

LIEVENSE



POV
K&L

Optimalisatie leidingberekeningen
volgens NEN 3650

Organisatie
Lievens Infra B.V.

Telefoon
+31 (0)88 910 20 00

Projectnummer
POVV

Adres
Tramsingel 2
4814 AB Breda

Datum
3 December 2020

Documentnummer
POVV-N-001, Definitief rev. 1b

Colofon

Rapporthistorie

[versiennr] [versiedatum] [wijzigingen]

[versiennr] [versiedatum] [wijzigingen]

[versiennr] [versiedatum] [wijzigingen]

Verantwoording

[tekst]

Contactgegevens

R.R. van der Meer

+31 (0)6 224 76 607

rvdmeer@lievense.com

Autorisatie

Projectnummer	Documentnummer	Versie	Status
POVV	POVV-N-001	1	Definitief

Opgesteld door	Functie	Datum	Paraaf
R. van der Meer (Lievense WSP)	Senior Consultant	03-12-2020	
J. Spiekhout (B&B Advisor)	Senior Consultant	03-12-2020	

Geverifieerd door	Functie	Datum	Paraaf
H.J. Brink (Gasunie)	Buisleidingexpert	03-12-2020	

Inhoudsopgave

1	Inleiding	4
1.1	Algemeen	4
1.2	Leeswijzer	4
2	Uitgebreid grondonderzoek	4
3	Optimalisatie versterkingsprofiel	7
4	Ontwerpparameters (ontwerpdrukken, ontwerptemperaturen)	8
5	Materialen	8
5.1	Materiaalcertificaten	8
5.2	Alternatieve NDO methodes voor de vaststelling van de sterkte van een stalen buisleiding	9
5.3	Rekcapaciteit	10
6	Wanddikte	12
6.1	Relatieve sterkte	12
6.2	Rekenmethodiek (plastisch)	13
6.3	Verhoging grensspanning bij aanwezigheid van verstijvingsringen	14
6.4	Beoordeling stalen leidingen met een bedrijfsdruk van $\geq 1,0$ MPa	14
7	Referenties	16
-	Bijlage 1	

1 Inleiding

1.1 Algemeen

De Project Overstijgende Verkenning Kabels en Leidingen (POV K&L) is uitgevoerd binnen het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP) met als belangrijkste doel om de risico's van kabels en leidingen bij dijkversterkingsprojecten te minimaliseren. Het project is gestart in september 2017 en eindigt in december 2020.

Het huidige instrumentarium voor de veiligheidsbeoordeling van primaire waterkeringen in de ontwerpsituatie en in de bestaande situatie bevat kennisleemten bij de bepaling van de faalkansbijdrage van kabels en leidingen aan de toelaatbare kans op overstroming zijn daar een onderdeel van.

Om aan de faalkansbijdrage van kabels & leidingen een nadere invulling te kunnen geven is in vijf praktijkcasussen door de Project Overstijgende Verkenning Kabels & Leidingen (POV K&L) het conceptuele WBI veiligheidsraamwerk K&L [Deltares, 2018] toegepast.

Bij de praktijkcasussen is geleerd dat bij de toepassing van de NEN 3650 reeks [NEN, 2020] er op punten nog verbetering en aanscherping mogelijk is. In het voorliggende rapport worden de daarbij opgedane ervaringen beschreven.

1.2 Leeswijzer

Dit rapport is bedoeld voor met name de normcommissie (310.004) van de NEN welke zich bezig houdt met aanpassingen van de NEN 3650 reeks. De in dit rapport genoemde onderwerpen kunnen gezien worden als verbeteringsvoorstellen voor de toekomstige periodieke aanpassingen van de NEN 3650 reeks.. Dit rapport vertoont enige overlapping met het rapport "Doorontwikkeling Veiligheidsraamwerk K&L" van POV K&L [POV K&L, 2020-f] . Dit rapport is onder meer bedoeld voor technisch specialisten die bezig zijn met de (ontwikkeling van) rekenmethodes aan veiligheid aan de waterkering met kabels & leidingen in meer algemene zin. Vanwege afronding van het project heeft geen volledig integratie tussen beide rapporten plaats kunnen vinden.

2 Uitgebreid grondonderzoek

In bijlage C van de NEN 3651 [NEN, 2020-f] en hoofdstuk 5 van de NEN 3650-1 [NEN, 2020-a] is de minimaal benodigde omvang van het grondmechanisch onderzoek (terrein- en laboratoriumonderzoek) bij dijkkruisingen omschreven. Op basis van dit grondonderzoek worden de voor de sterkte-berekeningen grondmechanische leidingeigenschappen afgeleid.

Deze grondmechanische leidingeigenschappen worden bepaald uit de gevonden grond-eigenschappen, waarbij rekening gehouden moet worden met verschillende onzekerheden. Volgens B.4.2 van de NEN 3650-1 zijn de belangrijkste bronnen van onzekerheid, de volgende:

- bij het onderzoek wordt langs het leidingtracé op een beperkt aantal punten onderzoek uitgevoerd. Tussen deze punten kunnen de grondeigenschappen anders zijn
- bij het grondonderzoek worden op basis van meetgegevens uit sonderingen, boringen en beproevingen van grondmonsters de voor de leidingberekening benodigde grondmechanische eigenschappen bepaald
- bij de metingen en de hierbij gebruikte beproevingsmethoden moet rekening worden gehouden met de daarbij optredende onzekerheden

De grondeigenschappen, zoals bepaald aan de hand van het grondmechanisch onderzoek (cohesie, hoek van inwendige wrijving, enz.), moeten worden beschouwd als gemiddelde waarden.

