |
| Diameter | N | 0.345 | 0.015 | 0.000 |
| psi | N | 0.062 | 0.005 | 0.000 |
| Snelheid u | N | 2.100 | 0.100 | 0.000 |
| turb.coeff | N | 10.800 | 1.000 | 0.000 |
| cb | N | 28.000 | 3.000 | 0.000 |

| Naam | Startwaarde | Minimum | Maximum |
|------------|-------------|----------|----------|
| rho_s | 2650.000 | 2000.000 | 3000.000 |
| Diameter | 0.300 | 0.050 | 0.500 |
| psi | 0.060 | 0.000 | 0.100 |
| Snelheid u | 2.100 | 0.000 | 10.000 |
| turb.coeff | 10.000 | 0.000 | 20.000 |
| cb | 28.000 | 0.000 | 100.000 |

Het iteratieproces:

```
-----
Gewenste tolerantie tav. Z = 0:      5.0000E-05
Bereikte tolerantie tav. Z = 0:      3.4764E-05
Gewenste tolerantie tav. beta:        1.0000E-02
Bereikte tolerantie tav. beta:        2.8607E-06
-----
```

```
-----
Het aantal iteraties in de laatste herhaling: 12
Het aantal herhalingen: 0
Het totale aantal iteraties: 12
-----
```

Het ontwerp punt:

| Naam | type | X | Alfa | Epsilon | Vervangende Norm. Verdeling | |
|------------|------|----------|------|---------|--------------------------------|----------|
| | | | | | Gem. | St. Afw. |
| rho_s | N | 2697.179 | 0.05 | -0.10 | 2650.000 | 100.000 |
| Diameter | N | 0.350 | 0.03 | -0.05 | 0.345 | 0.015 |
| psi | N | 0.065 | 0.09 | -0.17 | 0.062 | 0.005 |
| Snelheid u | N | 2.020 | 0.15 | -0.29 | 2.100 | 0.100 |
| turb.coeff | N | 9.993 | 0.15 | -0.29 | 10.800 | 1.000 |
| cb | N | 32.466 | 0.52 | -1.00 | 28.000 | 3.000 |

De betrouwbaarheidsfunctie:

```
-----
Z in het ontwerp punt (Z*):          -0.000
Gemiddelde van Z:                     -0.020
Standaardafwijking van Z:             0.010
Beta:                                  -2.057
Faalkans:                              9.80159E-01
-----
```

 OPDRACHTNAAM : Berekening S321-101
 DATUM : 14 mei 1998
 TIJD : 12:14:55 uur
 REKENDUUR : 0:00:07 uur

 Damping: 0.50 Maximale sprong: 1.00
 Delta demping: 0.00 Delta sprong: 0.10

Stochastische variabelen:

| Naam | Type | A | B | C |
|------------|------|----------|---------|-------|
| rho_s | N | 2650.000 | 100.000 | 0.000 |
| Diameter | N | 0.345 | 0.015 | 0.000 |
| psi | N | 0.062 | 0.005 | 0.000 |
| Snelheid u | N | 2.100 | 0.100 | 0.000 |
| rtau | N | 7.500 | 1.000 | 0.000 |
| rtaur | N | 0.300 | 0.100 | 0.000 |
| gamma | N | 0.625 | 0.100 | 0.000 |
| alfae | N | 5.000 | 1.000 | 0.000 |
| alfaer | N | 3.000 | 1.000 | 0.000 |
| cb | N | 28.000 | 3.000 | 0.000 |

| Naam | Startwaarde | Minimum | Maximum |
|------------|-------------|----------|----------|
| rho_s | 2650.000 | 2000.000 | 3000.000 |
| Diameter | 0.300 | 0.050 | 0.500 |
| psi | 0.060 | 0.000 | 0.120 |
| Snelheid u | 2.100 | 0.000 | 10.000 |
| rtau | 7.000 | 0.000 | 20.000 |
| rtaur | 0.300 | 0.000 | 1.000 |
| gamma | 0.600 | 0.000 | 6.000 |
| alfae | 5.000 | 0.000 | 100.000 |
| alfaer | 3.000 | 0.000 | 100.000 |
| cb | 28.000 | 0.000 | 100.000 |

Het iteratieproces:

```

-----
Gewenste tolerantie tav. Z = 0:      5.0000E-05
Bereikte tolerantie tav. Z = 0:     2.6889E-05
Gewenste tolerantie tav. beta:      1.0000E-02
Bereikte tolerantie tav. beta:      7.3425E-07
-----

```

```

-----
Het aantal iteraties in de laatste herhaling: 12
Het aantal herhalingen: 0
Het totale aantal iteraties: 12
-----

```

Het ontwerp punt:

| Naam | type | X | Alfa | Epsilon | Vervangende | |
|------------|------|----------|------|---------|-------------------------|----------|
| | | | | | Norm. Verdeling Gem. | St. Afw. |
| rho_s | N | 2671.041 | 0.02 | -0.09 | 2650.000 | 100.000 |
| Diameter | N | 0.347 | 0.01 | -0.04 | 0.345 | 0.015 |
| psi | N | 0.063 | 0.04 | -0.16 | 0.062 | 0.005 |
| Snelheid u | N | 2.066 | 0.06 | -0.24 | 2.100 | 0.100 |
| rtau | N | 7.074 | 0.09 | -0.37 | 7.500 | 1.000 |
| rtaur | N | 0.278 | 0.02 | -0.09 | 0.300 | 0.100 |
| gamma | N | 0.561 | 0.21 | -0.84 | 0.625 | 0.100 |
| alfae | N | 4.301 | 0.25 | -0.99 | 5.000 | 1.000 |
| alfaer | N | 2.784 | 0.02 | -0.09 | 3.000 | 1.000 |
| cb | N | 30.112 | 0.26 | -1.00 | 28.000 | 3.000 |

De betrouwbaarheidsfunctie:

```

-----
Z in het ontwerp punt (Z*):          -0.000
Gemiddelde van Z:                    -0.020
Standaardafwijking van Z:            0.014
Beta:                                 -1.392
Faalkans:                             9.17994E-01
-----

```

C Detailresultaten berekeningen

1 Resultaten formule 3.10

In Tabel C.1a t/m C.1d zijn de relatieve bijdragen in procenten vermeld van de diverse variabelen alsmede de faalkans. Alvorens deze resultaten te bespreken worden de achtergronden van de gekozen waarden van de variabelen verduidelijkt.

