

380 kV Westküstenleitung

110 kV Eiderquerung als Dükerleitung

Stellungnahme zu den Wechselwirkungen des Bodens mit der Dükerleitung

Auftraggeber:

TenneT TSO GmbH
Bernecker Straße 70
95448 Bayreuth

Hamburg, den 13.06.2014

*Dieser Bericht umfasst das Deckblatt, Inhaltsverzeichnis, 10 Seiten, Anlagenverzeichnis und 4 Anlagen.
Er darf nur ungekürzt an Dritte weitergeben werden.*

Geschäftsführende Gesellschafter
Dr. habil. Stefan Melchior
Dipl.-Ing. Wolfgang Wittpohl
Beratende Ingenieure VBI

Bankverbindung
Hamburger Sparkasse
IBAN DE75 2005 0550 1238 1169 64
BIC/SWIFT HASPDEHHXXX/

Postanschrift:
Rödingsmarkt 43
20459 Hamburg
Tel.: 040/430 950-0

Email/Internet:
info@mplusw.de
www.mplusw.de



Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung	1
2	Verwendete Unterlagen.....	1
3	Grundlagen	2
4	Abschätzung des Einflusses von Laständerungen.....	3
	Anlagenverzeichnis	11



1 Veranlassung

Die zunehmende Erzeugung von regenerativen Energien an der Westküste Schleswig-Holsteins und der gestiegene internationale Energiehandel machen den Ausbau des Stromnetzes erforderlich, um die Systemstabilität und Versorgungssicherheit aufrecht zu erhalten. Die TenneT TSO GmbH plant aus diesen Gründen den Ausbau eines 380-kV-Netzes an der Westküste Schleswig-Holsteins. Als Teilmaßnahme ist vorgesehen, die bestehende 110-kV-Hochleitung im Bereich der Eiderquerung östlich von Tönning als Dükerleitung umzulegen. Diese Umbaumaßnahme der bestehenden Leitung gilt als Ausgleichsmaßnahme für die im Hinblick auf die Avifauna erwarteten Eingriffe durch die weiter östlich verlaufende zusätzliche Ausbautrasse der 380-kV-Leitung. Der geplante Trassenverlauf der Dükerleitung wirkt aufgrund der anstehenden Weichschichten und der mäandrierenden Eigenschaften der Eider folgende Fragestellungen auf:

- Die auch bis in größere Tiefen anstehenden Weichschichten weisen ein hohes Setzungs- und Verformungspotential auf. Der Einfluss der Weichschichten auf die Dükerleitung ist zu bewerten.
- Die mäandrierend verlaufende Eider weist oberhalb der geplanten Dükerleitung eine Krümmung auf. Zur Sicherung des Hochwasserschutzdeiches wurden Leitbuhnen am Prallhang der Eider hergestellt, die ein weiteres Abtragen der prallseitigen Böschung verhindern sollen. An den jeweiligen wasserseitigen Kopfenden der Leitbuhnen haben sich tiefreichende Kolke gebildet, deren bisherige und mögliche zukünftige Entwicklung nicht bekannt ist. Aufgrund der großen Tiefe dieser Kolke ist ein möglicher Einfluss auf die geplante Dükerleitung zu prüfen. Weiterhin ist der Einfluss der Kolkentwicklung auf mögliche Setzungen und Hebungen zu betrachten.

Die melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft wurde aufgefordert, eine gutachtliche Stellungnahme zu den genannten Fragestellungen abzugeben.

2 Verwendete Unterlagen

Zur Bearbeitung der oben genannten Fragestellungen standen folgende Unterlagen zur Verfügung:

- [1] imp GmbH (2014): Zeichnung 2014-05-23_imp_HH3_Eider_LP_schaltbar.pdf: Arbeitsplan Eiderquerung bei Tönning mit 110-kV-Drehstromkabeln, LH-13-1434, erstellt im Auftrag der TenneT als schaltbares pdf mit Stand vom 22.05.2014
- [2] Bohlen & Doyen Bauunternehmung GmbH (2014): Zeichnung 204-04-24_B&D_HH3_A01-Bohrlinie_20140424_00.pdf: Eiderquerung – Bohrlinie und Koordinatenliste – Genehmigungsplanung, Anlage 01, Projekt-Nr. 8/65071002 erstellt für die TenneT mit Stand vom 24.04.2014