In werkelijkheid kunnen de grondeigenschappen zowel groter als kleiner zijn dan uit het grondmechanisch onderzoek volgt als gevolg van de ruimtelijke spreiding. De gevonden gemiddelde waarden voor de grondeigenschappen moeten daarom worden vermenigvuldigd met, of gedeeld door partiële factoren om de hoge dan wel lage waarden voor de grondeigenschappen te bepalen.

$$\gamma = e^{-t_n V_m \sqrt{(1+1/n)}}$$

V_m is de gemeten variatiecoëfficiënt (= standaardafwijking gedeeld door gemiddelde waarde)

n is het aantal meetwaarden

t is de waarde studentverdeling volgens onderstaande tabel:

aantal meetwaarden n		3	6	10	20	30
t waarde	bruikbaarheidsgrenstoestand	3,24	2,48	2,25	2,11	2,06
	uiterste grenstoestand	9,22	4,90	3,96	3,42	3,27

Als alternatieven kan men:

- a) de variatiecoëfficiënt volgens NEN 6740 [NEN, 1997] hanteren en dan gebruik maken van $t = 2$ en $t = 3$ voor respectievelijk de bruikbaarheidsgrenstoestand en de uiterste grenstoestand
- b) zowel het gemiddelde als de variatiecoëfficiënt volgens NEN 6740 hanteren en dan gebruik maken van de partiële factoren volgens tabel B.2

Tabel B.3 in de NEN 3650-1 [NEN, 2020-a] geeft de volgende waarden:

Grondmechanische parameter	Partiële factoren					
	Zand			Klei/veen		
	Ruimtelijke spreiding V	Rekenmodel M	Totaalfactor V × M	Ruimtelijke spreiding V	Rekenmodel M	Totaalfactor V × M
Neutrale grondbelasting	1,1	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1
Gereduceerde grondbelasting	1,1	1,35	1,5	1,1	1,35	1,5
Passieve grondbelasting	1,1	1,35	1,5	1,1	1,35	1,5
Horizontaal evenwichtsdraagvermogen	1,4	1,16	1,6	1,4	1,46	2,0
Verticaal evenwichtsdraagvermogen	1,5	1,35	2,0	1,4	1,16	1,6
Horizontale beddingconstante	1,4	1,25	1,7	1,4	1,25	1,7
Verticale beddingconstante, omlaag	1,8 ^a	1,83 ^a	2,0 ^a	1,9 ^a	1,57 ^a	1,6 ^a
Verticale beddingconstante, omhoog	1,2	1,16	1,4	1,5	1,25	1,9
Wrijving	1,1	1,25	Zie ^b	1,5	1,57	Zie ^b
Axiale verplaatsing	1,3	1,25	1,6	1,2	1,25	1,5
Zetting	2,2	0,9	2,0	2,2	0,9	2,0
Uitvoeringszakking (tabel C.3 – C.5)			1,5			1,5

De totale partiële factor van 2,0 voor de zetting volgt dan uit de vermenigvuldiging van $2.2 \times 0,9 = 2,0$.

De achtergrond wordt gegeven in [TNO, 2003], te weten:

Met betrekking tot de *zettingsprognose* is er door het CROW onderzoek verricht. Uit dit (nog lopend) onderzoek is gebleken dat de variatiecoëfficiënt voor de Samendrukkingconstante C 0,25 bedraagt en μ/X_{nom} 0,9 bedraagt. Ofwel, het gemiddelde van de gemeten zettingen bedraagt 90% van de geprognostiseerde zetting, de prognose is dus in het algemeen enigszins conservatief. In deze waarde voor de variatiecoëfficiënt zijn alle onzekerheden die van belang zijn voor het maken van een zettingsprognose verwerkt (dus ook de laagdikte en het volumiek gewicht van de ophoging). Aangezien de grootte van de zetting lineair afhankelijk is van de samendrukkingsconstante kan de gevonden waarde voor de variatiecoëfficiënt ook voor de bepaling van de modelfactor voor zettingen worden gehanteerd.

Gezien het belang van de zetting voor het ontwerp van een leiding is deze belasting als dominant aangemerkt. Ook hier is een betrouwbaarheidsindex van 4,7 voor kruisingen, verhoogd tot 5,15 in verband met het lengte-effect, ook voor de veldstrekking gehanteerd. Rekening houdend met het volume effect (mechanisme lengte van 2x20 meter) voor het verloop van de zetting en een conservatieve waarde voor de fluctuatiefrequentie van 15 meter wordt de lokale variatie van 0,25 gereduceerd tot 0,19 voor het mechanisme en bedraagt de partiële factor voor zettingen daardoor 2,2. Deze waarde dient nog met de factor μ/X_{nom} 0,9 vermenigvuldigd te worden.

