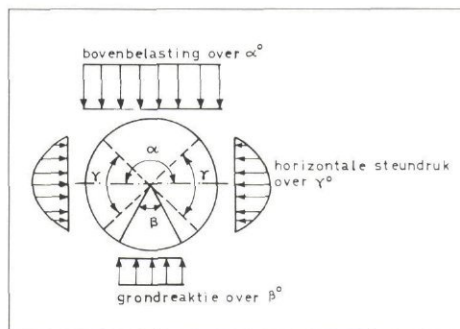


Het optimaliseren van vereenvoudigde sterkteberekeningen van buizen

Inleiding

De drinkwaterleidingen in het voorzieningsgebied van de DWL Rotterdam hebben een totale lengte van 1.600 km. Ruim 300 km hiervan zijn transportleidingen met diameters variërend van 400 mm tot 1.600 mm. Het op sterkte dimensioneren van deze leidingen geschiedt, voor zover zij zijn gelegen in waterbouwkundige objecten, met behulp van een vrij groot en complex computerprogramma.

Voor de berekening van dergelijke leidingkruisingen zijn onder meer uitgebreide grondmechanische randvoorwaarden noodzakelijk.



Afb. 1 - Schematisatie belastingen.

Daarom werd besloten om het maken van vereenvoudigde sterkteberekeningen te automatiseren.

Eisen berekeningsprogramma

Het medio 1983 gereedgekomen computerprogramma X-PYP voldoet aan de volgende eisen:

- diverse buizen onder wisselende omstandigheden kunnen snel en probleemloos berekend worden;
- de gehanteerde berekeningsmethodiek is geschikt/toegestaan om sterkteberekeningen te maken welke voldoen aan de interne veiligheidsvoorschriften van de DWL.

Analyseklasse IV² en de provinciale Pijpleidingcode 1972.

Deze eisen houden in dat het programma de mogelijkheid moet bieden om zowel met een horizontale steundruk over een variabele hoek als met een variabele opleghoek te kunnen rekenen (zie afb. 1);

- het computerprogramma is geschikt voor het dimensioneren van zowel stalen als kunststofbuizen; ten behoeve van de berekening van laatstgenoemde buissoort wordt aan het einde van het programma een toetsing op de deflectie uitgevoerd;
- het programma bepaalt de resultante van eigen gewicht van de buis incl. watervulling en opwaartse kracht van het grondwater;
- door de opbouw van het programma is muteren snel en gemakkelijk, zodat nieuwe berekeningsinzichten zonder problemen verwerkt kunnen worden.

Eisen ten aanzien van de invoer

De invoergegevens kunnen formatvrij worden ingetoetst via het beeldscherm, waarbij men de keuze heeft uit de volgende twee mogelijkheden:

- interactief door middel van het beantwoorden van de voor het systeem gestelde vragen;



ING. J. KREBER
DWL Rotterdam



ING. P. C. VAN BEEK
DWL Rotterdam

Leidingen met diameters tot 400 mm werden tot voor kort bij de DWL berekend aan de hand van een rekenschema.

Dit schema was gebaseerd op de rekenmethodiek beschreven in de provinciale Pijpleidingcode 1972 (Vereenvoudigde Sterkteberekening).

De huidige economische omstandigheden en het langzamerhand gewijzigde (meer reële) inzicht van de vergunning/toestemmingverleners, waren voor de DWL aanleiding het op sterkte dimensioneren van buizen met kleinere diameter kritisch te beschouwen.

In de op te stellen rekenregels zouden de nieuwste inzichten, gebaseerd op onderzoeksresultaten met betrekking tot opleghoeken en horizontale steundrukken verdisconteerd moeten zijn.¹

Met betrekking tot het te bestellen buismateriaal kan gesteld worden dat de meest verantwoorde keuze slechts mogelijk is indien meerdere combinaties van buismateriaal en wanddikte onderzocht zijn. De mogelijkheid om snel diverse alternatieve berekeningen te kunnen maken was daarom een vereiste.

