



BILFINGER

Engineering & Maintenance

Memo

Aan Menno Visser
Van Alexander Leicher
Afdeling Pipelines
E-mail alexander.leicher@bilfinger.com

Memo nr.: nIT56672-1931001_A
Onderwerp: Sterktetechnische berekeningen warmtenet Loppersum

13 september 2022

Northwest Europe

Bilfinger Tebodin Netherlands B.V.
Jan Tinbergenstraat 172
7559 SP Hengelo

A	13-09-2022	Origineel	A. Leicher	W. Huinen
Rev.	Datum	Beschrijving	Auteur	Gecontroleerd door

Beste heer Visser,

Voor de aanleg van het nieuwe warmtenet in Loppersum zijn sterktetechnische berekeningen uitgevoerd om te bepalen of het warmtenet voldoende sterk is om de optredende belastingen te weerstaan. Met name de thermische expansie van de aanvoerleiding die verhinderd wordt doordat de leiding in de grond ligt kan tot spanningen in het leidingmateriaal leiden. Daarom zijn voor het ontwerpen van de leiding de grafieken uit AGFW FW401 Arbeitsblatt 11 toegepast. In deze Duitse standaard zijn grafieken en tabellen weergegeven die het resultaat zijn van allerlei berekeningen voor veel voorkomende praktijksituaties met leidingmateriaal dat voldoet aan EN 253. Daarmee kan een ontwerp voor een warmtenet op efficiënte wijze opgesteld worden. In deze memo worden expansielussen en T-stukken van het Prins pipe systeem van Weijers beschouwd, dat voldoet aan EN 253.

Expansielussen

Voor het ontwerp van expansielussen gaat AGFW FW401 Arbeitsblatt 11 uit van een aantal uitgangspunten. De meeste uitgangspunten komen overeen met de leidingen in Loppersum, zoals:

- Het leidingmateriaal voldoet aan EN 253
- Het verschil tussen aanlegtemperatuur en ontwerp temperatuur (hoog) is 60 °C

- De bochten hebben een straal van minimaal 1,5D (het leidingmateriaal in Loppersum heeft bochten van 2,5D)
- De leiding ligt boven de grondwaterstand. In Loppersum is dit zo, want tijdens een projectbezoek waarbij graafwerkzaamheden plaatsvonden is geen grondwater gezien.

AGFW FW401 gaat uit van ligging van de leiding in zand. In Loppersum ligt de leiding echter in klei. De ligging in zand of klei bepaalt de wrijving tussen de leiding en de grond en daardoor de uitzetting van de leiding. De grafieken in AGFW FW401 zijn dus niet direct toepasbaar, maar kunnen wel gebruikt worden als de verschillen qua grondsoort in detail bekeken worden.

De uitzetting van het glijdend deel (dus niet verankerde deel van de leiding) kan als volgt worden bepaald conform NEN 3650-1 paragraaf D.2.3:

$$\Delta L = 0,5 \cdot \alpha_g \cdot \Delta T \cdot a$$

Waarin:

ΔL	De uitzetting van het glijdend deel van de leiding (m)
α_g	Lineaire uitzettingscoëfficiënt (m/m/K)
ΔT	Temperatuurverschil (K)
a	De verankeringslengte

De verankeringslengte wordt conform NEN 3650-1 paragraaf D.2.3 als volgt bepaald:

$$a = \alpha_g \cdot \Delta T \cdot \frac{E(t_2) \cdot A}{W}$$

Waarin:

$E(t_2)$	De elasticiteitsmodulus van het materiaal (N/mm ²) bij de ontwerptemperatuur (hoog)
W	Is de wrijving tussen grond en leidingwand (N/mm), met toepassing van de partiële factoren volgens NEN 3650-1 tabel B.2

Door bovenstaande formules te combineren kan de uitzetting van het glijdend deel als volgt bepaald worden:

$$\Delta L = 0,5 \cdot \alpha_g \cdot \Delta T \cdot a = 0,5 \cdot \alpha_g \cdot \Delta T \cdot \alpha_g \cdot \Delta T \cdot \frac{E(t_2) \cdot A}{W}$$

Dus:

$$\Delta L = \frac{0,5 \cdot \alpha_g^2 \cdot \Delta T^2 \cdot E(t_2) \cdot A}{w \cdot \pi \cdot D_e}$$

Waarin:

w	Is de wrijving tussen grond en leidingwand (N/mm ²), met toepassing van de partiële factoren volgens NEN 3650-1 tabel B.2
---	---

Omdat de wrijving nu expliciet in de formule voor de uitzetting van het glijdend deel van de leiding wordt weergegeven, kan berekend worden wat de invloed is van de wrijving is. De wrijving in zand (zwak siltig) is bepaald op 0,0111 N/mm² (zie bijlage). De wrijving in klei (slap) is onder verder gelijke omstandigheden bepaald op 0,0072 N/mm².

Invullen van de aangepaste uitgangspunten ten opzichte van AGFW FW401 geeft:

$$\Delta L = \frac{0,5 \cdot \alpha_g^2 \cdot \Delta T^2 \cdot E(t_2) \cdot A}{\left(\frac{0,0072}{0,0111}\right) \cdot \pi \cdot D_e} = \frac{0,5 \cdot \alpha_g^2 \cdot \Delta T^2 \cdot E(t_2) \cdot A}{\pi \cdot D_e} \cdot 1,54$$

Met andere woorden: de uitzetting van het glijdende deel (ΔL) is onder de aangepaste uitgangspunten 1,54 maal de waarde waarmee in AGFW FW401 rekening is gehouden in het ontwerp. Omdat a rechtevenredig is met ΔL is de lengte van het glijdende deel ook 1,54 keer de waarde conform AGFW FW401. Conform AGFW FW401 Arbeitsblatt 11 tabel 15 is de lengte van het glijdende deel voor een DN125 leiding bij een 90° L-bocht en een dekking van 1,2 m gelijk aan 39 m ('Gleitbereich'). De lengte van het glijdende deel in Loppersum wordt dus 39 m x 1,54 = 60,0 m. De uitzetting van het glijdende deel is dan:

$$\Delta L = 0,5 \cdot \alpha_g \cdot \Delta T \cdot a = 0,5 \cdot 1,16 \cdot 10^{-5} \cdot 60 \cdot 60,0 = 0,0209m \approx 21mm$$

Bij een uitzetting van 21 mm is een expansiekussen met een dikte van 40 mm voldoende (standaard handelsmaat), omdat die conform de specificatie van Weijers tot maximaal 50% ingedrukt mogen worden (middelharde kussens). Weliswaar is de berekende uitzetting 1 mm meer dan 50% van 40 mm, maar de kleiige grond in Loppersum draagt ook bij aan het opnemen van de uitzetting van de leiding. In de praktijk worden in kleiige grond daarom vaak geen kussens toegepast. Het toepassen van kussens is in deze situatie daarom ook een erg veilig ontwerpaspect.

AGFW FW401 gaat uit van toepassing van zachte expansiekussens (drukspanning 0,05 N/mm²) bij 50% indrukking, terwijl in Nederland doorgaans middelharde expansiekussens worden toegepast (drukspanning 0,10 N/m² bij 50% indrukking). Conform AGFW FW401 hoofdstuk 6 geldt dat de dikte van middelharde kussens 20% dikker genomen moet worden om equivalente stijfheid van een laag zachte kussens te bereiken. De gewenste kussendikte is dus 40 x 1,2 = 48 mm. Maar vanwege de kleiige grond wordt het niet nodig geacht om twee kussenlagen van elk 40 mm toe te passen. Eén kussenlaag van 40 mm is voldoende.

De lengte waarover de expansiekussens aangebracht moeten worden is conform AGFW FW401 tabel 15 ongeveer 1,4 m, wat voor de praktijk wordt afgerond naar 2,0m. Dit is

ook in overeenstemming met de voorschriften van Weijers voor het Prins pipe system (tabel 4.16).

T-stukken

Conform de specificatie van Weijers voor het Prins pipe system mag op plaatsen waar T-stukken met 45° sprong worden toegepast de haakse aftakkende leiding niet langer zijn dan 6m. Indien de aftakkende leiding langer is dan 6 meter, kan dit leiden tot het afscheuren van de las van de aftakkende leiding op de hoofdleiding. Indien de aftakkende leiding langer moet zijn dan 6m dient een expansiebocht in de aftakkende leiding voor het T-stuk te worden geplaatst. Er kan ook een parallel T-stuk worden toegepast, maar die behoren niet tot het beschikbare materiaal. Daarnaast moeten expansiekussens (middelhard) worden toegepast rond de aftakkende leiding. Deze kussenlaag moet minimaal 40 mm dik zijn. De aftakkende leiding moet vanaf het T-stuk tot aan de expansiebocht van kussens worden voorzien. Op die manier is zijwaartse verplaatsing van de aftakkende leiding als gevolg van axiale verplaatsing van de hoofdleiding mogelijk.

Conclusie

Vanwege de relatief lage ontwerptemperatuur van het leidingsysteem is het mogelijk om alleen bochten toe te passen waar een richtingsverandering nodig is. Er zijn geen expansielussen nodig. De bochten moeten voorzien zijn van een halfhard expansiekussen van minstens 40 mm dikte over een lengte van 2 meter vanuit het midden van de bocht. Voor T-stukken geldt dat de aftakkende leiding een lengte van maximaal 6m mag hebben. Indien de aftakkende leiding langer moet zijn dan 6m dient een expansiebocht in de aftakkende leiding voor het T-stuk te worden geplaatst. De aftakkende leiding moet vanaf het T-stuk tot aan de expansiebocht van kussens worden voorzien.

Met vriendelijke groet,

Alexander Leicher
Pipeline engineer

Wouter Huinen
Pipeline engineer

Bepaling grondmechanische parameters

Conform NEN 3650-1:2020

INVOER GRONDGEGEVENS				INVOER LEIDINGGEVENS			
Grondsoort	zand			Medium			
Bijmengsel	zwak siltig			Dichtheid medium			
				ρ_{me}	1000	kg/m ³	
Uitvoeringsmethode	open ontgraving			Leiding			
				Uitwendige diameter leiding			
				D_i	139,7	mm	
				Wanddikte			
				w_i	3,6	mm	
				Dichtheid leiding materiaal			
Sleuftype op leidingasniveau	1,5D ≤ b ≤ 3D			ρ_i	7850	kg/m ³	
				Isolatie/buitenmantel			
				Dichtheid isolatie			
				ρ_{iso}	45	kg/m ³	
				Uitw. diameter iso./mantel			
				D_{iso}	225	mm	
				Wanddikte buitenmantel			
				w_{mb}	3,5	mm	
				Dichtheid buitenmantel			
				ρ_{mb}	960	kg/m ³	
GRONDEIGENSCHAPPEN CONFORM NEN3650-1:2020							
Volumegewicht droog				γ_d	19	kN/m ³	
Volumegewicht nat				γ_n	21	kN/m ³	
Elasticiteitsmodulus genormeerd op een effectieve verticale grondspanning van 100 kPa				E_{100}	43	MN/m ²	
Elasticiteitsmodulus van de sleufaanvulling boven de buis				E_1	20	MN/m ²	
Elasticiteitsmodulus onder de buis				E_3	22	MN/m ²	
Hoek van inwendige wrijving				φ	30	°	
Wrijvingshoek buis/grond				δ	20	°	
Gedraineerde cohesie				c'	0	kN/m ²	
Ongedraineerde cohesie				c_u	0	kN/m ²	
GRONDPARAMETERS BEREKEND CONFORM NEN 3650-1:2020							
				(Factor nog niet meegenomen in grondparameter)			
	Hoog / laag	Factor		incl. D_{iso}/D_i			
Horizontale beddingsconstante	H	1,7	KLH	0,0829 N/mm ³			
Verticale beddingsconstante, omlaag	H	2,0	KLS	0,0511 N/mm ³			
Verticale beddingsconstante, omhoog	H	1,4	KLT	0,0128 N/mm ³			
Wrijving	L	1,136	F	0,0111 N/mm ²			
Axiale verplaatsing	H	1,6	UF	4 mm			
Verticaal evenwichtsdraagvermogen	H	2,0	RVS	1,0542 N/mm ²			
Passieve grondlast	H	1,5	RVT	0,0559 N/mm ²			
Horizontaal evenwichtsdraagvermogen	H	1,6	RH	0,3793 N/mm ²			
Neutrale grondlast	H	1,1	SOILNB	0,0365 N/mm ²			
VERKEERSBELASTING CONFORM NEN-EN 1991-2:2011							
Wegkruising belastingsmodel 3 (grafiek I)				0,0430 N/mm ²			
Wegkruising belastingsmodel 2 (grafiek II)				0,0239 N/mm ²			
Leiding in open veld (0,5 x grafiek II)				0,0120 N/mm ²			

	Rev.	Datum	Omschrijving				Door	Gec.	Gez.
	0								
Vestiging	Afdeling	Form A4	Ordernummer	sub	Documentnummer		Sheet 1 van 1	Rev 0	

Bepaling grondmechanische parameters

Conform NEN 3650-1:2020

INVOER GRONDGEGEVENS			
Grondsoort	klei		
Bijmengsel	zwak zandig		
Consistentie	slap		
Uitvoeringsmethode	open ontgraving		
Belastingtype	langzaam, gedraineerd		
Sleuftype op leidingasniveau	1,5D ≤ b ≤ 3D		

INVOER LEIDINGGEVENS			
Medium			
Dichtheid medium	ρ _{me}	1000	kg/m ³
Leiding			
Uitwendige diameter leiding	D _i	139,7	mm
Wanddikte	w _i	3,6	mm
Dichtheid leiding materiaal	ρ _i	7850	kg/m ³
Isolatie/buitenmantel			
Dichtheid isolatie	ρ _{iso}	45	kg/m ³
Uitw. diameter iso./mantel	D _{iso}	225	mm
Wanddikte buitenmantel	w _{mb}	3,5	mm
Dichtheid buitenmantel	ρ _{mb}	960	kg/m ³

GRONDEIGENSCHAPPEN CONFORM NEN3650-1:2020			
Volumegegewicht droog	γ _d	15	kN/m ³
Volumegegewicht nat	γ _n	15	kN/m ³
Elasticiteitsmodulus genormeerd op een effectieve verticale grondspanning van 100 kPa	E ₁₀₀	1,5	MN/m ²
Elasticiteitsmodulus van de sleufaanvulling boven de buis	E ₁	0,4	MN/m ²
Elasticiteitsmodulus onder de buis	E ₃	0,4	MN/m ²
Hoek van inwendige wrijving	φ	23	°
Wrijvingshoek buis/grond	δ	15	°
Gedraineerde cohesie	c'	0	kN/m ²
Ongedraineerde cohesie	c _u	40	kN/m ²

GRONDPARAMETERS BEREKEND CONFORM NEN 3650-1:2020				
	(Factor nog niet meegenomen in grondparameter)			
	Hoog / laag	Factor		incl. D _{iso} /D _i
Horizontale beddingsconstante	H	1,7	KLH	0,0352 N/mm ³
Verticale beddingsconstante, omlaag	H	1,6	KLS	0,0170 N/mm ³
Verticale beddingsconstante, omhoog	H	1,9	KLT	0,0004 N/mm ³
Wrijving	L	2,355	F	0,0072 N/mm ²
Axiale verplaatsing	H	1,5	UF	8 mm
Verticaal evenwichtsdraagvermogen	H	1,6	RVS	0,3823 N/mm ²
Passieve grondlast	H	1,5	RVT	0,0453 N/mm ²
Horizontaal evenwichtsdraagvermogen	H	2,0	RH	0,1612 N/mm ²
Neutrale grondlast	H	1,1	SOILNB	0,0296 N/mm ²

VERKEERSBELASTING CONFORM NEN-EN 1991-2:2011		
Wegkruising belastingsmodel 3 (grafiek I)	0,0430	N/mm ²
Wegkruising belastingsmodel 2 (grafiek II)	0,0239	N/mm ²
Leiding in open veld (0,5 x grafiek II)	0,0120	N/mm ²

	Rev.	Datum	Omschrijving				Door	Gec.	Gez.
	0								
Vestiging	Afdeling	Form A4		Ordernummer	sub	Documentnummer	Sheet 1 van 1	Rev 0	