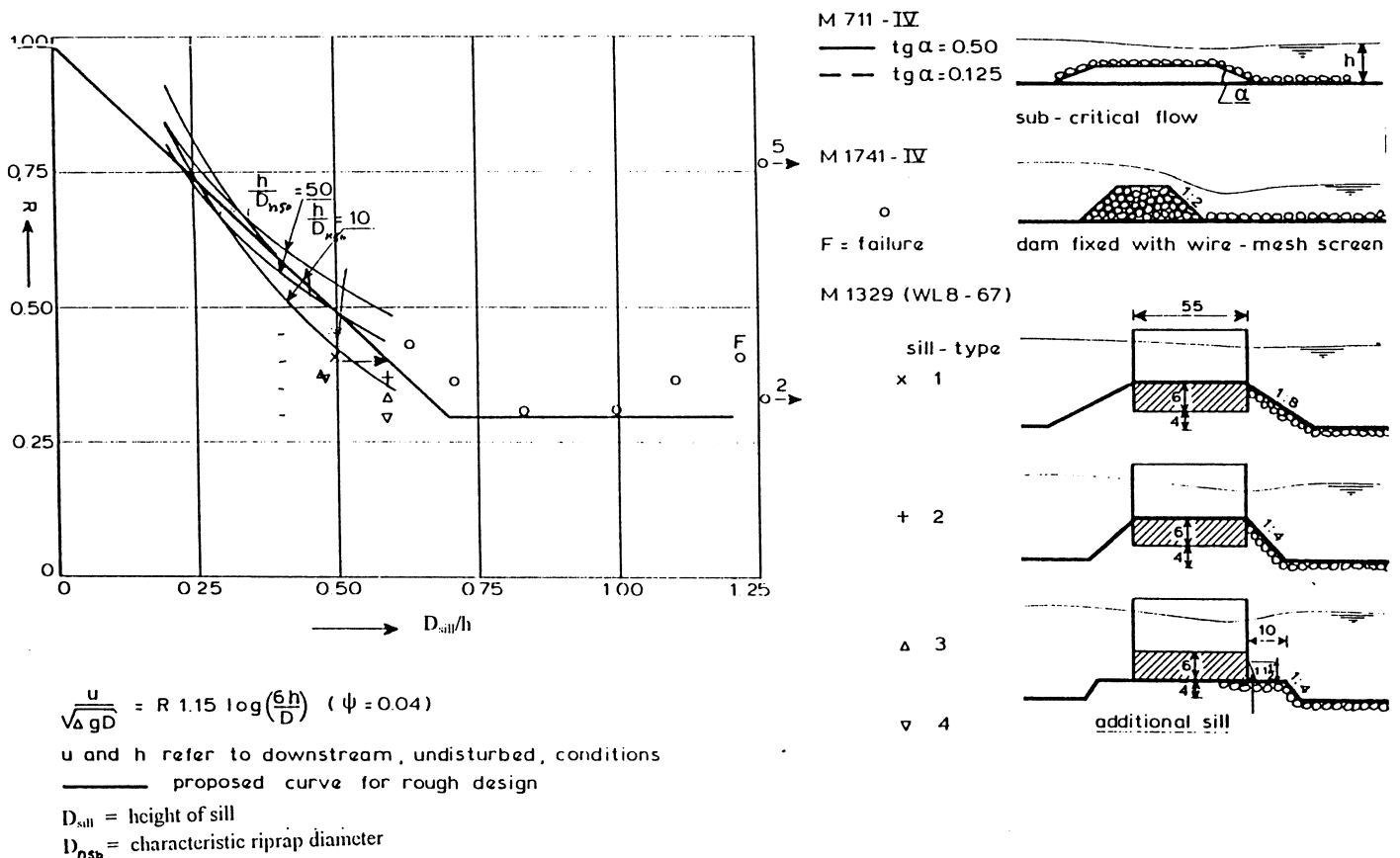
De betreffende waarden staan vermeld in Tabel 4.1. Gegeven een steensortering is bekend in welke range de waarde van D_{n50} ligt. Voor de sortering 40/200 kg houdt dit in dat de verwachtingswaarde ligt tussen 0.32 - 0.37 m. Op basis hiervan is gesteld: $\mu(D_{n50}) = 0.345$ m en $\sigma(D_{n50}) = 0.015$ m ($4\sigma = 0.05 = 0.37 - 0.32$).

De gemiddelde waarde voor de Shieldsparameter is gesteld op 0.04 met een standaardafwijking van 0.005 (gesteld is: $2\sigma = 0.01$). De waarde 0.04 is een gebruikelijke waarde voor stabiliteitsbeschouwingen (zonder veiligheid) en is bovendien conform de ontwerpgrafiek Figuur C.1 (zie Figuur C.2 voor de beschouwde situatie).

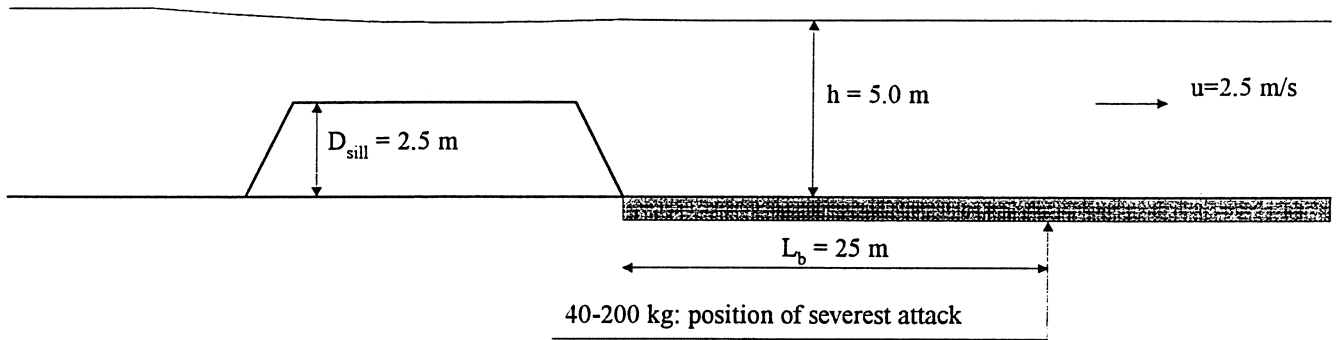
Wat betreft de stroomsnelheid is aangenomen dat deze met een nauwkeurigheid van ongeveer 10% kan worden bepaald. Voor de standaardafwijking betekent dit een waarde van 0.10 m/s.

De verwachtingswaarde voor de turbulentiecoëfficiënt r_u is afgelezen uit Figuur C.3 (Hoffmans en Booij, 1993). Voor $L/h = 5$ volgt $r_u = 0.3$ met een spreiding van 0.05, wat voor de standaardafwijking een waarde van 0.025 betekent.

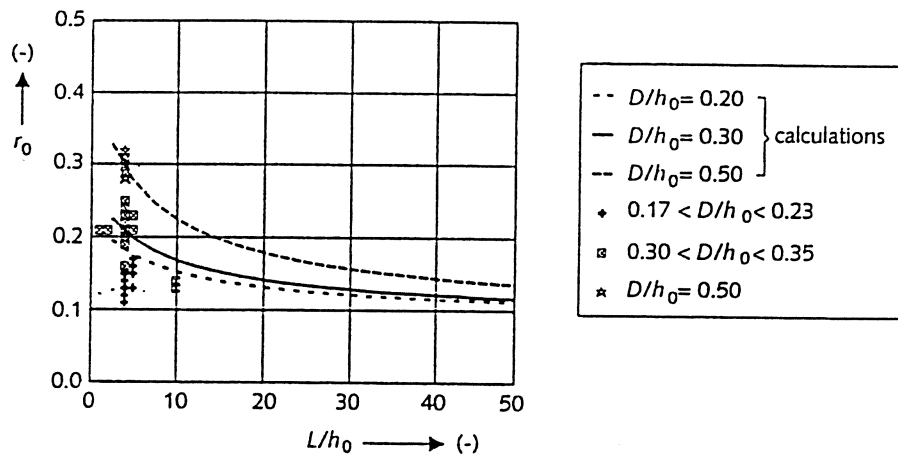
De gekozen waarden voor ρ_s , ρ en g spreken voor zich.



