

Notitie

HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.
RIVERS, DELTAS & COASTS

Aan : Waterschappen WRO en WPM
Van : Albert Wiggers
Datum : 25 juni 2013
Kopie : Monique Sanders, Harm Snoeren, Mathijs Bos en
archief
Onze referentie : BC1054-100/N0001/AWI/MJANS/Nijm

**Betreft : Discussie-notitie m.b.t. aanpak geavanceerde
toetsing van leidingen in de nabijheid van
waterkeringen volgens de
restprofiel/faalkansanalyse**

Verschillende wijzen van geavanceerde toetsing

Een geavanceerde toetsing kan volgen op een eenvoudige toetsing of een gedetailleerde toetsing zoals beschreven in het VTV. Bij een eenvoudige toetsing kan de veiligheid van de dijk met de leiding worden beoordeeld op basis van de ligging van de leiding ten opzichte van de dijk of op basis van de eenvoudige sterkte regels uit NEN3651 waarbij gekeken wordt naar diameter-drukverhoudingen voor verschillende typen leidingen. Bij een gedetailleerde toetsing zijn er ook verschillende mogelijkheden: de faalmechanismen voor de waterkering worden beoordeeld volgens de beoordelingssporen van VTV (dus vanuit de dijk geredeneerd) ofwel de sterkte van de leiding wordt beoordeeld conform methodiek toetsen bestaande leidingen uit de NEN 3651. Een geavanceerde toetsing van de waterkering op de aanwezigheid van leidingen kan volgens het VTV2006 worden uitgevoerd op basis van:

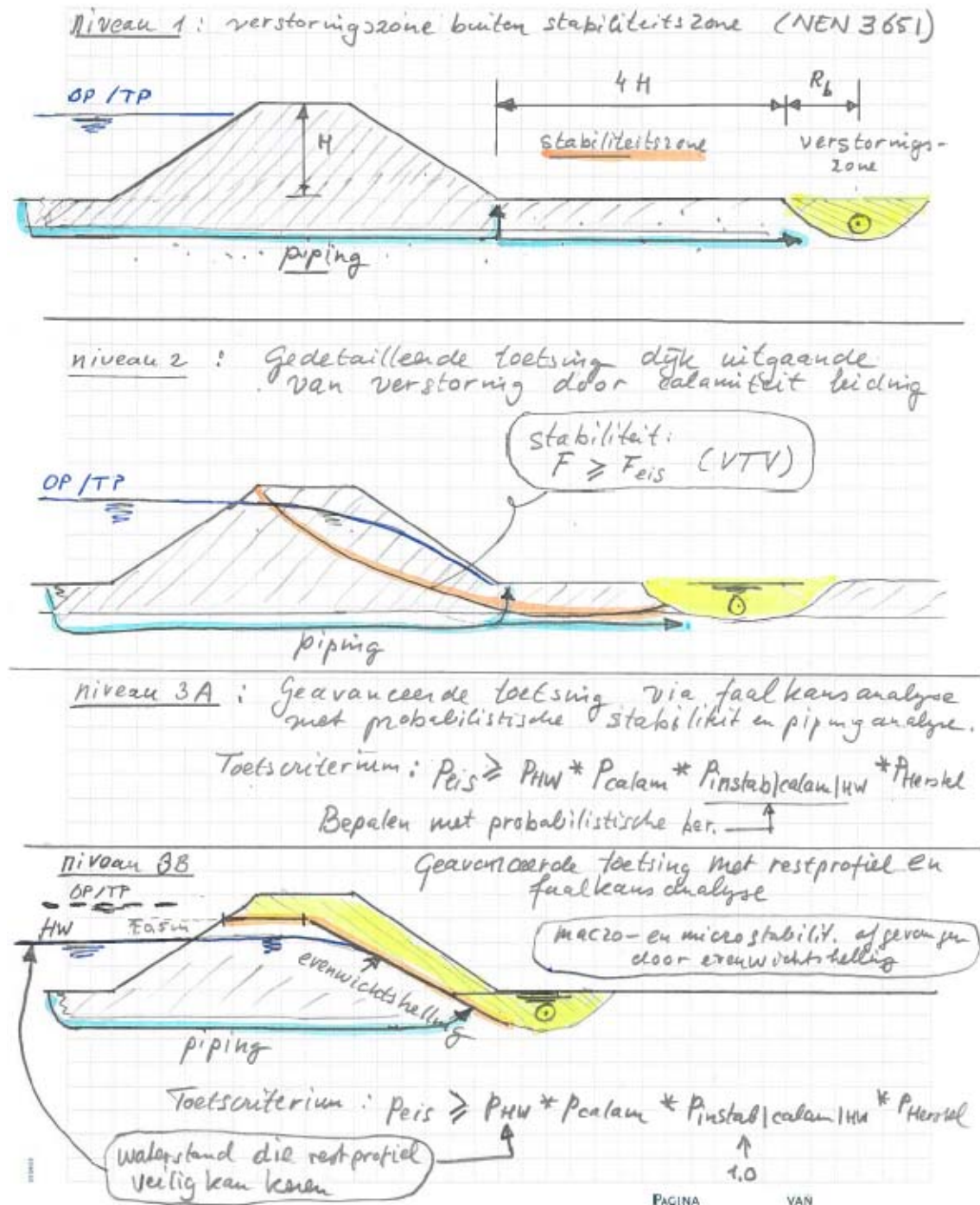
- een faalkansanalyse;
- een restprofiel/faalkansanalyse;
- een risicoanalyse;
- bewezen sterkte.