- [3] aQua der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Wasser- und Schifffahrtsamt Tönning (2011): Zeichnung PN45_Tideeider_km96-8_km99-2.pdf: Tideeider – km 96,8 bis km 99,2 – Peil Nummer 45/11 – Aufnahme vom 06.09.2011, erstellt am 06.01.2012
- [4] Neumann Baugrunduntersuchung (2014): Bericht G 06014 mit Anlagen.pdf: Bauvorhaben Nr. 060/14 – 380-kV-Westküstenleitung Heide – Husum, Eiderdüker im Raum Karolinenkoog - Baugrunduntersuchung – Gründungsbeurteilung, erstellt im Auftrag der TenneT vom 08.04.2014 (10 Text + 7 Anlagen auf 22 Seiten)
- [5] aQua der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Wasser- und Schifffahrtsamt Tönning (2012): Zeichnung Tideeider_km96-7_km99-2.pdf: Tideeider – km 96,7 bis km 99,2 – Peil Nummer 65 – Aufnahme vom 05.09.2005, erstellt am 06.01.2012
- [6] aQua der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nord, Wasser- und Schifffahrtsamt Tönning (2009): Zeichnung Tideeider_km96-7_km99-2.pdf: Tideeider – km 96,7 bis km 99,2 – Peil Nummer 43/09 – Aufnahme vom 16.06.2009, erstellt am 01.10.2009
- [7] L. Hofmann und B. R. Oswald (2013): Gutachten – Technische und wirtschaftliche Bewertung der treene- und Eiderquerung mit 110-kV-Drehstromkabeln, erstellt im Auftrag der TenneT vom 02.08.2013 (Text und Anhänge auf 22 Seiten)
- [8] Hr. Biber, imp GmbH (2014): Gesprächsprotokoll des Erörterungstermin zur geplanten Dükerleitung am 14.01.2014, Teilnehmer WSA Tönning, TenneT, imp, (imp, 3 Seiten Text)

3 Grundlagen

Die Erdkabeltrasse soll bezogen auf die Mittelachse ca. 15 m bis 35 m östlich der derzeitigen Hochspannungsfreileitung verlegt werden, vgl. Anlage 1. Die Erdverlegung erfolgt zwischen den Masten 46 und 50. Über nördlich und südlich der Eiderdeiche neu herzustellenden Kabelaufführungsmasten werden die Kabel von der Freileitung in die Erdkabel überführt.

Die Erdkabel werden in PE 100 (ältere Bezeichnung PE-HD) Hüllrohre verlegt, die mit Hilfe des HDD-Bohrverfahrens (Horizontal Directional Drilling) in den Untergrund eingezogen werden. Gemäß der Unterlage [2] wird das Kabel auf einer Tiefe von ca. NHN -21,5 m unter der Eider hindurchgeführt. Dies entspricht im nördlichen Vorland der Eider Tiefen von ca. 23 m bis 24 m unter GOK, vgl. Anlage 2.

Die Trasse verläuft östlich einer Biegung der Eider, in der die Eider von Nordosten kommend in Richtung Westen schwenkt. In dieser Biegung ist das Gewässerbett der Eider schmal und weit zum südlichen Deich hin verschoben. Der südliche Deich liegt auf der Prallhangseite.

Der Deich wird durch in das Gewässer reichende Leitbuhnen geschützt. An den Buhnen haben sich tief in die Gewässersohle eingeschnittene Kolke gebildet, vgl. Anlage 3. Die Kolke reichen in der Peilung aus dem Jahre 2011 bis 10 m unter Seekartennull (SKN), was NHN - 12,0 m entspricht. Das SKN wird seit 2005 auf die LAT (lowest astronomical tide), den nied-



rigsten astronomisch verursachten Wasserstand bezogen. Dieser beträgt für den Pegel in Tönning NHN -2,0 m.

Außerhalb der Kolke liegen die Gewässertiefen in der Strommitte zwischen 2 m und 3 m unter SKN, d. h. auf NHN -4,0 m bis -5,0 m.

Gemäß dem geologischen Schnitt der Anlage 3 stehen im für den Leitungsbau maßgeblichen Untergrund wechselnde Schichtpakete aus Sanden (schluffige bis stark schluffige Feinsande) und bindigen Böden (Klei aus tonigen Schluffen mit wechselnden Anteilen an organischen Beimengungen) an. Örtlich treten geringmächtige Torf-Schichten auf. Unterhalb der Eider verläuft die Leitung in mittelsandigen Feinsanden unterhalb einer 5,3 m bis 6,7 m mächtigen Klei-Schicht, die von 0,5 m bis 0,8 m mächtigen Torf-Schichten unterlagert wird. Es muss davon ausgegangen werden, dass in den geneigten Abschnitten der Leitungstrasse die in den Bohrungen aufgeschlossenen Schichtpakete durchörtet werden.