Figuur C.1 Stabiliteitsanalyse voor bodemverdediging benedenstrooms van een drempel



Figuur C.2 Schets van de situatie voor de onderzochte case (basisvariant)



Figuur C.3 Relatieve turbulentie-intensiteit als functie van L/h

Bij de 2e benadering zijn waarden nodig voor C en c_s . Met de gegeven formules (Hoofdstuk 3 of Bijlage A) en substitutie van de in Tabel 4.1 vermelde waarden voor variabelen volgt: $\mu(C) = 33$ en $\sigma(c_s) = 0.068$. Voor $\sigma(C)$ is een waarde gekozen van 3, voor $\sigma(c_s) = 0.015$.

Bij de 3e benadering moeten ook standaardafwijkingen worden opgegeven voor de drempelconstructie en de aangrenzende bodembescherming. Verondersteld is dat deze nauwkeurig bekend zijn.

Verder moet voor c_s een σ worden opgegeven. Verondersteld is dat de waarde van c_s voor een steenbestorting kan variëren tussen 1.5 en 3.5 (onregelmatigheid in aangebrachte bestorting) en daarmee resulteert een σ van 0.5.

1e benadering (tabel C.1a)

Beschouwen we eerst Tabel C.1a (1e benadering) dan staan daarin aangegeven een aantal berekeningen met per berekening kolommen met de ingevoerde standaardafwijkingen voor de

betreffende variabelen, kolommen met de berekende bijdrage van die variabele aan de faalkans, en een laatste kolom met de voorspelde faalkans.

De verschillende berekeningen zullen nu achtereenvolgens worden toegelicht.

S310-001

Gegeven de ingevoerde uitgangspunten blijkt bij een $\sigma(r_u) = 0.025$ de bijdrage van de turbulentiecoëfficiënt r_u aan de faalkans 61% te zijn. In veel mindere mate dragen ψ en u bij aan de faalkans.

De variabelen gerelateerd aan de sterkte, steendiameter en -dichtheid, dragen in geringe mate bij (beide minder dan 5%).

De faalkans bedraagt 99% en is niet realistisch en sluit niet aan bij wat gevoelsmatig zou worden verwacht; dit houdt verband met de factor 0.7 (op te vatten als een modelonzekerheid). Hierop zal in het vervolg van deze paragraaf worden teruggekomen bij S310-006 en S310-025. Nu wordt alvast wel opgemerkt dat de absolute grootte van de faalkans voor het vergelijken van de onderlinge relatieve bijdragen hier weinig verschil maakt.

S310-002

De standaardafwijking van r_u is in deze berekening verlaagd tot 0.01. Dit resulteert in een verlaging van de relatieve bijdrage tot 18%. De relatieve bijdragen van de andere variabelen nemen toe en wel zodanig dat ψ met 37% de grootste bijdrage gaat leveren.

S310-003

Verlaging van $\sigma(\psi)$ tot 0.0025 reduceert de bijdrage van ψ tot 15% en leidt er toe dat de bijdrage van u de grootste wordt.

S310-004

Om de invloed van een grotere onzekerheid in u aan te geven is een berekening uitgevoerd met $\sigma(u) = 0.25$ m/s. Vergelijken we het resultaat met S310-001 dan zien we dat de onzekerheid in r_u nog altijd maatgevend is met 61%, maar nu gevolgd door de onzekerheid in u met 23% (bij S310-001 stond ψ tweede).

S310-005

Reduceren van de onzekerheid in r_u ten opzichte van die in S310-004, doet de bijdrage van u stijgen van 23% tot 72%, terwijl die van ψ zakt van 61% naar 6%.

S310-005 kan ook worden vergeleken met S310-001 en dan zien we een vergelijkbaar effect: daling van de bijdrage van r_u van 61% tot 6% en stijging van de bijdrage van u van 11% tot 72%. Het effect van de verlaging van $\sigma(r_u)$ is kennelijk ongeveer gelijk aan het effect van de vergroting van $\sigma(u)$.

S310-006

Zoals eerder aangegeven zijn de berekende faalkansen niet realistisch. De berekeningen 001 t/m 005 zijn uitgevoerd met $\mu(r_u) = 0.3$, een factor van 0.7 (= c_1) in de formule, en een steendiameter van 0.345 m.

Er zijn aanwijzingen dat de factor 0.7 in de formule te hoog is in geval van niet-uniforme stromingscondities (0.7 is het product van turbulentiecoëfficiënten waarvoor in geval van uniforme stroming waarden bekend zijn (zie Bijlage A), maar niet voor niet-uniforme

condities). Daarom zijn enkele aanvullende berekeningen uitgevoerd om realistische faalkansen te verkrijgen. Het maakt daarbij in principe niet uit welke van de variabelen r_u , 0.7 of D wordt gewijzigd, er kan eenzelfde effect mee worden bereikt.

Bij berekening S310-006 is gerekend met $\mu(r_u) = 0.2$ (meest eenvoudige aanpassing, want voor een lagere factor dan 0.7 moet in de programmatuur worden ingegrepen). Verder zijn de waarden gelijk aan die in S310-001.

Het resultaat is een faalkans van 20%, terwijl de relatieve bijdragen niet noemenswaardig veranderen ten opzichte van S310-001. Uit dit resultaat blijkt niet alleen het grote belang van goede gegevens wat betreft gemiddelde waarden, maar ook dat de veronderstelling juist is, namelijk dat de formule niet correct is. De waarde van 0.7 geldt uitsluitend voor uniforme condities; voor niet-uniforme condities is een lagere waarde dan 0.7 van toepassing.

S310-025

Teneinde de voorgaande veronderstelling te toetsen is formule 3.10 opnieuw geprogrammeerd, nu met een factor 0.4 in plaats van 0.7. In de berekening is een $\mu(r_u) = 0.3$ en een steendiameter van 0.38 m toegepast. De steendiameter is een nauwkeuriger schatting, gebruik makend van Figuur 4.1 (hierbij is de waarde van R iets anders gekozen) en niet gerelateerd aan een op de markt zijnde steensortering.

Uit het resultaat blijkt dat de faalkans nu 51% bedraagt, wat goed aansluit bij wat gevoelsmatig mag worden verwacht als zonder veiligheid een bestorting wordt dimensioneerd die juist stabiel is volgens experimentele gegevens.

De bijdragen van de afzonderlijke variabelen aan de onzekerheid zijn hier niet gepresenteerd maar zijn vergelijkbaar met het antwoord bij S310-006.

2e benadering (Tabel C.1b)

In plaats van r_u worden nu waarden voor c_s en C gebruikt. Welke in eerste aanleg zijn gebruikt, is eerder uiteengezet. Deze zijn consistent met de berekeningen bij de 1e benadering, maar niet identiek: voor $\mu(r_u)$ volgt met de berekende waarde voor c_s : $\mu(r_u) = 0.284$ in plaats van de eerder genomen waarde 0.3. Deze verschillen zijn echter niet relevant in het kader van deze studie.

De resultaten zijn weergegeven in Tabel C.1b.

S310-101

Voor $\sigma(c_s)$ is in eerste instantie een waarde van 0.015 gekozen. Dit resulteert in een bijdrage aan de faalkans van 71% en verder min of meer vergelijkbare bijdragen als bij S310-001 (bijdrage C slechts 2%). In plaats van de variabele r_u is nu c_s de bepalende factor geworden.

S310-102

De waarde van $\sigma(c_s)$ is verlaagd naar 0.005, maar nog altijd blijkt deze onzekerheid de grootste bijdrage te leveren. De relatieve bijdrage van ψ en u is echter toegenomen.

