



## Optimalisatie leidingberekeningen met PLE

Opgesteld door r+k  
Consulting Engineers,  
Rijswijk

Auteur: Marco Lammers  
Reviewers: Harry Schelfhout  
Jan Spiekhout (B&B Advisor)



## NOTITIE 5-277-520/01 v3

3 december 2020

onze ref.: 5-277-520/01 v3

Betreft: Optimalisatie leidingberekeningen met PLE

### Inleiding

Nederland heeft een grote hoeveelheid dijken en de waterkerende functie van de dijk is van groot belang voor het land. Om er zeker van te zijn dat de dijken hun taak goed kunnen vervullen, wordt onder meer gekeken naar de faalkans van een dijktraject en moet deze kans onder een voorgeschreven waarde blijven. Indien dit niet zo is, moet het dijktraject worden versterkt of moeten de invloeden die een negatief effect hebben op de dijk worden verminderd. In Nederland is een uitgebreid transport- en distributieleidingnet aanwezig: gas, olieproducten, water en andere stoffen worden d.m.v. duizenden kilometers leiding vervoerd. Transportleidingen moeten regelmatig waterwegen en de bijbehorende dijken kruisen. Indien er iets zou gebeuren met een kruisende of parallelle leiding, moet een dijk niet in gevaar komen. Er moet daarom worden gekeken naar de bijdrage van de faalkans van een leiding op de kans of overstroming van een dijktraject. Leidingsterkteberekeningen worden normaliter uitgevoerd om te bepalen of een leiding onder invloed van de krachten en vervormingen die erop inspelen, geschikt blijft om zijn taak te vervullen. Leidingen in Nederland moeten in de regel voldoen aan de eisen van de NEN 3650 reeks. Hierbij worden de optredende spanningen in het leidingmateriaal en de vervormingen van de leidingdoorsnede getoetst tegen een grenswaarde. Deze methode verschilt wezenlijk van de faalkansbepaling van een dijk, waardoor een “normale” leidingberekening niet goed bruikbaar is om het effect van de leiding op de dijk in rekening te brengen.

In het kader van de POV K&L (projectoverstijgende verkenning kabels en leidingen) is gezocht naar een (breed bruikbare) methode om het effect en de kans op falen van een leiding in een dijk mee te nemen in de integrale faalkansanalyses van leidingfalen en dijkfalen. Dit is in eerste instantie gedaan d.m.v. een aantal proefprojecten. Hiermee is geëxperimenteerd en ervaring opgedaan om op deze manier te komen tot een bruikbare methodiek. Hierbij worden nog steeds leidingberekeningen gemaakt, maar i.p.v. een toetsing worden de resultaten gebruikt om tot een faalkans te komen. De opzet van de berekeningen verandert daardoor wel enigszins. In deze notitie wordt beschreven hoe een leidingsterkteberekening kan worden opgezet en geoptimaliseerd, zodat de resultaten kunnen worden omgerekend naar een kans op falen van de leidingsterkte. Hoe dat in zijn werk gaat, wordt nader uitgelegd in de TNO notitie “Omrekening van unity check naar faalkans” [1].

### Opzet van het leidingmodel

Voor het berekenen van leidingen die belangrijke waterstaatswerken (zoals rivierdijken) kruisen, moet veelal een uitgebreide leidingsterkteberekening worden gemaakt. In Nederland wordt daar meestal het programma Ple4Win voor gebruikt. De mogelijkheden die dit programma biedt, maken het zeer geschikt voor dit type berekeningen. Omdat het rekenprogramma is gebaseerd op een semi-probabilistische methode met toepassing van partiële belasting- en sterktefactoren, hoeft het model van de leiding niet anders te zijn. Bij de model opties “Model Options” wordt gebruik gemaakt van het geometrisch niet-lineaire model. Hierbij wordt de evenwichtstoestand gezocht in het verplaatste leidingenmodel. Tevens wordt gebruik gemaakt van de redistributie van zowel de ovalisatie als de belastingen. Hiermee wordt bewerkstelligd dat (piek)verplaatsingen en -belastingen worden verdeeld over naastliggende leidingdelen. Het resultaat van de sterkteberekeningen is een veiligheidsmarge (UC = Unity Check) in elke leidingdoorsnede ten opzichte van de grensspanning of -rek en de toelaatbare ovalisatie (deflectie). Bij een UC groter dan 1 voldoet de leiding niet aan de eisen van NEN 3650 reeks, wat bij een leidingkruising overeenkomt met beta kleiner dan 5,1.