De $V = 0,25$ representeert de punt-voor-punt-spreiding van alle relevante stochasten en wordt gedomineerd door de (generieke) spreiding in de samendrukkingsconstante. De spreiding van 0,25 wordt gereduceerd tot 0,19 vanwege uitmiddeling over het volume van het mechanisme.

Bij de cases Wolferen – Sprok [POV K&L, 2020-b] en [POV K&L, 2020-c] leidt dat op overeenkomstige wijze tot $V = 0,13 \times (19/25) = 0,10$.

De verhouding $\mu / X_{nom} = 0,9$ geeft informatie over de gemiddelde modelonzekerheid. De spreiding van de modelonzekerheid moet ook worden meegenomen. Alhoewel niet expliciet vermeld lijkt deze te zijn verwerkt in de partiële factor in de eerste kolom. In het geval van de cases Wolferen - Sprok moet die dus ook nog worden toegevoegd. De totale variatiecoëfficiënt voor de zetting komt daarmee op:

$$V = \sqrt{(0,10^2 + 0,10^2)} = 0,14$$

De partiële factor voor de RV (inclusief dus de spreiding voor modelonzekerheid) komt daarmee voor de cases Wolferen - Sprok op:

$$\gamma_{(RV)} = \gamma \{ \exp (\alpha_S \times \beta_t \times V) \}$$

$$\mu = 1,0$$

$$\alpha_S = \text{standaard invloedscoëfficiënt} = 0,7 \text{ [Eurocode EN 1990]}$$

$$\beta_t = \text{streefwaarde betrouwbaarheidsindex} = 5,1$$

$$V = \text{variatiecoëfficiënt} = 0,14$$

Waarmee:

$$\gamma_{(RV)} = \exp \{ (0,7 \times 5,1 \times 0,14) \} = 1,65$$

Verder geldt dan nog steeds voor de modelfactor (zonder spreiding)

$$\gamma_{(M)} = 0,9$$

Product:

$$\gamma_{(RV)} \times \gamma_{(M)} = 1,65 \times 0,9 = 1,48 = \text{afgerond } 1,5$$

Dit is dus een reductie ten opzichte van de waarde 2,0 in NEN 3650-1, gemotiveerd door het hanteren van een lokale proevenverzameling en zettingsberekening.

3 Optimalisatie versterkingsprofiel

In voortrajecten bij dijkversterkingsprogramma worden regelmatig in eerste instantie robuuste nieuwe dijkprofielen voorgesteld om de veiligheidsopgave te mitigeren. Bedacht moet worden dat robuuste dijkprofielen op de Nederlandse gronden zettingen op kunnen leveren. In het algemeen is in leidingberekeningen de zettingsbelasting, of beter de belasting ten gevolge van zettingsverschillen, de dominante belasting. Omdat leidingkruisingen in principe haaks op de waterkering worden ontworpen kan de zettingsbelasting relatief groot zijn. Indien reeds

vroegtijdig in het ontwerpproces nagedacht kan worden over de mogelijkheden voor optimalisaties van het versterkingsprofiel bij leidingkruisingen (als voorbeelden kunnen genoemd worden flauwere taluds of bermen) dan wordt direct daarmee de dominante belasting gemitigeerd.

Uiteraard afhankelijk van het type leiding, maar bij zettingen dient er eerder in centimeters dan in decimeters gedacht te worden.

4 Ontwerpparameters (ontwerpdrukken, ontwerptemperaturen)

Leidingen worden onder andere ontworpen op basis van de ontwerpdruk en ontwerptemperatuur. Met name bij lange leidingsecties (transportleidingen) kan de actuele maximale druk en / of temperatuur ter plaatse van de betreffende dijk kruising lager zijn dan de gespecificeerde ontwerpdruk of -temperatuur.

In de sterkteberekeningen volgens de NEN 3650 reeks dienen diverse belastingcombinaties beschouwd te worden, waarbij verschillende belastingen gevarieerd moeten worden. Het beperken van de lokale temperatuurgradiënt of drukgradiënt kan een significant verschil leveren in de berekening van de spannings- en vervormingswaarden in de leiding..

Om de in de dijk kruising te verwachten maximale of minimale druk of temperatuur aan te kunnen tonen dient de leidingeigenaar te kunnen beschikken over langdurige meetregistraties van druk dan wel temperatuur. Veelal zijn deze echter voor de locatie zelf niet beschikbaar, maar kunnen wellicht worden geïnterpoleerd uit registraties van andere meetlocaties.

Het zij overigens opgemerkt dat in het (verre) verleden leidingkruisingen niet altijd berekend werden op thermische belastingen in de leiding. Veelal werd blijkbaar aangenomen dat in ondergrondse transportleidingen na verloop van enige afstand van de pomp geen of nauwelijks temperatuurvariatie meer voorkomen.

5 Materialen

5.1 Materiaalcertificaten

Stalen leidingen zijn vervaardigd uit buizen met een gespecificeerde minimum rekgrens. Sterkteberekeningen van leidingen volgens de NEN 3650 serie worden getoetst op deze gespecificeerde minimum rekgrens.