Nachfolgend wird der Einfluss von Laständerungen auf die Leitungen betrachtet.

4 Abschätzung des Einflusses von Laständerungen

Laständerungen können aus einer Änderung des Gewässerverlaufes innerhalb der Deichgrenzen oder einer Änderung der Sohliefen herrühren. Bezogen auf die letzten Jahre waren die Bedingungen im Bereich der geplanten Eiderquerung der Kabeltrasse recht stabil. Aus vorliegenden Peilplänen vom September 2005 (Unterlage [5]), vom Juni 2009 (Unterlage [6]) und vom September 2011 (Unterlage [3]) geht hervor, dass die Lage der Kolke ortsstabil war und nur die Tiefe und Größe der Kolke Schwankungen unterliegen. Der westlichste Kolk weist z. B. in der Peilung von 2005 eine maximale Tiefe von 8,9 m unterhalb des heutigen SKN auf, die im Jahr 2011 nur noch 8,4 m beträgt, siehe Peilung vom September 2011 in Anlage 3.

Gemäß telefonischer Auskunft des Wasser- und Schifffahrtsamtes Tönning muss davon ausgegangen werden, dass sich die Gewässerausbildung der Eider unter langfristigen Aspekten innerhalb der Deiche deutlich verschieben kann. Da die Kolke mit den Leitbahnen im Zusammenhang stehen und zukünftige Arbeiten an den Leitbahnen zur Sicherung des südlichen Deiches nicht ausgeschlossen werden können, können sich die Kolke sowohl örtlich als auch in ihrer Größe und Tiefe deutlich verändern.

Um den Einfluss möglicher Laständerungen im Bereich der Gewässersohle auf das erdverlegte Kabel abzuschätzen, wird deshalb davon ausgegangen, dass sich die Kolke bis zur normalen Gewässertiefe verfüllen können. Eine weitere maßgebliche Vertiefung der Kolke ist weniger wahrscheinlich, da dies eine Gefährdung der Deichsicherheit bedeuten würde und diesbezüglich Gegenmaßnahmen ergriffen werden müssten.

Für die Betrachtung wird davon ausgegangen, dass sich oberhalb der Kabeltrasse die Gewässersohle von ca. NHN -11,5 m, wie im Jahr 2011, auf NHN -5,0 m durch Verfüllung oder Sedimentation hebt. Dies bedeutet ein Materialeintrag von ca. 6,5 m.



Es muss davon ausgegangen werden, dass historisch betrachtet die Gewässerlinie der Eider in einem weiten Bereich mäandriert ist. Hierdurch hat der gewachsene Untergrund bereits eine Vielzahl von Laständerungen mit Verlust von Auflast durch Erosion (Kolkbildung, Gewässerbettverlagerung im Zuge von Sturmfluten) und mit Zunahme der Auflast durch Sedimentation oder durch bauliche Eingriffe des Menschen (Deichbau, Buhnenbau) erfahren. Die gewachsenen Schichten des Untergrundes haben also schon verschiedene Bewegungen ausgeführt.

Laständerungen führen in empfindlichen Schichten bei Auflast zu Setzungen und bei Verlust von Auflast zu Hebungen (Entspannung). Die Prozesse erfolgen im vorliegenden Fall innerhalb wassergesättigter Schichten, d. h. die Feststoffe des Bodens stehen unter Auftrieb.

Gemäß der Unterlage [4] wurde in den beiden südlich und nördlich der Eider 25 m tief ausgeführten Bohrungen der in den Tabellen 1a und 1b aufgeführte Untergrundaufbau angetroffen, siehe auch Anlagen 2 und 4.

Mit Ausnahme der geringmächtigen Torfschicht treten im Untergrund der Leitungstrasse zwei grundsätzlich unterschiedliche Schichtglieder auf:

- Nichtbindige Böden, hier vor allem Feinsande mit unterschiedlichen Beimengungen an Schluff oder Kleilagen

sowie

- Bindige Böden, hier Klei, bestehend aus tonigem, organischem Schluff mit unterschiedlichen Beimengungen an Feinsanden, teilweise in Form von geringmächtigen Bändern oder Lagen.