### Uitgangsgegevens berekeningen

Het grootste verschil met leidingberekeningen die worden gedaan in het kader van een toetsing volgens de NEN 3650 reeks is dat een deel van de invoer afwijkt van de gebruikelijke invoer. Het gaat hierbij om rekenwaarden (vloiegrens staal, inwendige overdruk) en factoren (verkeer, zetting, eigen gewicht grond, grondparameters). Dit heeft alles te maken met het bepalen van een faalkans van de buisleiding.

Het betrouwbaarheidsniveau wordt uitgedrukt in een kans van falen per tijdseenheid of een betrouwbaarheidsindex ( $\beta$ ). De betrouwbaarheidsindex is, a.d.h.v. een serie leidingberekeningen, door TNO bepaald. (Zie bijlage E in het rapport “Faalkansanalyse in dijkontwerp Wolferen-Sprok met kruisende gasleiding A-505” [2]) Uiteindelijk is ervoor gekozen om de leidingberekeningen uit te voeren met twee betrouwbaarheidsindices, een bèta van 4,1 en een bèta van 5,1. Bij een toename van bèta zullen belastingen of belastingfactoren toenemen en zal bijvoorbeeld de sterkte van het materiaal afnemen. Deze belastingen, belastingfactoren en de materiaalsterkte zullen in leidingberekeningen worden gebruikt.



### Een korte toelichting op betrouwbaarheid

Het betrouwbaarheidsniveau wordt in een probabilistische veiligheidsbeschouwing uitgedrukt in de kans op falen of, gelijkwaardig daaraan, in de betrouwbaarheidsindex  $\beta$ . Het verband tussen beide grootheden wordt gegeven door:

$$P_f = \Phi(-\beta)$$

met:

$$P_f = \text{Faalkans}$$

$\Phi$  = Verdelingsfunctie voor de normale verdeling

Voor een aantal waarden is het verband weergegeven in onderstaande tabel:

$\beta$	0	1,3	2,3	3,1	3,7	4,2	4,7	5,2
$P_f = \Phi(-\beta)$	0,5	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$	$10^{-7}$

De relatie tussen een rekenwaarde en de betrouwbaarheidsindex staat hieronder:

Voor de rekenwaarde van de sterkte; R (Resistance):  $\mu_R = 1 - (\alpha_R \times \beta \times \sigma_R)$

Voor de rekenwaarde van de belasting; S (Sollicitation):  $\mu_S = 1 - (\alpha_S \times \beta \times \sigma_S)$

met:

$\mu$  = verwachtingswaarde

$\alpha$  = invloedscoëfficiënt

$\beta$  = betrouwbaarheidsindex

$\sigma$  = standaardafwijking

M. b.v. de eerder genoemde faalkans:  $P_f = \Phi(-\beta)$  kan een koppeling tussen rekenwaarde en faalkans worden gemaakt.

Een unity check kan worden uitgedrukt als:

UC = rekenwaarde van de belasting (S) / rekenwaarde van de sterkte (R).

Let op: de omgekeerde definitie komt ook wel voor!

Wat geldt is dat UC=1 correspondeert met de streefwaarde van de faalkans als:

- die is gedefinieerd;
- de rekenwaarden op basis van de theorie zijn afgeleid;
- om praktische redenen geen te grote afrondingen hebben plaatsgevonden.

Verder geldt dat UC>1 correspondeert met een grotere faalkans als de UC is gedefinieerd als: UC = S / R.

### Optimalisatie van de berekeningen

Het maken van een leidingenmodel kan meerdere dagen in beslag nemen, terwijl het uitvoeren van een berekening van dat model een aantal minuten kost. Het loont daarom om varianten te berekenen om daarmee inzicht te verkrijgen of onzekerheden weg te nemen. Een andere mogelijkheid is het optimaliseren van de berekeningen; hierbij worden de mogelijkheden die de pipeline engineer ter beschikking staan, gebruikt om een (voor de leiding) gunstig resultaat te halen: lage rekken, spanningen en vervormingen. Hiermee zal de UC en daarmee ook de kans op falen van de leiding afnemen, wat resulteert in een reductie van de bijdrage van deze kans op falen aan de overstromingskans. Dit kan leiden tot een kostenreductie die velen malen groter is dan de bijkomende kosten voor de extra leidingberekeningen.

Welke zaken kunnen van belang zijn voor de optimalisatie van een leidingsterkteberekening? Dit zijn [A] de uitgangspunten, [B] de partiële factoren en [C] de modelleringsopties. We bekijken ze stuk voor stuk:

[A] Als een leiding berekend moet worden, dienen tekeningen veelal als basis. Hoe ouder de leiding, hoe groter de kans dat de tekening(en) niet alle informatie bevat die nodig is en hoe groter de kans op afwijkingen en fouten. De uitgangspunten van een leidingenmodel worden mede gebaseerd op de informatie uit de tekening(en). Als er onduidelijkheid bestaat over de gegevens, zal een aanname worden gedaan. Deze aanname is veelal conservatief: er wordt uitgegaan van een relatief ongunstige situatie. Als uit de leidingberekeningen volgt dat de leiding met deze aanname voldoet aan de eisen van de NEN 3650 reeks, dan wordt meestal geen onderzoek meer gedaan naar juiste gegevens. Als er bij meerdere gegevens of uitgangspunten onduidelijkheden bestaan, zullen de conservatieve aannames gecombineerd worden en een te negatief beeld kunnen geven van de werkelijkheid. Hierdoor kan een leiding worden "stukgerekend": de leiding, die al tientallen jaren zijn taak uitvoert, zou volgens de leidingberekening bezwaken moeten zijn.

De manier om hiermee om te gaan, zou de volgende kunnen zijn: als eerste kan een aantal varianten worden berekend, zodat de gevoeligheid voor veranderingen in een bepaald gegeven kan worden vastgesteld. Is die gevoeligheid laag, dan is verder onderzoek m.b.t. dat gegeven weinig zinvol. Ten tweede: is de gevoeligheid hoog, dan loont verder onderzoek. Dit onderzoek zou in archieven kunnen zijn (is er een betere tekening?), maar ook in het veld (hoe ligt de leiding erbij?). Doel van het onderzoek is de aanname te verifiëren of aan te scherpen. Voorbeelden daarvan zijn aanvullende metingen over de exacte ligging van de leiding in x-y-z-coördinaten of replica-onderzoek ter verificatie van de staalsoort en/of -kwaliteit, de wanddikte, etc.



[B] Bij een leidingsterkteberekening worden belasting-, materiaal- en andere factoren toegepast en veel van deze factoren worden voorgeschreven in de NEN 3650-1 Algemeen. Belastingfactoren worden gebruikt om van een (gemiddelde) belasting te komen tot een rekenwaarde van de belasting. Deze rekenwaarde heeft, t.o.v. de gemiddelde waarde, een beperkte kans om overschreden te worden en is een manier om een stukje onzekerheid weg te nemen. Hoewel het zeker denkbaar is dat de daadwerkelijke belasting de rekenwaarde overschrijdt, is de kans zeer klein dat meerdere belastingen tegelijkertijd dit doen; de kans dat een constructie in de problemen komt, is dus klein. Materiaalfactoren zijn veelal klein en hebben te maken met de variatie in materiaaleigenschappen. Als bekend is welk materiaal (en welke kwaliteit) gebruikt is, dan zijn de bijbehorende eigenschappen bekend en deze vertonen meestal een geringe variatie. Partiële factoren brengen onzekerheden in rekening. Bij buisleidingen in de grond is het voornamelijk de grond waar de onzekerheden hoog zijn; Niet alleen het grondprofiel, ook de grond zelf vertoont variatie. De interactie tussen de grond en de buisleiding (belasting door, zetting van en draagkracht van de grond) worden daarom met flinke partiële factoren in het leidingenmodel ingevoerd. Er bestaat echter wel een mogelijkheid om deze factoren te reduceren en dat is door lokaal grondonderzoek uit te voeren. Bij voldoende onderzoek kunnen de eigenschappen van de grond nauwkeuriger en met grotere zekerheid worden vastgesteld. Hierdoor kan aannemelijk worden gemaakt dat de partiële factoren gereduceerd kunnen worden. Het is verstandig om dit vantevoren te overleggen met de toetsende instantie, zodat er overeenstemming is over de manier om dit aan te pakken.

[C] De modelleringsopties in het PLE programma biedt de gebruiker de mogelijkheid om op een aantal punten het rekenmodel met een hogere nauwkeurigheid te laten rekenen, vooral met betrekking tot bochten met een kleine bochtstraal. Daarnaast kunnen een aantal aan grond gerelateerde zaken in acht worden genomen, maar de toepasbaarheid daarvan hangt sterk af van de lokale omstandigheden. Als laatste is er een mogelijkheid om materiaal niet-lineair te rekenen. Dit is vooral voor stalen buizen interessant. Bij deze optie wordt geen gebruik gemaakt van een lineaire relatie tussen de (materiaal-)spanning en -rek. In plaats van een spanningstoets zal een rek toets worden gedaan om de uiterste grenstoestand te bepalen. De NEN 3650 geeft deze mogelijkheid en hiermee kan winst behaald worden: de maximaal toetsspanning wordt bereikt bij een rek van 2 promille, de toetsrek bij een materiaal niet-lineaire berekening bedraagt echter 5 of 7 promille (dit is afhankelijk van de sterkte van het staal). Bijkomend voordeel is dat de resultaten bij dit model een hogere betrouwbaarheid hebben in het geval dat de vloeigrens van het materiaal overschreden wordt. De grens voor de toetsrek kan eventueel hoger gelegd worden, in dit geval zal onderzoek moeten worden verricht naar het materiaal. (Zie hiervoor bijlage C.2 van bijlage E in het rapport "Faalkansanalyse in dijkontwerp Wolferen-Sprok met kruisende gasleiding A-505" [2] en de beschouwing van Jan Spiekhout "Beschouwing grootte grenstoestand rekken i.v.m. sterkteberekening Gasunie leiding A-505 met kruising met dijkvak Wolferen – Sprok"[3]). Ook hierbij is overleg (vooraf) met de toetsende instantie aan te raden om niet voor verrassingen te komen staan.

#### Buisleidingen in of nabij belangrijke waterstaatswerken

Indien een buisleiding zich in of nabij een belangrijk waterstaatswerk bevindt, moet de leiding ook voldoen aan de regels van de NEN 3651 norm. Twee belangrijke zaken om rekening mee te houden zijn de importantiefactor en de relatieve sterkte-eis. De importantiefactor is een factor tussen de 0,75 en de 1 waarmee de toetsspanning, -rek en -vervorming binnen de veiligheidszone van de dijk wordt gereduceerd. Bij de relatieve sterkte-eis moet een stalen buisleiding binnen de veiligheidszone van de dijk twintig procent sterker zijn voor inwendige druk dan de veldleiding aan weerszijden van deze zone. Voor niet-stalen leidingen moeten de berekende spanningen uit zowel inwendige druk als uit uitwendige belastingen worden meegenomen. Bij de relatieve sterkte-eis gaat het voornamelijk om de locatie van de "zwakste schakel" van de buisleiding; deze moet zich niet in of nabij de dijk bevinden.

Als we kijken naar een faalkansbenadering, dan is vooral de locatie van de veiligheidszone interessant: Als falen van de leiding buiten deze zone niet bijdraagt aan de faalkans van de dijk, dan is deze begrenzing goed gekozen. Indien leidingfalen buiten deze zone wel bijdraagt aan de faalkans van de dijk, is het nuttig als de NEN commissie hier van op de hoogte wordt gebracht; het doel van de NEN 3651 is tenslotte om te voorkomen dat de veiligheid van het waterstaatswerk in het geding komt door de aanwezigheid van buisleidingen.

Bij de faalkansanalyses van de POV K&L is gebleken dat de veiligheidszone, zoals die nu is gedefinieerd in NEN 3651 niet aansluit bij de veiligheidsbenadering op basis van overstromingskansen. In voorkomende gevallen dient de veiligheidszone te worden afgestemd op de impact van leidingfalen op de dijkfaalmechanismen. De impactzone kan worden berekend op basis van de beschikbare semi-probabilistische rekenregels voor de verstoringszones (uitgebreide formules uit Bijlage A van NEN 3651) en de dijkfaalmechanismen rekenregels uit het WBI/OI). Voor de leidingsterkte berekeningen moet daar dan nog de rekentechnische zone worden opgeteld.



## Conclusie

Als zich in of nabij een dijk een leiding bevindt, heeft deze mogelijk invloed op de faalkans van betreffende dijk. Om dit na te gaan, kan een uitgebreide sterkteberekening van de leiding worden gemaakt. Het leidingmodel kan gelijk worden gehouden met een gebruikelijke sterkteberekening die wordt gemaakt om de leiding te toetsen volgens de NEN 3651.

Hoewel het leiding- en grondmodel gelijk kan blijven, verschilt de invoer op een aantal punten wel degelijk: rekenwaarden en factoren wijken af. Deze zijn afhankelijk van de betrouwbaarheidsindex waarmee gerekend wordt. Deze index is bepaald door TNO en zij kwamen uit op een bèta van 4,1 en 5,1. De leiding wordt berekend in een aantal situaties: de huidige en de toekomstige, waarbij werkzaamheden aan de dijk kunnen worden meegenomen. Uit deze berekeningen volgen de unity checks (UC's) voor de materiaalspanning en doorsnedevervorming. Met deze gegevens kan de faalkans van de leiding en de invloed op de dijk worden bepaald.

Daarnaast moet de leiding zelf natuurlijk ook (blijven) voldoen aan de NEN 3650 reeks. Hiertoe wordt de leiding berekend met de gebruikelijke rekenwaarden en factoren en getoetst aan de normen uit de NEN 3650 reeks.

Leidingberekeningen kunnen geoptimaliseerd worden; dit is niet altijd zinvol, maar bij dit soort projecten loont het wel. De kosten van extra berekeningen zijn vaak vele malen lager dan de voordelen die behaald kunnen worden.

Ir . Marco Lammers,  
r+k consulting engineers.

[1] Notitie van TNO “Omrekening van unity check naar faalkans”, referentie: 041.00097/01.03.59, 3 december 2020, opsteller: Prof. Ir. A.C.W.M. Vrouwenfelder.

[2] Rapport van POV K&L “Faalkansanalyse in dijkontwerp Wolferen-Sprok met kruisende gasleiding A-505, Derde toepassing Veiligheidsraamwerk Kabels en Leidingen”, documentnummer 11203959-000-GEO-0001, 29 oktober 2020, versie 5, definitief, auteurs: Timo Schweckendiek, Anton van der Meer en Ana Martins Teixeira.

[3] Beschouwing van Jan Spiekhout “Beschouwing grootte grenstoestand rekken i.v.m. sterkteberekening Gasunie leiding A-505 met kruising met dijkvak Wolferen – Sprok”, 19 december 2019, versie 01, definitief, opsteller: Jan Spiekhout.

Met dank aan Harry Schelfhout, Jan Spiekhout (B&B Advisor) en Ton Vrouwenfelder voor de geleverde bijdrage.