S310-103

De onzekerheid in u is vergroot en direct is het effect te zien in de bijdrage van 70%. Deze berekening is vergelijkbaar met S310-005.

Vastgesteld kan worden dat de tendenzen gelijk zijn aan die bij de 1e benadering.

S310-104

Evenals bij de 1e benadering zijn de faalkansen te hoog. Daarom is ook hier een berekening gemaakt om een meer realistische faalkans te produceren. In analogie met S310-006 is gekozen voor een lagere waarde van c_s zodanig dat $\mu(r_u) = 0.2$. Dit resulteert in $\mu(c_s) = 0.027$. Zoals mocht worden verwacht is de faalkans nu meer realistisch (26%). Overigens is deze niet exact gelijk aan die bij S310-006, omdat andere gemiddelde waarden invloed hebben op de faalkans.

3e benadering (Tabel C.1c)

Nu moeten waarden voor h , D_{sill} en c_s worden gebruikt. Welke in eerste aanleg zijn gebruikt, is eerder uiteengezet. Deze zijn consistent met de berekeningen bij de 1e benadering.

De resultaten staan in Tabel C.1c.

S310-201

Gegeven de invoerwaarden leveren achtereenvolgens ψ , u en D_{sill} de grootste bijdragen. De bijdrage van c_s blijkt gering. Aan de waarde van $\sigma(D_{sill})$ is weinig te veranderen (onveranderbaar gegeven). De waarde van $\sigma(\psi)$ zou lager kunnen worden aangehouden.

S310-202

De onzekerheid in c_s is vergroot, maar dit leidt niet tot een significant grotere bijdrage.

S310-203

In deze berekening is de waarde van $\sigma(\psi)$ verlaagd. Dit blijkt duidelijk te resulteren in een groter belang van de bijdrage van u (stijging tot 34%).

S310-201a t/m S310-203a

Dit betreft identieke berekeningen als S310-201 t/m S310-203, met dien verstande dat de drempelhoogte 2 m bedraagt in plaats van 2.5 m. De resultaten zijn verder vergelijkbaar. Wel is de faalkans geringer, wat logisch is gezien de geringere turbulentie.

Overigens zou bij een andere drempelhoogte ook moeten worden gerekend met een andere steendiameter, etc. Dat is hier achterwege gelaten.

variëren gemiddelde waarden (Tabel C.1d)

In Tabel C.1d staan resultaten van berekeningen waarbij is "gespeeld" met de gemiddelde waarden van sommige variabelen. Het gaat om zowel berekeningen volgens de 1e benadering en volgens de 2e benadering.

De verschillende kolommen geven per variabele nu de ingevoerde gemiddelde waarde weer, de bijdragen van de standaardafwijking aan de onzekerheid, en de faalkans.

S310-001 en S310-051

Bij deze berekeningen is de waarde van $\mu(r_u)$ gevarieerd. De faalkans wijzigt daardoor van 99% in 20%.

Overigens is dit een resultaat wat al eerder aan de orde is geweest. S310-051 is namelijk gelijk aan S310-006 en bij de bespreking van laatstgenoemde berekening is hier reeds op ingegaan.

S310-052

Ten opzichte van S310-051 is de stroomsnelheid verlaagd tot 2 m/s. Dit leidt tot een lagere faalkans: 1% (vergelijk met 20% bij S310-051).

Verder blijven de bijdragen van de afzonderlijke variabelen orde van grootte gelijk.

S310-053

De steendiameter is vergroot (sortering 60/300 kg). Ten opzichte van S310-051 (gelijke u) reduceert de faalkans tot 7%, maar ten opzichte van S310-052 (verhoogde u) stijgt de faalkans.

S310-054

Dit betreft een berekening voor een andere conditie (feitelijk een andere case). De drempelhoogte bedraagt nog steeds 2.5 m, maar de waterdiepte is nu 10 m. Gebruikmakend van Figuur 4.1 en de beschikbare sorteringen zou een sortering 40-200 mm met $D_{n50} = 0.0634$ mm voldoen. Dit betekent voor r_u een waarde van 0.20, $c_s = 0.0344$, en $C = 52$.

Zoals mocht worden verwacht zijn de resultaten vergelijkbaar, dat wil zeggen r_u levert vanuit de grootste bijdrage.

S310-101, 104, 154, 155 en 156

Deze berekeningen zijn analoog aan voorgaande en de resultaten spreken verder voor zich.

samenvatting

Uit het voorgaande kan worden geconcludeerd dat de onzekerheden in de belasting bepalend zijn voor de grootte en de onzekerheid van het eindantwoord. De sterkte gaat pas een rol spelen als de onzekerheden in belastingvariabelen klein zijn; hierbij speelt een rol de uniforme gradering van het gekozen materiaal voor de bodemverdediging in deze berekeningen.

Als we het totale resultaat beschouwen dan kan de volgende prioriteitsvolgorde worden opgesteld:

* 1e en 2e benadering: $r_u/c_s - u - \psi$

* 3e benadering: $u - D_{sill} - \psi$

Opgemerkt wordt dat het gaat om de standaardafwijkingen, uitgezonderd in geval van D_{sill} waar het de invloed van de verwachtingswaarde betreft.

Een andere belangrijke conclusie is dat formule 3.10 in deze vorm met een factor $c_1 = 0.7$ alleen juist is voor uniforme stromingscondities. De waarde van c_1 zal ergens tussen de 0.4 en 0.6 liggen bij niet-uniforme condities en experimenteel (of aan de hand van eerdere

meetresultaten) moeten worden bepaald. Dit blijkt ook uit een analyse van deze formule met experimentele gegevens van de stabiliteit van verdedigingsconstructies benedenstrooms van drempels, etc; daarbij (Hoffmans et al, 1998) wordt een factor 0.55 gevonden.

Tenslotte wordt vermeld dat in Bijlage B voorbeelden zijn gepresenteerd van uitkomsten van berekeningen met het Afda pakket. In het specifieke geval van formule 3.10 betreft het de berekeningen S310-001, S310-051, en S310-201.

2 Resultaten formule 3.13

Analoog aan het voorgaande zijn in de Tabellen C.2a t/m C.2b de resultaten van de 1e en 2e benadering gepresenteerd. Voor de waarden van de variabelen wordt verwezen naar Tabel 4.2. Een nadere toelichting vereisen de waarden voor ψ^1 en $k_{3,13}$. Formule 3.13 wordt daartoe als volgt geschreven:

$$k_{3,13} \frac{u^2}{C^2 \Delta D} = \psi^1 = 1.54 \psi \quad (\text{C.1})$$

$$\text{met } k_{3,13} = \left(\frac{1 + r_r \gamma}{1 - r_{tr} \gamma} \right).$$

De factor 1.54 is bepaald uit de relatie tussen Shields en Grass voor uniforme stromingscondities, waarbij geldt: $r_r = 0.4$, $r_{tr} = 0.3$ en $\gamma = 0.625$ wat resulteert in 1.54.

Opgemerkt wordt dat in uniforme condities dus geldt: $k_{3,13} = 1.54$ en voor niet-uniforme condities: $k_{3,13} \neq 1.54$.