Afb. 2 - Beslissingstabel voor eliminatie spanningsoverschrijding.

		GEEN/WEL BOCHT IN ZETTINGSGEBIED			
		GEEN		WEL	
Richting buisspanning	verkeersbelasting met/zonder	ZONDER	MET	ZONDER	MET
Y	OORZAAK SPANNINGS- OVERSCHRIJDING	GROND	GROND + VERKEER	GROND + I _y	GROND + I _y + VERKEER
	OPLOSSING	H< T> σ _{v1} >	H> T> σ _{v1} >	H< T> σ _{v1} > R> δ< L>	H> T> σ _{v1} > R> δ< L>
X	OORZAAK SPANNINGS- OVERSCHRIJDING	ZETTING		ZETTING + I _x	
	OPLOSSING	σ _{v1} > δ< L>		σ _{v1} > δ< L> R>	

Verklaring van de in de tabel gebruikte symbolen:

- Y – tangentiële spanning
- X – axiale spanning
- H – gronddekking boven kruin buis
- T – buiswanddikte
- σ_{v1} – vloeispanning
- R – bochtstraal buis
- δ – zettingsverschil
- L – afstand waarover zettingsverschil werkt
- I_x en I_y – stressintensificatiefactoren bij bocht in zettingsgebied.

¹ Onderzoek naar opleghoek en horizontale steundruk in zand is in 1983 uitgevoerd in het laboratorium van ingenieursbureau Geotechniek van Gemeentewerken Rotterdam. De proef is een gezamenlijke actie van NV Nederlandse Gasunie, Publieke Werken Amsterdam, Centrum Onderzoek waterkeringen en Gemeentewerken/DWL Rotterdam.

² Klasse voor het ontwerpen van leidingen, zoals beschreven in de Toelichting op de Algemene Bepalingen etc. voor leidingen van de gemeente Rotterdam.

berekennings- resultaten	GEEN/WEL BOCHT IN ZETTINGSGEBIED					
	Geen			Wel		
	$\sigma_y \approx \bar{\sigma}$ $\sigma_x < \bar{\sigma}$	$\sigma_y < \bar{\sigma}$ $\sigma_x < \bar{\sigma}$	$\sigma_y < \bar{\sigma}$ $\sigma_x \approx \bar{\sigma}$	$\sigma_y \approx \bar{\sigma}$ $\sigma_x < \bar{\sigma}$	$\sigma_y < \bar{\sigma}$ $\sigma_x < \bar{\sigma}$	$\sigma_y < \bar{\sigma}$ $\sigma_x \approx \bar{\sigma}$
oplossing	$T >$ $\sigma_{v1} <$	$T <$ $\sigma_{v1} <$	$T <$	$T >$ $\sigma_{v1} <$	$T <$ $\sigma_{v1} <$ $R <$	$T <$

Verklaring gebruikte symbolen

σ_y - tangentiële spanning	$\approx$ - ongeveer gelijk aan
σ_x - axiale spanning	$<$ - kleiner dan
$\bar{\sigma}$ - toelaatbare spanning (in x- en y-richting)	$>$ - groter dan
T - buiswanddikte	$<<$ - veel kleiner dan
σ_{v1} - vloeispanning	
R - bochtstraal buis	

Afb. 3 - Beslissingstabel optimalisatie buiswanddikte, bochtstraal en staalkwaliteit.

— schijfgebied (koppelen van een invoerfile).

Eisen ten aanzien van de uitvoer

— uitvoer op A4-formaat, zodat deze direct te gebruiken is voor het aanvragen bij vergunningen (geen typewerk);

— logische opbouw van de diverse belastingscomponenten. Hierdoor krijgt de constructeur een goed inzicht in de diverse aandelen van de buisspanningen ten gevolge van bepaalde belastingssituaties.