In een faalkansanalyse wordt de te verwachten faalkans vergeleken met de vereiste faalkans (ook wel taakstellende faalkans genoemd). Het gaat hier om de situatie dat er een calamiteit aan de leiding optreedt tijdens of net voorafgaand aan hoogwater. Door de calamiteit wordt de waterkering verzwakt en bij hoogwater kan er hierdoor overstroming van het achterland plaatsvinden. In de meest eenvoudige vorm wordt er vanuit gegaan dat de waterkering faalt wanneer er een calamiteit aan de leidingen optreedt. Bij een restprofiel/faalkansanalyse wordt ervan uitgegaan dat een restprofiel ontstaat bij het optreden van een calamiteit aan de leiding. Dit restprofiel is nog steeds in staat een water te keren, maar in meeste gevallen zal deze waterstand lager zijn dan Toetspeil.

In een risicoanalyse, die hier niet verder wordt uitgewerkt, wordt ook de gevolgenkant in de beoordeling van de veiligheid ten aanzien van een gebeurtenis betrokken. De kans op een gebeurtenis gecombineerd met de hier uit volgende schade wordt dus beschouwd. Het betrekken van de gevolgenkant in de toetsing wordt vooralsnog als een stap te ver gezien. Een toetsing op basis van bewezen sterkte vereist een goede kennis van de leiding en het leidingensysteem. Ook deze wijze van toetsen wordt vooralsnog als een stap te ver gezien.

A company of Royal HaskoningDHV

De faalkansanalyse is voor de Limburgse situatie eerder toegepast en sluit erg goed aan op de aanpak die in het toekomstige WTI programma verder zal worden uitgewerkt. RHDHV stelt voor om deze aanpak te volgen voor de geavanceerde toetsing van de leidingen. In figuur 1 is een schematisch overzicht gegeven van verschillende niveaus van toetsen waarbij vooral vanuit de waterkering is getoetst (sterkte toetsing is hierin niet gepresenteerd).



Figuur 1: Overzicht niveaus van beoordeling van leidingen

Aanpak faalkansanalyse

In deze studie wordt aanbevolen om een geavanceerde toetsing volgens een faalkansanalyse uit te voeren. Dat wil zeggen dat de te verwachten kans op falen van de waterkering door de aanwezigheid van een pijpleiding, de zogenaamde additionele dysfunctiekans, wordt getoetst aan de te accepteren faalkans voor dit specifieke mechanisme, de zogenaamde taakstellende faalkans. Dit kan in formulevorm als volgt worden weergegeven:

$$P_{\text{additioneel leiding}} \leq P_{\text{eis}} \quad (\text{formule 1})$$

hierin geldt:

- $P_{\text{additioneel leiding}}$: te verwachten kans op falen van de waterkering door calamiteit aan leiding bij hoogwater voor de betreffende leiding per jaar;
- P_{eis} : vereiste faalkans voor de betreffende leiding per jaar. Dit wordt ook wel eens de taakstellende faalkans genoemd.

De verwachte faalkans van de waterkering door calamiteit aan leiding (ook wel additionele dysfunctiekans genoemd) kan als volgt gedefinieerd worden:

$$P_{\text{additioneel leiding}} = P_{\text{HW}} \cdot P_{\text{calam}} \cdot P_{\text{instab|calam|HW}} \cdot P_{\text{herstel}} \quad (\text{formule 2})$$

hierin geldt:

- $P_{\text{additioneel leiding}}$: actuele kans op falen van de waterkering door calamiteit aan leiding bij hoogwater per leiding per jaar;
- P_{HW} : kans op het overschrijden van een hoogwaterstand per jaar;
- P_{calam} : kans op een calamiteit aan de leiding per jaar;
- $P_{\text{instab|calam|HW}}$: kans op instabiliteit gegeven een calamiteit aan de leidingen gegeven hoogwater (kans per jaar). Er zijn verschillende manieren om de stabiliteit van de dijk bij de situatie van een calamiteit te beschouwen, zie figuur 1. Een pragmatische methode is de restprofielbenadering waarbij een restprofiel aan de hand van veilig geachte vuistregels wordt geconstrueerd waarbij rekening wordt gehouden met de verschillende faalmechanismen, zie verderop in deze notitie. Dit restprofiel is het profiel dat resteert na een afschuiving of na het optreden van micro-instabiliteit en betreft dus een profiel dat juist in evenwicht is. Er wordt daarom vanuit gegaan dat de kans op instabiliteit van dit evenwichtsprofiel gelijk is aan $P_{\text{instab|calam|HW}} = 1$. Wanneer de verstoringszone buiten het dijkprofiel ligt kan de kans op een instabiliteit van het dijklichaam zelf aan de hand van een probabilistische stabiliteit- en pipingberekeningen worden bepaald. Vaak is macrostabiliteit in dit geval het dominante mechanisme. In dit geval zal $P_{\text{instab|calam|HW}}$ aanzienlijk kleiner dan 1 zijn. Het loont zich dan om een probabilistische stabiliteitsanalyse uit te voeren om de $P_{\text{instab|calam|HW}}$ nauwkeuriger vast te stellen;
- P_{herstel} : kans dat de herstelperiode van een calamiteit aan de leiding samenvalt met hoogwater in het bewuste jaar dat er een calamiteit optreedt en het kritieke hoogwater plaatsvindt;
- $f_{\text{correlatie}}$: term voor correlatie tussen faalkans leiding en hoogwater. Er wordt dus uitgegaan van $f_{\text{correlatie}} = 1$.

Formule 2 impliceert dat de kans op hoogwater en de kans op een calamiteit aan de leiding niet gecorreleerd zijn. In bepaalde gevallen is het mogelijk dat de kans op een calamiteit aan de leiding groter is in de situatie dat er een hoog water heerst, bijvoorbeeld doordat er deformaties in de ondergrond ontstaan die extra spanningen op de leiding kunnen veroorzaken. Vooral nog wordt ervan uitgegaan mogelijke beïnvloeding van de kans op leidingbreuk door hoogwater in voldoende mate zit verdisconteerd in de calamiteiten statistiek en dat het optreden van hoog water en van leidingbreuk als onafhankelijke gebeurtenissen mogen worden beschouwd.

Voorgesteld wordt om bij de uitwerking van de faalkansanalyse te beginnen bij de onderdelen die gerelateerd zijn aan de waterkering zelf. De volgende stappen worden doorlopen:

- Stap 1: Bepalen van kans op overschrijden van een hoogwaterstand (p_{HW});
- Stap 2: Bepalen van kans dat er gedurende een jaar een calamiteit optreedt gelijktijdig met hoogwater ($p_{herstel}$);
- Stap 3: Bepalen kans op een calamiteit aan de leiding per jaar (p_{calam});
- Stap 4: Bepalen vereiste faalkans (p_{eis});
- Stap 5: Toets of de berekende additionele dysfunctiekans kleiner is dan de taakstellende faalkans.

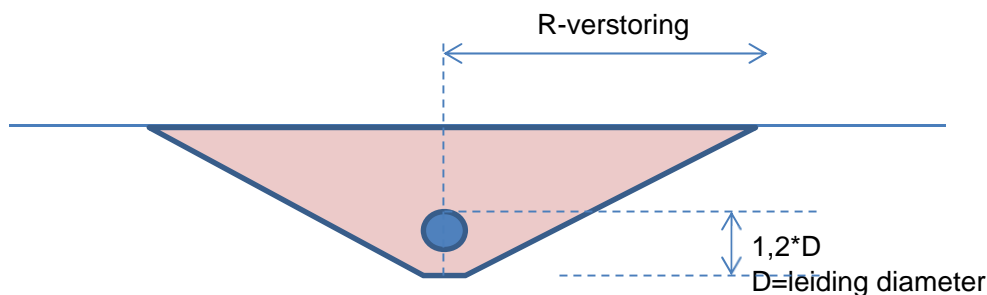
Stap 1: Bepalen maximaal te keren waterstand en bijbehorende overschrijdingsfrequentie (p_{HW})

Deze stap bestaat uit 4 deelstappen:

- a) Vaststellen van ontgrondingskuil die kan ontstaan bij een calamiteit aan de leiding;
- b) Bepalen restprofiel van de waterkering bij een calamiteit aan de leiding;
- c) Bepalen maximaal te keren waterstand bij het restprofiel;
- d) Bepalen van bijbehorende overschrijdingsfrequentie.