Voor de onderhavige situatie is van belang dat overeenkomstige probabilistische berekeningen worden gemaakt om de resultaten onderling te kunnen vergelijken. Daartoe is $k_{3,13}$ bepaald aan de hand van formule 3.10 die daartoe is geschreven als:

$$k_{3,10} \frac{u^2}{C^2 \Delta D} = \psi \quad \text{met} \quad k_{3,10} = 0.7 r_u^2 \frac{C^2}{g} \quad (\text{C.2})$$

Vergelijken van de formules C.1 en C.2 geeft een relatie tussen $k_{3,13}$ en $k_{3,10}$:

$$k_{3,13} = 1.54 k_{3,10}$$

Substitutie van $r_{tr} = 0.3$, $C = 33 \text{ m}^{0.5}/\text{s}$ en $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ resulteert in $k_{3,13} = 7.0 * 1.54 = 10.8$. Deze waarden voor $k_{3,10}$ en $k_{3,13}$ lijken hoog maar zijn qua orde van grootte overeenkomstig de waarde van de k-factor zoals die voorkomt in de formule (zie formule 3.6 in Q2395.10):

$$\frac{k^2 u^2}{C^2 \Delta D} = \psi \quad (\text{C.3})$$

Een waarde van 2.6 voor k in (C.3) betekent een waarde van $k_{3,10} = 7.0$; evenzo betekent $k = 3.3$ dat $k_{3,13} = 10.8$.

Voor de 2e benadering moesten waarden voor r_τ , r_{tr} en γ worden gesubstitueerd. Hiertoe wordt gebruik gemaakt van de definitie van $k_{3,13}$. Aangenomen wordt dat $\gamma = 0.625$ en dat de sterkte een normale verdeling heeft, dus $r_{tr} = 0.3$. Substitutie van deze waarden met $k_{3,13} = 10.8$ leidt tot $r_\tau = 12.44$. Dit is een zeer hoge waarde, wat als volgt kan worden verklaard. Bij de afleiding van formule 3.13 is verondersteld dat sprake is van een normale verdeling van de belasting, dus $\alpha_e = 3$. Bekend is dat bij hoog-turbulente stromingen de verdelingen scheef zijn met voor α_e waarden groter dan 3. Het niet in rekening brengen van deze scheefheid (wat wel zal gebeuren bij formule 3.21) is de oorzaak van de hoge waarde voor r_τ .

1e benadering (Tabel C.2a)

S313-001

Met standaardafwijkingen voor C en $k_{3,13}$ van respectievelijk 3 en 1 en verder gelijke waarden als bij formule 3.10 blijken de bijdragen aan de onzekerheid in de faalkans van C en $k_{3,13}$ met respectievelijk 47% en 20% het grootst. Het feit dat de bijdrage van $k_{3,13}$ niet de grootste is komt door de relatief lage waarde (grote veronderstelde nauwkeurigheid) voor de standaardafwijking.

S313-002

De nauwkeurigheid van $k_{3,13}$ is vergroot wat leidt tot een geringere bijdrage van die variabele.

S313-003

Een verdere reductie van $\sigma(k_{3,13})$ maar tevens van $\sigma(C)$ leidt er toe dat de bijdrage van de stroomsnelheid het grootst wordt.

S313-004 en S313-005

Bij deze berekeningen is de standaardafwijking van u vergroot. Het effect is dat de bijdrage van u het grootst wordt (vergelijk daartoe met S313-001 en S313-002).

S313-006

In deze berekening geldt $\sigma(k_{3,13}) = 2$ met verder gelijke waarden als bij S313-001. Duidelijk blijkt nu dat de onzekerheid in $k_{3,13}$ bepalend wordt, zoals bij S313-001 reeds opgemerkt.

S313-007

Ten opzichte van de vorige berekening zijn de onzekerheden van C en $k_{3,13}$ verkleind. Het relatieve belang van de onzekerheid in u neemt nu toe, maar nog altijd levert $k_{3,13}$ de grootste bijdrage.

S313-051

Analoog aan formule 3.10 blijkt ook bij voorgaande berekeningen dat de faalkansen te hoog zijn. De reden in dit geval heeft niet te maken met onjuistheden in formule 3.13, maar met het feit om vergelijkbare resultaten te verkrijgen waarden voor $k_{3,13}$ zijn ontleend aan formule 3.10 met de onjuiste factor 0.7.

Om reële faalkansen te produceren is ook een berekening uitgevoerd met $k_{3,13} = 4.5$ ($= k_{3,10} k_{ref} = 3.0 * 1.54$; factor 3.0 kan worden afgeleid uit (4.2) met $r_u = 0.2$). Dit geeft een faalkans van 16%.

*2e benadering (Tabel C.2b)*S313-101

In plaats van k_{313} is nu gerekend met waarden voor r_τ , r_{tr} en γ . Uit het resultaat blijkt dat γ veruit de grootste bijdrage levert. De aangehouden nauwkeurigheid van r_τ lijkt aan de hoge kant.

S313-102

Ten opzichte van S313-101 is de onzekerheid in γ verkleind. Dit geeft een lagere bijdrage van die variabele (die overigens wel de grootste blijft) en een hogere van C.

S313-103

De onzekerheid in r_τ is nu vergroot en nu levert deze een substantiele bijdrage die in dezelfde orde is als γ en C.

S313-104 en S313-105

Bij de berekeningen tot nu toe is steeds uitgegaan van $\gamma = 0.625$, een resultaat dat is verkregen voor begin van bewegen bij uniforme stroming, overeenkomstig het Shields-criterium ($\psi = 0.06$). Waarschijnlijk was het beter geweest te rekenen met $\gamma = 1.0$, omdat dit beter aansluit bij $\psi = 0.04$.

Bij beide onderhavige berekeningen is met $\gamma = 1.0$ gerekend, waarbij de volgende waarde is af te leiden: $r_\tau = 6.56$.

Als $\sigma(r_\tau)$ is respectievelijk 2 en 1 dan volgen voor r_τ grotere bijdragen dan bij de vergelijkbare berekeningen S313-101 en S313-102.

samenvatting

Analoog aan de conclusies bij formule 3.10 geldt ook hier dat de grootste bijdragen aan de onzekerheid voortkomen uit de onzekerheden in de belasting: mate van turbulentie en (in mindere mate) stroomsnelheid. Echter ook de onzekerheid in γ blijkt belangrijk.

In volgorde:

* 1e benadering: $k_{3.13} - u - C$

* 2e benadering: $r_\tau - \gamma - u$

Opgemerkt wordt dat het relatieve belang van C bij de 1e benadering wordt veroorzaakt door de relatie tussen C en u.

Verder is het van belang op te merken dat niet wordt aanbevolen met formule 3.13 verder te gaan. De reden hiervoor is dat α_s ontbreekt in de formule terwijl dit relevant lijkt te zijn bij niet-uniforme stroming.

Tenslotte zijn in Bijlage B van de volgende berekeningen voorbeelden van resultaten gepresenteerd: S313-006 en S313-101.

3 Resultaten formule 3.20

De resultaten staan vermeld in de Tabellen C.3a en C.3b, terwijl de invoer in Tabel 4.3 staat gepresenteerd. De achtergronden bij enkele ingevoerde waarden zullen nu eerst worden toegelicht.