Wanneer de buizen vervaardigd zijn volgens een bepaalde fabricage standaard, is er derhalve de zekerheid dat deze buizen de daarbij behorende gespecificeerde minimum rekgrens bezitten. Er bestaat evenwel de mogelijkheid dat uit materiaalcertificaten van die buizen blijkt dat de actuele rekgrens van de betreffende buizen (behorende bij dezelfde batch waar de

materiaalcertificaat naar verwijst) hoger is dan de minimum gespecificeerde rekgrens van het leidingmateriaal. Bij toetsingen van bestaande leidingen in dijkkruisingen kan dan met deze gevalideerde actuele rekgrens gerekend worden in plaats van de gespecificeerde minimumrekgrens van het materiaal.

Opgemerkt wordt dat in een dijkkruising buizen van verschillende batches aanwezig kunnen zijn, zoals bijvoorbeeld buizen die gebruikt zijn voor de warme bochten en buizen die gebruikt zijn voor de rechte leidingdelen. Om deze optimalisatie toe te kunnen passen dient er zekerheid te zijn middels de certificaten en bijvoorbeeld het las- en pijpboek waar welke buizen zijn toegepast.

De ervaring van Lievense|WSP en B&B Advisor is dat zeker bij de wat meer gedateerde leidingkruisingen de actuele rekgrens op het materiaalcertificaat in sommige gevallen duidelijk hoger is dan de gespecificeerde minimumrekgrens van het materiaal, vermoedelijk omdat in het verleden de staalfabrieken het risico op afkeuring wilden vermijden.

In de praktijk blijkt niet altijd de locatie specifieke materiaalcertificaten beschikbaar te zijn, in dat geval kunnen mogelijk alternatieve NDO methodes toegepast worden om de sterkte van een stalen buisleiding vast te stellen. In de volgende mogelijkheid tot optimalisatie wordt dat omschreven.

5.2 Alternatieve NDO methodes voor de vaststelling van de sterkte van een stalen buisleiding

Omdat de materiaalcertificaten van te onderzoeken kruisingen van buisleidingen met waterkeringen niet altijd beschikbaar zijn kan het nodig zijn een praktisch bruikbare, NDO (Niet destructief Onderzoek) techniek voor de meting van de materiaalsterktes te velde te hebben voor buisleidingen waar sterkte de belangrijke factor is.

Nota Bene: Indien ook de kerftaaiheid (kerfslagwaarde) belangrijk is en deze niet bekend is (overwegend bij hoge druk leidingen in Groep I, is het niet zinvol de sterkte te verifiëren).

In de NPR 3659 [NPR, 1996], onderdeel uitmakend van de NEN-3650 reeks - is geen methode aangegeven voor het bepalen van de sterkte van stalen leidingen.

De onderstaande beschikbare methodes zouden in een aanvullende nieuwe paragraaf 7.3 in de NPR 3659 kunnen worden opgenomen.

Beschikbare methodes voor het op niet destructieve wijze vaststellen van de materiaalsterkte bij stalen leidingen zijn de volgende:

1. Bepalen van de chemische samenstelling met een mobiele spectrometer. Bepaalde (micro-) legeringselement zijn kenmerkend voor hogere sterkte staalsoorten
2. Uitvoeren van hardheidsmetingen. Er is een relatie tussen de hardheid en de sterkte (met een zekere spreiding)

3. Het maken van replica's om onder microscoop de korrelgroottes te kunnen meten. Een stukje materiaal wordt schoon (beitsen) gemaakt en vervolgens wordt de replica gemaakt. Een replica is een soort foto van de materiaalstructuur. Naast korrelgrootte kan de metaalkundige ook wat zeggen over de warmtebehandeling (hogere sterkte krijgt men door aanvullende warmtebehandelingen)
4. Bepaling van de elektromechanische parameters. Het principe van deze techniek is dat er een relatie is tussen de elektrische geleidbaarheid en de magnetische permeabiliteit met de mechanische eigenschappen van ferromagnetische materialen

Per situatie moet een plan met meetlocaties worden opgesteld. Hierbij is te bedenken dat ter plaatse van materiaalovergangen/wanddikte overgangen er sprake kan zijn van verschillende sterktes. Ook bochten kunnen andere sterktes hebben omdat het uitgangsmateriaal anders is of een warmtebehandeling heeft plaatsgevonden. Per meetlocatie wordt aanbevolen voor een bepaalde proef de regels aan te houden zoals die gelden voor het uitvoeren van destructief onderzoek (tenminste drie) aan te houden.

In principe moet een uitvoerder zijn geaccrediteerd voor de betreffende verrichting (zie lijst van verrichting onder rva.nl van de Raad voor Accreditatie. Bijvoorbeeld een laboratorium, een inspectie instelling of keuringsinstelling moeten geaccrediteerd zijn voor hun werkgebied).

Toelichting

De eerste drie methodes worden toegepast op raffinaderijen en chemisch industrie, indien dat door de inspecteur nodig wordt gevonden. Ook bij buisleidingen worden deze technieken zo nu en dan toegepast, bij bijvoorbeeld "fit for purpose" situaties.