Stap 1a: Ontgrondingskuil

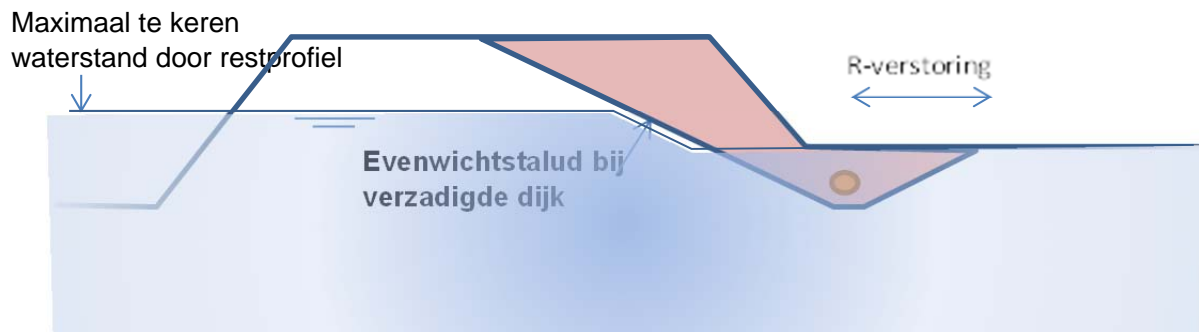
In appendix A van de NEN 3651 kan de straal van een verstoringszone van een leiding worden bepaald aan de hand van eenvoudige leidingkarakteristieken zoals materiaal van de leiding, het medium, de maximale werkdruk en de inwendige leidingdiameter. Voor de diepte van de ontgrondingskuil wordt uitgegaan van de diepte onderkant leiding vermeerderd met een marge van 20% van de leidingdiameter (figuur 2). Deze verstoringszone kan tevens worden bepaald volgens een meer geavanceerde methodiek. Aanvullende gegevens hiervoor zijn onder andere het debiet en de grote van het lek.



Figuur 2: Standaard ontgrondingsprofiel bij vlak maaiveld

Stap 1b: Bepalen restprofiel

In deze stap wordt de verstoringszone van de leiding ingetekend in het profiel van de waterkering. Een complicerende factor hierbij is dat de standaard verstoringszones uit de NEN 3651 horen bij de situatie van een vlak maaiveld. Wanneer de leiding bijvoorbeeld in de teenzone van de waterkering ligt kan de verstoringszone aanzienlijk groter zijn doordat het dijkprofiel instabiel zal worden door een ontgronding die wordt veroorzaakt door een calamiteit aan de leiding (figuur 3). In dit geval wordt voorgesteld om vanuit de bodem van de ontgrondingskuil een evenwichtstalud te tekenen. Dit evenwichtstalud is het dijkprofiel dat bij de ontgronding voldoende stabiel is. Voor het bepalen van de helling van het evenwichtspitaal worden vuistregels toegepast die onderbouwd kunnen worden met berekeningen van de macro- en microstabiliteit waarbij wordt uitgegaan van een volledig verzadigd dijklichaam en een verzadigd achterland. Zonder nadere berekening kan uit worden gegaan van een talud van 1V:6H voor zanddijken omdat in dat geval micro-instabiliteit maatgevend is. Voor klei- en leemdijken is een 1V:4H een veilige aanname.



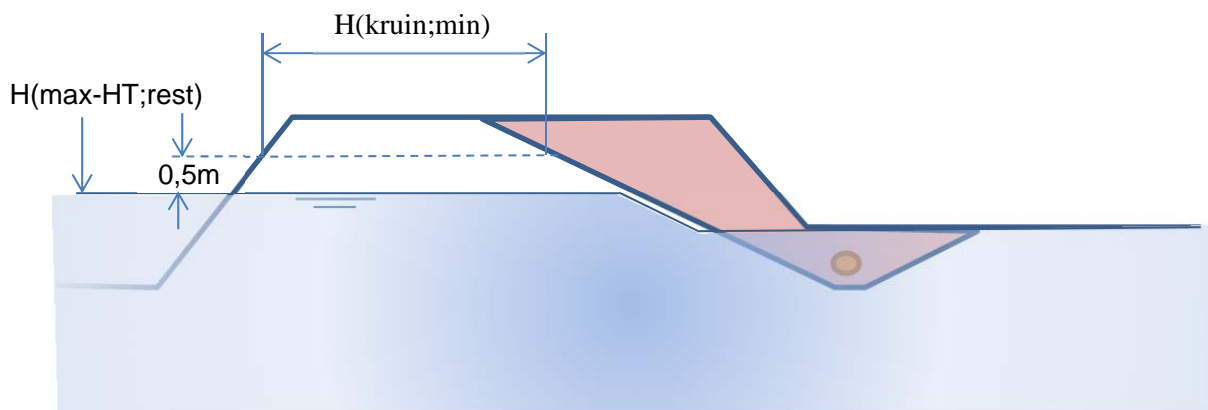
Figuur 3: Configuratie restprofiel waterkering bij calamiteit leiding