Setzung bzw. Hebungen durch Änderungen der Auflast finden vor allem in den bindigen Böden (Klei und Torf) statt. Die Verformung der Sande ist etwa um den Faktor 10 bis 40 (je nach Lagerungsdichte des Sandes) kleiner als die des Kleis und kann deshalb in diesem Fall vernachlässigt werden.

Gemäß der Anlage 2 wird die Leitung in einer Tiefe von 23 m bis 24 m unter GOK auf einer Höhenkote von ca. NHN -21,50 m geführt. Diese Tiefe wird nur in zwei der insgesamt 11 Aufschlussbohrungen erreicht. Die Leitungstrasse weist im Bereich des Gewässerbettes mit den Kolken eine Bodenüberdeckung von mindestens 10 m auf.

Nach den beiden tiefen Bohrungen verläuft die Leitung innerhalb der Sandschicht unterhalb der mächtigen Klei- und Torfschichten. Sofern nicht unterhalb der Sandschicht weitere setzungsempfindliche Schichten folgen, würden die Auflaständerungen zu Bodenbewegungen oberhalb der Leitungstrasse führen und die Leitungstrasse selbst davon nicht weiter berührt werden.



Tabelle 1a: Schichtenaufbau der Bohrung BS 10S

Bohrung BS 10 Süd			
Schichtgrenze	Mächtigkeit	Schichtgrenze	Schichtbezeichnung
[m unter GOK]	[m]	[NHN ± m]	
0,30	0,3	+2,03	Mutterboden (Schluff, humos)
1,40	1,1	+0,93	Feinsand, stark schluffig m. Kleilagen
6,90	5,5	-4,57	Klei (Schluff, tonig, humos)
11,90	5,0	-9,57	Feinsand, schluffig, m. Klei- und Mittelsandlagen
12,60	0,7	-10,27	Mittelsand, feinsandig, schwach grobsandig, m. Kleilagen
13,00	0,4	-10,67	Klei (Schluff, tonig, humos), m. Feinsandlagen
15,20	2,2	-12,87	Feinsand, schluffig
20,50	5,3	-18,17	Klei (Schluff, tonig, humos), m. Feinsandlagen
21,30	0,8	-18,97	Torf
25,00	3,7	-22,67	Feinsand, mittelsandig



Tabelle 1b: Schichtenaufbau der Bohrung BS 1N

Bohrung BS 1 Nord			
Schichtgrenze	Mächtigkeit	Schichtgrenze	Schichtbezeichnung
[m unter GOK]	[m]	[NHN ± m]	
0,30	0,3	+1,17	Mutterboden (Schluff, humos)
2,40	2,1	+0,93	Klei (Schluff, tonig, humos), m. Feinsandlagen
13,40	11,0	-11,93	Feinsand, stark schluffig, m. Kleilagen
20,10	6,7	-18,63	Klei (Schluff, tonig, humos), m. Feinsandlagen
20,50	0,4	-19,03	Torf
25,00	4,5	-23,53	Feinsand, schwach mittelsandig

Die bindigen setzungsempfindlichen Schichten werden von der Leitungstrasse in den Abschnitten durchschnitten, in denen die Leitungen in Radien von 700 m bis 900 m von der GOK auf die Endteufe in ca. NHN -21,50 m geführt werden. Dies sind die Deichbereiche und Außendeichbereiche, in denen keine maßgeblichen Laständerungen und damit keine Setzungen zu erwarten sind, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Leitung haben.

Grundsätzlich können Weichschichten unterhalb der geplanten Leitungstrasse im Bereich der Eider nicht ausgeschlossen werden. Die Tiefe der Leitungstrasse und die Erfahrungen der WSA aus Untergrunderkundungen weiter flussabwärts gemäß Unterlage [8] deuten jedoch darauf hin, dass Weichschichten mit hohem Setzungspotential in einer Tiefe unterhalb der geplanten Leitungstrasse im Bereich der Eider und damit einhergehenden maßgebliche Setzung der Dükerleitung wenig wahrscheinlich sind.