Hulpmiddelen bij het dimensioneren

Tijdens het toetsen van berekende aan toelaatbare spanningen wordt de constructeur herhaaldelijk geconfronteerd met een keuze probleem, namelijk bij welke spanningoverschrijding moeten welke factoren aangepast worden en op welke wijze? Met andere woorden, wat zijn de invloeden van de diverse berekeningsgegevens op het spanningsniveau in de buis? Om het inzicht van de constructeur te vergroten en tijdens het rekenen met het computerprogramma X-PYP snel de juiste beslissingen te kunnen nemen, is een beslissingstabel samengesteld (zie afb. 2). Ook bij een juiste berekening (geen spanningoverschrijding) kan het noodzakelijk zijn de berekening te herzien, indien het spanningsniveau in x- en/of y-richting ver beneden de toelaatbare spanning ligt. Voor deze situatie is eveneens een beslissingstabel samengesteld (zie afb. 3). Opgemerkt moet worden, dat beide beslissingstabellen behalve voor stalen buizen, tevens voor kunststofbuizen te gebruiken zijn.

Voor deze laatste categorie kan uiteraard de materiaalkwaliteit (en hiermee de toelaatbare spanning) niet gewijzigd worden. Uit de beslissingstabellen kan verder worden geconcludeerd dat een te hoog axiaal spanningsniveau onder meer verlaagd kan worden door gebruik te maken van een betere materiaalkwaliteit (hogere toelaatbare

spanning). In eerste instantie zou men geneigd zijn te kiezen voor een grotere wanddikte.

Dat dit niet juist is kan eenvoudig worden ingezien bij beschouwing van de volgende tabel met berekeningsresultaten (afb. 4).

Opmerking. Voor de berekeningen zijn de invoergegevens identiek behoudens de wanddikten en in het laatste geval de vloeispanning.

Gerekend is met de situatie met inwendige overdruk, met verkeersbelasting, geen bocht in zettingsgebied en zonder horizontale steundruk; $\delta = 0,25$ m over $L = 8,5$ m, $\beta = 30$ graden, $H = 1,00$ m voor een $\varnothing 168,3$ m stalen buis.

Het blijkt dus dat de axiale spanning ten gevolge van een zettingsverschil niet te beïnvloeden is door het vergroten van de wanddikte!

Alleen bij het belastingsgeval 'inwendige overdruk' zal het axiale spanningsniveau slechts een weinig afnemen ten gevolge van wanddiktevergroting (ketelformule).

Afb. 4 - Overschrijding toelaatbare axiale spanning ($\bar{\sigma}_x$) ondanks oplopende wanddikte.

Fe 360 $\bar{\sigma} = 160$ N/mm ²					
AP1-SLX-42 $\bar{\sigma} = 197$ N/mm ²					
$T = 3,2$ mm $T = 14,3$ mm $T = 3,2$ mm					
σ_y	σ_x	σ_y	σ_x	σ_y	σ_x
144,75	184,46	8,83	180,83	144,75	184,46

Afb. 5 - Invloed opleghoek en horizontale steundruk op een PVC-leiding.

belastingshoek $\alpha = 180^\circ$					
opleghoek	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 90^\circ$	$\beta = 120^\circ$		
hor.steundr.	$\delta = 0$	$\delta = 0$	$\delta = 90$	$\delta = 120$	$\delta = 0$
SIGMYB [N/mm ²]	26,04	17,40	14,83	14,54	15,29
DY [mm]	20,19	17,15	11,36	10,91	9,66

$\bar{\sigma} = 12,5$ N/mm²
 $\bar{D}Y = 20$ mm

Deflectieberekening

De controle op de (verticale) deflectie van de buiswand is bij kunststofbuizen een vergunningseis.

Deze deflectie is afhankelijk van de volgende factoren:

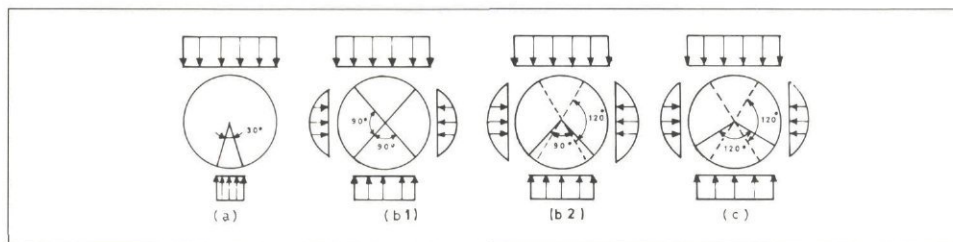
- bovenbelasting in combinatie met de belastings- en ondersteuningshoek (α resp. β) zie afb. 1;
- horizontale steundruk en de hoek waarover deze aangrijpt (γ);
- inwendige overdruk (reroundingseffect);
- gemiddelde buisstraal;
- stijfheidsfactor tegen buiging van de buiswand (EI).

De provinciale Pijpleidingcode stelt als norm dat deze deflectie niet groter mag zijn dan 5% van de uitwendige diameter.

Verder wordt geëist dat de deflectie bepaald moet worden volgens Spangler bij de (ongunstige) belastingsituatie 'drukloos'. Vergunninggevers die de provinciale code als leidraad voor de sterkteberekening voorschrijven, eisen dat slechts met een opleghoek van maximaal 30 graden gerekend mag worden. Bovendien mag, als extra veiligheid, de horizontale steundruk niet in de berekening verdisconteerd worden. Andere vergunningverleners laten, onder bepaalde omstandigheden, wel degelijk grotere opleghoeken en horizontale steundruk toe.

Het computerprogramma X-PYP biedt naast de mogelijkheid te rekenen met variabele opleg- en horizontale steunhoeken, tevens gelegenheid de invloed van de horizontale steundruk bij de deflectieberekening mee te nemen.

Aangezien de formule voor het bepalen van de verticale deflectie volgens Spangler geen rekening houdt met de gunstige invloed van de horizontale gronddruk is ten behoeve van de deflectieberekening in het computerprogramma X-PYP een algemene formule

Afb. 6 - Belastingsschema met variabele β en γ .

<pre> PROGRAMMA X-PYP (DVL ROTTERDAM - AFDELING DISTRIBUTIE) *blad 5- 400 MM PVC OPLEGHOEK BETA = 120, GRADEN! HORIZONTALE STEUNDUK OVER 120, GRADEN! LAMBDA = 0,5 ***** BELASTINGSKOMBINATIES ZONDER HORIZONTALE STEUNDUK ***** I BELASTINGSGEVAL ZONDER INWENDIGE OVERDRUK A ZONDER VERKEERSBELASTING 1. TANGENTIËLE SPANNINGEN QTOT1 = QN + QG = 7,92 N/MM SPB1 = KB*QTOT1*RGEM/(1+T) = 5,39 N/MM2 BOCHT ZETT.DELT = 0,00 N/MM2 TOTAAL: SIGY1 = 5,39 N/MM2 2. AXIALE SPANNINGEN SIGX1 = 0,29 N/MM2 TOTAAL: SIGX1 = 0,29 N/MM2 B MET VERKEERSBELASTING 1. TANGENTIËLE SPANNINGEN QTOT2 = QN + QG + QV = 22,48 N/MM SPB2 = KB*QTOT2*RGEM/(1+T) = 15,29 N/MM2 BOCHT ZETT.DELT = 0,00 N/MM2 TOTAAL: SIGY2 = 15,29 N/MM2 2. AXIALE SPANNINGEN SIGX2 = 0,29 N/MM2 TOTAAL: SIGX2 = 0,29 N/MM2 II BELASTINGSGEVAL MET INWENDIGE OVERDRUK A ZONDER VERKEERSBELASTING 1. TANGENTIËLE SPANNINGEN SPB3 = KB*QTOT1*RGEM/(1+T) = 5,39 N/MM2 SP = P/(QGM*(2+T)) = 4,40 N/MM2 SIGY3 = FRK+SPB3 + SP + SIGY1 = 6,00 N/MM2 2. AXIALE SPANNINGEN SIGX3 = SIGX1 + 0,5*SP = 2,49 N/MM2 B MET VERKEERSBELASTING 1. TANGENTIËLE SPANNINGEN SPB4 = KB*QTOT2*RGEM/(1+T) = 15,29 N/MM2 SIGY4 = FRK+SPB4 + SP + SIGY1 = 14,63 N/MM2 2. AXIALE SPANNINGEN SIGX4 = SIGX1 + 0,5*SP = 2,49 N/MM2 </pre>	<pre> PROGRAMMA X-PYP (DVL ROTTERDAM - AFDELING DISTRIBUTIE) *blad 6- 400 MM PVC OPLEGHOEK BETA = 120, GRADEN! HORIZONTALE STEUNDUK OVER 120, GRADEN! LAMBDA = 0,5 ***** BELASTINGSKOMBINATIES MET HORIZONTALE STEUNDUK ***** III BELASTINGSGEVAL ZONDER INWENDIGE OVERDRUK A ZONDER VERKEERSBELASTING SIGY5 = SIGY1 - SIGYH1 = 4,35 N/MM2 SIGX5 = SIGX1 = 0,29 N/MM2 B MET VERKEERSBELASTING SIGY6 = SIGY2 - SIGYH2 = 12,44 N/MM2 SIGX6 = SIGX2 = 0,29 N/MM2 IV BELASTINGSGEVAL MET INWENDIGE OVERDRUK A ZONDER VERKEERSBELASTING SIGY7 = SIGY3 - SIGYH3 = 6,87 N/MM2 SIGX7 = SIGX3 = 2,49 N/MM2 B MET VERKEERSBELASTING SIGY8 = SIGY4 - SIGYH4 = 11,77 N/MM2 SIGX8 = SIGX4 = 2,49 N/MM2 OVERZICHT MAXIMALE SPANNINGEN: I ZONDER HORIZONTALE STEUNDUK SIGY2 = 15,29 N/MM2 SIGX3 = 2,49 N/MM2 II MET HORIZONTALE STEUNDUK SIGY6 = 12,44 N/MM2 SIGX7 = 2,49 N/MM2 TOELAATBAAR SPANNING: STDEIX = 12,50 N/MM2 STDELY = 12,50 N/MM2 </pre>
<pre> 400 MM PVC OPLEGHOEK BETA = 120, GRADEN! HORIZONTALE STEUNDUK OVER 120, GRADEN! LAMBDA = 0,5 ***** TOETSING VERTIKALE DEFLECTIE (BELGEVAL ZONDER INW. DRUK) I ***** BEPALING DEFLECTIECOEFFICIENTEN I ***** - T.O.V. BOVENBELASTING BIJ ALPHA = 180, EN BETA = 120, IS VLOS SPANLEKI: KY = 0,089 - T.O.V. HORIZONTALE STEUNDUK BIJ GAMMA = 120, IS VLOS SCAR (FORMULE III) I KYH = 0,095 BEREKENING VERTIKALE DEFLECTIE MET MAX. BOVENBELASTING I ***** QTOT2 = 22,48 N/MM; QTH2 = 8,27 N/MM DY = (QTOT2*KY - QTH2*KYH) * Rgem^3 / (E * I) TOELAATBAAR DEFLECTIE I ***** VOOR KUNSTSTOFBUISZIJEN BEDRAAGT DE TOELAATBAAR DEFLECTIE I (VOLGENS PIJPLEIDINGCODE 1972) DYTOEL = 0,05 * DU = 20,00 MM CONCLUSIE I DY IS AKKOORD </pre>	

Afb. 7 - Voorbeeld uitvoer computerprogramma X-PYP (blad 5 t/m 7).

afgeleid, waarin alle effecten worden meegenomen.

De resulterende deflectie kan met onderstaande formule worden bepaald.

$$DY = (QTOT2 * KY - QTH2 * KYH) * R_{gem}^3 / (E * I), \text{ waarin:}$$

DY — resulterende verticale deflectie [mm]

QTOT2 — totale bovenbelasting [kN/m¹] (grond- en verkeersbelasting + resultante van eigen gewicht buis, watervulling minus opwaartse kracht grondwater)

KY — verticale deflectiecoëfficiënt, afhankelijk van de belastings- en ondersteuningshoek (α, β); zie afb. 1

QTH2 — totale horizontale belasting (grond- en verkeersbelasting) [kN/m¹]

KYH — verticale deflectiecoëfficiënt,

afhankelijk van de horizontale steunhoek (γ); zie afb. 1

R_{gem} — gemiddelde buisstraal [mm]

$E \cdot I$ — stijfheidsfactor tegen buiging van de buiswand [Nmm²].

De formule voor het bepalen van de coëfficiënt KYH is opgesteld met behulp van formules uit tabel 17 van Roark.

De invloed van de grootte van opleghoek en horizontale steundruk op de buisspanningen en deflectie wordt duidelijk gemaakt in afb. 5.

De berekeningen zijn gemaakt met de volgende algemene gegevens:

Du = 400 mm; T = 15,3 mm;

H = 1,00 m; verkeersbelasting volgens VOSB klasse 30; zetting δ = 0,10 m over een afstand L = 25,00 m.

Het belastingsschema van deze berekeningen wordt in afb. 6 gegeven.

Als voorbeeld van de uitvoer van het computerprogramma X-PYP is de berekening volgens de laatste kolom van afb. 5 voor een gedeelte weergegeven in afb. 7 (blad 5 t/m 7).

Weggelaten zijn de lijst met gebruikte symbolen, de invoergegevens en de berekening van de diverse belastingen en basisspanningen (blad 1 t/m 4).

Slotopmerking

In de provinciale code wordt er bij de vereenvoudigde sterkteberekening vanuit gegaan dat de buis in de grond half is ingeklemd.

Deze schematisatie is te eenvoudig en in verband met de door de code vereiste veiligheid te ongunstig om redelijk economisch te kunnen dimensioneren. Bovendien zijn de te hanteren waarden voor de zetting δ over de bijbehorende afstand L arbitrair.

Een alternatieve berekening van de axiale spanningen veroorzaakt door zettingsverschillen wordt gegeven in Geotubomechanica (de zgn. 'gestyleerde systeem-berekening'). Deze berekeningsmethode is voor minder ervaren constructeurs tijdrovend en gecompliceerd.

Het ligt in de bedoeling te zijner tijd een betere benadering van het hier beschreven probleem uit te werken. Gedacht wordt aan het in de berekening betrekken van de beddingsconstante en correcte bovenbelasting (neutraal en/of passief).

Het computerprogramma is geschikt voor computers met een Fortran-compiler.

Inlichtingen over het gebruik en/of overdracht kunt u inwinnen bij de auteurs van dit artikel, tel. (010) 89 55 43.

Literatuur

Spangler, M. G. *Soil engineering*. International Textbook, Scranton, 1960.

Pijpleidingcode 1972, revisie 4; uitgegeven door

Provinciale Waterstaat van Zuid-Holland.

Compendium Geo-tubomechanica, deel II Tubomechanica, door ing. B. J. J. Soudijn en ir. R. A. J. de Kock, Den Haag, 1977.

Toelichting op de algemene bepalingen voor het aangaan van overeenkomsten tot het leggen, houden, gebruiken, onderhouden, vernieuwen en verwijderen van leidingen in gronden van de gemeente Rotterdam, Rotterdam, juli 1981.

Roark, R. J. *Formulas for stress and strain, fifth edition*. Tokyo, 1975.