Voor uniforme condities is de volgende gelijkheid op te stellen:

$$\frac{u^2}{C^2 \Delta D} = \frac{u_b^2}{c_b^2 \Delta D} \quad (\text{C.4})$$

waaruit is af te leiden:

$$c_b = C \frac{u_b}{u} \quad (\text{C.5})$$

In eerste instantie is u_b bepaald op een afstand vanaf de bodem van $2.5 k_s$ met $k_s = 2.5 D_{n50}$, wat leidt tot een afstand van circa 2.0 m. Dit is 0.4 keer de waterdiepte h en derhalve geldt voor $u_b = u = 2.5$ m/s. Dit is in deze situatie niet reëel en daarom is gekozen voor u_b op een hoogte van 1.0 m boven de bodem. Voor $u(1)$ geldt:

$$u(1) = \kappa^{-1} \sqrt{ghi} \ln(z / z_0) \quad (\text{C.6})$$

Voor i geldt: $i = u^2 / (hC^2)$ en voor z_0 : $z_0 = 0.033 k_s$. Substitutie van bekende waarden leidt tot: $i = 0.00115$ en $u_b = u(1) = 2.1$ m/s.

Met vgl(C.5) volgt verder: $c_b = 28$ (voor de standaardafwijking is een waarde van 3 aangehouden).

Voor de waarde van $k_{3,20}$ is een zelfde type redenering aangehouden als voor de afleiding van $k_{3,13}$:

$$\frac{k_{3,13}}{1.54} \frac{u^2}{C^2 \Delta D} = k_{3,20} \frac{u_b^2}{c_b^2 \Delta D} \quad (\text{C.7})$$

Hieruit volgt:

$$k_{3,20} = \left(\frac{c_b^2 u^2 k_{3,13}}{C^2 u_b^2 1.54} \right)^{0.5} = \left(\frac{k_{3,13}}{1.54} \right)^{0.5} = (k_{3,10})^{0.5} \quad (\text{C.8})$$

Voor de eerder berekende waarden volgt nu voor $k_{3,20}$ een waarde van 2.64.

Bij de 2e benadering geldt

$$k_{3,20} = c_6 / c_{6ref} = c_6 / 1.45 \quad \text{en} \quad c_6 = 1 + \alpha_e r_{u,b} \quad (\text{C.9})$$

waaruit vervolgens is af te leiden: $c_6 = 3.85$, en met $\alpha_e = 5$ (aanname) verder $r_{u,b} = 0.57$.

*1e benadering (Tabel C.3a)*S320-001

Eevenals bij de eerdere berekeningen blijkt de onzekerheid in $k_{3,20}$ een grote bijdrage te leveren. Als tweede volgt nu de onzekerheid in c_b .

S320-002

Reduceren van de onzekerheid in $k_{3,20}$ doet de bijdrage van $k_{3,20}$ afnemen (tot 38%) en die van c_b toenemen (tot 34%).

S320-003

Ten opzichte van S320-001 is nu de onzekerheid in de stroomsnelheid vergroot, waardoor deze direct de grootste bijdrage levert.

S320-051

Analoog aan de eerdere formules is ook weer een berekening uitgevoerd met een lagere verwachtingswaarde voor $k_{3,20}$ namelijk 1.70 (bij $k_{3,13} = 4.5$; zie S313-051)) teneinde meer realistische faalkansen te verkrijgen.

De faalkans blijkt nu 29%, terwijl de afzonderlijke bijdrage in de orde zijn zoals bij S320-001.

*2e benadering (Tabel C.3b)*S320-101

Deze berekeningen met $r_{u,b}$, α_c en c_b laten significante bijdragen van genoemde variabelen zien aan de onzekerheid. De bijdrage van de snelheid is relatief beperkt.

S320-102

Vergroten van de standaardafwijking van u doet die bijdrage toenemen onder gelijktijdige afname van de bijdragen van de eerder genoemde variabelen.

S320-103

Als de standaardafwijking van α_c wordt verkleind terwijl die van de andere gelijk is aan die bij S320-101 dan zien we dat de bijdrage van c_b het grootst wordt.

samenvatting

Opnieuw blijken de grootste bijdragen aan de grootte en de onzekerheid van het eindantwoord voort te komen uit de onzekerheden in de belasting: mate van turbulentie en (in mindere mate) stroomsnelheid. Nu speelt ook de onzekerheid in c_b een rol. De volgende volgorde kan worden aangegeven:

* 1e benadering: $k_{3,20} - c_b$

* 2e benadering: $\alpha_c/r_{u,b} - c_b$

In Bijlage B zijn van de volgende berekeningen voorbeelden van resultaten gepresenteerd: S320-001 en S320-101.

4 Resultaten formule 3.21

De Tabellen C.4a en C.4b bevatten de resultaten van de probabilistische sommen en Tabel 4.4 bevat de invoergegevens. Ter toelichting het volgende.

Voor c_b en u_b zijn gelijke waarden aangehouden als bij formule 3.20, terwijl voor ψ^{11} een zelfde waarde is gehanteerd als bij 3.13, te weten 0.062 (1.54 * 0.04).

Voor $k_{3,21}$ kan een analoge redenering worden opgezet als gedaan bij $k_{3,13}$:

$$k_{3,21} \frac{u_b^2}{c_b^2 \Delta D} = 1.54 \psi \quad (\text{C.10})$$

Hieruit is in combinatie met de vgl.(C.2) af te leiden dat voor $k_{3,21}$ geldt:

$$k_{3,21} = 1.54 k_{3,10} \frac{u^2}{u_b^2} \frac{c_b^2}{C^2} = 1.54 k_{3,10} \quad (\text{C.11})$$

Dit betekent dat $k_{3,21} = 10.8$.

Voor de 2e benadering zijn waarden voor α_e , α_{er} , r_r , r_{tr} en γ nodig. Deze zijn bepaald uit de definitie voor $k_{3,21}$. Voor $\gamma = 0.625$, $\alpha_{er} = 3$, $r_{tr} = 0.3$ (aannames) en $\alpha_e = 5$ volgt voor $r_r = 7.50$.

1e benadering (Tabel C.4a)

S321-001

Uit de berekening blijkt dat c_b de grootste bijdrage levert, gevolgd door u_b en $k_{3,21}$.

S321-002

Verkleining van de onzekerheid in c_b leidt tot ongeveer gelijke bijdragen van u_b en $k_{3,21}$, terwijl die van c_b sterk afneemt.

Evenals bij formule 3.13 is bij de uitgevoerde berekeningen de nauwkeurigheid in $k_{3,21}$ mogelijk te hoog verondersteld (zie S313-006). Een berekening met een grotere onnauwkeurigheid is nu echter niet uitgevoerd.

S321-051

Ook nu is een berekening uitgevoerd met een lagere k-waarde: $k_{3,21} = 4.5$. Het leidt tot een faalkans van 16%.

2e benadering (Tabel C.4b)

S321-101

De berekeningen met de volledige formule laten zien dat de grootste bijdragen aan de onzekerheid worden geleverd door de variabelen c_b , α_e en γ .

S321-102

Reductie van de onnauwkeurigheid in α_c leidt tot sterke afname van die variabele aan de onzekerheid, een gelijk blijven van c_b en γ , terwijl de bijdrage van r_τ van belang wordt.

S321-103 en S321-104

Analoog aan de berekeningen S313-104 en S313-105 zijn twee berekeningen uitgevoerd met $\gamma = 1$ waarbij verder geldt $r_\tau = 4.0$.

