



**WASSER
VERBAND
NORD**

G.3 - GRUNDSATZBERECHNUNGEN

Neubau einer Trinkwasserleitung nach Pellworm

Wasserverband Nord

30. November 2023

G.3-Rev00 (223105)



REVISIONEN

Rev.	Kommentar	Datum
00	Erstausgabe	30. November 2023



INHALT

1. Allgemeines	4
2. Rohrkenndaten	4
3. Beulsicherheit	5
3.1 Nachweis der Beulsicherheit	6
4. Zugkraftberechnungen	8
4.1 Allgemeines	8
4.2 Schutzrohreinzug Anlandung Pellworm	10
4.2.1 Berechnungsannahmen	10
4.2.2 Geometrie der Bohrachse	10
4.2.3 Rohrgewichte	11
4.2.4 Zulässige Zugkräfte	11
4.2.5 Zu erwartende Zugkräfte	12
4.3 Einzug Produktrohr in Schutzrohr	12
4.3.1 Berechnungsannahmen	12
4.3.2 Geometrie der Rohrachse	12
4.3.3 Rohrgewichte	13
4.3.4 Zulässige Zugkräfte	13
4.3.5 Zu erwartende Zugkräfte	14



1. ALLGEMEINES

Nachfolgend werden die Grundsatzberechnungen für die Anlandungen Pellworm und Hamburger Hallig sowie die Anbindung der Trinkwasserleitung an die Warft der Hamburger Hallig im Horizontalspülbohrverfahren (HDD) aufgestellt.

Im Einzelnen sind dies:

- Nachweis der Beulsicherheit
- Berechnung der zulässigen Zugkraft / der zu erwartenden Zugkraft
 - Einzug des Schutzrohres in die Bohrung
 - Einzug des Trinkwasserrohres in das Schutzrohr

2. ROHRKENNDATEN

Für die Trinkwasserleitung sind folgende Rohrkenndaten zu berücksichtigen:

Trinkwasserleitung PE100 (RC), SDR 11, d_a 200

Außendurchmesser	d _a	200,0 mm
Wanddicke	s	18,2 mm
Innendurchmesser	d _i	163,6 mm
Werkstoff		PE 100 (RC)

Die Anlandungen auf Pellworm und der Hamburger Hallig sind im HDD-Verfahren vorgesehen. Hierbei werden die Anlandungen mit einem Schutzrohr vorbereitet, in dass die Trinkwasserleitung anschließend eingebracht wird. Um die Trinkwasserleitung sicher einziehen zu können ist folgende Schutzrohrdimension geplant:

Schutzrohr für Trinkwasserleitung => PE, SDR 11, d_a 355

Anzahl		1 je Anlandung
Außendurchmesser	d _a	355,0 mm
Wanddicke	s	32,3 mm
Innendurchmesser	d _i	290,6 mm
Werkstoff		PE 100

3. BEULSICHERHEIT

Bei der Verlegung von Rohren im luftgefüllten Zustand im Wasser oder im Boden unterhalb des Grundwasserspiegels sind Rohrleitungen Beanspruchungen durch äußeren Überdruck ausgesetzt, wodurch nicht nur ein Materialversagen, sondern auch ein Stabilitätsversagen (Beulen) eintreten kann.

Der kritische Beuldruck für Rohrleitungen wird wie folgt berechnet:

$$p_K = \frac{E_C}{4 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left[\frac{s}{r_m} \right]^3$$

mit

p_K	=	Kritischer Beuldruck	in bar
E_C	=	Kriechmodul bzw. E-Modul	in N/mm ²
s	=	Rohrwanddicke	in mm
r_m	=	Mittlerer Rohrradius	in mm
μ	=	Querkontraktionszahl	in -

Nachweis: $S_{vorh} = \frac{p_K}{p} \geq S$

mit

S_{vorh}	=	Vorhandene Sicherheit gegen Beulen	in -
p_K	=	Kritischer Beuldruck	in bar
p	=	Äußerer Überdruck	in bar
S	=	Sicherheit gegen Beulen ($\gamma_M \times \gamma_F$)	in -
$\gamma_{M,F}$	=	Teilsicherheitsbeiwerte	in -

Falls der ermittelte kritische Beuldruck p_K größer als der zulässige Innendruck ist, muss mit dem äußeren Druck p ein Nachweis analog zum Nachweis gegen Innendruck geführt werden.