Veelal wordt een combinatie van methodes gebruikt. In het geval van buisleidingen waar niets van bekend is, wordt aanbevolen de eerste 3 technieken gezamenlijk voor de case toe te passen. In geval van verschillende uitkomsten kan dan een besluit worden genomen. Hierbij is expert input van belang vanwege het indicatieve karakter van de methodes.

De vierde methode is als "hand held" techniek nog niet veel toegepast en daar is dan ook weinig ervaring mee. Ook bij deze methode wordt aanbevolen deze te combineren met een methode genoemd onder 1, 2 of 3.

5.3 Rekapaciteit

In geval van het plastisch berekenen van de leiding volgens de NEN 3650 methodiek mag volgens D.3.2 van de NEN 3650-2 [NEN, 2020-b] – indien geen nadere informatie beschikbaar is – de rekenwaarde van de rek (totale rek onder belasting) niet meer bedragen dan 0,5% en 0,7% voor staalsoorten met een gegarandeerde minimumrekgrens van 360 MPa of minder. Indien voor een specifiek materiaal in combinatie met specifieke eisen ten aanzien het lasproces wordt aangetoond dat het desbetreffende buismateriaal met de daarin voorkomende lassen een grotere rekapaciteit heeft dan 0,5%, dan mag volgens de NEN 3650-2 van die capaciteit gebruik worden gemaakt.

In de opmerking van D.3.2 van de NEN 3650-2 wordt overigens aangegeven dat de waarde van 0,5% als veilige waarde wordt beschouwd, waarbij bij bijvoorbeeld oude leidingen veel grotere rekapaciteiten zijn vastgesteld.

In de jaren 1970-1980 heeft onderzoek plaatsgevonden voor implementatie van een berekeningsmethode gebaseerd op de plasticiteitsleer in het kader van "Onderzoek Pijpleidingen (OPL)". Een groot deel van dit onderzoek is verricht door TNO. De ontwikkelde theorie en formules zijn opgenomen in de huidige NEN 3650 reeks.

Eén van de onderdelen betrof het vaststellen van de toelaatbare rekapaciteit. Dit werk is gerapporteerd in "P. Bristoll, A.M. Gresnigt, P.H.A. Rietjens; "Materiaaleisen", Eindrapport van de Subgroep Materiaaleisen van de Begeleidingscommissie Pijpleidingen, Delft, oktober 1982"

De basis voor de relatie tussen rek en de middels de mechanische beproeving te bepalen CTOD (Crack Tip Opening Displacement, scheurtip opening verplaatsing) wordt gevormd door de zogenaamde CTOD "Design Curve". Deze is afkomstig uit de BS PD 6493, de voorganger van de BS 7910.

Ook in de Canadese pijpleidingnorm CSA Z662-11 (CSA Z662-11, Oil and Gas Pipeline Systems, 2013) is een berekeningsmethode gegeven, gebaseerd op de plasticiteitsleer (met veel dezelfde formules als in NEN 3650 – voor de achtergronden wordt onder andere gerefereerd naar Heron 31 van TNO - Gresnigt). Hierin is ook een formulering opgenomen voor de rekapaciteit. Deze is gebaseerd op degelijk onderzoek rond 2005 (later dan het in de jaren 70-80 uitgevoerde onderzoek) door het Gas Research Institute.

In C.6.3.1.3 van CSA Z662-11 worden in het gedeelte over plastisch ontwerp volgende formules vermeld voor berekenen van de rekapaciteit:

C.6.3.1.3.1 Equations

In the absence of more detailed information, a generally conservative, and sometimes highly conservative, longitudinal tensile strain capacity (in %) may be computed as follows:

(a) for surface-breaking defects:

$$\varepsilon_t^{crit} = \delta^{(2.36-1.58\lambda-0.101\xi\eta)} (1+16.1\lambda^{-4.45}) (-0.157+0.239\xi^{-0.241}\eta^{-0.315}) \quad (\text{C-4})$$

(b) for buried defects:

$$\varepsilon_t^{crit} = \delta^{(1.08-0.612\eta-0.0735\xi+0.364\psi)} (12.3-4.65\sqrt{t}+0.495t) \quad (\text{C-5})$$

$$(11.8-10.6\lambda) \left(-5.14 + \frac{0.992}{\psi} + 20.1\psi \right) (-3.63+11.0\sqrt{\eta}-8.44\eta)$$

$$\left(-0.836+0.733\eta+0.0483\xi + \frac{3.49-14.6\eta-12.9\psi}{1+\xi^{1.84}} \right)$$

where

δ = apparent crack-tip opening displacement (CTOD) toughness, mm

λ = ratio of yield strength to tensile strength or Y/T

ξ = ratio of defect length to pipe wall thickness, or $2c/t$

η = ratio of defect height to pipe wall thickness, or a/t for surface-breaking defects and $2a/t$ for buried defects

ψ = ratio of defect depth to pipe wall thickness, or d/t

t = pipe wall thickness, mm

Toelichting: In bovenstaande beschrijving wordt gesproken van “buried defects”, dit zijn defecten die onder het staaloppervlakte aanwezig zijn, zogenaamde ingesloten defecten. Surface-breaking defects zijn uittrekkende fouten.

In de NEN 3650-2 is geen formule vermeld om op basis van de CTOD waarden de actuele rekgrens te kunnen bepalen. Met bovenstaande formule is dat mogelijk. De defectafmetingen moeten daarbij worden ontleend aan de project specifieke specificaties voor lassen en niet-destructief onderzoek.

6 Wanddikte

6.1 Relatieve sterkte

In de Pijpleidingcode Zuid-Holland 1972 [SGPL, 1992], een voorloper van de huidige NEN 3650 reeks, was vermeld dat afgezien kon worden van de eis van relatieve sterkte indien het drukbeheersingssysteem door een overheidsinstantie c.q. onafhankelijk deskundig instituut wordt gecontroleerd. Verwezen wordt naar paragrafen III.5.A.2.a.3 en hoofdstuk XI van de Pijpleiding Code. Deze bepaling, in de Pijpleidingcode Zuid Holland zelf als ‘ontsnappingsclausule’ aangemerkt, is op zich een welkome bepaling bij dijkversterkingsprojecten, maar is destijds niet overgenomen in de NEN 3651 [NEN, 2020-f].

De gedachte bij de eis van relatieve sterkte is dat ingeval van te hoge overdruk barsten van de buis op zal treden buiten de kruising. Uit de breukmechanica blijkt dat mogelijk barsten van een leiding in eerste instantie wordt bepaald door de kerftaaiheid (kerfslagwaarde) en door aanwezige beschadigingen of corrosie en veel minder door de sterkte van het materiaal.

Ook bij het stoppen van een instabiele lopende scheur (fracture arrest) is de kerftaaiheid belangrijker dan de sterkte. De eis van een 20% hogere sterkte (in de praktijk een 20% hogere wanddikte) in relatie tot het vermijden van barsten heeft dus geen nut. De materiaaleisen genoemd in de NEN 3650 garanderen voldoende kerftaaiheid. Voor bestaande leidingen zal aangetoond moeten worden dat de kerftaaiheid voldoende is (als vermeld op de materiaalcertificaten of uit een analyse van de data van uitgenomen pijpstukken). Uiteraard moet ook een goede leidingconditie worden aangetoond.

Gezien bovenstaande wordt voorgesteld de ontsnapingsclausule uit de Pijpleidingcode over te nemen in de NEN 3651 door in paragraaf 6.6 van NEN 3651:2020 de volgende tekst toe te laten voegen:

“Van de eis van relatieve sterkte mag worden afgezien indien wat betreft drukbeheersing wordt voldaan aan paragraaf 7.1 tot en met 7.4 uit NEN 3650-1:2020 en dit is geverifieerd en periodiek wordt gecontroleerd door een Aangewezen en Geaccrediteerde Keuringsinstelling (dit kan zijn een onafhankelijke Keuringsdienst of een zogenaamde Eigen Inspectiedienst).”

6.2 Rekenmethodiek (plastisch)

De ‘standaard’ rekenmethodiek voor stalen (transport)leidingen volgens de NEN 3650 reeks is de elastische berekening, die vereenvoudigd kan worden uitgevoerd volgens de NEN 3650-1 ofwel volledig volgens de NEN 3650-2, waarbij berekening overgaat naar een liggerberekening.

De NEN 3650-1 biedt, onder voorwaarden, echter ook de mogelijkheid om over te gaan naar de plastische rekenmethodiek. Deze rekenmethode beschrijft het gedrag van een stalen leiding beter, met name waar in de leidingkruising mogelijk sprake is van spanningspieken en belastingconcentraties, bijvoorbeeld tussen rechtstanden en bochten of bij overspanningen.

Uiteraard vergt deze rekenmethodiek meer geavanceerde rekensoftware dan software voor de ‘eenvoudigere’ elastische berekeningsmethode, deze software is beschikbaar. In het kader van de toetsingen van de Gasunie leiding A-505 [POV K&L, 2020-b] en de Vitens waterleiding [POV K&L, 2020-c] in het dijkversterkingsproject Wolferen-Sprok behoefde overigens uiteindelijk de plastische rekenmethodiek niet te worden toegepast, daar de beschouwde leidingen al volgens de elastische rekenmethodieken voldeden aan de sterkte- en vervormingseisen van de NEN 3651. Parallel is echter voor de Gasunie leiding A-505 ook een de toetsing uitgevoerd volgens de plastische rekenmethodiek; het berekeningsresultaat gaf een circa 10% ruimere marge ten opzichte van grenswaarden voor de spanning en toonde een afvlakking van de piekspanningen. Het valt daarmee te overwegen om gedurende de toetsingen deze rekenmethodiek (alsnog) in te zetten.

6.3 Verhoging grensspanning bij aanwezigheid van verstijvingsringen

Bij leidingkruisingen uitgevoerd (met segmentbochten) met verstijvingsringen zijn ter plekke van de verstijvingsringen de spanningen hoog. Een deel van deze spanningen betreft secundaire buigspanningen. De grensspanningen volgens de NEN 3650-2 zijn conservatief. In de drukvatenwereld komt men bv. op een toelaatbare secundaire buigspanning van $1,75 R_e$. In de NEN 3650-2 komt men op $1.70 R_e$ grensspanning. Dit is ca. een factor 1,5 verschil met de drukvatenwereld.