Im Folgenden wird ein Szenario entwickelt und betrachtet, indem entgegen der bisherigen Einschätzung sich eine Kleischicht unterhalb der Leitungstrasse im Bereich der bestehenden Kolke befindet. Weiterhin wird eine Kolkverfüllung bis zu einer Höhe von NHN -5,0 m als neue Auflast berücksichtigt. In diesem Szenario wurden folgenden Annahmen und Festlegung getroffen:

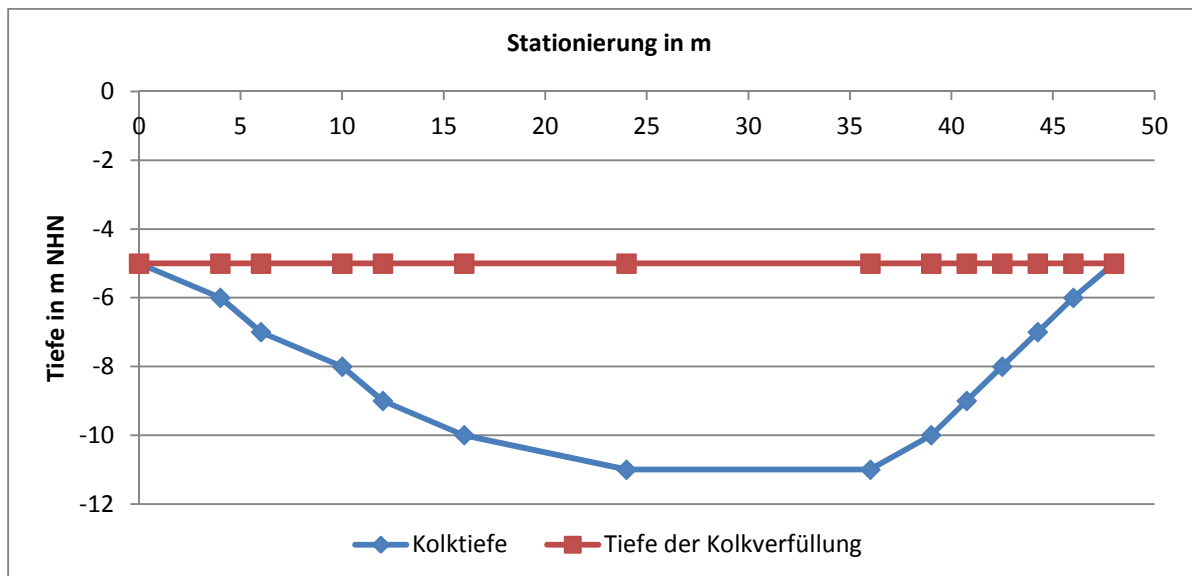
- Die Kleischicht befindet sich direkt unterhalb der geplanten Dükerleitung. In dieser Höhenlage hat die Kleischicht den größtmöglichen Einfluss auf die Setzung der geplanten Dükerleitung.
- Die Kleischicht ist 5,0 m mächtig (d_{Klei}). Dies entspricht in etwa dem oberen Bereich der bei den Untergrunderkundungen festgestellten Mächtigkeit des Kleis.



- Es werden die plausibilitätsgeprüften Kennwerte des Bodens gemäß Unterlage [4] angesetzt.
- Es wird die maßgebliche Kolkgeometrie des östlichsten Kolkes gemäß Unterlage [3] im Bereich der größten Kolkböschungsneigung angesetzt: Länge im betrachtetem Schnitt etwa 48 m, Kolktiefe bis NHN -11,0 m, Böschungsneigung bis zu etwa 1:1,75. Hieraus resultiert ein Verlauf der Auflast, die der Geometrie des Kolkes entspricht.
- Es wird auf der sicheren Seite liegend von einer Verfüllung mit Sand ausgegangen, der eine dichte Lagerung besitzt (die Auftriebswichte γ' beträgt 11 kN/m³).
- Es wird von einem kontinuierlichen Verlauf der Setzungslinie ausgegangen, die der Geometrie des Kolkes entspricht.
- Die Setzung (Primär- und Sekundärsetzung) wird anhand des Steifemoduls, der ermittelten Auflast und der Mächtigkeit der Kleischicht errechnet. Eine räumliche Verteilung der Spannung infolge der räumlich begrenzten Auflast wird auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt.
- Die langfristig wirkende Kriechverformung wird durch eine Erhöhung der berechneten Primär- und Sekundärsetzung um 20 % berücksichtigt.