Uit het resultaat blijkt met name dat de bijdrage van r_τ van groter belang wordt (ten opzichte van S321-101).

samenvatting

De gevoeligheidsanalyses laten zien dat de belastingparameters de meeste onzekerheid veroorzaken, in volgorde:

- * 1e benadering: $k_{3,21} - u_b$
- * 2e benadering: $\alpha_c / r_\tau - \gamma / c_b$

Voorbeelden van berekeningsresultaten zijn gepresenteerd voor S321-001 en S321-101.

| Tabel C.1a | Resultaten formule 3.10: 1e benadering | | | | | | | | | | | | |
|---|--|----------|--------|--------------------------------------|----------|--------|----|-------|-----------|----------|--------|---|----------|
| berekening | ingevoerde σ | | | ψ | | | u | | | r_u | | | faalkans |
| | D_{n50} | ρ_s | | | | | | | | | | | |
| | | | | bijdrage aan faalkans (in procenten) | | | | | | | | | |
| | D_{n50} | ρ_s | | D_{n50} | ρ_s | ψ | u | r_u | D_{n50} | ρ_s | ψ | u | r_u |
| S310-001 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.025 | 3 | 5 | 19 | 11 | 61 | 0.99 | | |
| S310-002 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.01 | 6 | 12 | 37 | 27 | 18 | 0.99 | | |
| S310-003 | 0.015 | 100 | 0.0025 | 0.1 | 0.01 | 8 | 15 | 15 | 37 | 24 | 0.99 | | |
| S310-004 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.25 | 0.025 | 3 | 3 | 10 | 23 | 61 | 0.96 | | |
| S310-005 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.25 | 0.01 | 2 | 4 | 16 | 72 | 6 | 0.98 | | |
| S310-006 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.025 | 2 | 5 | 21 | 8 | 65 | 0.2 | | |
| S310-025 | | | | | | | | | | | | | 0.51 |
| NB. 001 t/m 005 met $\mu(r_u) = 0.3$; 006 met $\mu(r_u) = 0.2$ | | | | | | | | | | | | | |
| NB. 025 met $\mu(r_u) = 0.3$, $D_{50} = 0.38m$ en factor 0.4 ipv 0.7 | | | | | | | | | | | | | |

Tabel C.1a Formule 3.10 - 1e benadering

| Tabel C.1b | | Resultaten formule 3.10: 2e benadering | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------|--|--------|------|-------|---|-----------|-------|--------|----|-------|---|----------|
| berekening | ingevoerde σ | | | | | | | | | | | | faalkans |
| | D_{n50} | p_s | ψ | u | c_s | C | D_{n50} | p_s | ψ | u | c_s | C | |
| S310-101 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.015 | 3 | 2 | 4 | 15 | 7 | 71 | 2 | 0.95 |
| S310-102 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.005 | 3 | 6 | 12 | 38 | 25 | 42 | 3 | 0.99 |
| S310-103 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.25 | 0.005 | 3 | 2 | 4 | 17 | 70 | 5 | 1 | 0.96 |
| S310-104 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.015 | 3 | 2 | 3 | 13 | 5 | 76 | 2 | 0.26 |
| NB. 101 t/m 103 met $\mu(c_s) = 0.068$; 104 met $\mu(c_s) = 0.027$ | | | | | | | | | | | | | |

Tabel C.1b

Formule 3.10 - 2e benadering

| Tabel C.1c | Resultaten formule 3.10: 3e benadering | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|--|----------|--------|--------------------------------------|-----|------------|----------|----------|--------|-----|-----|------------|-------|---|------|
| | ingevoerde σ | | | bijdrage aan faalkans (in procenten) | | | faalkans | | | | | | | | |
| berekening | D_{n50} | ρ_s | ψ | u | h | D_{sill} | c_5 | ρ_s | ψ | u | h | D_{sill} | c_5 | | |
| S310-201 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 5 | 11 | 37 | 24 | 2 | 19 | 1 | 0.99 |
| S310-202 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 5 | 11 | 36 | 23 | 2 | 19 | 4 | 0.99 |
| S310-203 | 0.015 | 100 | 0.0025 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 7 | 15 | 16 | 34 | 3 | 24 | 1 | 0.99 |
| S310-201a | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 5 | 12 | 47 | 22 | 1 | 13 | 2 | 0.72 |
| S310-202a | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 5 | 11 | 42 | 20 | 1 | 12 | 6 | 0.72 |
| S310-203a | 0.015 | 100 | 0.0025 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 7 | 18 | 19 | 33 | 2 | 19 | 2 | 0.77 |
| 201a e.v.: $D_{sill} = 2\text{ m}$ | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabel C.1c Formule 3.10 - 3e benadering

| Tabel C.1d | Resultaten formule 3.10: Effect andere gemiddelde waarde | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------|--------|-----|--------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------|--------|----------|-------------------|---|----------|
| 1e benadering berekening ingevoerde μ | D_{n50} | ρ_s | ψ | u | r_u | bijdrage aan faalkans (in procenten) | | | r_u | faalkans | | | |
| | | | | | | D_{n50} | ρ_s | ψ | | | | u | |
| S310-001 | 0.345 | 2650 | 0.04 | 2.5 | 0.3 | 3 | 5 | 19 | 11 | 61 | 0.99 | | |
| S310-051 | 0.345 | 2650 | 0.04 | 2.5 | 0.2 | 2 | 5 | 21 | 8 | 65 | 0.2 idem S310-006 | | |
| S310-052 | 0.345 | 2650 | 0.04 | 2 | 0.2 | 2 | 5 | 28 | 12 | 53 | 0.01 | | |
| S310-053 | 0.415 | 2650 | 0.04 | 2.5 | 0.2 | 2 | 5 | 24 | 8 | 61 | 0.07 | | |
| S310-054 | 0.064 | 2650 | 0.04 | 2.5 | 0.2 | 8 | 2 | 6 | 3 | 82 | 0.99 | | |
| NB. $\sigma(r_u) = 0.025$ | | | | | | | | | | | | | |
| 2e benadering berekening ingevoerde μ | D_{n50} | ρ_s | ψ | u | c_s | C | bijdrage aan faalkans (in procenten) | | | u | c_s | C | faalkans |
| | | | | | | | D_{n50} | ρ_s | ψ | | | | |
| S310-101 | 0.015 | 1000 | 0.04 | 2.5 | 0.015 | 33 | 2 | 4 | 15 | 7 | 71 | 2 | 0.95 |
| S310-104 | 0.015 | 1000 | 0.04 | 2.5 | 0.015 | 33 | 2 | 3 | 13 | 5 | 76 | 2 | 0.26 |
| S310-154 | 0.415 | 1000 | 0.04 | 2.5 | 0.027 | 33 | 1 | 4 | 17 | 6 | 70 | 2 | 0.12 |
| S310-155 | 0.415 | 1000 | 0.04 | 2.5 | 0.027 | 33 | 3 | 8 | 46 | 12 | 24 | 7 | 0.03 |
| S310-156 | 0.064 | 1000 | 0.04 | 2.5 | 0.0344 | 52 | 12 | 3 | 9 | 6 | 69 | 2 | 0.79 |
| NB. S310-054 en S310-156 hebben betrekking op een andere case met $h = 10$ m en $D_{sill} = 2.5$ m | | | | | | | | | | | | | |