Stap 1c: Bepalen maximaal te keren rivierwaterstand

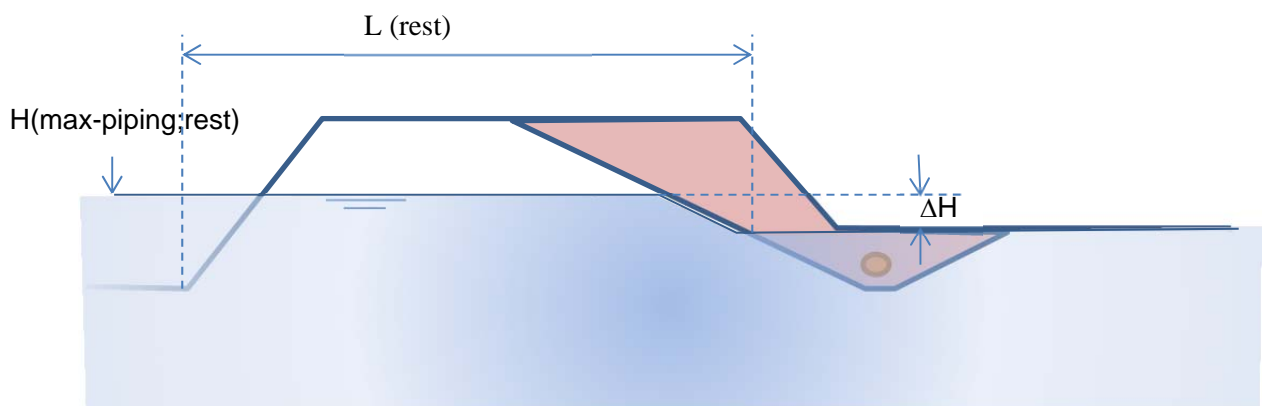
In deze stap wordt bepaald welke rivierwaterstand door het restprofiel kan worden gekeerd. Hierbij worden de volgende relevante faalmechanismen beschouwd:

- Overloop/overslag: Op een niveau gelijk aan 0,5 m boven de maximaal te keren waterstand dient een minimale kruinbreedte aanwezig te zijn (figuur 4). Voor de minimale kruinbreedte zou 3 m kunnen worden aangehouden.
- Piping: Het verval ΔH over het restprofiel mag niet meer zijn dan L-piping/C (figuur 5). Hierbij is C een constante die kan worden bepaald met de formule van Sellmeijer op basis van een gedegen grondonderzoek (korrelverdelingen). Zonder dit grondonderzoek kan een bovengrens $C=18$ worden gebruikt.
- Macrostabiliteit: Dit mechanisme is automatisch afgedekt met het restprofiel omdat gekeken wordt naar een evenwichtstalud. Dit talud is per definitie macrostabil.
- Microstabiliteit: Dit mechanisme is automatisch afgedekt met het restprofiel omdat gekeken wordt naar een evenwichtstalud. Dit talud is per definitie microstabil.
- Erosie: Dit geldt vooral voor leidingen in of nabij het buitenbeloop van de dijk. In dit geval kan het evenwichtspitaal worden bepaald op basis van veilige afslagprofielen, zie VTV/Handreiking Constructief ontwerpen. Dergelijke profielen worden gekenmerkt door zeer flauwe taludhellingen. Verwacht wordt dat dit mechanisme te bepalen is bij leidingen die aan de buitendijkse zijde van de waterkering liggen.

Eén van bovengenoemde mechanismen is maatgevend voor de maximale rivierwaterstand $H_{\max;\text{rest}}$ die nog door het restprofiel gekeerd kan worden. Indien $H_{\max;\text{rest}}$ 0,5 m onder de aanwezige kruinhoogte staat dan is de veiligheid bij een calamiteit aan de leiding voldoende en hoeft niet verder te worden gegaan. In de andere gevallen wordt verder gegaan op basis van de faalkansbenadering.



