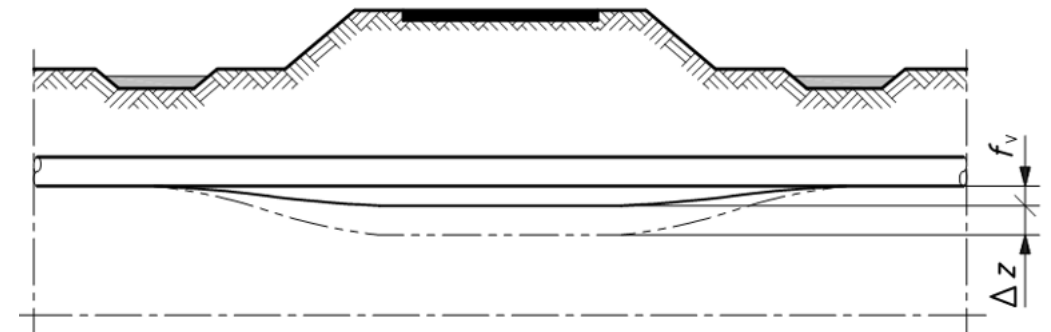
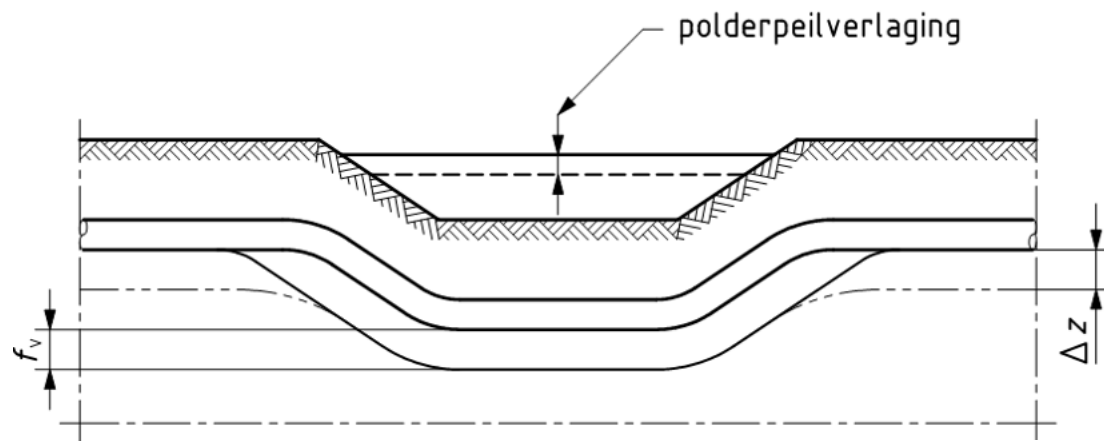
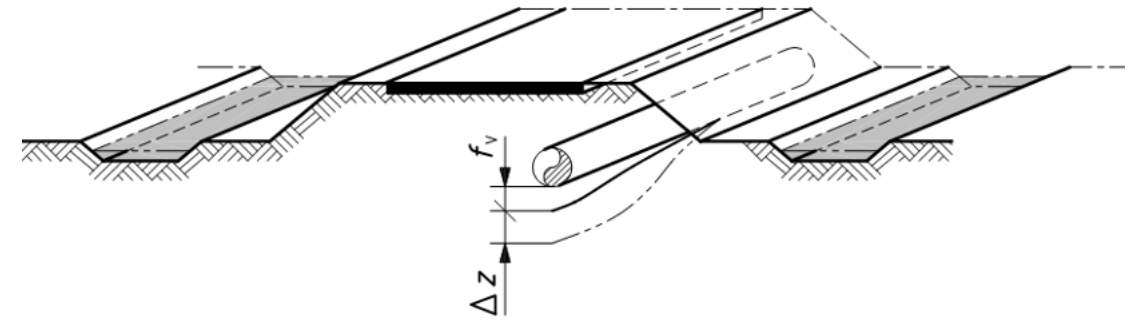
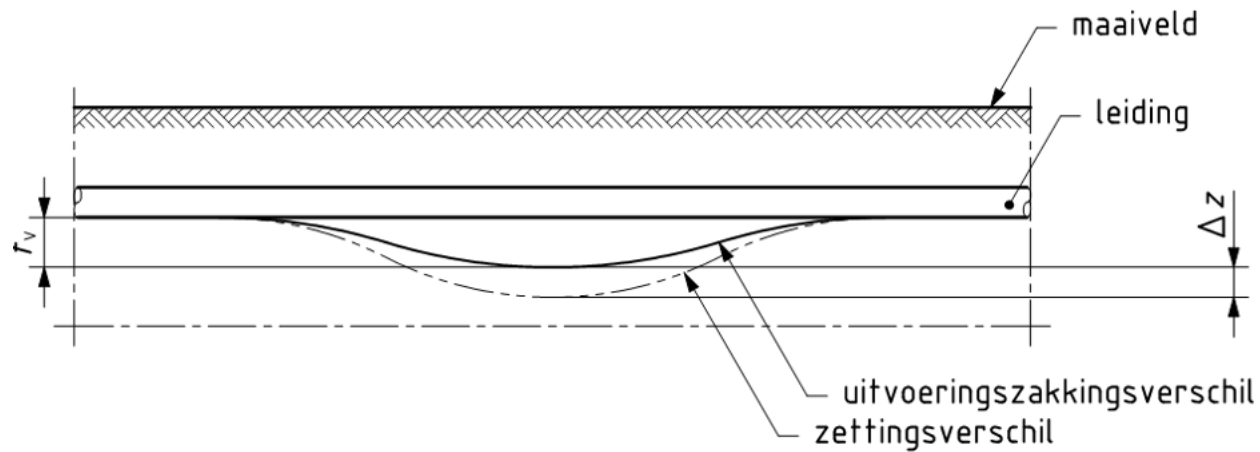


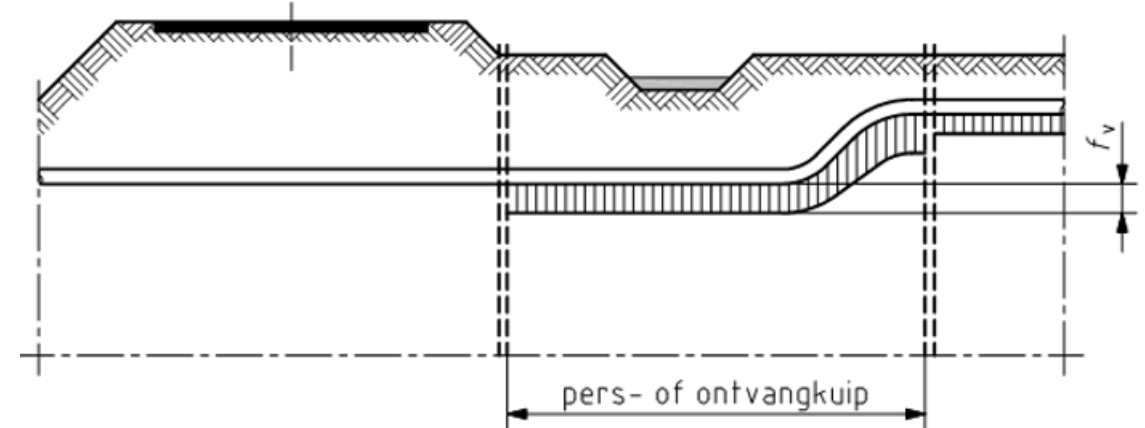
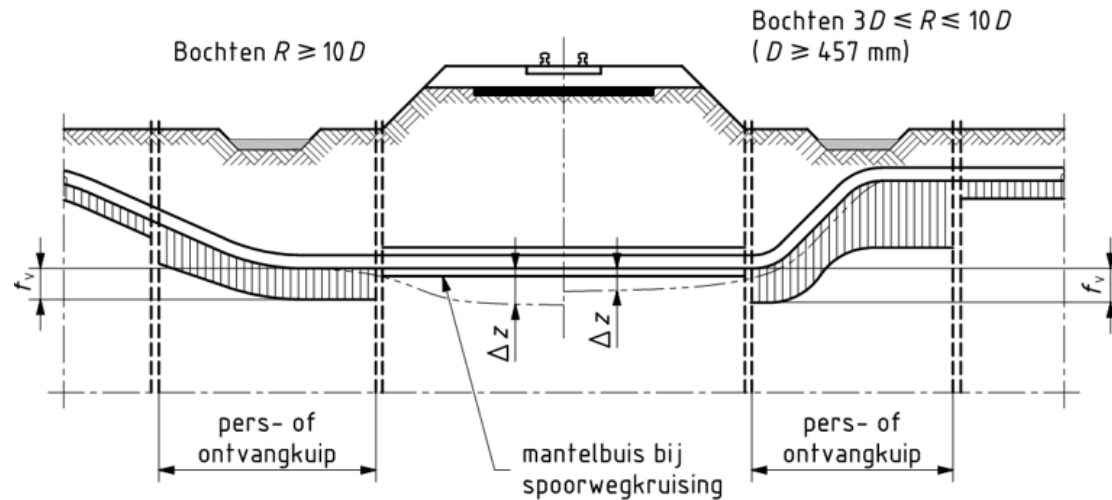
Invloed van bochten
bij ondergrondse leidingen
&
NEN 3650/3651
&
Programma Sigma 2022

Leidingen reageren op uitvoeringszakkingsverschillen en zettingsverschillen



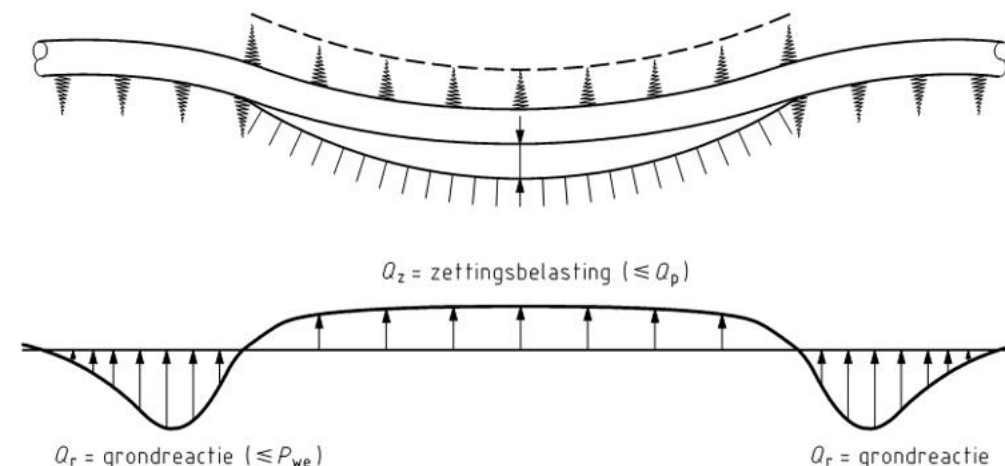
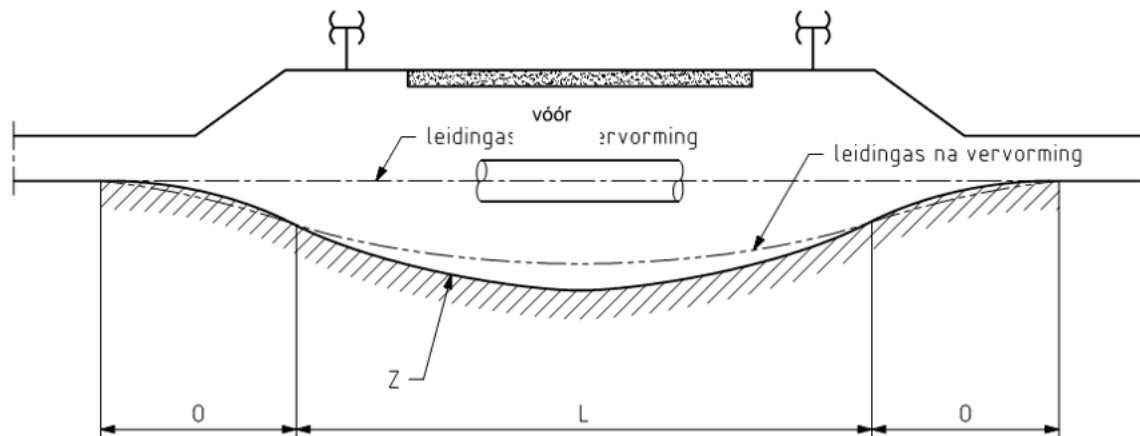
f_v maximaal uitvoeringszakkingsverschil
 Δz maximaal zettingsverschil

Leidingen reageren op uitvoeringszakkingsverschillen en zettingsverschillen



f_v maximaal uitvoeringszakkingsverschil
 Δz maximaal zettingsverschil

Leidingen reageren op uitvoeringszakkingsverschillen en zettingsverschillen



- O oplegzone (maximum reactie: evenwichtsdraagvermogen)
- L lengte waarover de leiding de grondzetting niet volgt (maximum reactie: passieve grondbelasting)
- Z zettingsverloop van de grond
- Q_r grondreactie
- Q_z zettingsbelasting

Afhankelijk van de buigstijfheid van de leiding volgt de leiding de ruimte die ontstaan is als gevolg van zettingen. Een starre leiding volgt minder dan een flexibele leiding. Een en ander is afhankelijk van de elasticiteitsmodulus en het traagheidsmoment van de leiding.



Uitvoeringszakingsverschil f_v voor GOED verdichte aanvulgrond

Voor leidingen gelegd in open ontgraving moet bij een zorgvuldige sleufaanvulling een uitvoeringszakingsverschil f_v door grondroering, geleidelijk (bijv. sinusvormig) verlopend van 0 naar f_v over een lengte L en weer terug, worden aangehouden. Het gebied waarover het zakingsverschil zich uitstrekt, heeft dus een lengte gelijk tweemaal L .

$$L = 10 \times \sqrt[4]{\frac{4 \times E \times I_b}{D_o \times k_v}}$$

waarin:

E is de elasticiteitsmodulus van het leidingmateriaal, in N/mm^2 ;

I_b is het traagheidsmoment van de buis, in mm^4 ;

k_v is de verticale beddingconstante, in N/mm^3 .

Is de berekende waarde van L kleiner dan 20 m, dan wordt 20 m in rekening gebracht. Is deze waarde groter dan 50 m, dan wordt 50 m in rekening gebracht. In Sigma is L standaard $2 \times 20 \text{ m} = 40 \text{ m}$. De gebruiker kan dit wijzigen.

Bij een kruising met een waterstaatswerk wordt de lengte L berekend (op basis van buigstijfheid en beddingsconstante). Die kan dan korter zijn dan 40 m.

Uitvoeringszakingsverschil f_v voor NIET GOED verdichte aanvulgrond

In de NEN 3650:2020 staat vermeld met welke uitvoeringszakingsverschillen rekening gehouden moet worden.

Tabel C.8 — Uitvoeringszakingsverschil f_v voor niet goed verdichte aanvulgrond onder en naast de leiding in een droge sleuf en een continu zakingsprofiel (f_v in mm)

Grondsoort	Slappe klei/veen			Stijve klei			Normaal zand			Hard zand		
Dekking (m)	2,5			1,25			2,5			1,25		
Sleuftype	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
D nom. (mm)												
100	20	30	30	20	25	30	15	25	30	15	20	20
200	20	35	40	20	30	35	15	25	35	15	20	25
300	25	40	50	25	30	40	15	25	35	15	20	25
400	25	40	55	25	30	40	20	30	40	20	25	30
450	25	40	60	25	30	45	20	30	40	20	25	30
600	25	45	65	25	35	50	20	30	45	20	25	30
750	30	45	70	30	35	50	20	30	50	20	25	35
900	30	50	75	30	40	50	20	35	50	20	30	35
1 200	30	50	75	30	40	55	25	35	55	25	35	40

We zien hier vier grondsoorten.

De dekking van de leiding is ook van belang.

De diameters variëren van 100 mm tot 1200 mm.

De sleufbreedte (b op buisasniveau) is smal (a), breder (b) of nog breder (c).

- voor sleuftype a geldt: $b \leq 1,5 D_o$;
- voor sleuftype b geldt: $1,5 D_o < b \leq 3 D_o$;
- voor sleuftype c geldt: $b > 3 D_o$.

Uitvoeringszakkingsverschil f_v voor GOED verdichte aanvulgrond

Tabel C.9 — Uitvoeringszakkingsverschil f_v voor <u>goed</u> verdichte aanvulgrond onder en naast de leiding in een droge <u>sleuf</u> en een continu zakkingsprofiel (f_v in mm)																								
Grondsoort	Slappe klei/veen						Stijve klei						Normaal zand						Hard zand					
Dekking (m)	2,5			1,25			2,5			1,25			2,5			1,25			2,5			1,25		
Sleuftype	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
D nom. (mm)																								
100	10	15	20	10	15	20	10	10	15	10	10	10	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	0	5
200	10	15	25	10	15	20	10	15	15	10	10	15	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	0	5
300	10	20	25	10	15	20	10	15	20	10	10	15	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	0	5
400	10	20	30	10	15	25	10	15	20	10	10	15	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	0	5
450	10	20	30	10	15	25	10	15	20	10	10	15	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	0	5
600	15	20	35	15	20	25	10	15	25	10	10	15	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5		
750	15	25	35	15	20	25	10	15	25	10	15	20	5	5	10	5	5	5	5	5	5	5		
900	15	25	40	15	20	25	10	15	25	10	15	20	5	10	10	5	5	5	5	5	5	5		
1 200	15	25	40	15	20	30	10	20	30	10	15	20	5	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Bij goed verdichte aanvulgrond onder en naast de leiding in een droge sleuf zien we veel lagere uitvoeringszakkingsverschillen.

- voor sleuftype a geldt: $b \leq 1,5 D_o$;
- voor sleuftype b geldt: $1,5 D_o < b \leq 3 D_o$;
- voor sleuftype c geldt: $b > 3 D_o$.

Uitvoeringszakkingsverschil f_v voor zinkers en pers- en ontvangstuipen

Tabel C.10 — Uitvoeringszakkingsverschil f_v voor een zinkersleuf en voor goed en niet goed verdichte pers- of ontvangkuip en een discontinu zakkingsprofiel (gronddekking $H \leq 2,5$ m, f_v in mm) ^a

Ligging	Zinkersleuf				Bouwkuip niet goed verdicht				Bouwkuip goed verdicht			
Grondsoort	Slappe klei/veen	Stijve klei	Normaal zand	Hard zand	Slappe klei/veen	Stijve klei	Normaal zand	Hard zand	Slappe klei/veen	Stijve klei	Normaal zand	Hard zand
D nom. (mm)												
100	110	85	40	40	110	85	40	40	65	50	20	15
200	120	95	45	40	120	95	45	40	70	55	25	15
300	130	100	45	40	130	100	45	40	75	55	25	15
400	135	105	50	45	135	105	50	45	80	60	25	15
450	140	105	50	45	140	105	50	45	80	60	25	15
600	150	110	50	45	150	110	50	45	85	65	25	20
750	155	110	55	45	155	110	55	45	90	65	30	20
900	160	115	55	50	160	115	55	50	95	70	30	20
1 200	160	120	60	50	160	120	60	50	95	70	30	20

^a Zakkingen ten gevolge van het trekken van damwanden zijn niet verdisconteerd in de tabelwaarden.

Bij een zinkers die “in den natte” wordt gelegd kun je niet goed verdichten.

De f_v waarden zijn identiek aan die bij niet goed verdichte bouwkuipen. We zien grote uitvoeringszakkingsverschillen.

De in tabel C.10 aangegeven uitvoeringszakkingsverschillen voor een pers- of ontvangkuip zijn gebaseerd op de veronderstelling dat onder de leiding maximaal 0,5 m geroerde grond aanwezig is.

In situaties waar plaatselijk aanmerkelijk meer grond onder de leiding wordt ontgraven gelden de tabelwaarden niet en moet een onderbouwde inschatting van de te verwachten klink onder de leiding worden gemaakt.

Zettingsverschil f_z volgens Pijpleidingcode (laatste uitgave)

Bij het maken van berekeningen moet ook het zettingsverschil f_z op lange termijn worden verdisconteerd. In de NEN 3650 staan hiervoor geen indicatieve waarden voor vermeld. In de Pijpleidingcode (voorloper van de NEN 3650) stonden deze wel. Zie Pijpleidingcode 7^e revisie, 2^e nieuwsbrief blz. 144.

Voor het te verwachten zettingsverschil f_z dienen in het veld en voor minder belangrijke kruisingen de volgende waarden te worden aangehouden:

- voor slappe klei/ veen minimaal 25 mm (als gevolg van polderpeilaanpassingen),
- voor stijve klei 15 mm (idem),
- voor zand 0 mm.

Dit zettingsverschil volgt uit de onderhoudservaring van de beheerders van de waterstaatswerken. Het is verstandig om dit bij twijfel na te vragen bij deze beheerders.

In sommige regio's kunnen deze zettingen fors zijn. Wanneer de zettingsverschillen meer dan 100 mm bedragen dan moet vaak een uitgebreide sterkteberekening worden uitgevoerd.



Enige rekenvoorbeelden met uitvoeringszakkingsverschil f_v en zettingsverschil f_z

Om een indruk te geven van de impact van de zettingen is het handig om een twee materialen nader door te rekenen, namelijk Staal en PE 100 SDR 11. Wanneer we kijken naar een Ø 400 mm leiding dan zien we:

Tabel C.8 — Uitvoeringszakkingsverschil f_v voor <u>niet goed</u> verdichte aanvulgrond onder en naast de leiding in een droge <u>sleuf</u> en een continu zakkingsprofiel (f_v in mm)																								
Grondsoort	Slappe klei/veen						Stijve klei						Normaal zand						Hard zand					
Dekking (m)	2,5			1,25			2,5			1,25			2,5			1,25			2,5			1,25		
Sleuftype	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
D nom. (mm)																								
100	20	30	30	20	25	30	15	25	30	15	20	20	10	10	15	10	10	10	10	10	10	10	10	10
200	20	35	40	20	30	35	15	25	35	15	20	25	10	10	15	10	10	10	10	10	15	10	10	10
300	25	40	50	25	30	40	15	25	35	15	20	25	10	15	20	10	10	10	10	10	15	10	10	10
400	25	40	55	25	30	40	20	30	40	20	25	30	10	15	20	10	10	15	10	10	15	10	10	10
450	25	40	60	25	30	45	20	30	40	20	25	30	10	15	20	10	10	15	10	10	15	10	10	10

Uitvoeringszakkingsverschil varieert van max. 55 mm naar minimaal 10 mm.

Enige rekenvoorbeelden met uitvoeringszakkingsverschil f_v en zettingsverschil f_z

Invoerscherm Sigma indien Ø 406,4 mm staal indien slappe klei en niet goed verdichte sleuf

Leiding- en materiaalgegevens

Materiaal: Staal
Kwaliteit: NEN-EN ISO 3183
Uitwendige middellijn [mm]: 406,4
Wanddikte [mm]: 5,0
☐ Rekenen met minimale wanddikte
Minimale wanddikte [mm]: 5,0
Dikte bekleding [mm]: 0,0
Bocht in constructie: ☒ Nee ☐ Glad ☐ Mijter

Verkeersbelasting

Verkeersbelasting: Grafiek I

Importantiefactor

☒ 1.0 ☐ 0.95 ☐ 0.90 ☐ 0.85 ☐ 0.80 ☐ 0.75

Aanleggegevens

Ligging: ☐ Kruising met een waterstaatswerk ☒ Evenwijdig aan een waterstaatswerk ☐ Zinkerconstructie
Uitvoeringszakkingverschil [mm]: 55,0
Zettingsverschil [mm]: 25,0
Klinkpercentage [-]: 0,1
Marstonfactor [-]: 0,3

Grondmechanische gegevens

Grondwater: ☐ Ja ☒ Nee
Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]: 1,25
Grondsoort: Klei
Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]: 14,0
Inwendige wrijvingshoek grond [°]: 17,5
Effectieve cohesie [kN/m²]: 0,0
Ongedraineerde schuifsterkte [kN/m²]: 25,0
E-modulus ondergrond [MN/m²]: 1,0
Minimale verticale beddingconstante [N/mm³]: 0,002
Gemiddelde verticale beddingconstante [N/mm³]: 0,003

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,0396 \cdot 55 \cdot \sqrt{\frac{205800 \cdot 0,003}{5}} = \mathbf{24,18 \text{ N/mm}^2}$$

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,0396 \cdot (55 + 2,0 \cdot 25) \cdot \sqrt{\frac{205800 \cdot 0,003}{5}} = \mathbf{46,16 \text{ N/mm}^2}$$

Ten gevolge van het uitvoeringszakkingsverschil zien we een spanning σ_{bx} van 24,18 N/mm². Het zettingsverschil f_z van 25 mm wordt met een onzekerheidsfactor van 2,0 in rekening gebracht. Dit geeft een spanning van 46,16 N/mm².

Invoerscherm Sigma indien Ø 400 mm PE in combinatie met slappe klei en niet goed verdichte sleuf

Leiding- en materiaalgegevens

Materiaal

PE

Kwaliteit

PE 100

Uitwendige middellijn [mm]

400,0

Wanddikte [mm]

36,4

Dikte bekleding [mm]

0,0

Bocht in constructie

☒ Nee
☐ Glad
☐ Mijter

Verkeersbelasting

Grafiek I

Ontlastende invloed t.g.v. wegdek

☒ Geen ontlastende invloed
☐ Toeslag op de constructie

Importantiefactor

☒ 1.0
☐ 0.95
☐ 0.90
☐ 0.85
☐ 0.80
☐ 0.75

Aanleggegevens

Ligging

☐ Kruising met een waterstaatswerk
☒ Evenwijdig aan een waterstaatswerk
☐ Zinkerconstructie

Uitvoeringszakkingverschil [mm]

55,0

Zettingsverschil [mm]

25,0

Klinkpercentage [-]

0,1

Marstonfactor [-]

0,3

Grondmechanische gegevens

Grondwater

☐ Ja
☒ Nee

Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]

1,25

Grondsoort

Klei

Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]

14,0

Inwendige wrijvingshoek grond [°]

17,5

Effectieve cohesie [kN/m²]

0,0

Ongedraineerde schuifsterkte [kN/m²]

25,0

E-modulus ondergrond [MN/m²]

1,0

Minimale verticale beddingconstante [N/mm³]

0,002

Gemiddelde verticale beddingconstante [N/mm³]

0,003

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v, gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,00904 \cdot 55 \cdot \sqrt{\frac{975 \cdot 0,003}{36,4}} = \mathbf{0,14 \text{ N/mm}^2}$$

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,00904 \cdot (55 + 2,0 \cdot 25) \cdot \sqrt{\frac{975 \cdot 0,003}{36,4}} = \mathbf{0,27 \text{ N/mm}^2}$$

Ten gevolge van het uitvoeringszakingsverschil zien we een spanning σ_{bx} van 0,14 N/mm² in plaats van 24,18 N/mm². Het zettingsverschil f_z van 25 mm wordt ook hier met een onzekerheidsfactor van 2,0 in rekening gebracht. Dit geeft een spanning van 0,27 N/mm² in plaats van 46,16 N/mm².

Enige rekenvoorbeelden met uitvoeringszakkingsverschil f_v en zettingsverschil f_z

Bij een goed verdichte sleuf varieert het uitvoeringszakkingsverschil van maximaal 30 mm (klei/veen) tot minimaal 0 mm (hard zand).

Tabel C.9 — Uitvoeringszakkingsverschil f_v voor <u>goed</u> verdichte aanvulgrond onder en naast de leiding in een droge <u>sleuf</u> en een continu zakkingsprofiel (f_v in mm)																								
Grondsoort	Slappe klei/veen						Stijve klei						Normaal zand						Hard zand					
Dekking (m)	2,5			1,25			2,5			1,25			2,5			1,25			2,5			1,25		
Sleuf type	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
D nom. (mm)																								
100	10	15	20	10	15	20	10	10	15	10	10	10	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	0	5
200	10	15	25	10	15	20	10	15	15	10	10	15	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	0	5
300	10	20	25	10	15	20	10	15	20	10	10	15	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	0	5
400	10	20	30	10	15	25	10	15	20	10	10	15	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	0	5
450	10	20	30	10	15	25	10	15	20	10	10	15	0	5	5	0	5	5	0	5	5	0	0	5

Enige rekenvoorbeelden met uitvoeringszakkingsverschil f_v en zettingsverschil f_z

Invoerscherm Sigma indien Ø 406,4 mm staal wanneer sprake is van slappe klei met een goed verdichte sleuf

Leiding- en materiaalgegevens

Materiaal

Staal

Kwaliteit

NEN-EN ISO 3183

Uitwendige middellijn [mm]

406,4

Wanddikte [mm]

5,0

☐ Rekenen met minimale wanddikte

Minimale wanddikte [mm]

5,0

Dikte bekleding [mm]

0,0

Bocht in constructie

☒ Nee
☐ Glad
☐ Mijter

Verkeersbelasting

Grafiek I

Importantiefactor

☒ 1.0
☐ 0.95
☐ 0.90
☐ 0.85
☐ 0.80
☐ 0.75

Aanleggegevens

Ligging

☐ Kruising met een waterstaatswerk
☒ Evenwijdig aan een waterstaatswerk
☐ Zinkerconstructie

Uitvoeringszakkingverschil [mm]

25,0

Zettingsverschil [mm]

25,0

Klinkpercentage [-]

0,1

Marstonfactor [-]

0,3

Grondmechanische gegevens

Grondwater

☐ Ja
☒ Nee

Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]

1,25

Grondsoort

Klei

Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]

14,0

Inwendige wrijvingshoek grond [°]

17,5

Effectieve cohesie [kN/m²]

0,0

Ongedraineerde schuifsterkte [kN/m²]

25,0

E-modulus ondergrond [MN/m²]

1,0

Minimale verticale beddingconstante [N/mm³]

0,002

Gemiddelde verticale beddingconstante [N/mm³]

0,003

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}} \quad \sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,0396 \cdot 25,0 \cdot \sqrt{\frac{205800 \cdot 0,003}{5}} = \mathbf{10,99 \text{ N/mm}^2} \quad \sigma_{bx} = 0,0396 \cdot (25,0 + 2,0 \cdot 25) \cdot \sqrt{\frac{205800 \cdot 0,003}{5}} = \mathbf{32,97 \text{ N/mm}^2}$$

Ten gevolge van het uitvoeringszakingsverschil zien we nu een spanning σ_{bx} van 10,99 N/mm² in plaats van 24,18 N/mm². Het zettingsverschil f_z van 25 mm wordt ook hier met een onzekerheidsfactor van 2,0 in rekening gebracht. Dit geeft een spanning van 32,97 N/mm² in plaats van 46,16 N/mm².

Enige rekenvoorbeelden met uitvoeringszakkingsverschil f_v en zettingsverschil f_z

Invoerscherm Sigma indien Ø 400 mm PE in combinatie met slappe klei en goed verdichte sleuf

Leiding- en materiaalgegevens		Importantiefactor		Grondmechanische gegevens	
Materiaal	PE	☒ 1.0	☐ 0.95	☐ 0.90	☐ 0.85
Kwaliteit	PE 100	☐ 0.80	☐ 0.75	Grondwater ☐ Ja ☒ Nee	
Uitwendige middellijn [mm]	400,0	Aanleggegevens		Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]	1,25
Wanddikte [mm]	36,4	Ligging		Grondsoort	Klei
Dikte bekleding [mm]	0,0	☐ Kruising met een waterstaatswerk		Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]	14,0
Bocht in constructie ☒ Nee ☐ Glad ☐ Mijter		☒ Evenwijdig aan een waterstaatswerk		Inwendige wrijvingshoek grond [°]	17,5
		☐ Zinkerconstructie		Effectieve cohesie [kN/m²]	0,0
Verkeersbelasting		Uitvoeringszakkingverschil [mm]	25,0	Ongedraineerde schuifsterkte [kN/m²]	25,0
Verkeersbelasting	Grafiek I	Zettingsverschil [mm]	25,0	E-modulus ondergrond [MN/m²]	1,0
Ontlastende invloed t.g.v. wegdek		Klinkpercentage [-]	0,1	Minimale verticale beddingconstante [N/mm³]	0,002
☒ Geen ontlastende invloed		Marstonfactor [-]	0,3	Gemiddelde verticale beddingconstante [N/mm³]	0,003

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,00904 \cdot 25,0 \cdot \sqrt{\frac{975 \cdot 0,003}{36,4}} = \mathbf{0,06 \text{ N/mm}^2}$$

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,00904 \cdot (25,0 + 2,0 \cdot 25) \cdot \sqrt{\frac{975 \cdot 0,003}{36,4}} = \mathbf{0,19 \text{ N/mm}^2}$$

Ten gevolge van het uitvoeringszakingsverschil zien we nu een spanning σ_{bx} van 0,06 N/mm² i.p.v. 0,14 N/mm². Het zettingsverschil f_z van 25 mm wordt ook hier met een onzekerheidsfactor van 2,0 in rekening gebracht. Dit geeft een spanning van 0,19 N/mm² in plaats van 0,27 N/mm².

Enige rekenvoorbeelden met uitvoeringszakingsverschil f_v en zettingsverschil f_z

Vergelijking alle optredende spanningen van de berekeningen van de stalen leiding

22. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (1^e en 2^e jaar)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_q$$
$$\sigma_{y2} = 1 \cdot 206,43 = \mathbf{206,43 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$
$$\sigma_x = 1 \cdot 24,18 + 23,87 = \mathbf{48,05 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot Re \cdot S = 0,8 \cdot 245 \cdot 1,00 = \mathbf{196,00 \text{ N/mm}^2}$$

23. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (na 2 jaar)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_q$$
$$\sigma_{y2} = 1 \cdot 210,07 = \mathbf{210,07 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$
$$\sigma_x = 1 \cdot 46,16 + 23,87 = \mathbf{70,04 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot Re \cdot S = 0,8 \cdot 245 \cdot 1,00 = \mathbf{196,00 \text{ N/mm}^2}$$

22. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (1^e en 2^e jaar)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_q$$
$$\sigma_{y2} = 1 \cdot 194,46 = \mathbf{194,46 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$
$$\sigma_x = 1 \cdot 10,99 + 23,87 = \mathbf{34,86 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot Re \cdot S = 0,8 \cdot 245 \cdot 1,00 = \mathbf{196,00 \text{ N/mm}^2}$$

23. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (na 2 jaar)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_q$$
$$\sigma_{y2} = 1 \cdot 198,10 = \mathbf{198,10 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$
$$\sigma_x = 1 \cdot 32,97 + 23,87 = \mathbf{56,85 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot Re \cdot S = 0,8 \cdot 245 \cdot 1,00 = \mathbf{196,00 \text{ N/mm}^2}$$

Links zien we de resultaten van de 1^e berekening, rechts van de 2^e berekening. Minder zetting betekent dus lagere spanningen. Het 1^e en 2^e jaar wordt gerekend met het uitvoeringszakingsverschil. Voor de langere termijn (na 2 jaar) gaan we uit van extra zetting t.g.v. zettingsverschil f_v .

Enige rekenvoorbeelden met uitvoeringszakingsverschil f_v en zettingsverschil f_z

Vergelijking alle optredende spanningen van de berekeningen van de PE SDR 11 leiding

23. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (1^e en 2^e jaar)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_q$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 3,58 = \mathbf{2,33 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 0,61 + 0,65 \cdot 0,14 + 1,56 = \mathbf{2,26 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 1,00 = \mathbf{8,00 \text{ N/mm}^2}$$

24. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (na 2 jaar)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_q$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 3,34 = \mathbf{2,17 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 0,61 + 0,65 \cdot 0,27 + 1,56 = \mathbf{2,34 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 1,00 = \mathbf{8,00 \text{ N/mm}^2}$$

23. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (1^e en 2^e jaar)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_q$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 3,54 = \mathbf{2,30 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 0,61 + 0,65 \cdot 0,06 + 1,56 = \mathbf{2,21 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 1,00 = \mathbf{8,00 \text{ N/mm}^2}$$

24. Berekening van het totaal aan optredende spanningen (na 2 jaar)

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_q$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot 3,29 = \mathbf{2,14 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 0,61 + 0,65 \cdot 0,19 + 1,56 = \mathbf{2,29 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 1,00 = \mathbf{8,00 \text{ N/mm}^2}$$

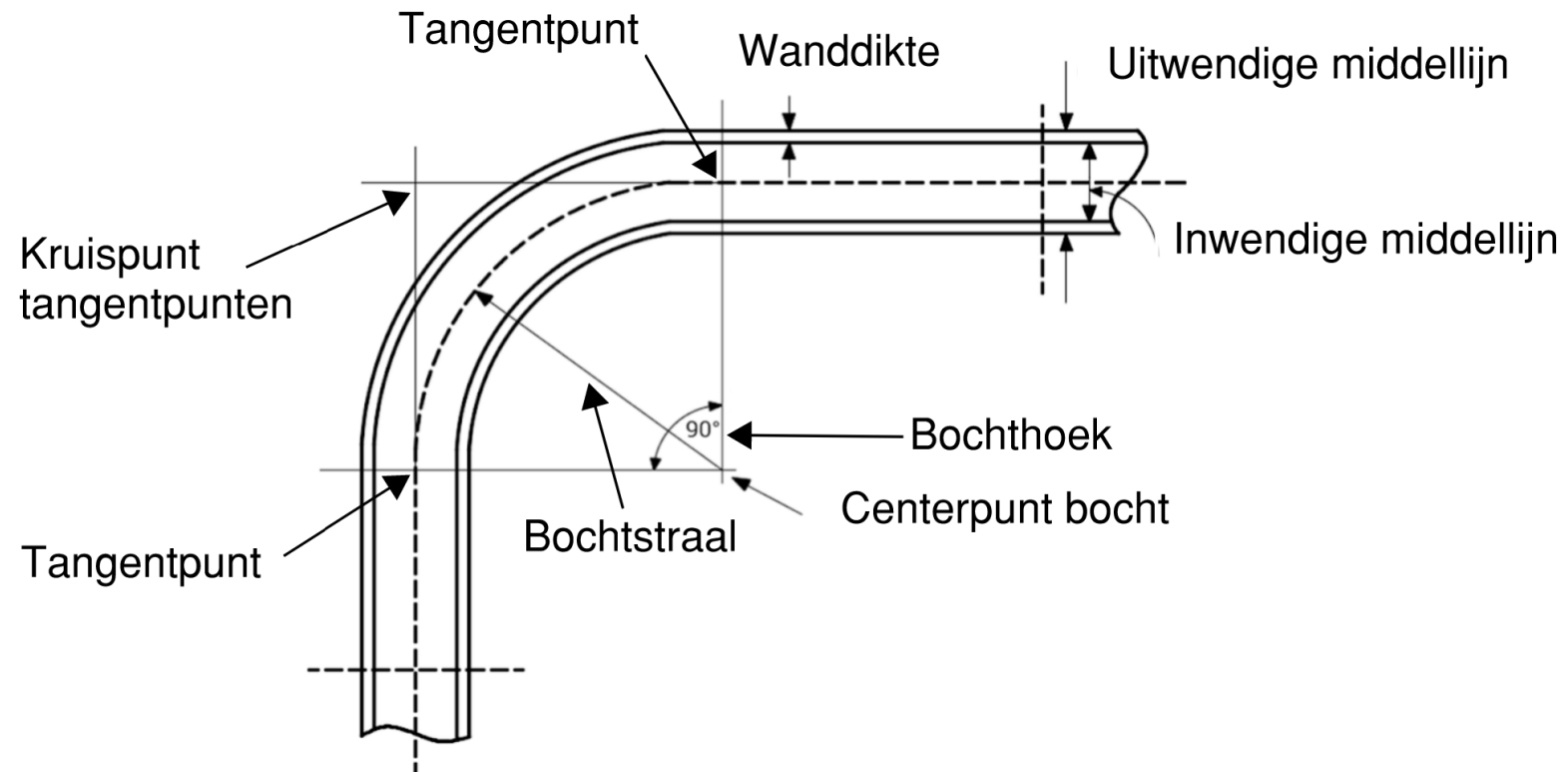
Ook hier twee eindresultaten naast elkaar. Wie zien hier marginale verschillen in vergelijking met de stalen leidingen. Opvallend zijn de veel lagere spanningen ten opzichte van met staal.



Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen

Wanneer in het leidingtracé een bocht is opgenomen om een hoogteverschil te overbruggen (in verticale, horizontale of gecombineerde richting) dan heeft dit een spanning verhogend effect. Dit kan heel fors zijn.

Een bocht is slapper dan een rechte buis en trekt spanningen naar zich toe. De bochtstraal R wordt uitgedrukt in de diameter D . Bijvoorbeeld: $R = 3 D$.



Wanneer een rechte buis met een bepaalde wanddikte wordt gebogen en daarbij dezelfde wanddikte zou behouden (hetgeen niet helemaal het geval is), is die buis als bocht gebogen slapper dan toen hij nog recht was. Van een rechte buis is de stijfheid in langsrichting bepaald door $E \cdot I_b$.

De elasticiteitsmodulus E is bij staal gelijk aan 205.800 N/mm^2 . Bij PE 100 is de elasticiteitsmodulus (korte duur) gelijk aan 975 N/mm^2 . Dus veel lager dan bij staal. Staal is dus veel minder buigzaam dan PE (of PVC, of GVK enz.).

Het traagheidsmoment van de buis wordt als volgt berekend:

$$I_b = (D_e^4 - D_i^4) \cdot \pi/64$$

We zien hier een formule waarin zowel uitwendige middellijn als de inwendige middellijn wordt gebruikt. Het verschil tussen deze twee waarden is dus de wanddikte van de leiding. Hoe dikker de wand, hoe hoger het traagheidsmoment van de leiding.



In NEN 3650-1:2020 zien we het volgende vermeld over bochten.

D.6.2 Materiaalspecifiek

De relatie tussen de factoren i_x en i_y is afhankelijk van het materiaaltype:

- voor tangentieel flexibel homogeen isotroop materiaal (bijv. staal, nodulair gietijzer en niet-vezelversterkte thermoplasten) geldt: $i_y = 2 i_x$ resp. $i_{yp} = 2 i_{xp}$;
- voor tangentieel flexibel anisotroop materiaal (bijv. vezel versterkte thermoplasten en thermoharde kunststoffen) moeten de spanningsverhogingsfactoren door de producent worden opgegeven;
- voor tangentieel starre materialen (bijv. beton) geldt: $i_x = 1$, $i_y = 0$ en $k = 1$.



In NEN 3650-1:2020 zien we het volgende vermeld over bochten.

D.6.3 Gladde bochten

Voor gladde tangentieel flexibele bochten van homogeen isotroop materiaal (bijv. staal, nodulair gietijzer en niet-vezelversterkte thermoplasten) worden de factoren bepaald met de formules:

$$h = \frac{d_n \times R}{r^2}, \quad k = \frac{1,65}{h}, \quad i_x = \frac{0,9}{h^{2/3}}$$



De mate van stijfheid of slappe wordt bepaald door de flexibiliteitsfactor k.

Deze factor is afhankelijk van de flexibiliteitskarakteristiek h en is een functie van de wanddikte, de bochtstraal en de straal van de buis.

$$k = \frac{1,65}{h}$$

Voor k geldt dat deze $\geq 1,0$ is. Want een bocht kan niet stijver zijn dan een equivalente rechte buis.

In deze formule zien we h. Deze waarde h wordt de flexibiliteitskarakteristiek genoemd en kan als volgt worden berekend:

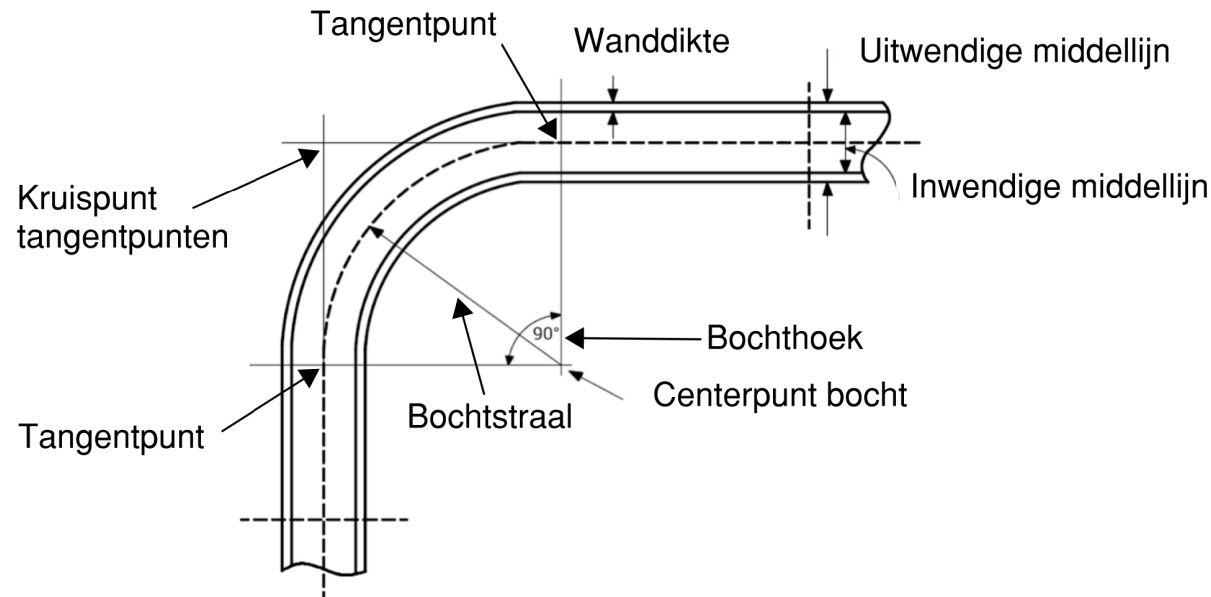
$$h = \frac{t \cdot R}{r^2}$$

- t = wanddikte van de leiding in mm
- R = gemiddelde bochtstraal in mm
- r = gemiddelde straal van de leiding in mm



Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen: de factor h is materiaalonaafhankelijk

Bij gladde bochten zien we dus dat de flexibiliteitsfactor h altijd hetzelfde is, ongeacht het materiaal.



$$\Rightarrow h = \frac{t \cdot R}{r^2}$$

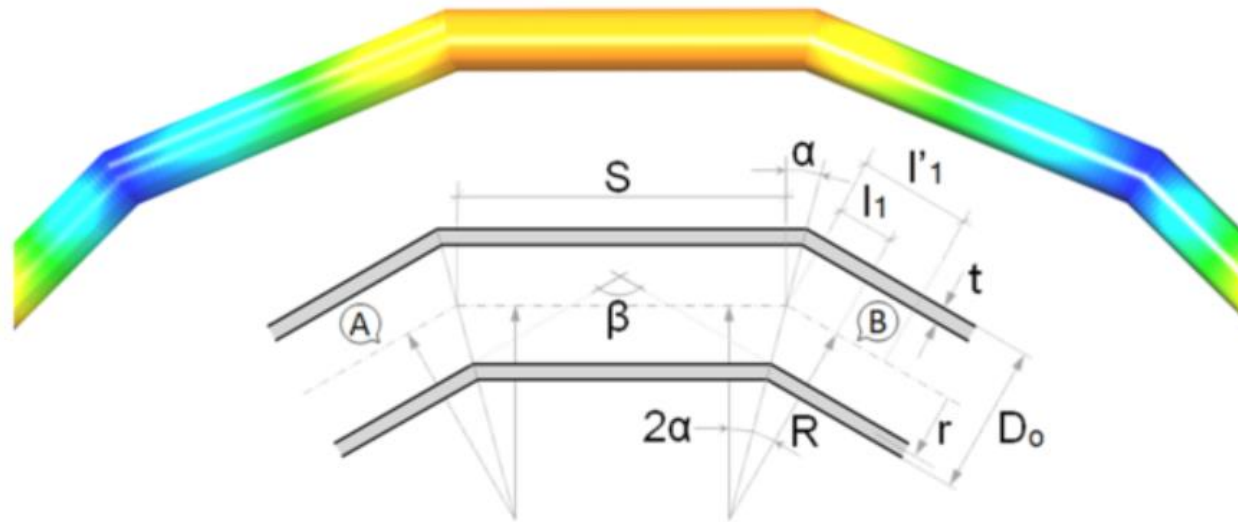
We zien ook dat een beperkt aantal gegevens nodig zijn om die factor te berekenen. Namelijk de bochtstraal, de wanddikte en de gemiddelde straal van de bocht. Het is dus niet nodig om in te voeren of er sprake is van staal, PE, GVK, PVC of beton.



In NEN 3650-1:2020 zien we het volgende vermeld over mijterbochten.

D.6.4 Mijterbochten

Voor de bepaling van de spanningsverhoging in mijterbochten wordt onderscheid gemaakt naar de grootte van de hartafstand s tussen de opvolgende verstekken (rondgaande lassen met knikhoek) van de bocht. De knikhoek (2α) van mijterbochten of verstekbochten mag niet meer bedragen dan 15° .

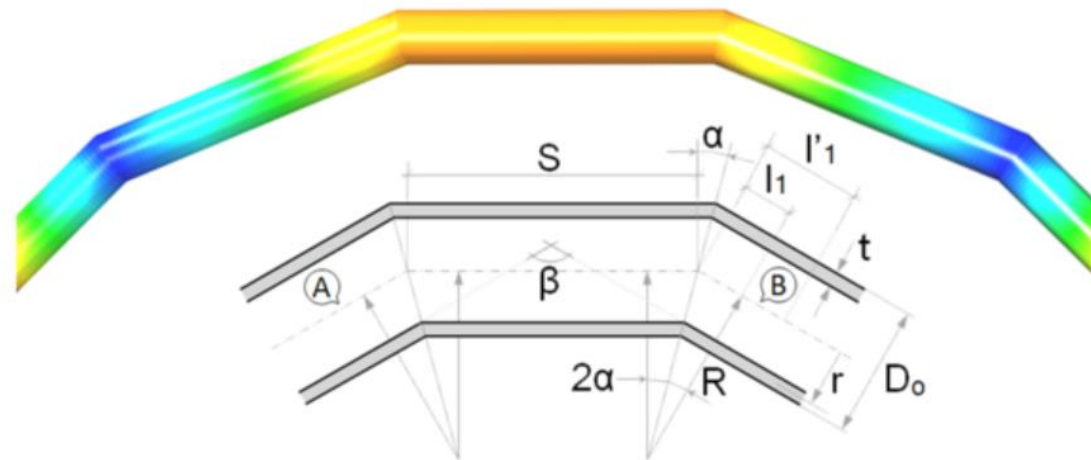


Schematisatie mijterbocht PLE4Win



Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen: mijterbochten

In het programma Sigma wordt uitgegaan van de “in plane” situatie om i_x te berekenen.



$$\text{Als: } s \geq r(1 + \tan \alpha), \quad \text{geldt} \quad R = \frac{r}{2}(1 + \cot \alpha), \quad h = \frac{1 + \cot \alpha}{2} \times \frac{d_n}{r}$$

$$\text{Als: } s < r(1 + \tan \alpha), \quad \text{geldt} \quad R = \frac{s}{2} \times \cot \alpha, \quad h = \frac{\cot \alpha}{2} \times \frac{d_n \times s}{r^2}$$

$$\text{Verder geldt: } k = \frac{1,52}{h^{5/6}}, i_x = \frac{0,9}{h^{2/3}} \text{ ('in plane')}, i_x = \frac{0,75}{h^{2/3}} \text{ ('out of plane')}.$$



Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen

Wanneer zich tussen twee bochten een recht stuk pijp bevindt treden vrijwel alle opgedrongen vervormingen op in de bochten. Dit komt omdat de bochten makkelijker kunnen vervormen dan het rechte eind (minimale vormveranderingsarbeid), zoals zettingen bij fundering op staal. i_x^*

Als neveneffect van het verschijnsel dat een bocht slapper is dan een rechte buis, en dus bij gelijk moment meer vervorming ondergaat, wordt de langsbuigspanning σ_{bx} , zoals die is uitgerekend voor de rechte buis, in de bocht groter, en wel met een factor i_x (= stress-intensification factor in axiale richting).

$$\sigma_{x_{bocht}} = i_x^* \sigma_{x_{recht}} = i_x^* \frac{M_x}{W_{buis}}$$

Dus voor een axiaal buigend moment M in een bocht, waarbij M werkzaam is in het vlak van de bocht, zijn de langsbuigspanningen (axiale buigspanningen):

$$i_x^* \frac{M_x}{W_{buis}}$$



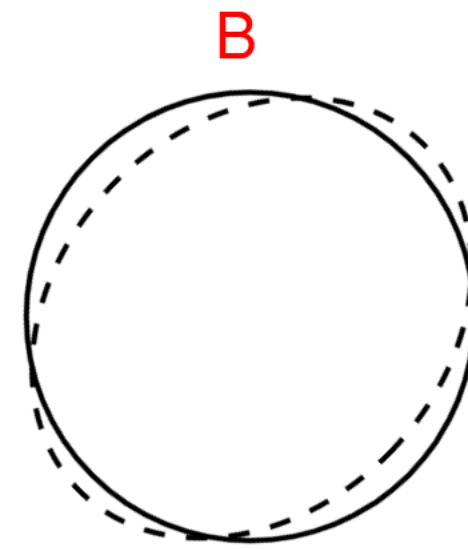
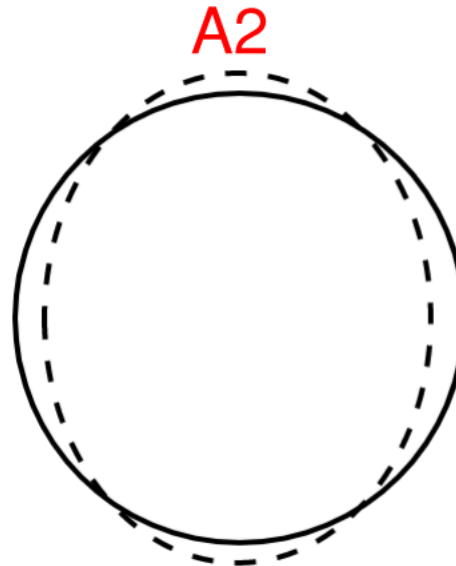
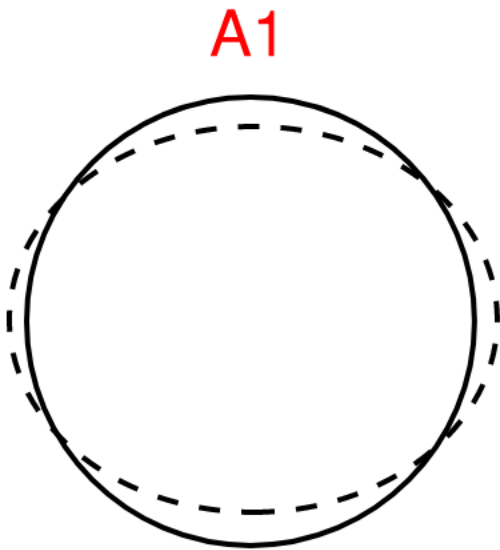
Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen

Buiging in het vlak van de bocht = **in plane bending**: twee mogelijkheden:

A1: negatief axiaal moment = trek aan de bovenzijde van de bocht = rechte einden naar elkaar toe = horizontale ovalisatie van de buisdoorsnede = ei op zijn plat.

A2: Positief axiaal moment = trek aan de binnenzijde van de bocht = rechte einden van elkaar af = verticale ovalisatie van de buisdoorsnede = ei op zijn kant.

B: Buiging uit het vlak van de bocht (bijvoorbeeld loodrecht op het vlak van de bocht) = **out of plane bending**



Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen

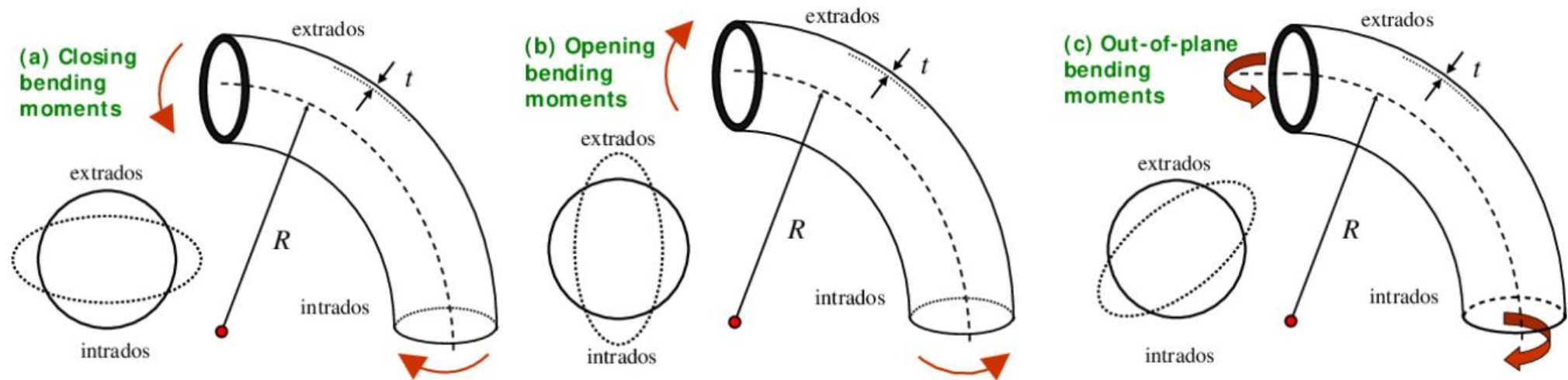
Extra weergaven van buigingen (zelfde principe als voorgaande blz.)

Buiging in het vlak van de bocht = in plane bending: twee mogelijkheden:

a: negatief axiaal moment = trek aan de bovenzijde van de bocht = rechte einden naar elkaar toe = horizontale ovalisatie van de buisdoorsnede = ei op zijn plat.

b: Positief axiaal moment = trek aan de binnenzijde van de bocht = rechte einden van elkaar af = verticale ovalisatie van de buisdoorsnede = ei op zijn kant.

c: Buiging uit het vlak van de bocht (bijvoorbeeld loodrecht op het vlak van de bocht) = out of plane bending



Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen

Het gedrag van een rechte leiding en een bocht als gevolg van een van buitenaf uitgeoefende buigmoment is verschillend. Een rechte leiding gedraagt zich als een balk met een cirkelvormige doorsnede (figuur 1), terwijl de bocht een ovale vorm aanneemt (figuur 2).

Door de ovalisatie van de bocht wordt de afstand van de uiterste vezel van de bocht minder ten opzichte van de neutrale lijn waardoor het traagheidsmoment verandert. Als gevolg daarvan wordt de buigstijfheid van de bocht minder waardoor de spanning in de bocht toeneemt.

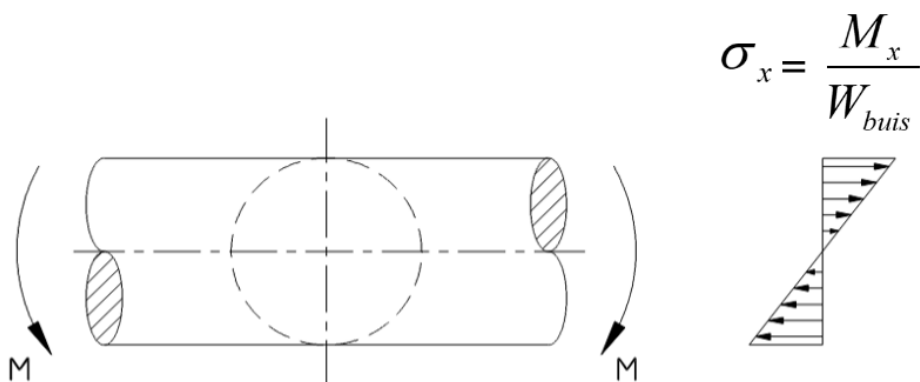


Fig. 1 Rechte buis: stijfheidsfactor EI

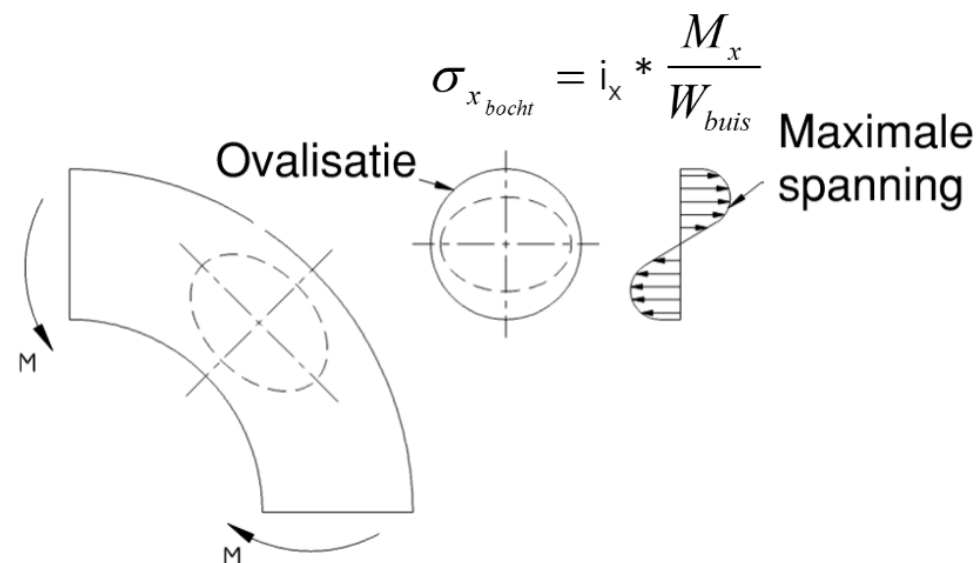
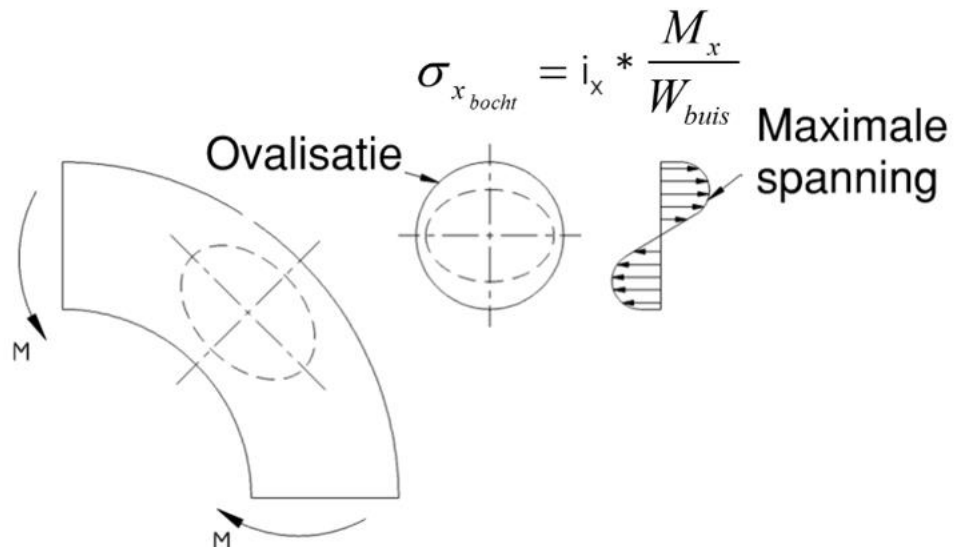


Fig. 2 Scherpe bocht: stijfheidsfactor EI/k





De factor i_x moet evenals k groter zijn dan 1 ($i_x > 1$), want wanneer $i_x < 1$ zou bij vermenigvuldiging met σ_x met $i_x < 1$ de toestand gunstiger worden dan bij een rechte buis, hetgeen niet reëel is.

De toestand blijft hetzelfde ($i_x = 1$) of wordt ongunstiger ($i_x > 1$).

De factor i_x is te berekenen met: $i_x = \frac{0,9}{h^{(2/3)}}$

i_x = stress-intensification factor in axiale richting (≥ 1)

h = flexibiliteitskarakteristiek



In NEN 3650-1:2020 zien we het volgende vermeld over bochten.

De relatie tussen de factoren i_x en i_y is afhankelijk van het materiaaltype. Wat is die factor i_y ?

Wanneer een leiding buigt t.g.v. zettingen kunnen we voor een recht leidingdeel de buigspanning σ_{bx} berekenen. Daar zijn we deze presentatie mee begonnen.

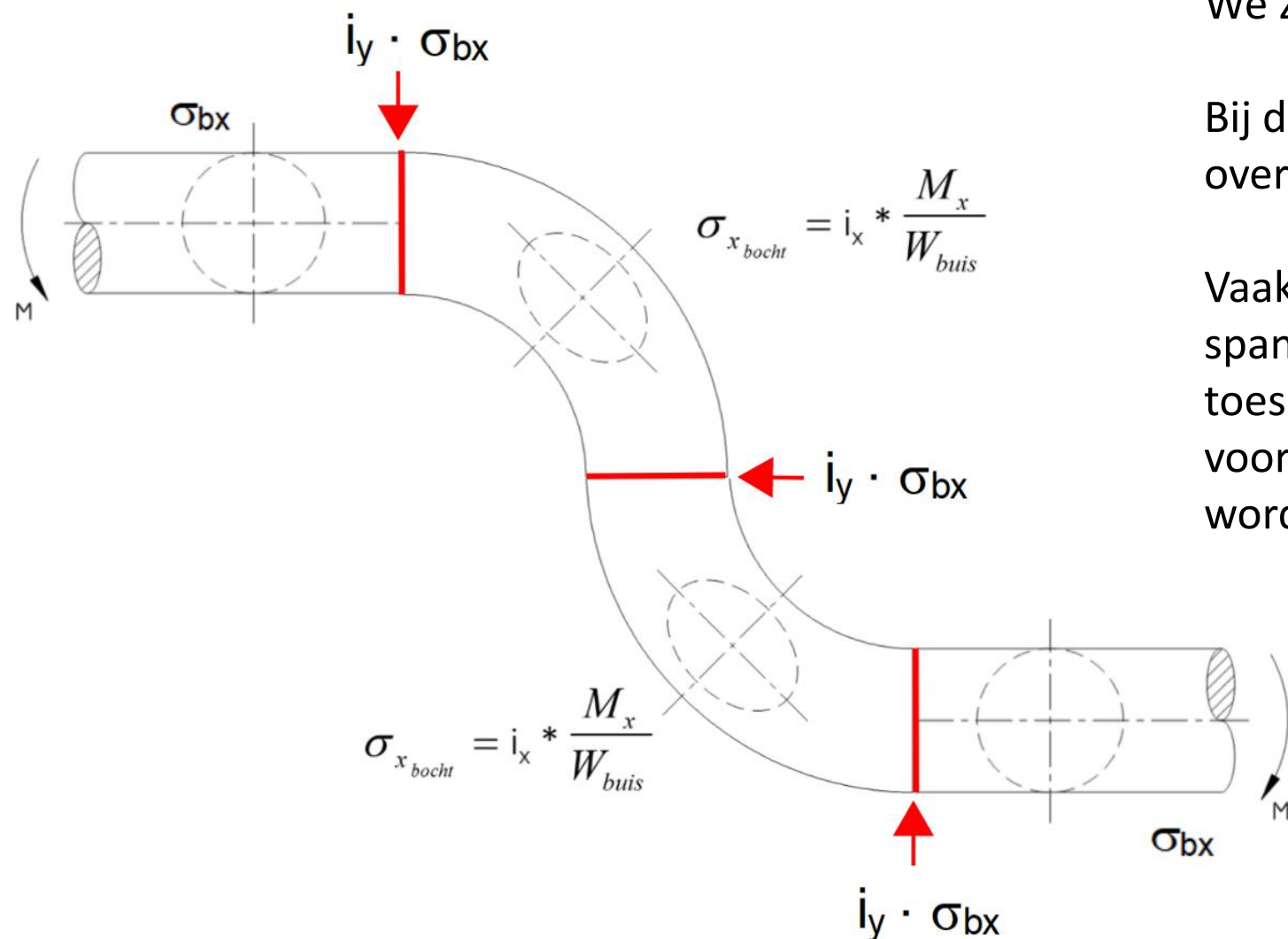
De spanning in langsrichting van de bocht is minimaal gelijk aan de buigspanning in het rechte leiding gedeelte. Deze buigspanning wordt via de lasverbinding tussen het rechte deel van de leiding en de bocht doorgegeven. Of als er een trekvaste mofverbinding is, via deze verbinding, of als er een mof-spie verbinding is, via deze verbinding.

De verbinding tussen de rechte leiding en de bocht wordt dus extra belast, namelijk met een factor $i_y = 2 i_x$ of indien we met inwendige druk rekenen bij niet stalen leidingen, met $i_{yp} = 2 i_{xp}$.

Vaak zijn de spanningen t.p.v. de aansluiting van de rechte buis op de bocht maatgevend.



Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen: de factor i_y



We zien hier waar de i_y van toepassing is.

Bij de aansluitingen van de bochten en de overgangen tussen de bochten.

Vaak zijn deze doorsneden maatgevend qua spanningen. Bij te krappe bochten wordt de toeslag als gevolg van i_y zo hoog dat vaak voor ruimere bochten gekozen moet worden.



D.6.5 'Rerounding'effect

Door inwendige druk worden voor tangentieel flexibel isotroop materiaal de factoren k en i_x gereduceerd ('rerounding'effect) tot k_p en i_{xp} :

$$k_p = k/c_1 \text{ en } i_{xp} = i_x/c_2$$

$$\text{met: } c_1 = 1 + 6 \frac{p_d}{E} \left(\frac{r}{d_n} \right)^{7/3} \times \left(\frac{R}{r} \right)^{1/3} \quad \text{en} \quad c_2 = 1 + 3,25 \frac{p_d}{E} \left(\frac{r}{d_n} \right)^{5/2} \times \left(\frac{R}{r} \right)^{2/3}$$



Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen: de factor i_{xp} en i_{yp}

In ASME B3.1-2018
Zien we opmerking (5)

Table D-1 Flexibility and Stress Intensification Factors				
Description	Flexibility Characteristic, h	Flexibility Factor, k	Stress Intensification Factor, i	Illustration
Welding elbow or pipe bend [Notes (1), (2), (3), (4), (5)]	$\frac{t_n R}{r^2}$	$\frac{1.65}{h}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	
Closely spaced miter bend [Notes (1), (2), (3), (5)] $s < r(1 + \tan \theta)$ $B \geq 6t_n$ $\theta \leq 22\frac{1}{2}$ deg	$\frac{st_n \cot \theta}{2r^2}$	$\frac{1.52}{h^{5/6}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	
Widely spaced miter bend [Notes (1), (2), (5), (6)] $s \geq r(1 + \tan \theta)$ $\theta \leq 22\frac{1}{2}$ deg	$\frac{t_n(1 + \cot \theta)}{2r}$	$\frac{1.52}{h^{5/6}}$	$\frac{0.9}{h^{2/3}}$	



ASME B3.1-2018: Voetnoot(5)

- (5) In large diameter thin-wall elbows and bends, pressure can significantly affect magnitudes of k and i . Values from the Table may be corrected by dividing k by

$$\left[1 + 6 \left(\frac{P}{E_c} \right) \left(\frac{r}{t_n} \right)^{7/3} \left(\frac{R}{r} \right)^{1/3} \right]$$

and dividing i by

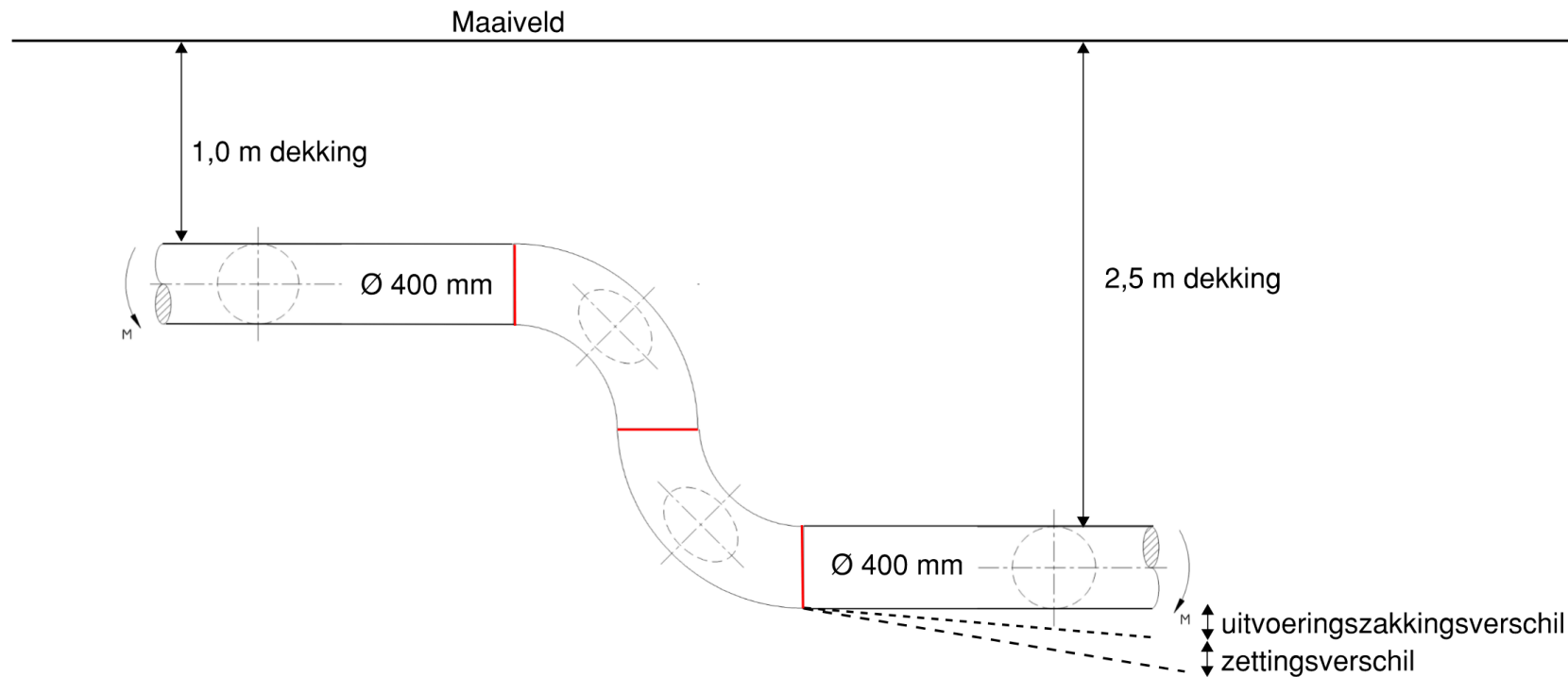
$$\left[1 + 3.25 \left(\frac{P}{E_c} \right) \left(\frac{r}{t_n} \right)^{5/2} \left(\frac{R}{r} \right)^{2/3} \right]$$

In het programma Sigma doen we niets met de aanpassing van de factor k want dit getal is eigenlijk alleen een indicatie van de stijfheid van de bocht. Wel met het aanpassen van i_x . Daarmee berekenen we eerst de factor i_{xp} en vervolgens de factor i_{yp} .

$$\Rightarrow i_{xp} = \frac{i_x}{C_2} \Rightarrow i_{yp} = 2 \cdot i_{xp}$$



Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen: toepassingen in de praktijk



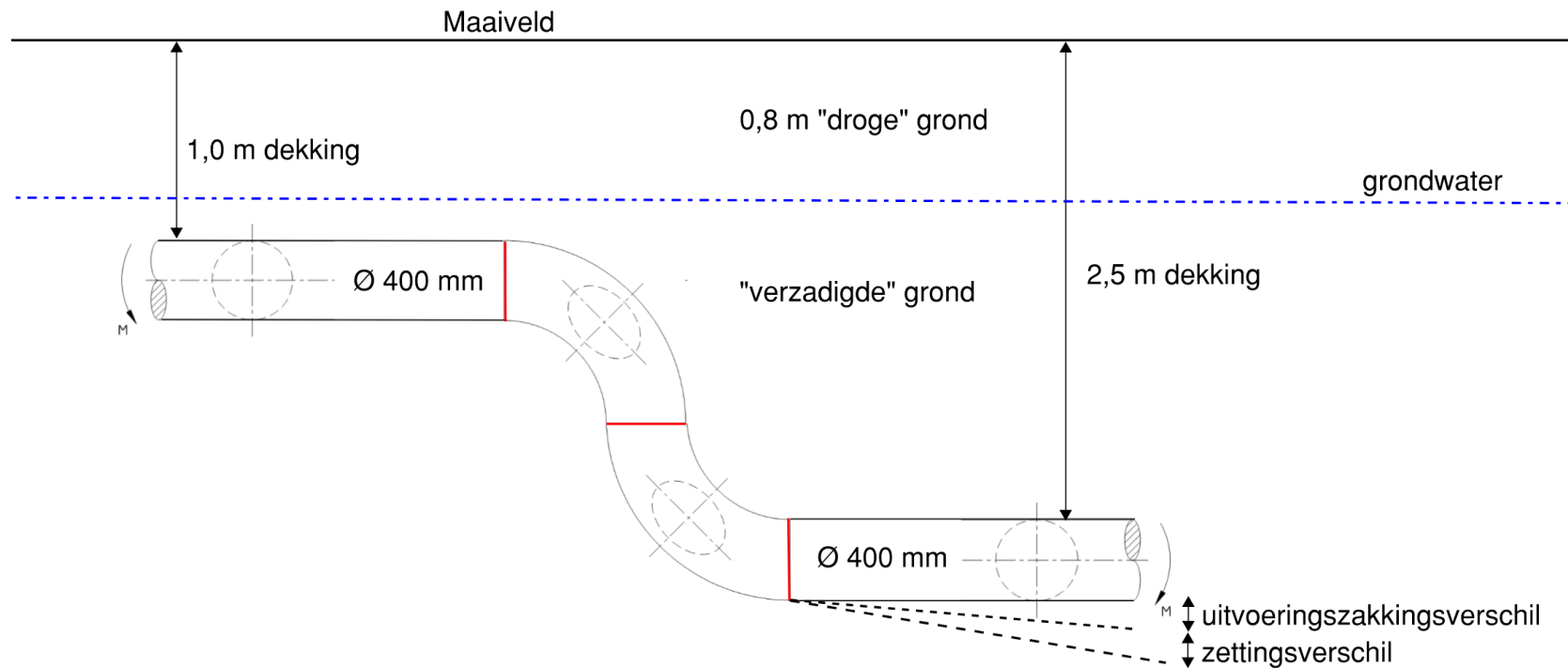
Dekking varieert van 1,0 m naar 2,5 m.

Verticale bochten om hoogteverschil tussen twee leidingen te overbruggen.

Zettingen aan de rechterzijde hebben invloed op de bochten.



Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen: toepassingen in de praktijk



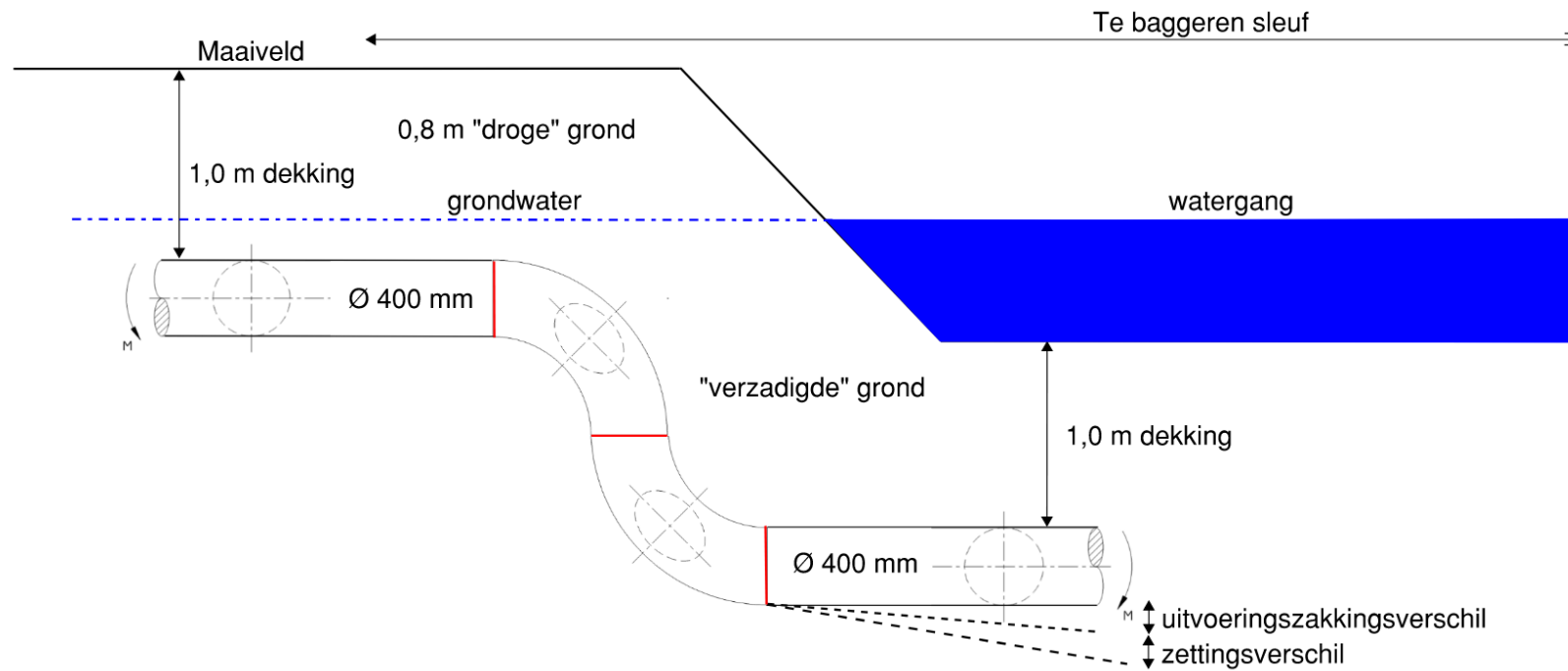
Dekking varieert van 1,0 m naar 2,5 m. Grondwaterstand op 0,8 m t.o.v. maaiveld

Verticale bochten om hoogteverschil tussen twee leidingen te overbruggen.

Zettingen aan de rechterzijde hebben invloed op de bochten. Uiteraard hebben zettingen aan de linkerzijde ook invloed....



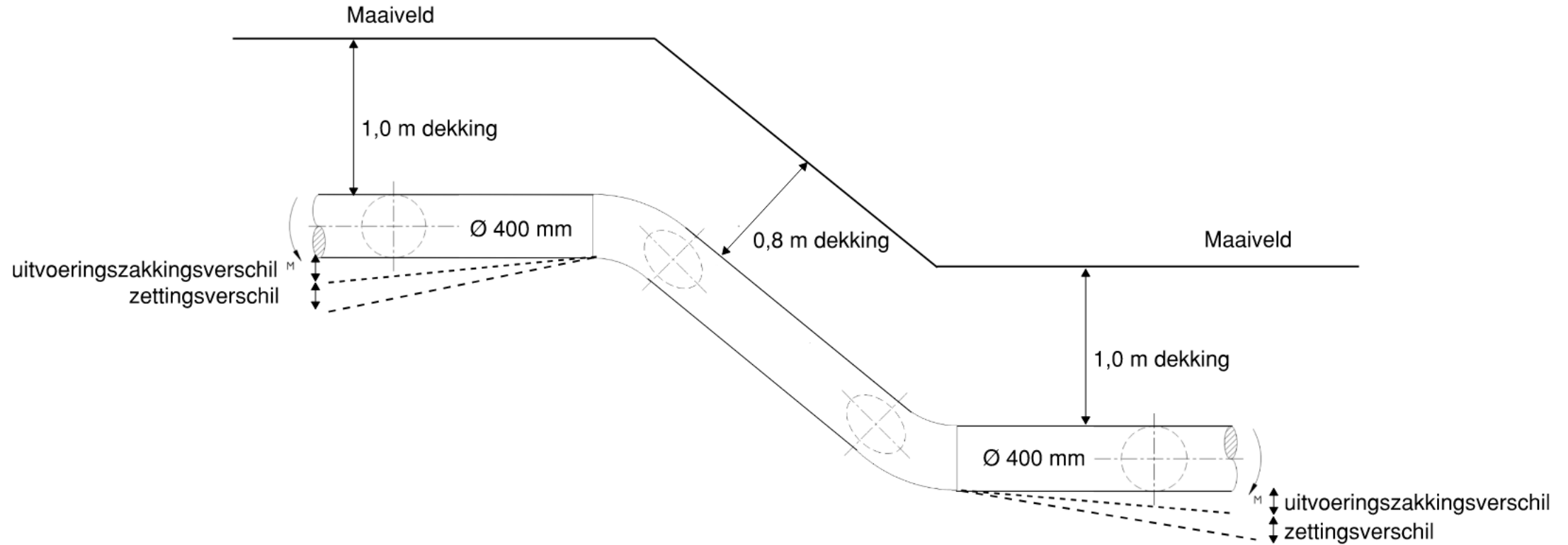
Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen: toepassingen in de praktijk



Zinker. De lengte van de gebaggerde sleuf is belangrijk voor het berekenen van de spanningen. Het uitvoeringszakkingsverschil kan bij een zinker fors zijn. Dit betekent (zeer) grote spanningen in de bochten. Wanneer daar bovenop dan ook nog grote zettingen optreden dan kan het gebeuren dat de toelaatbare spanningen overschreden worden.



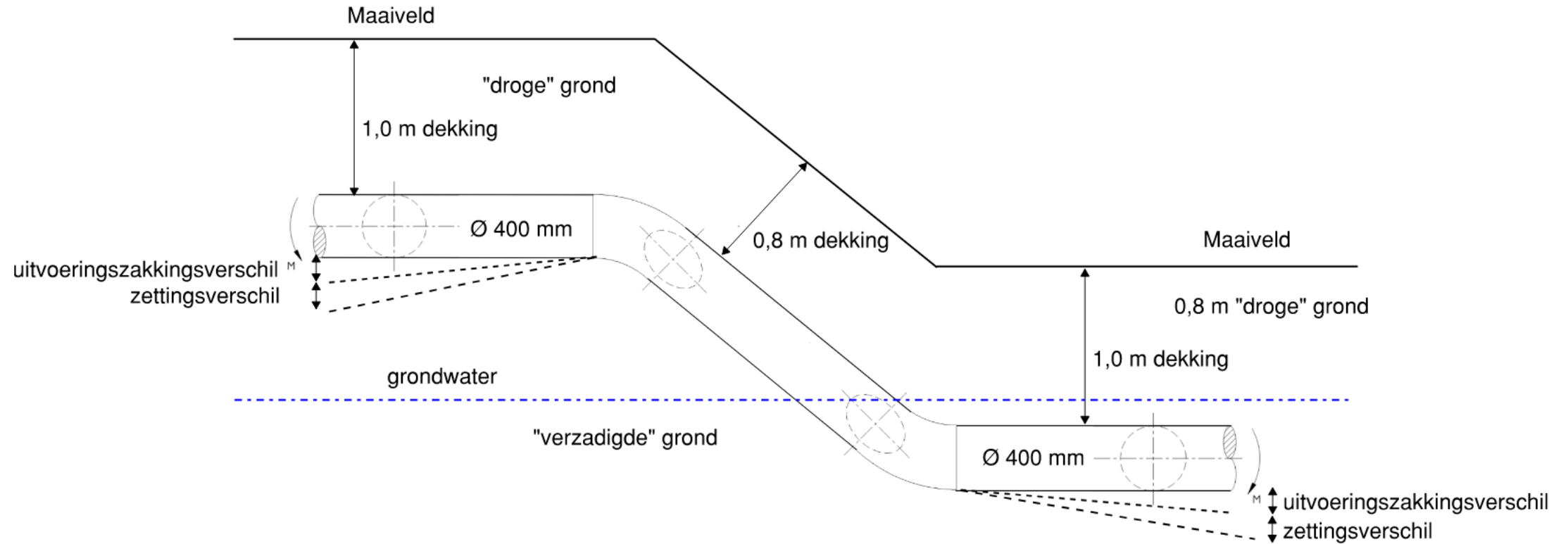
Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen: toepassingen in de praktijk



Kruising met een grondlichaam. Bijvoorbeeld een waterkering of een weg. Zowel in de kruin als in de veldstrekking zal sprake zijn van uitvoeringszakkingsverschillen en zettingsverschillen. Deze zorgen voor extra spanningen in de bochten (en de lassen/verbindingen waarmee de bochten bevestigd zijn aan de rechte delen).



Invloed van bochten bij ondergrondse leidingen: toepassingen in de praktijk



Kruising van een grondlichaam met grondwater.



Uitbreiding rekenvoorbeelden met bochten: 1,5 D bocht bij stalen leiding

Invoerscherm Sigma indien Ø 406,4 mm staal: slappe klei met een goed verdichte sleuf en 1,5 D bocht

Leiding- en materiaalgegevens		Importantiefactor		Grondmechanische gegevens	
Materiaal	Staal	1.0	0.95	Grondwater	Ja
Kwaliteit	NEN-EN ISO 318	0.90	0.85	Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]	1,25
Uitwendige middellijn [mm]	406,4	0.80	0.75	Grondsoort	Klei
Wanddikte [mm]	5,0	Aanleggegevens		Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	14,0
☐ Rekenen met minimale wanddikte		Ligging		Inwendige wrijvingshoek grond [°]	17,5
Minimale wanddikte [mm]	5,0	☐ Krusing met een waterstaatswerk ☒ Evenwijdig aan een waterstaatswerk ☐ Zinkerconstructie		Effectieve cohesie [kN/m ²]	0,0
Dikte bekleding [mm]	0,0	Uitvoeringszakkingverschil [mm]		Ongedraineerde schuifsterkte [kN/m ²]	25,0
Bocht in constructie ☐ Nee ☒ Glad ☐ Mijter		Zettingsverschil [mm]		E-modulus ondergrond [MN/m ²]	1,0
Wanddikte bocht [mm]	5,0	Klinkpercentage [-]		Minimale verticale beddingconstante [N/mm ³]	0,002
Bochtstraal [mm]	609,6	Marstonfactor [-]		Gemiddelde verticale beddingconstante [N/mm ³]	0,003
Verkeersbelasting		Opleghoeken		Grondmechanisch onderzoek uitgevoerd	
Verkeersbelasting	Grafiek I	Horizontale steundruk		Ja	

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}} \quad \sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,0396 \cdot 25,0 \cdot \sqrt{\frac{205800 \cdot 0,003}{5}} = \mathbf{10,99 \text{ N/mm}^2} \quad \sigma_{bx} = 0,0396 \cdot (25,0 + 2,0 \cdot 25) \cdot \sqrt{\frac{205800 \cdot 0,003}{5}} = \mathbf{32,97 \text{ N/mm}^2}$$

Ten gevolge van het uitvoeringszakkingsverschil zien we een spanning σ_{bx} van 10,99 N/mm². Het zettingsverschil f_z van 25 mm wordt ook hier met een onzekerheidsfactor van 2,0 in rekening gebracht. Dit geeft een spanning van 32,97 N/mm². Wat dat betreft is geen invloed van de bocht merkbaar. Maar wel als we verder kijken.....

Overzicht spanningsverhogende factoren i_x en i_y .

Berekening van de factoren i_x , i_{xp} , i_y en i_{yp} van de bocht:

$$r = \left(\frac{D_e}{2} + \frac{D_e - 2 \cdot t}{2} \right) / 2 = 200,70 \text{ mm}$$

$$h = \frac{t \cdot R}{r^2} = \frac{5 \cdot 609,6}{200,7^2} = 0,08$$

$$k = \frac{1,65}{h} = \frac{1,65}{0,08} = 21,81$$

$$i_x = \frac{0,9}{h^{(2/3)}} = \frac{0,9}{0,08^{(2/3)}} = 5,03$$

$$i_y = 2 \cdot i_x = 2 \cdot 5,03 = 10,06$$

We zien hier de spanningsverhogende factoren van de bocht. De factor $h = 0,08$. De factor k is 21,81. De bocht is dus 21,81 keer zo slap als de rechte buis. De factor i_x is 5,03. De factor i_y is $2 \cdot i_x = 10,06$.



Uitbreiding rekenvoorbeelden met bochten: 1,5 D bocht bij stalen leiding

Spanningen 1^e en 2^e jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 1 \cdot (194,46 + 10,06 \cdot 10,99) = \mathbf{305,05 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 1 \cdot 5,03 \cdot 10,99 + 23,87 = \mathbf{79,17 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot Re \cdot S = 0,8 \cdot 245 \cdot 1,00 = \mathbf{196,00 \text{ N/mm}^2}$$

Spanningen na 2 jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 1 \cdot (198,10 + 10,06 \cdot 32,97) = \mathbf{529,86 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 1 \cdot 5,03 \cdot 32,97 + 23,87 = \mathbf{189,75 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot Re \cdot S = 0,8 \cdot 245 \cdot 1,00 = \mathbf{196,00 \text{ N/mm}^2}$$

Uit dit overzicht blijkt dat deze leiding niet voldoet. De optredende spanningen zijn veel hoger dan de rekgrens van het materiaal.

Het grootste probleem zit in omtreksrichting van de leiding. Daar komt direct na aanleg van de leiding een spanningsverhoging van 10,06 (de i_y) * 10,99 (de σ_{bx}). Dus er komt ruim 100 N/mm² bij.

Na 2 jaar zijn er meer zettingen in rekening gebracht. Dit geeft een buigspanning (σ_{bx}) van 32,97 N/mm². Die waarde moet ook vermenigvuldigd worden met de factor i_y .

Dit betekent een verhoging van circa 330 N/mm². Eindconclusie: deze bocht kan niet worden toegepast.



Uitbreiding rekenvoorbeelden met bochten: 3,5 D bocht bij PE 100 leiding

Invoerscherm Sigma indien Ø 400 mm PE 100 SDR 11: slappe klei met een goed verdichte sleuf en 3,5 D bocht

Leiding- en materiaolgegevens

Materiaal

PE

Kwaliteit

PE 100

Uitwendige middellijn [mm]

400,0_

Wanddikte [mm]

36,4_

Dikte bekleding [mm]

0,0_

Bocht in constructie

☐ Nee
☒ Glad
☐ Mijter

Wanddikte bocht [mm]

36,4_

Bochtstraal [mm]

1400,0_

Verkeersbelasting

Grafiek I

Importantiefactor

☒ 1.0
☐ 0.95
☐ 0.90
☐ 0.85
☐ 0.80
☐ 0.75

Aanleggegevens

Ligging

☐ Kruising met een waterstaatswerk
☒ Evenwijdig aan een waterstaatswerk
☐ Zinkerconstructie

Uitvoeringszakkingverschil [mm]

25,0_

Zettingsverschil [mm]

25,0_

Klinkpercentage [-]

0,1_

Marstonfactor [-]

0,3_

Grondmechanische gegevens

Grondwater

☐ Ja
☒ Nee

Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]

1,25

Grondsoort

Klei

Volumiek gewicht droge grond [kN/m³]

14,0_

Inwendige wrijvingshoek grond [°]

17,5_

Effectieve cohesie [kN/m²]

0,0_

Ongedraineerde schuifsterkte [kN/m²]

25,0_

E-modulus ondergrond [MN/m²]

1,0_

Minimale verticale beddingconstante [N/mm³]

0,002_

Gemiddelde verticale beddingconstante [N/mm³]

0,003_

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,00904 \cdot 25,0 \cdot \sqrt{\frac{975 \cdot 0,003}{36.4}} = \mathbf{0,06 \text{ N/mm}^2}$$

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,00904 \cdot (25,0 + 2,0 \cdot 25) \cdot \sqrt{\frac{975 \cdot 0,003}{36,4}} = \mathbf{0,19 \text{ N/mm}^2}$$

Ten gevolge van het uitvoeringszakingsverschil zien we een spanning σ_{bx} van 0,06 N/mm². Het zettingsverschil f_z van 25 mm wordt ook hier met een onzekerheidsfactor van 2,0 in rekening gebracht. Dit geeft een spanning van 0,19 N/mm². Wat dat betreft is hier geen invloed van de bocht merkbaar.

Overzicht spanningsverhogende factoren i_x , i_{xp} , i_y en i_{yp}

Berekening van de factoren i_x , i_{xp} , i_y en i_{yp} van de bocht:

$$r = \left(\frac{D_e}{2} + \frac{D_e - 2 \cdot t}{2} \right) / 2 = 181,80 \text{ mm}$$

$$h = \frac{t \cdot R}{r^2} = \frac{36,4 \cdot 1400}{181,8^2} = 1,54$$

$$k = \frac{1,65}{h} = \frac{1,65}{1,54} = 1,07$$

$$i_x = \frac{0,9}{h^{(2/3)}} = \frac{0,9}{1,54^{(2/3)}} = 0,67$$

$$c_2 = 1 + 3,25 \cdot (p_d/E) \cdot (r/t)^{(5/2)} \cdot (R/r)^{(2/3)}$$

$$c_2 = 1 + 3,25 \cdot (0,3/975) \cdot (181,80/36,4)^{(5/2)} \cdot (1.400,00/181,8)^{(2/3)} = 1,22$$

$$i_{xp} = \frac{i_x}{c_2} = \frac{0,67}{1,22} = 0,55$$

$$i_y = 2 \cdot i_x = 2 \cdot 0,67 = 1,35$$

$$i_{yp} = 2 \cdot i_{xp} = 2 \cdot 0,55 = 1,11$$

$$i_x < 1 \rightarrow i_x = 1,00$$

$$i_{xp} < 1 \rightarrow i_{xp} = 1,00$$

Bij PE zien we meer factoren dan bij staal. De factor h is nu 1,54 i.p.v. 0,08 zoals bij staal. De factor k is nu 1,07. De bocht is dus iets slapper dan de rechte buis.

De factor i_x is 0,67 i.p.v. 5,03.

De factor i_y is nu $2 \cdot i_x = 1,35$.

Bij PE mogen i_x en i_y gereduceerd worden als gevolg van de inwendige druk. Dit betekent een verlaging van deze 2 factoren in 0,55 (i_{xp}) respectievelijk 1,11 (i_{yp}).



Spanningen 1^e en 2^e jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_{yp} \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot (3,54 + 1,11 \cdot 0,06) = \mathbf{2,34 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot i_{xp} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 0,66 + 0,65 \cdot 1,00 \cdot 0,06 + 1,56 = \mathbf{2,26 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 1,00 = \mathbf{8,00 \text{ N/mm}^2}$$

Spanningen na 2 jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_{yp} \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot (3,29 + 1,11 \cdot 0,19) = \mathbf{2,28 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot i_{xp} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 0,66 + 0,65 \cdot 1,00 \cdot 0,19 + 1,56 = \mathbf{2,34 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 1,00 = \mathbf{8,00 \text{ N/mm}^2}$$

Uit dit overzicht blijkt dat deze leiding wel voldoet. De optredende spanningen zijn lager dan de toelaatbare spanning.

Eindconclusie: deze bocht kan wel worden toegepast.



Uitbreiding rekenvoorbeelden met bochten: 3,5 D bocht bij PVC SDR 34 leiding

Invoerscherm Sigma indien Ø 400 mm PVC SDR 34: slappe klei met een goed verdichte sleuf en 3,5 D bocht

Leiding- en materiaalgegevens		Importantiefactor		Grondmechanische gegevens	
Materiaal	PVC	☒ 1.0	☐ 0.95	☐ 0.90	☐ 0.85
Kwaliteit	PVC-U	☐ 0.80	☐ 0.75	Grondwater	☐ Ja ☒ Nee
Uitwendige middellijn [mm]	400,0	Aanleggegevens		Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]	1,25
Wanddikte [mm]	11,7	Ligging		Grondsoort	Klei
Dikte bekleding [mm]	0,0	☐ Kruising met een waterstaatswerk ☒ Evenwijdig aan een waterstaatswerk ☐ Zinkerconstructie		Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	14,0
Bocht in constructie ☐ Nee ☒ Glad ☐ Mijter		Uitvoeringszakkingverschil [mm]	25,0	Inwendige wrijvingshoek grond [°]	17,5
Wanddikte bocht [mm]	11,7	Zettingsverschil [mm]	25,0	Effectieve cohesie [kN/m ²]	0,0
Bochtstraal [mm]	1400,0	Klinkpercentage [-]	0,1	Ongedraineerde schuifsterkte [kN/m ²]	25,0
Verkeersbelasting		Marstonfactor [-]	0,3	E-modulus ondergrond [MN/m ²]	1,0
Verkeersbelasting	Grafiek I			Minimale verticale beddingconstante [N/mm ³]	0,002
				Gemiddelde verticale beddingconstante [N/mm ³]	0,003

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,00976 \cdot 25 \cdot \sqrt{\frac{3000 \cdot 0,003}{11,7}} = \mathbf{0,21 \text{ N/mm}^2}$$

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$

$$\sigma_{bx} = 0,00976 \cdot (25 + 2,0 \cdot 25) \cdot \sqrt{\frac{3000 \cdot 0,003}{11,7}} = \mathbf{0,64 \text{ N/mm}^2}$$

Ten gevolge van het uitvoeringszakingsverschil zien we een spanning σ_{bx} van 0,21 N/mm² i.p.v. 0,06 N/mm². Het zettingsverschil f_z van 25 mm wordt ook hier met een onzekerheidsfactor van 2,0 in rekening gebracht. Dit geeft hier een spanning van 0,64 N/mm² i.p.v. 0,19 N/mm². Wat dat betreft is hier beperkte invloed van de PVC merkbaar.

Overzicht spanningsverhogende factoren i_x , i_{xp} , i_y en i_{yp}

Berekening van de factoren i_x , i_{xp} , i_y en i_{yp} van de bocht:

$$r = \left(\frac{D_e}{2} + \frac{D_e - 2 \cdot t}{2} \right) / 2 = 194,15 \text{ mm}$$

$$h = \frac{t \cdot R}{r^2} = \frac{11,7 \cdot 1400}{194,15^2} = 0,43$$

$$k = \frac{1,65}{h} = \frac{1,65}{0,43} = 3,80$$

$$i_x = \frac{0,9}{h^{(2/3)}} = \frac{0,9}{0,43^{(2/3)}} = 1,57$$

$$c_2 = 1 + 3,25 \cdot (p_d/E) \cdot (r/t)^{(5/2)} \cdot (R/r)^{(2/3)}$$

$$c_2 = 1 + 3,25 \cdot (0,3/3000) \cdot (194,15/11,7)^{(5/2)} \cdot (1.400,00/194,15)^{(2/3)} = 2,36$$

$$i_{xp} = \frac{i_x}{c_2} = \frac{1,57}{2,36} = 0,66$$

$$i_y = 2 \cdot i_x = 2 \cdot 1,57 = 3,14$$

$$i_{yp} = 2 \cdot i_{xp} = 2 \cdot 0,66 = 1,33$$

$$i_{xp} < 1 \rightarrow i_{xp} = 1,00$$

Bij PVC we ook meer factoren dan bij staal. De factor h is nu 0,43 i.p.v. 1,54 bij PE. De factor k is nu 3,8 i.p.v. 1,07. De bocht is veel slapper dan de PE buis.

De factor i_x is 1,57 i.p.v. 0,67.

De factor i_y is nu $2 \cdot i_x = 3,14$ i.p.v. 1,35.

Ook bij PE mogen i_x en i_y gereduceerd worden als gevolg van de inwendige druk. Dit betekent een verlaging van deze 2 factoren in 1,33 (i_{xp}) respectievelijk 1,0 (i_{yp}).



Spanningen 1^e en 2^e jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_{yp} \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,75 \cdot (18,89 + 1,33 \cdot 0,21) = \mathbf{14,38 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot i_{xp} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 2,00 + 0,75 \cdot 1,00 \cdot 0,21 + 2,40 = \mathbf{4,56 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 12,50 \cdot 1,00 = \mathbf{12,50 \text{ N/mm}^2}$$

Spanningen na 2 jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_{yp} \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,75 \cdot (17,63 + 1,33 \cdot 0,64) = \mathbf{13,86 \text{ N/mm}^2}$$

[Geen titel]

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot i_{xp} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 2,00 + 0,75 \cdot 1,00 \cdot 0,64 + 2,40 = \mathbf{4,88 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 12,50 \cdot 1,00 = \mathbf{12,50 \text{ N/mm}^2}$$

Uit dit overzicht blijkt dat deze leiding net niet voldoet. De optredende spanningen zijn iets hoger dan de toelaatbare spanning.

Let op: Dit komt niet zo zeer door de invloed van de bocht. Hier is de combinatie grond + verkeersbelasting maatgevend.

Toch laten we dit rekenvoorbeeld zien in deze presentatie.

Wanneer de leiding drukloos is zien we een totaal ander overzicht. Zie volgende pagina.



Overzicht spanningsverhogende factoren i_x en i_y

Berekening van de factoren i_x , i_{xp} , i_y en i_{yp} van de bocht:

$$r = \left(\frac{D_e}{2} + \frac{D_e - 2 \cdot t}{2} \right) / 2 = 194,15 \text{ mm}$$

$$h = \frac{t \cdot R}{r^2} = \frac{11,7 \cdot 1400}{194,15^2} = 0,43$$

$$k = \frac{1,65}{h} = \frac{1,65}{0,43} = 3,80$$

$$i_x = \frac{0,9}{h^{(2/3)}} = \frac{0,9}{0,43^{(2/3)}} = 1,57$$

$$i_y = 2 \cdot i_x = 2 \cdot 1,57 = 3,14$$

Bij de drukloze situatie zien we dat er geen i_{yp} en i_{xp} meer worden berekend. worden als gevolg van de inwendige druk.

Dit betekent geen verlaging van de factoren i_x en i_y .



Spanningen 1^e en 2^e jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,75 \cdot (40,02 + 3,14 \cdot 0,21) = \mathbf{30,52 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx}$$

$$\sigma_x = 0,75 \cdot 1,57 \cdot 0,21 = \mathbf{0,25 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 12,50 \cdot 1,00 = \mathbf{12,50 \text{ N/mm}^2}$$

Spanningen na 2 jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,75 \cdot (37,36 + 3,14 \cdot 0,64) = \mathbf{29,53 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx}$$

$$\sigma_x = 0,75 \cdot 1,57 \cdot 0,64 = \mathbf{0,76 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 12,50 \cdot 1,00 = \mathbf{12,50 \text{ N/mm}^2}$$

Uit dit overzicht blijkt dat deze leiding niet voldoet. De optredende spanningen zijn nu veel hoger dan de toelaatbare spanningen.

Ook hier geldt: Dit komt niet zo zeer door de invloed van de bocht.

Hier is de combinatie grond + verkeersbelasting maatgevend.

Conclusie: Het is verstandig om leidingen van kunststof zowel met als zonder inwendige druk te berekenen.



Zowel in de NEN 3650 als in de NEN 3651 wordt veel aandacht besteed aan zinkers. Enige artikelen:

6.2 Veiligheidseisen met betrekking tot minimale diepteligging

Voor zover in deze norm dan wel door bevoegd gezag niet anders is bepaald, moeten nieuwe ondergrondse buisleidingen die tot groep I behoren, een minimale gronddekking van 100 cm hebben. Voor groep II-leidingen geldt een minimale gronddekking van 80 cm. Zie ook 8.2.4 en 9.10.4.2.

Voor kruisingen met watergangen, in beheer bij een waterschap, geldt een minimale gronddekking van 100 cm onder de onderhoudsdiepte.

Indien de minimale gronddekking niet realiseerbaar is, moet de leiding aanvullend worden beschermd tegen mechanische beschadiging, bijv. door een afdekkende constructie.

8.2.4 Diepteligging leiding

Waar de leiding een sloot of watergang kruist, kunnen additionele eisen aan de leiding worden gesteld door o.a. de eigenaar van de sloot of de waterbeheerder. De gronddekking van zinkers kan in overleg met de betrokken beheerder worden vergroot met een toeslag wegens bijv. bodemerosie en ankerrisico ten gevolge van scheepvaart. (Zie ook NEN 3651.)



Zowel in de NEN 3650 als in de NEN 3651 wordt veel aandacht besteed aan zinkers. Enige artikelen:

8.1.2 Boezemwater en boezemwaterkeringen

8.1.2.1 Verticaal alignement

De minimale gronddekking boven de leiding ter plaatse van de kaden en de veiligheidszones moet 1,0 m bedragen.

In het boezemwater moet minimale gronddekking bedragen voor:

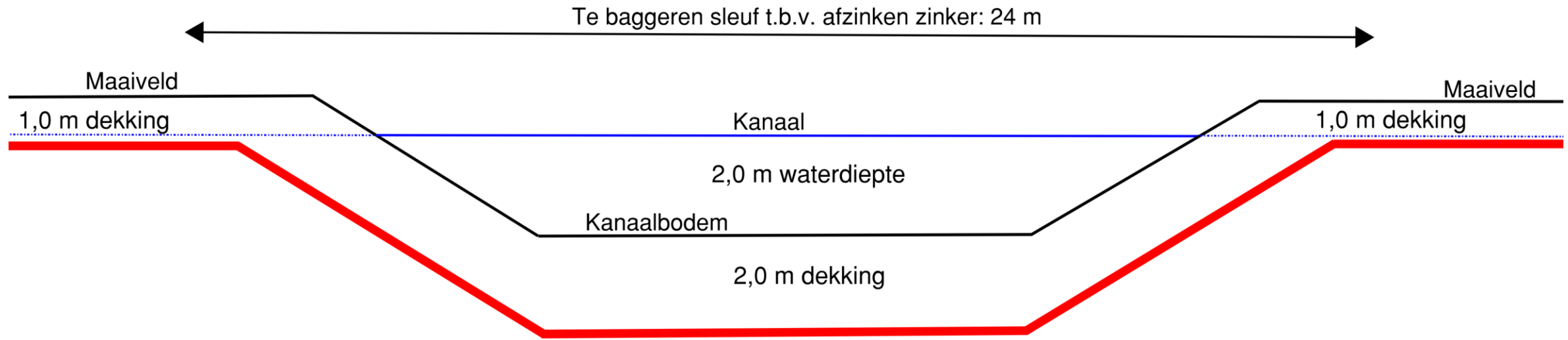
- geen scheepvaart 1,3 m;
- kleine scheepvaart 2,0 m;
- grote scheepvaart 2,5 m;
- duwvaart 3,0 m.

Indien aanvullende beschermende maatregelen boven de leiding worden aangebracht (bijvoorbeeld steenbestorting), mits de grondslag daarvoor geschikt is, mag de gronddekking van de leiding in het water worden verminderd.

Volgens 8.1.6.2 kunnen voor rijks- en provinciale vaarwegen grotere gronddekkingen zijn vereist.



Berekenen van de invloed van bochten op spanningen bij zinkers



We zien hier een zinker. De dekking t.o.v. de bodem is 2,0 m. Er is dus sprake van kleine scheepvaart volgens artikel 8.1.2.1 van de NEN 3651. Aan beide oevers bedraagt de dekking 1,0 m.

Om de zinker te kunnen afzinken moet van te voren een sleuf gebaggerd worden. Er moet over een lengte van 24 m gebaggerd/gegraven worden.

De zinker heeft onderbochten en bovenbochten. Bij staal is de standaard bocht 1,5 x de diameter. In dit voorbeeld gaan we uit van 3,0 x de diameter. Ook maken we een berekening met PE 100 SDR 11. De bochten hierbij zijn 3,5 x de diameter.



Berekenen van de invloed van bochten op spanningen bij zinkers: STAAL

Leiding- en materiaalgegevens		Importantiefactor		Grondmechanische gegevens	
Materiaal	Staal	☒ 1.0 ☐ 0.95 ☐ 0.90 ☐ 0.85 ☐ 0.80 ☐ 0.75		Grondwater	☒ Ja ☐ Nee
Kwaliteit	NEN-EN ISO 318			Dekking van de leiding t.o.v. maaiveld [m]	1,0_
Uitwendige middellijn [mm]	406,4_			G.W.S. t.o.v. maaiveld [m]	0,8_
Wanddikte [mm]	8,8_			Grondsoort	Klei
☐ Rekenen met minimale wanddikte				Volumiek gewicht droge grond [kN/m ³]	17,0_
Minimale wanddikte [mm]	8,8_			Volumiek gewicht natte grond [kN/m ³]	17,0_
Dikte bekleding [mm]	0,0_			Inwendige wrijvingshoek grond [°]	17,5_
Bocht in constructie ☐ Nee ☒ Glad ☐ Mijter				Effectieve cohesie [kN/m ²]	5,0_
Wanddikte bocht [mm]	8,8_			Ongedraineerde schuifsterkte [kN/m ²]	50,0_
Bochtstraal [mm]	1220,0_			E-modulus ondergrond [MN/m ²]	2,0_
				Minimale verticale beddingconstante [N/mm ³]	0,002_
				Gemiddelde verticale beddingconstante [N/mm ³]	0,003_

Aanleggegevens	
Ligging	
☐ Kruising met een waterstaatswerk	
☐ Evenwijdig aan een waterstaatswerk	
☒ Zinkerconstructie	
Lengte gebaggerde zinkersleuf [m]	24,0_
Uitvoeringszakkingverschil [mm]	135,0_
Zettingsverschil [mm]	25,0_
Klinkpercentage [-]	0,1_
Marstonfactor [-]	0,3_

Verkeersbelasting	
Verkeersbelasting	Grafiek ½ x II

Wanneer we in het programma Sigma bij “Ligging” een zinker aanvinken dan zien we gelijk de optie “Lengte gebaggerde sleuf” verschijnen.

Voor het uitvoeringszakkingverschil is uitgegaan van slappe klei/veen. De zinker heeft onderbochten en bovenbochten. In dit voorbeeld gaan we uit van 3,0 x de diameter qua bochtstraal, ofwel $3 * 406 = \text{circa } 1220 \text{ mm}$.



Spanning t.g.v. uitvoeringszakingsverschil

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot f_v \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$
$$\sigma_{bx} = 0,0964 \cdot 135 \cdot \sqrt{\frac{205800 \cdot 0,003}{8,8}} = \mathbf{109,04 \text{ N/mm}^2}$$

Spanning t.g.v. uitvoeringszakingsverschil en zettingsverschil

$$\sigma_{bx} = C_z \cdot (f_v + 2,0 \cdot f_z) \cdot \sqrt{\frac{E \cdot k_{v,gem}}{d_n}}$$
$$\sigma_{bx} = 0,0964 \cdot (135 + 2,0 \cdot 25) \cdot \sqrt{\frac{205800 \cdot 0,003}{8,8}} = \mathbf{149,43 \text{ N/mm}^2}$$

Ten gevolge van de ruimte onder de leiding (uitvoeringszakingsverschil van 135 mm) zien we dat er hoge spanningen ontstaan in de langsrichting, de richting waarin de leiding gaat doorbuigen. Op langere termijn neemt deze spanning toe als gevolg van zettingen. Deze zetting van in dit geval 25 mm wordt met een onzekerheidsfactor van 2 in rekening gebracht. De totale zetting wordt dus 185 mm. Of de leiding deze zetting geheel of gedeeltelijk kan volgen hangt af van de buigstijfheid van de leiding in combinatie met de coëfficiënt C_z .

Omdat bij een zinker sprake is van bochten moeten we bij die bochten dus de spanning σ_{bx} vermenigvuldigen met i_x en i_y . Net zoals bij de vorige voorbeelden.



Berekening van de factoren i_x , i_{xp} , i_y en i_{yp} van de bocht:

$$r = \left(\frac{D_e}{2} + \frac{D_e - 2 \cdot t}{2} \right) / 2 = 198,80 \text{ mm}$$

$$h = \frac{t \cdot R}{r^2} = \frac{8,8 \cdot 1220}{198,8^2} = 0,27$$

$$k = \frac{1,65}{h} = \frac{1,65}{0,27} = 6,07$$

$$i_x = \frac{0,9}{h^{(2/3)}} = \frac{0,9}{0,27^{(2/3)}} = 2,15$$

$$i_y = 2 \cdot i_x = 2 \cdot 2,15 = 4,29$$

We zien hier een h van 0,27. Dit betekent een k van 6,07. Dit betekent dat de bocht 6,07 keer slapper is dan de rechte buis. De spanning in langsrichting van de rechte leiding wordt met een factor i_x van 2,15 in rekening gebracht in langsrichting van de bocht. Via de verbinding van de rechte leiding en de bocht, bij staal is dit via de lasverbinding, wordt in omtreksrichting van de leiding de factor i_y (= 4,29) in rekening gebracht.



Berekening van de factoren i_x , i_{xp} , i_y en i_{yp} van de bocht:

$$r = \left(\frac{D_e}{2} + \frac{D_e - 2 \cdot t}{2} \right) / 2 = 198,80 \text{ mm}$$

$$h = \frac{t \cdot R}{r^2} = \frac{8,8 \cdot 1220}{198,8^2} = 0,27$$

$$k = \frac{1,65}{h} = \frac{1,65}{0,27} = 6,07$$

$$i_x = \frac{0,9}{h^{(2/3)}} = \frac{0,9}{0,27^{(2/3)}} = 2,15$$

$$i_y = 2 \cdot i_x = 2 \cdot 2,15 = 4,29$$

We zien hier een h van 0,27. Dit betekent een k van 6,07. Dit betekent dat de bocht 6,07 keer slapper is dan de rechte buis. De spanning in langsrichting van de rechte leiding wordt met een factor i_x van 2,15 in rekening gebracht in langsrichting van de bocht. Via de verbinding van de rechte leiding en de bocht, bij staal is dit via de lasverbinding, wordt in omtreksrichting van de leiding de factor i_y (= 4,29) in rekening gebracht.



Berekenen van de invloed van bochten op spanningen bij zinkers: STAAL

Spanningen 1^e en 2^e jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 1 \cdot (121,36 + 4,29 \cdot 109,04) = \mathbf{589,32 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx}$$

$$\sigma_x = 1 \cdot 2,15 \cdot 109,04 = \mathbf{233,98 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot R_e \cdot S = 0,8 \cdot 360 \cdot 1,00 = \mathbf{288,00 \text{ N/mm}^2}$$

Spanningen na 2 jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 1 \cdot (139,16 + 4,29 \cdot 149,43) = \mathbf{780,43 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx}$$

$$\sigma_x = 1 \cdot 2,15 \cdot 149,43 = \mathbf{320,63 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot R_e \cdot S = 0,8 \cdot 360 \cdot 1,00 = \mathbf{288,00 \text{ N/mm}^2}$$

Uit dit overzicht blijkt dat deze leiding niet voldoet. De optredende spanningen zijn veel hoger dan de toelaatbare spanningen.

In langsrichting zien we de maximale spanning van 320,63 N/mm². Dit zou op te lossen zijn door een hogere staalkwaliteit.

In omtreksrichting zien we echter 589,32 N/mm² respectievelijk 780,43 N/mm². Dit is niet op te lossen door aan hogere staalkwaliteit.

Mogelijke oplossingen:

- a) Kleiner uitvoeringszakkingsverschil door de zinker in “den droge” te leggen
- b) Grotere (ruimere) bochten waardoor i_x en i_y kleiner worden
- c) Dikkere wand toepassen waardoor k en daardoor h gunstiger worden.



Berekenen van de invloed van bochten bij zinkers: STAAL met aanpassingen

Spanningen 1^e en 2^e jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 1 \cdot (64,70 + 4,29 \cdot 24,23) = \mathbf{168,69 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx}$$

$$\sigma_x = 1 \cdot 2,15 \cdot 24,23 = \mathbf{51,99 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot R_e \cdot S = 0,8 \cdot 360 \cdot 1,00 = \mathbf{288,00 \text{ N/mm}^2}$$

Spanningen na 2 jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 1 \cdot (82,49 + 4,29 \cdot 64,62) = \mathbf{359,80 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx}$$

$$\sigma_x = 1 \cdot 2,15 \cdot 64,62 = \mathbf{138,65 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot R_e \cdot S = 0,8 \cdot 360 \cdot 1,00 = \mathbf{288,00 \text{ N/mm}^2}$$

Kleiner uitvoeringszakkingsverschil door de zinker in “den droge” te leggen.

Volgens de NEN 3650 mag je bij in de situatie dat de sleuf goed verdicht kan worden rekenen met uitvoeringszakkingsverschillen volgens tabel C9 i.p.v. tabel C10. Dit betekent met 30 mm in plaats van 135 mm (bij deze grondslag en deze diameter).

We zien een veel gunstiger beeld qua spanningen. Toch voldoet de leiding nog niet.

Nog twee mogelijkheden:

- a) Grotere (ruimere) bochten waardoor i_x en i_y kleiner worden
- b) Dikkere wand toepassen waardoor k en daardoor h gunstiger worden.



Berekenen van de invloed van bochten bij zinkers: STAAL met aanpassingen

Spanningen 1^e en 2^e jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 1 \cdot (64,70 + 4,29 \cdot 24,23) = \mathbf{168,69 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx}$$

$$\sigma_x = 1 \cdot 2,15 \cdot 24,23 = \mathbf{51,99 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot R_e \cdot S = 0,8 \cdot 360 \cdot 1,00 = \mathbf{288,00 \text{ N/mm}^2}$$

Spanningen na 2 jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 1 \cdot (82,49 + 4,29 \cdot 64,62) = \mathbf{359,80 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx}$$

$$\sigma_x = 1 \cdot 2,15 \cdot 64,62 = \mathbf{138,65 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot R_e \cdot S = 0,8 \cdot 360 \cdot 1,00 = \mathbf{288,00 \text{ N/mm}^2}$$

Kleiner uitvoeringszakkingsverschil door de zinker in “den droge” te leggen.

Volgens de NEN 3650 mag je bij in de situatie dat de sleuf goed verdicht kan worden rekenen met uitvoeringszakkingsverschillen volgens tabel C9 i.p.v. tabel C10. Dit betekent met 30 mm in plaats van 135 mm (bij deze grondslag en deze diameter).

We zien een veel gunstiger beeld qua spanningen. Toch voldoet de leiding nog niet.

Nog twee mogelijkheden:

- a) Grotere (ruimere) bochten waardoor i_x en i_y kleiner worden
- b) Dikkere wand toepassen waardoor k en daardoor h gunstiger worden.



Berekenen van de invloed van bochten bij zinkers: STAAL met aanpassingen

Spanningen 1^e en 2^e jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 1 \cdot (64,70 + 3,06 \cdot 24,23) = \mathbf{138,92 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx}$$

$$\sigma_x = 1 \cdot 1,53 \cdot 24,23 = \mathbf{37,11 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot R_e \cdot S = 0,8 \cdot 360 \cdot 1,00 = \mathbf{288,00 \text{ N/mm}^2}$$

Spanningen na 2 jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 1 \cdot (82,49 + 3,06 \cdot 64,62) = \mathbf{280,43 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx}$$

$$\sigma_x = 1 \cdot 1,53 \cdot 64,62 = \mathbf{98,97 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot R_e \cdot S = 0,8 \cdot 360 \cdot 1,00 = \mathbf{288,00 \text{ N/mm}^2}$$

Kleiner uitvoeringszakingsverschil door de zinker in “den droge” te leggen en ruimere bochten toe te passen (5 D i.p.v. 3 D).

De ix factor wordt verlaagd naar 1,53 i.p.v. 2,15.
De factor iy wordt nu 3,06 (was 4,29).

We zien nu dat de leiding voldoet. De rekgrens van staal in dit voorbeeld is 360 N/mm².

De toelaatbare spanning bij eenvoudige berekeningen bedraagt 0,8 * de rekgrens ofwel 288 N/mm². Daar blijven we dus net onder.

Nog een mogelijkheid:

- a) Dikkere wand toepassen waardoor k en daardoor h gunstiger worden.



Berekenen van de invloed van bochten bij zinkers: STAAL met aanpassingen

Spanningen 1^e en 2^e jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 1 \cdot (64,70 + 2,80 \cdot 24,23) = \mathbf{132,59 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx}$$

$$\sigma_x = 1 \cdot 1,40 \cdot 24,23 = \mathbf{33,94 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot R_e \cdot S = 0,8 \cdot 360 \cdot 1,00 = \mathbf{288,00 \text{ N/mm}^2}$$

Spanningen na 2 jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_y \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 1 \cdot (82,49 + 2,80 \cdot 64,62) = \mathbf{263,53 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \alpha_{\sigma} \cdot i_x \cdot \sigma_{bx}$$

$$\sigma_x = 1 \cdot 1,40 \cdot 64,62 = \mathbf{90,52 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = 0,8 \cdot R_e \cdot S = 0,8 \cdot 360 \cdot 1,00 = \mathbf{288,00 \text{ N/mm}^2}$$

Wanddikte aanpassen van 8,8 mm naar 10 mm

De i_x factor wordt verlaagd naar 1,40 i.p.v. 1,53.

De factor i_y wordt nu 2,8 (was 3,06).

We zien iets gunstiger beeld qua spanningen.

Zinker voldoet.



Berekenen van de invloed van bochten bij zinkers: PE SDR 11

Spanningen 1^e en 2^e jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_{yp} \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot (2,85 + 1,11 \cdot 0,82) = \mathbf{2,44 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot i_{xp} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 0,66 + 0,65 \cdot 1,00 \cdot 0,82 + 1,56 = \mathbf{2,75 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 1,00 = \mathbf{8,00 \text{ N/mm}^2}$$

Spanningen na 2 jaar na aanleg

Optredende spanningen in omtreksrichting van de leiding

$$\sigma_{y2} = \alpha_{\sigma} \cdot (\sigma_q + i_{yp} \cdot \sigma_{bx})$$

$$\sigma_{y2} = 0,65 \cdot (2,58 + 1,11 \cdot 1,12) = \mathbf{2,48 \text{ N/mm}^2}$$

Optredende spanningen in langsrichting van de leiding

$$\sigma_x = \sigma_{pl} + \alpha_{\sigma} \cdot i_{xp} \cdot \sigma_{bx} + \sigma_{ax}$$

$$\sigma_x = 0,66 + 0,65 \cdot 1,00 \cdot 1,12 + 1,56 = \mathbf{2,94 \text{ N/mm}^2}$$

$$\text{Toelaatbare spanning} = \bar{\sigma}_t \cdot S = 8,00 \cdot 1,00 = \mathbf{8,00 \text{ N/mm}^2}$$

We zien hier de resultaten van een PE zinker met een uitvoeringszakingsverschil van 135 mm, dus zinker in de natte. Bochtstraal gelijk aan 3,5 x D.

Zinker voldoet ruimschoots.



Met behulp van het programma Sigma 2022 zijn meerdere berekeningen gemaakt om duidelijk te maken wat de invloed is van bochten.

De volgende conclusies kunnen getrokken worden:

- Wanneer sprake is van een of meerdere bochten is sprake van (veel) hogere spanningen in de leiding.
- De invloed van zettingen (uitvoeringszakkingsverschillen en zettingsverschillen) heeft grote impact op de buigspanning σ_{bx} . Via de factoren i_x , i_y , i_{xp} en i_{yp} worden spanningen in de bocht(en) hoger.
- Bij kunststof leidingen is het verstandig om 2 situaties door te rekenen, namelijk met inwendige druk (dan worden i_x en i_y verlaagd naar i_{xp} en i_{yp}) en zonder inwendige druk. Het kan namelijk gebeuren dat de leiding enige tijd drukloos is en daardoor de factoren i_{xp} en i_{yp} niet meer van toepassing zijn.
- De bochtstraal heeft een grote invloed op de factoren k en h . Met als resultaat heel andere waarden voor i_x , i_y , i_{xp} en i_{yp} .