Tabel C.1d Formule 3.10 - variëren gemiddelde waarden

| Tabel C.2a | Resultaten formule 3.13: 1e benadering | | | | | | | | | | | | |
|--|--|-------|----------|------|---|------------|--------------------------------------|-------|----------|----|----|------------|----------|
| berekening | ingevoerde σ | | ψ^1 | u | C | $k_{3,13}$ | bijdrage aan faalkans (in procenten) | | | | C | $k_{3,13}$ | faalkans |
| | D_{n50} | p_s | | | | | D_{n50} | p_s | ψ^1 | u | | | |
| S313-001 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 3 | 1 | 3 | 6 | 11 | 13 | 47 | 20 | 0.99 |
| S313-002 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 3 | 0.5 | 4 | 8 | 13 | 16 | 55 | 5 | 0.99 |
| S313-003 | 0.015 | 100 | 0.0025 | 0.1 | 1 | 0.25 | 8 | 14 | 23 | 36 | 16 | 3 | 0.99 |
| S313-004 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.25 | 3 | 1 | 2 | 3 | 6 | 52 | 27 | 9 | 0.96 |
| S313-005 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.25 | 3 | 0.5 | 2 | 4 | 6 | 57 | 29 | 2 | 0.98 |
| S313-006 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 6 | 6 | 26 | 57 | 0.97 |
| S313-007 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 1 | 1 | 5 | 10 | 16 | 21 | 10 | 38 | 0.99 |
| S313-051 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 3 | 1 | 2 | 4 | 7 | 7 | 40 | 40 | 0.16 |
| NB. 001 t/m 007 met $\mu(k_{3,13}) = 10.8$; 051 met $\mu(k_{3,13}) = 4.5$ | | | | | | | | | | | | | |

Tabel C.2a Formule 3.13 - 1e benadering

| Tabel C.2b | | Resultaten formule 3.13: 2e benadering | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---------------------|--|----------|--------|-----|----------|--------|----------|-------|-------|-----|-----------|----------|--------|----|----------|--------|-------|-------|
| berekening | ingevoerde σ | bijdrage aan faalkans (in procenten) | | | | | | γ | r_t | r_r | C | faalkans | | | | | | | |
| | | D_{n50} | ρ_s | ψ | u | ρ_s | ψ | | | | | D_{n50} | ρ_s | ψ | u | ρ_s | ψ | r_t | r_r |
| S313-101 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.2 | 1 | 0.1 | 3 | 1 | 1 | 0.1 | 3 | 1 | 1 | 80 | 2 | 1 | 11 | 0.88 |
| S313-102 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 1 | 0.1 | 3 | 2 | 4 | 0.1 | 3 | 2 | 43 | 5 | 4 | 29 | 0.97 | |
| S313-103 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 2 | 0.1 | 3 | 2 | 3 | 0.1 | 3 | 2 | 34 | 22 | 3 | 25 | 0.96 | |
| S313-104 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 2 | 0.1 | 3 | 1 | 2 | 0.1 | 3 | 1 | 7 | 63 | 8 | 14 | 0.91 | |
| S313-105 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 1 | 0.1 | 3 | 2 | 4 | 0.1 | 3 | 2 | 15 | 23 | 15 | 29 | 0.96 | |
| NB. 101 t/m 103 met $\mu(r_c) = 12.5$; 104 en 105 met $\mu(r_r) = 6.5$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabel C.2b

Formule 3.13 - 2e benadering

| Tabel C.3a | | Resultaten formule 3.20: 1e benadering | | | | | | | | | | | |
|--|---------------------|--|-------|--------|-------|-------|------------|-----------|-------|--------|-------|-------|------------|
| berekening | ingevoerde σ | bijdrage aan faalkans (in procenten) | | | | | | faalkans | | | | | |
| | | D_{n50} | p_s | ψ | u_b | c_b | $k_{3,20}$ | D_{n50} | p_s | ψ | u_b | c_b | $k_{3,20}$ |
| S320-001 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 3 | 0.5 | 1 | 1 | 5 | 3 | 15 | 74 | 0.93 |
| S320-002 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 3 | 0.25 | 2 | 3 | 13 | 9 | 34 | 38 | 0.98 |
| S320-003 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.25 | 3 | 0.5 | 1 | 2 | 8 | 45 | 23 | 21 | 0.96 |
| S320-051 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 3 | 0.5 | 1 | 1 | 5 | 3 | 14 | 77 | 0.29 |
| NB. 001 t/m 003 met $\mu(k_{3,20}) = 2.85$; 051 met $\mu(k_{3,20}) = 1.7$ | | | | | | | | | | | | | |

Tabel C.3a Formule 3.20 - 1e benadering

| Tabel C.3b | | Resultaten formule 3.20: 2e benadering | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------------------|--|--------------------------------------|-------|-----------|------------|-------|-----------|----------|----------|-------|-----------|------------|-------|------|
| berekening | ingevoerde σ | | bijdrage aan faalkans (in procenten) | | | | | | | faalkans | | | | | |
| | D_{n50} | ρ_s | ψ | u_b | $r_{u,b}$ | α_e | c_b | D_{n50} | ρ_s | ψ | u_b | $r_{u,b}$ | α_e | c_b | |
| S320-101 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 6 | 4 | 31 | 40 | 17 | 0.85 |
| S320-102 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.25 | 0.1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 5 | 21 | 25 | 32 | 14 | 0.82 |
| S320-103 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.05 | 0.5 | 3 | 2 | 3 | 13 | 9 | 17 | 21 | 35 | 0.93 |

Tabel C.3b Formule 3.20 - 2e benadering

| Tabel C.4a | Resultaten formule 3.21: 1e benadering | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----------|-------|-------------|-------|------------|--------------------------------------|----------|-------------|----------|-------|------------|----|------|
| berekening | ingevoerde σ | | | ψ^{11} | | | bijdrage aan faalkans (in procenten) | | | faalkans | | | | |
| | D_{n50} | ρ_s | u_b | ψ^{11} | c_b | $k_{3,21}$ | D_{n50} | ρ_s | ψ^{11} | u_b | c_b | $k_{3,21}$ | | |
| S321-001 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 3 | 1 | 3 | 5 | 9 | 15 | 52 | 15 | 0.98 |
| S321-002 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 1 | 1 | 5 | 9 | 15 | 28 | 13 | 31 | 0.99 |
| S321-051 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 3 | 1 | 2 | 3 | 6 | 8 | 47 | 34 | 0.16 |
| NB. 001 t/m 007 met $\mu(k_{3,21}) = 10.8$; 051 met $\mu(k_{3,21}) = 4.5$ | | | | | | | | | | | | | | |

Tabel C.4a

Formule 3.21 - 1e benadering

| Tabel C.4b | Resultaten formule 3.21: 2e benadering | | | | | | | | | | faalkans | | | | | | | | |
|---|--|----------|---------------------|-------|-------------|-------|------------|---------------|-------|-----------|----------|--------------------------------------|-------|-------|-------|------------|---------------|-------|----|
| | berekening | | ingevoerde σ | | ψ^{11} | | u_b | | 7 | | | bijdrage aan faalkans (in procenten) | | | | | | | |
| | D_{n50} | ρ_s | ψ^{11} | u_b | f_t | f_r | α_b | α_{gr} | c_b | D_{n50} | ρ_s | ψ^{11} | u_b | f_t | f_r | α_b | α_{gr} | c_b | |
| S321-101 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 1 | 0.1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 4 | 21 | 9 | 2 | 25 | 2 | 26 |
| S321-102 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 1 | 0.1 | 0.5 | 1 | 3 | 1 | 3 | 5 | 28 | 12 | 3 | 6 | 3 | 31 |
| S321-103 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 1 | 0.1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 3 | 7 | 31 | 6 | 18 | 6 | 21 |
| S321-104 | 0.015 | 100 | 0.005 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 2 | 4 | 9 | 8 | 8 | 26 | 8 | 27 |
| NB. 101 en 102 met $\mu(r_j) = 7.5$; 103 en 104 met $\mu(r_j) = 4.0$ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |



wL | delft hydraulics

Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl