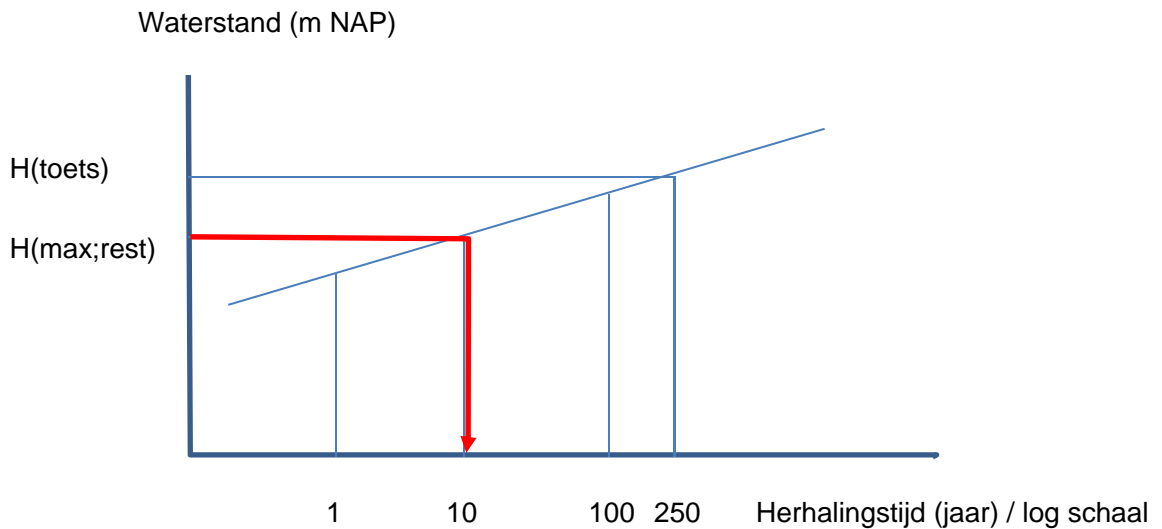
Figuur 4: Vaststellen maximaal te keren waterstand voor mechanisme “overloop/overslag”



Figuur 5: Vaststellen maximaal te keren waterstand voor mechanisme “piping”

Stap 1d: Bepalen van overschrijdingsfrequentie $H_{\max;\text{rest}}$

Bij deze stap wordt de overschrijdingsfrequentie bepaald op basis van de overschrijdingsfrequentielijn voor dit deel van de Maas. Deze overschrijdingsfrequentielijn kan worden afgeleid van decimeringshoogten en gemiddelde waterstanden. Bij het vaststellen van de overschrijdingsfrequentielijn is input van het waterschap en eventueel van de waterdienst (RWS) vereist. De betrekkinglijnen voor de Maas kunnen hiervoor worden gehanteerd. In figuur 6 is een voorbeeld gegeven waarbij de herhalingstijd van de maximaal door het restprofiel te keren waterstand gelijk is aan 10 jaar. De overschrijdingsfrequentie is dan $p_{\text{HW}} = 0,1$.



Figuur 6: Overschrijdingsfrequentielijn (fictief voorbeeld)

Stap 2: Bepalen van kans dat er gedurende een jaar een calamiteit optreedt gelijktijdig met hoogwater (p_{herstel})

In het jaar dat de leiding faalt en dat er hoog water is hoeven deze nog niet tegelijkertijd op te treden. In het bewuste jaar van de kritieke hoogwaterstand en de calamiteit aan de leiding kan de kans dat deze gebeurtenissen tegelijkertijd optreden als volgt worden berekend:

- Gedurende bijvoorbeeld een periode van zeg 3 weken is er een erosiekrater aanwezig. Deze erosiekrater kan gedurende het hele jaar ontstaan. Dus gedurende $3/52$ deel van het jaar is er een erosiekrater aanwezig. De kans per week is dan eveneens $3/52$.
- We gaan er van uit dat het hoogwater is slechts over een periode van ca. 2 weken per jaar aanwezig is, statistisch gezien is dat vooral in de winter- en voorjaarsperiode. Zeg over een periode van 6 maanden. De kans per week dat er hoogwater optreedt in deze periode is ca. $2/26$.
- In het jaar van een calamiteit en hoogwater kan vervolgens worden uitgerekend wat de kans is dat er zowel hoogwater is en de krater nog niet hersteld is. Deze kans is bij benadering gelijk aan $1 - [1 - (3/52) * (2/26)]^{26} = 0,11$.

Stap 3: Bepalen kans op een calamiteit aan de leiding per jaar (p_{calam})

De verwachte faalkans (P_{calam}) kan worden bepaald op basis van algemene "incidentenstatistiek leiding". Hierbij wordt gebruik gemaakt van de volgende literatuur:

- NPR 3659:1996/A1:2003: Ondergrondse pijpleidingen: Grondslagen voor de sterkteberekening. NNI 1^e druk 1996 en Addendum 2003;
- Risicoanalyse van hoge drukleidingen, studiegroep pijpleidingen voor gassen en vloeistoffen, Provincie Zuid-Holland, 1978 (Het "Zwarte Boek").

Deze bronnen geven een faalfrequentie voor lek en breuk. Deze faalfrequentie is uitgedrukt in een kans per meter per jaar. Deze faalfrequentie moet hierbij worden omgeschreven naar een kans per leiding. Aandachtspunt is, dat de gegeven waarden in de NPR3659 betrekking hebben op lekkagefrequenties van veldleidingen (f_{calam}). Vooral nog is het uitgangspunt dat deze waarden ook bruikbaar zijn voor leidingen in of nabij waterkeringen. De verwachte faalkans P_{calam} kan worden geschreven als:

$$P_{calam} = f_{calam} \cdot L \quad (formule 3)$$

hierin is:

- P_{calam} : kans op een calamiteit aan de leiding per jaar
 f_{calam} : faalfrequentie voor lek of breuk per meter per jaar voor een bepaald type leiding
 L : lengte leidingtraject. Dit is het stuk leiding van een bepaald type, dat door middel van het restprofiel / faalkansanalyse wordt beoordeeld.

Bij de beoordeling spelen ook kenmerken van de specifieke leiding een rol die kunnen bijdragen aan een additionele faalkans zoals:

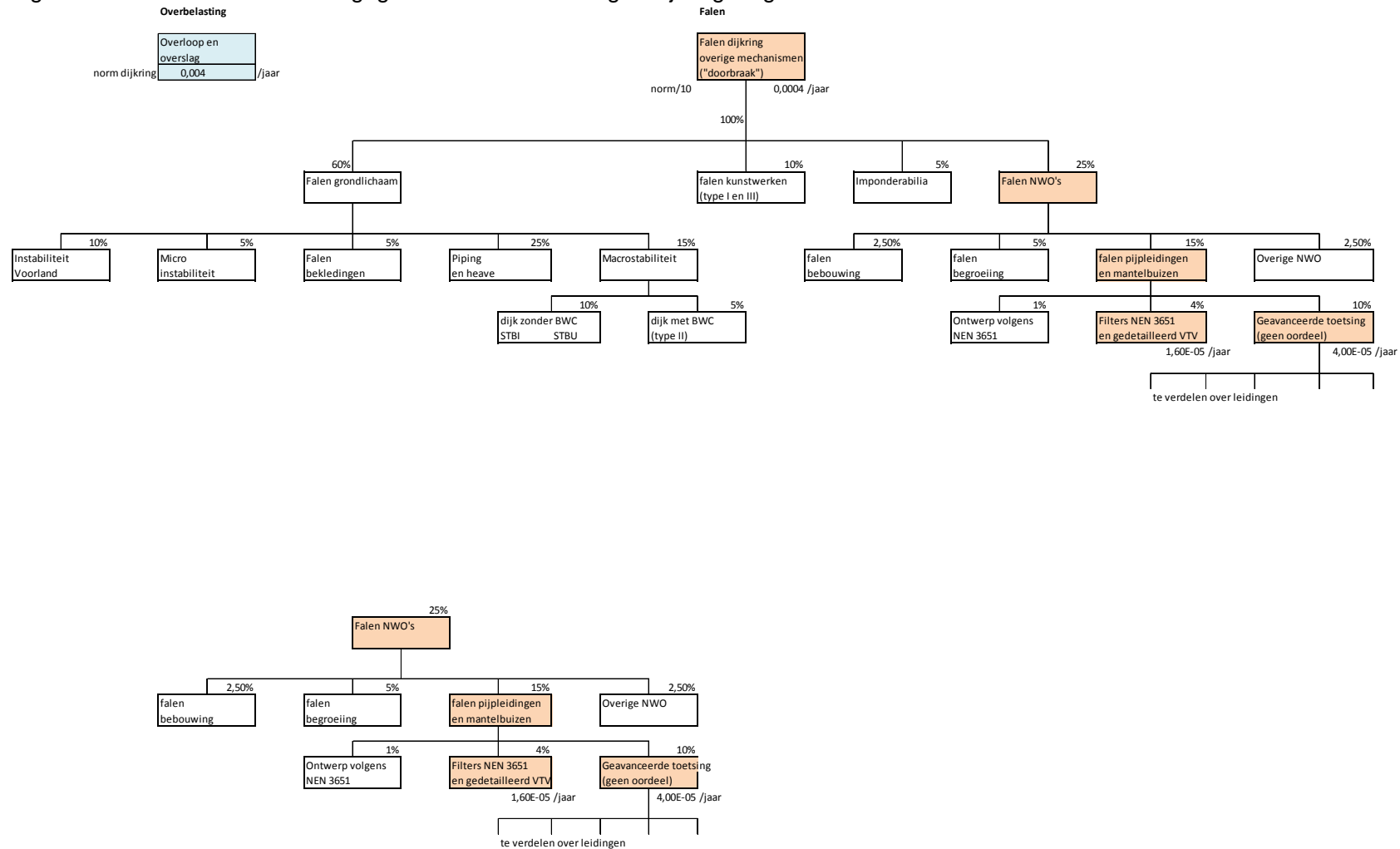
- ouderdom leiding / conditie leiding;
- hoeveelheid appendages en wijzigingen in leidingdiameter;
- eigenschappen mantelbuis;
- of er na aanleg van de leiding binnen de invloedssfeer van de leiding ophoogwerkzaamheden hebben plaatsgevonden.