Basis voor de criteria in de NEN 3650-2 is het vroegere RTOD blad D1101. De ROTD gaat uit van toelaatbare spanningen en de NEN 3650 van grensspanningen. Dit is als zodanig niet meegenomen bij de opstelling van de NEN 3650-2.

De tabellen 3 en D.4 in NEN 3650-2 zouden uitgebreid moeten worden met één regel betreffende secundaire buigspanningen ten gevolge van verstijvingsringen met het daarbij behorende minder conservatieve criterium. Het criterium dient zodanig te zijn dat wisselend vloeien wordt voorkomen.

Nieuw tekstvoorstel:

Uitbreiden van de tabellen 3 en D.4 met een regel over secundaire buigspanningen ten gevolge van verstijvingsringen met een grensniveau van $(R_e + R_{e(\theta)}) / \gamma_m$

6.4 Beoordeling stalen leidingen met een bedrijfsdruk van $\geq 1,0$ MPa

In het kader van dijkversterkingen dienen bestaande leidingen beoordeeld te worden. In de NEN 3651 is in bijlage E de wijze van toetsen vermeld, waarbij de beoordeling op sterkte en stabiliteit plaatsvindt volgens een bepaald schema, wat gezien kan worden als stappenplan (E.2.2.2 van de NEN 3651).

In de beoordeling van stalen leidingen met een bedrijfsdruk gelijk of hoger dan 10 bar (1,0 MPa) is in E.2.2.4 de volgende (afkeur)eis opgenomen:

— Indien $f_t = 2d_n \times R_e/p_d \times D_{gem} < 2,8$, dan voldoet de leiding niet.

Toepassing van de formule leidt tot veel afkeuring doordat in feite een te zware toetsfactor wordt toegepast. Aanpassing van deze factor zal leiden tot een meer reële formule.

De in deze formule gebruikte factor van 2,8 is afkomstig uit de Pijpleidingcode Zuid Holland [SGPL, 1992], een voorloper van de huidige NEN 3650 reeks.

In de Pijpleidingcode was 2,8 de rekenfactor ten opzichte van de grenswaarde van de minimum gegarandeerde rekgrens bij berekening op uitsluitend inwendige druk bij schadefactor 1.

De factor 2,8 is als volgt opgebouwd:

$1 \times 1,5 \times 1,4 \times 1,33 = 2,8$, waarin:

1 is de schadefactor (tegenwoordig importantiefactor) van de dijk

1,5 is de rekenfactor

1,4 is de onzekerheidsfactor voor zettingen

1,33 is de onzekerheidsfactor voor passieve grondbelasting

De factoren 1,4 en 1,33 zijn conform notities inzake constructieve risico-beperkende maatregelen bij hogedrukpijpleidingen in stedelijk gebied/waterstaatswerken, PWZH jaren '70 en '80, die zijn gebaseerd op de uitkomsten van 20 berekeningen uitgevoerd in de 70'er jaren (om precies te zijn, zijn het er 19), zowel berekeningen gebaseerd op de elasticiteitstheorie als de plasticiteitstheorie. In de 1,33 is opgenomen een onzekerheidsfactor 1,3 voor passieve grondbelasting.

Verder werd in de Pijpleidingcode in de formule uitgegaan van de nominale wanddikte, terwijl in de NEN 3651 in de formule de nominale wanddikte is vervangen door de minimale wanddikte. Dit betreft direct zo'n 10 - 12.5 % verschil in wanddikte (uitgaande van Grade B volgens API 5L) en daarmee een directe verzwaring van het criterium,

Uit de resultaten van genoemde berekeningen (zie bijlage) wordt voor de grondbelasting een factor van rond de 0,09 gevonden en ca. 0,4 voor zettingen. In de eerder genoemde formule worden de factoren met elkaar vermenigvuldigd terwijl ze volgens de gevolgde (conservatieve) filosofie in de berekeningen, opgeteld moeten worden, $1 + 0,4 + 0,09 \times 1,3 = 1,52$. Dan ontstaat $1,52 \times 1,5 = 2,28$. Met de wanddikte tolerantie van 10% moet dan getoetst worden tegen 2,1 in plaats van 2,8.

Uit OPL (Onderzoek Pijpleidingen – zie A.M Gresnigt “Plastic design of buried steel pipelines in settlement areas”, Heron nr. 31, Delft, 1986) is bekend dat de barstdruk niet nadelig wordt beïnvloed door uitwendige krachten en dat met de plasticiteitsleer het werkelijk gedrag van ingegraven stalen leidingen het best wordt beschreven.

Belangrijk is wel dat de buisleiding taai constructiegedrag vertoont. Met de materiaaleisen uit de NEN 3650 is hieraan voldaan. Met een nadere analyse van de database uitgesneden materiaal van leidingen elders kan bijvoorbeeld aangetoond worden dan voor bestaande leidingen aan deze eis kan worden voldaan, als voor deze materialen geen materiaalcertificaten voorhanden zijn.