In der Regel wird eine Sicherheit gegen Beulen von $S \geq 2,5$ gefordert.

Maßgebend ist im vorliegenden Fall der Endzustand, bei dem sich das drucklose luftgefüllte Rohr unterhalb des Grundwasserspiegels befindet. Auch während der Errichtung der Dükerleitung können Bauzustände auftreten, bei denen sich das Rohr leer unter äußerem Überdruck befindet, z.B. im Bohrloch unter Einwirkung des Spülungsdrucks. Solche Bauzustände sind bei gleicher hydrostatischer Höhe als weniger kritisch zu betrachten, da sie nur kurzzeitig am Anfang der Lebensdauer des Rohrs auftreten, wo das PE-Material noch einen sehr hohen Kriechmodul aufweist.

3.1 Nachweis der Beulsicherheit

Nachfolgend wird die Beulsicherheit für die Anlandungen sowie die Seetrasse nachgewiesen.

Berechnungsannahmen:

- hydrostatische Höhe 12 m. Dies deckt sowohl die Anlandungsbohrungen als auch die Querung der tiefen Priele ab.
- Wichte von Wasser 10 kN/m³
- Materialkennwerte und Sicherheitsbeiwerte nach DWA-A 161



Abbildung 3-1

Nachweis der
Beulsicherheit

Rohrkennwerte				
	d 200 SDR 11	d 355 SDR 11		
d_a	200,0	355,0	mm	
s	18,2	32,3	mm	
d_i	163,6	290,4	mm	
SDR	11,0	11,0	-	
r_m	90,9	161,4	mm	
μ	0,40	0,40	-	
E_c	160,0	160,0	N/mm ²	Langzeitrechenwert nach DWA-A 161
γ_M	1,85	1,85	-	Teilsicherheitsbeiwert nach DWA-A 161
γ_F	1,35	1,35	-	Teilsicherheitsbeiwert nach DWA-A 161

Kritischer Beuldruck p_K				
p_K	3,82	3,82	bar	Kritischer Beuldruck

Äußerer Überdruck p				
γ	10,0	10,0	kN/m ³	Medium: Wasser
h	12,0	12,0	m	hydrostatische Höhe
p	1,20	1,20	bar	Äußerer Überdruck

Nachweis der Beulsicherheit				
$S_{vorh} =$	3,2	3,2		
	\geq	\geq		
$\gamma_M \cdot \gamma_F =$	2,5	2,5		

Aus den obigen Berechnungen ist zu erkennen, dass die PE-Rohre mit dem Waddickenverhältnis SDR 11 eine globale Sicherheit gegen Beulen von $> 2,5$ erreichen.

4. ZUGKRAFTBERECHNUNGEN

Da es sich bei der Anlandung auf Pellworm um die deutlich längste Bohrung, mit den höchsten zu erwartenden Kräften handelt, wird diese stellvertretend für die beiden kleineren Bohrungen betrachtet.

4.1 Allgemeines

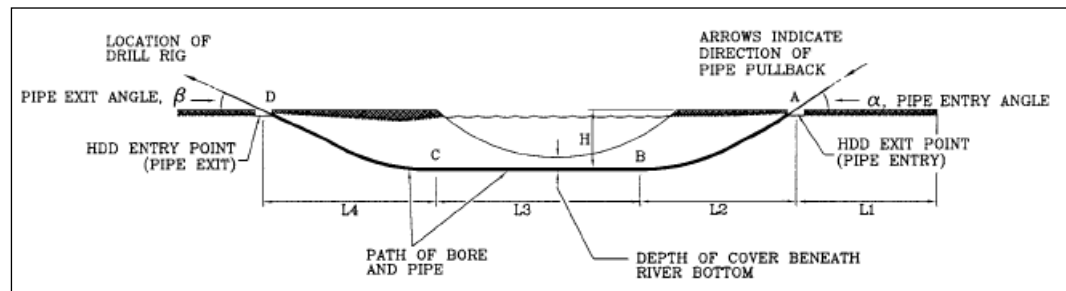
Die Zugkraft für den Einzug der PE-Rohre wird nach der amerikanischen Norm ASTM F 1962, die speziell für im HDD-Verfahren verlegte PE-Rohre gilt, ermittelt.

Der amerikanische Standard berücksichtigt die wesentlichen Einflussgrößen auf die zu erwartende Zugkraft.

- Coulombsche Reibung auf der Montagebahn
- Umlenkkräfte aus Richtungsänderungen auf der Montagebahn (z.B. im Oberbogen)
- Coulombsche Reibung im Bohrloch
- Umlenkkräfte aus Richtungsänderungen m Bohrloch (z.B. in den Unterbögen)
- Hangabtriebskraft

Abbildung 4.1

Bohrachsengeometrie nach ASTM F 1962



Zugkraftanteil aus Reibung auf der Montagebahn

$$T_{f,1} = v_a \cdot w_a \cdot L$$

mit:

$T_{f,1}$	=	Zugkraftanteil aus Reibung auf der Montagebahn	in kN
v_a	=	Reibungskoeffizient auf der Montagebahn	in –
w_a	=	Rohrgewicht	in kN/m
L	=	Gesamtlänge des Rohrstrangs	in m



Zugkraftanteil aus Umlenkung auf der Montagebahn

$$T_{\alpha,1} = T_{0,1} \cdot e^{v_a \cdot \alpha}$$

mit:

$T_{\alpha,1}$	=	Zugkraftanteil aus Umlenkung auf der Montagebahn	in kN
$T_{0,1}$	=	Zugkraft am Ende der Umlenkstrecke ohne Berücksichtigung der Umlenkung	in kN
v_a	=	Reibungskoeffizient auf der Montagebahn	in –
α	=	Umlenkwinkel	in rad

Zugkraftanteil aus Reibung im Bohrloch

$$T_{f,2} = v_b \cdot |w_b| \cdot L_i$$

mit:

$T_{f,2}$	=	Zugkraftanteil aus Reibung im Bohrloch	in kN
v_b	=	Reibungskoeffizient zwischen Rohr und Bohrlochwandung Montagebahn	in –
w_b	=	Rohrgewicht abzüglich Auftrieb in der Bohrspülung	in kN/m
L_i	=	betrachtete Teillänge der Bohrachse	in m

Zugkraftanteil aus Hangabtriebskraft

$$T_H = \pm w_b \cdot H$$

mit:

T_H	=	Zugkraftanteil aus Hangabtriebskraft im Bohrloch, wirkt beim Abtauchen entlastend und beim Aufauchen belastend	in kN
w_b	=	Rohrgewicht abzüglich Auftrieb in der Bohrspülung	in kN/m
H	=	Höhendifferenz zwischen Ein-/Austrittspunkt und tiefstem Punkt der Bohrung	in m

Zugkraftanteil aus Umlenkung im Bohrloch

$$T_{\alpha,2} = T_{0,2} \cdot e^{v_b \cdot \alpha}$$

mit:

$T_{\alpha,2}$	=	Zugkraftanteil aus Umlenkung im Bohrloch	in kN
$T_{0,2}$	=	Zugkraft am Ende der Umlenkstrecke ohne Berücksichtigung der Umlenkung	in kN
v_b	=	Reibungskoeffizient im Bohrloch	in –
α	=	Umlenkwinkel	in rad

4.2 Schutzrohreinzug Anlandung Pellworm

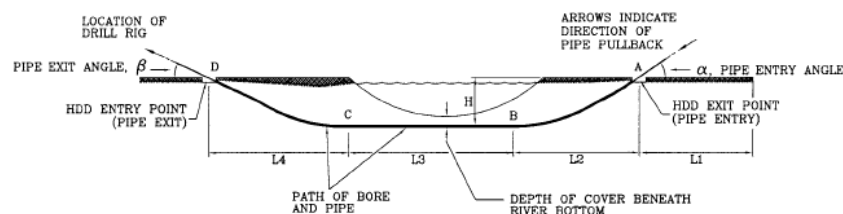
4.2.1 Berechnungsannahmen

Die Zugkraftberechnung wird mit folgenden Berechnungsannahmen durchgeführt.

- Zusatzrohrlänge zur rechnerischen Bohrungslänge $L_1 = 0$ m
- Es wird davon ausgegangen, dass das Schutzrohr beim Einzug in das Bohrloch ohne Trommelwiderstand von der Abspulvorrichtung abgewickelt wird ($v_a = 0$)
- Das Rohr ist luftgefüllt.
- Das Rohr im Bohrloch ist luftgefüllt und steht unter dem Auftrieb der Bohrspülung
- Reibungskoeffizient im Bohrloch $v_b = 0,3$
- Biegeradien nach Kapitel 4.2.2
- Gesamtbohrungslänge $L = 615$ m
- Höhendifferenz zwischen Ein-/Austrittspunkt und tiefstem Punkt der Bohrung $H = 10$ m

4.2.2 Geometrie der Bohrachse

Geometrie der Bohrachse				
L_1	0,00	m		
L_2	60,00	m		
L_3	495,00	m		
L_4	60,00	m		
H	10,00	m		Höhendiff. zw. tiefstem Punkt und Austrittspunkt
α	12,0	°		Austrittswinkel gegen die Horizontale
β	12,0	°		Eintrittswinkel gegen die Horizontale



γ	90,0	°		Umlenkung auf der Montagebahn
----------	------	---	--	-------------------------------



4.2.3 Rohrgewichte

Rohrgewicht G_R							
Bezeichnung	Anzahl	d_a in mm	s in mm	d_i in mm	A in mm ²	γ in kN/m ³	G in kN/m
PE d 350 SDR 11	1	355,0	32,3	290,4	32745	9,4	0,3078
Rohrgewicht (leer) G_R in kN/m							0,3078
Auftriebskraft F_A							
		Bohrspülung					
Wichte γ in kN/m ³		12,0					
Bezeichnung	Anzahl	d_a in mm	V in m ³ /m	F_A in kN/m	Bemerkungen		
PE d 350 SDR 11	1	355,0	0,0990	1,1878			
Auftriebskraft F_A in kN/m				1,1878			

4.2.4 Zulässige Zugkräfte

PE d 355 SDR 11			
σ_{Rbz}	21,0	N/mm ²	Kurzzeitrechenwert nach DWA-A 161
γ_M	1,92	-	
γ_F	1,3	-	
E_c	800	N/mm ²	Kurzzeitrechenwert
d_a	355,0	mm	
s	32,3	mm	
d_i	290,4	mm	
A	32745	mm ²	
Zulässige Zugkraft ohne Berücksichtigung der Biegung			
F_{zul}	275,5	kN	
Zulässige Zugkraft unter Berücksichtigung des gewählten Biegeradius			
$R_{min,1}$	200,0	m	Bohrachse
$F_{zul,R,1}$	252,3	kN	
$R_{min,2}$	20,0	m	Oberbogen
$F_{zul,R,2}$	43,0	kN	

4.2.5 Zu erwartende Zugkräfte

Rohrgewichte und Reibungskoeffizienten			
Montagebahn			
w_a	0,3078	kN/m	Rohr leer
v_a	0	-	
Bohrloch			
w_b	0,8800	kN/m	Rohr leer
v_b	0,30	-	

Zu erwartende Zugkräfte										
Zugkopf am Punkt	Rohrlänge auf Karusell	Rohrlänge, absteigender Ast	gerade Rohrlänge im Bohrloch	Rohrlänge aufsteigender Ast						
A	0,00	0,00	0,00	0,00	T_A	0,00	kN	\leq	43,01	kN
B	0,00	60,00	0,00	0,00	T_B	7,50	kN	\leq	252,25	kN
C	0,00	60,00	495,00	0,00	T_C	146,64	kN	\leq	252,25	kN
D	0,00	60,00	495,00	60,00	T_D	173,36	kN	\leq	252,25	kN

Der Nachweis gelingt mit den angesetzten Reibungskoeffizienten in jedem Punkt.

4.3 Einzug Produktrohr in Schutzrohr

4.3.1 Berechnungsannahmen

Die Zugkraftberechnung wird mit folgenden Berechnungsannahmen durchgeführt.

- Zusatzrohrlänge zur rechnerischen Bohrungslänge $L_1 = 0$ m
- Es wird davon ausgegangen, dass die Trinkwasserleitung beim Einzug in das Schutzrohr ohne Trommelwiderstand von der Abspulvorrichtung abgewickelt wird ($v_a = 0$)
- Die Trinkwasserleitung und das Schutzrohr sind luftgefüllt.
- Reibungskoeffizient im Schutzrohr $v_b = 0,3$ (PE auf PE, trocken)
- Biegeradien nach Kapitel 4.2.2
- Schutzrohrlänge $L = 615$ m
- Höhendifferenz zwischen Ein-/Austrittspunkt und tiefstem Punkt der Bohrung $H = 10$ m

4.3.2 Geometrie der Rohrachse

Hierzu siehe Kapitel 4.2.2.



4.3.3 Rohrgewichte

Rohrgewicht G_R							
Bezeichnung	Anzahl	d_a in mm	s in mm	d_i in mm	A in mm ²	γ in kN/m ³	G in kN/m
PE d 200 SDR 11	1	200,0	18,2	163,6	10395	9,40	0,0977
	0	163,6			21021	12,00	0,0000
Rohrgewicht (leer) G_R in kN/m							0,0977

4.3.4 Zulässige Zugkräfte

PE d 200 SDR 11			
σ_{Rbz}	21,0	N/mm ²	Kurzzeitrechenwert nach DWA-A 161
γ_M	1,92	-	
γ_F	1,3	-	
E_c	800	N/mm ²	Kurzzeitrechenwert
d_a	200,0	mm	
s	18,2	mm	
d_i	163,6	mm	
A	10395	mm ²	
Zulässige Zugkraft ohne Berücksichtigung der Biegung			
F_{zul}	87,5	kN	
Zulässige Zugkraft unter Berücksichtigung des gewählten Biegeradius			
$R_{min,1}$	200,0	m	Bohrachse bzw. Achse Schutzrohr
$F_{zul,R,1}$	83,3	kN	
$R_{min,2}$	20,0	m	Oberbogen
$F_{zul,R,2}$	45,9	kN	



4.3.5 Zu erwartende Zugkräfte

Rohrgewichte und Reibungskoeffizienten			
Montagebahn			
w_a	0,0977	kN/m	Rohr leer
v_a	0	-	

Schutzrohr			
w_b	0,0977	kN/m	Rohr leer
v_b	0,30	-	PE auf PE (trocken)

Zu erwartende Zugkräfte										
Zugkopf am Punkt	Rohrlänge auf Montagebahn	Rohrlänge, absteigender Ast	gerade Rohrlänge im Bohrloch	Rohrlänge aufsteigender Ast						
A	615,00	0,00	0,00	0,00	T_A	0,00	kN	\leq	45,88	kN
B	555,00	60,00	0,00	0,00	T_B	0,83	kN	\leq	83,30	kN
C	60,00	60,00	495,00	0,00	T_C	16,28	kN	\leq	83,30	kN
D	0,00	60,00	495,00	60,00	T_D	19,25	kN	\leq	83,30	kN

Der Nachweis gelingt mit den angesetzten Reibungskoeffizienten in jedem Punkt.