Bovenstaande zaken kunnen aanleiding zijn om de gehanteerde f_{calam} bij te stellen.

Stap 4: Bepalen vereiste faalkans

In deze stap wordt uitgezoomd naar de volledige dijkkring. Deze stap dient in nauw overleg met het waterschap te worden vastgesteld. Hieronder is een voorbeeld gegeven van een foutenboom met faalruimteverdeling voor een typische Limburgse dijkkring langs de Maas. Aan de hand van deze foutenboom is de taakstellende faalkans vastgesteld voor riolen en pijpleidingen buiten versterkingstrajecten.

In figuur 7 is een foutenboom weergegeven van een Limburgse dijkkring langs de Maas.



Figuur 7: Voorbeeld foutenboom voor Limburgse dijkkring langs de Maas

In een primaire waterkering is de hoogte van de waterkering de dominerende eis. Voor de primaire waterkeringen in Limburg is dit een waterstand op de Maas met een kans op voorkomen van kleiner dan 1/250 per jaar. Alle overige faalmechanismen tezamen moeten een factor 10 kleiner zijn dan de norm voor de hoogte van de waterkering. Dit houdt in dat voor een primaire waterkering, met een huidige wettelijke norm van 1/250 jaar, het aandeel van de overige faalmechanismen samen maximaal 1/2500 mag bedragen (4×10^{-4}). Hierbinnen is per dijkkring 15 % gereserveerd voor kabels en leidingen welke als NWO (Niet Waterkerende Object) worden aangemerkt. Daarvan is reeds 1% gereserveerd voor leidingen welke overeenkomstig de NEN3651 zijn ontworpen en 4% voor de leidingen die door de filterregels komen (vuistregels uit de NEN3651). Voor de overige leidingen blijft derhalve 10% over (4×10^{-5}).

Binnen een dijkkring zijn meerdere kabels en leidingen van verschillende beheerders gelegen. Het is voor een afzonderlijke nutsbeheerder onmogelijk om ook leidingen van derden mee te nemen in hun faalkansanalyse. Het is tevens zeer complex om goed onderbouwd een keuze te maken in aantal leidingen, type leidingen, ligging ten opzichte van de waterkering, etc.

Voorstel toegestane faalruimte per nutsbeheerder

Royal HaskoningDHV stelt voor om voor de toetsopgave voor WPM en WRO per nutsbeheerder een toegestane faalruimte ter beschikking te stellen. Daarbij is een inschatting gemaakt van het aantal nutsbeheerders in een dijkkring inclusief enige marge. Op basis van KLIC-aanvragen kan dit nog geoptimaliseerd worden. Voorsnog is afgesproken om uit te gaan van 10 nutsbeheerders per dijkkring. De faalruimte voor een afzonderlijke nutsbeheerder is 10% van 6×10^{-5} wat neer komt op 6×10^{-6} . Uitgangspunt is dat iedere nutsbeheerder een zelfde faalruimte heeft.


De totale faalruimte van de leidingen van één nutsbeheerder in één dijkkring mag niet groter zijn dan 6×10^{-6} per jaar.

Stap 5: Toets kans op falen van de waterkering versus taakstellende faalkans

Tot slot wordt getoetst of de te verwachten kans op falen van de waterkering door de aanwezigheid van een pijpleiding kleiner is dan de te accepteren faalkans voor dit specifieke mechanisme, de zogenaamde taakstellende faalkans. Dit is in formulevorm in formule 1.

Indien hier niet aan wordt voldaan voldoet de leiding niet. Vervolgens kan gericht worden bepaald van welke leiding een sterkteberekening wordt uitgevoerd of een optimalisatieslag kans van slagen heeft.

Nijmegen, 25 juni 2013



Albert Wiggers