Voor de minimum vereiste waarde van de breukrek wordt 8% voorgesteld (taai constructiegedrag) en voor de CTOD van de lassen en warmte beïnvloede zone een waarde van 0,075 mm. Tevens dient aangetoond te worden dat de sterkte van de lassen en warmte beïnvloede zone tenminste gelijk of meer is dan van het moedermateriaal.

Kwalitatieve beschrijving van het verbeteringsvoorstel:

Voor bestaande leidingen welke niet zijn berekend kan volstaan worden met een eenvoudige toets (ketelformule) op de wanddikte. In dit stuk wordt op basis van de oorspronkelijke analyse

een onderbouwd voorstel voor een meer realistische (maar nog steeds conservatieve) factor gedaan.

Nieuw tekstvoorstel:

Vervang in E.2.2.4 de factor 2,8 door 2,1

Pas tabel E.1 aan op deze nieuwe factor 2,1

Uitgaande van een aanpassing van de toetsfactoren met de vermenigvuldigingsfactor “2,1/2,8” wordt de tabel dan als volgt aangepast:

Importatiefactor fictieve nieuwe leiding	Huidige Toetsfactor NEN 3651 (minimaal vereist)	Voorstel nieuwe toetsfactor (minimaal vereist)
1,00	2,8	2,1
0,95	3,0	2,4
0,90	3,1	2,7
0,85	3,3	3,1
0,80	3,5	3,4
0,75	3,7	3,7

In de bijlage zijn de resultaten van de genoemde kruisingsberekeningen voor analyse aangegeven.

7 Referenties

[Deltares, 2018], WBI Veiligheidsraamwerk K&L

Generieke uitgangspunten als vertrekpunt voor nadere uitwerking in (pilot) projecten
Deltares (RWS-WVL)
Kenmerk 11202225-005-GEO-0001-jpjm
Versie 01 (definitief)
Mei 2018

[NEN,1997], NEN 6740:1991+A1:1997, Geotechniek - TGB 1990, Basiseisen en belastingen,
1 mei 1997.

[NEN, 2020], NEN (NEN 3650 reeks, 2020), bestaande uit:

NEN (2020-a). NEN 3650-1, Eisen voor buisleidingsystemen - Deel 1: Algemene eisen,

NEN (2020-b). NEN 3650-2, Eisen voor buisleidingsystemen - Deel 2: Staal,

NEN (2020-c). NEN 3650-3, Kunststof,

NEN (2020-d). NEN 3650-4, Beton,

NEN (2020-e). NEN 3650-5: Gietijzer,

NEN (2020-f). NEN 3651, Aanvullende eisen voor buisleidingen in of nabij belangrijke waterstaatswerken.

Normcommissie 310 004 Transportleidingen

Januari 2020

[NPR, 2006], Praktijkrichtlijn Ondergrondse pijpleidingen

Grondslagen voor de sterkteberekening,

NPR 3659/A1:2003/C1

Correctieblad C6

2006

[POV K&L, 2020-b], Faalkansanalyse dijkontwerp Wolferen - Sprok met kruisende gasleiding A-505

Derde toepassing Veiligheidsraamwerk Kabels & Leidingen

Projectoverstijgende verkenning Kabels en Leidingen, Deltares

Versie 4 (definitief eindconcept)

8 september 2020

Projectoverstijgende verkenning Kabels & Leidingen

3 december 2020

[POV K&L, 2020-c], Faalkansanalyse dijkontwerp Wolferen-Sprok met kruisende waterleiding

Vierde toepassing Veiligheidsraamwerk Kabels & Leidingen

Projectoverstijgende verkenning Kabels en Leidingen, Lievense|WSP

3 december 2020

[POV K&L, 2020-e], Doorontwikkeling Veiligheidsraamwerk K&L

Projectoverstijgende verkenning Kabels & Leidingen

3 december 2020

[SGPL, 1992], Pijpleidingcode

Eisen te stellen aan pijpleidingen voor het transport van gassen en vloeistoffen met betrekking tot de waterstaatkundige veiligheid

Studiegroep Pijpleidingen voor Gassen en Vloeistoffen

Revisie 7

Juni 1992

[TNO, 2003], Herziening rekenfactoren en spanningscorrectiefactoren in NEN 3650

TNO bouw, rapport 2003 CI R0031, 11 maart 2003.

Bijlage 1

Resultaten kruisingsberekeningen voor analyse

Onderstaande tabel geeft de verhoudingen tussen de spanningen ten gevolge van de zetting respectievelijk grondbelasting en de spanning en ten gevolge van inwendige druk.

Nummer buiselement in kruising	σ zetting/ σ druk	σ grondbelasting/ σ druk
1	0.16	0.08
2	0.15	0.09
3	0.12	0.10
4	0.14	0.11
5	0.14	0.04
6	-	0.17
7	2.78	-
	0.50	-
8	-	-
9	0.20	-
10	0.02	-
11	0.67	0.04
12	0.20	0.21
13	0.33	-
14	0.02	0.14
15	1.97	-
	0.31	0.07
16	0.05	0.08
17	0.02	0.25
18	-	0.20
19	0.01	0.16
Gemiddelde	0.39	0.09