Nachfolgend wird die Geometrie des Kolkes dargestellt. Aus der Abbildung geht auch die Mächtigkeit der Verfüllung hervor:

Abbildung 1: Geometrie des Kolkes





Nach dem geotechnischen Gutachten gemäß Unterlage [4] werden für die wesentlichen Schichtglieder folgende Kennwerte genannt:

Tabelle 2: Bodenmechanische Kennwerte gemäß Unterlage [4]

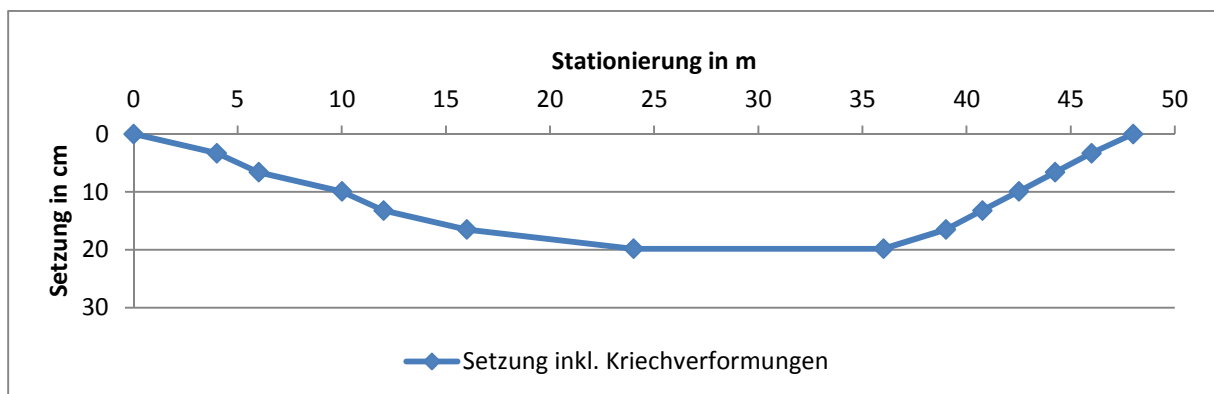
Bodenschicht	Steifemodul	Reibungswinkel	Kohäsion	Auftriebswichte
Symbol	E	φ'	c'	γ'
Einheit	[MN/m ²]	[°]	[kN/m ²]	[kN/m ³]
Wattsand, locker bis mitteldicht	15,0	30,0	--	10,0
Sand, dicht	80,0	36,0	--	11,0
Klei, weich	2,0	15,0	5,0	6,0
Torf	0,5	12,5	3,0	2,0

Die größten Setzungen in diesem Szenario treten im Bereich der tiefsten Stelle des Kolkes auf und werden wie folgt bestimmt:

$$s = \frac{d_{Klei} * \gamma' * d_{Verfüllung}}{E} = \frac{5 \text{ m} * 11 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * 6 \text{ m}}{2000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}} = 0,165 \text{ m}$$

Unter Berücksichtigung der Kriechverformungen betragen die Setzungen in etwa 20 cm. Durch die Geometrie des Kolkes mit seinen Böschungen ist ein kontinuierlicher Verlauf der Setzungslinie zu erwarten, dessen Tiefpunkt der maximalen Setzung entspricht. An den Rändern des Kolkes liegen die Setzungen nahe dem Nullpunkt. In der nachfolgenden Abbildung ist der Setzungslinie entlang des Kolkes dargestellt.

Abbildung 2: Setzungslinie entlang des Kolkes





Im weiteren Schritt kann auf der sicheren Seite liegend der Verlauf der Setzungslinie dem Verlauf der Dükerleitung nach Abschluss der Setzung infolge der Kolkverfüllung gleichgesetzt werden. Errechnet man die wahre Länge der Setzungslinie durch eine lineare Verbindung der Stützstellen und vergleicht diese ursprünglichen Länge der Dükerleitung zeigt sich, dass es nur zu einer unwesentlichen Verlängerung der Dükerleitung kommt (unter der Annahme, dass die Dükerleitung der Dehnung nicht widerstrebt):

Abbildung 3: Theoretische Längenänderung der Dükerleitung infolge der Kolkverfüllung

Ursprüngliche Länge der Dükerleitung	48,00 m
Theoretische Länge der Dükerleitung nach Abschluss der Setzung infolge der Kolkverfüllung	48,0027 m
Theoretische Längenänderung der Dükerleitung nach Abschluss der Setzung infolge der Kolkverfüllung	2,7 mm
Theoretische Dehnung der Dükerleitung nach Abschluss der Setzung infolge der Kolkverfüllung	0,0057 %

Das hier berechnete Szenario zeigt, dass die berechnete theoretische Längenänderung im oben beschriebenen Fall im Vergleich zu möglichen Längenänderungen infolge des Temperatureinflusses sehr klein ist. Weiterhin weist der Kurvenverlauf auf Radien größer 200 m hin, die von der geplanten Dükerleitung ohne weiteres aufgenommen werden können.

Das oben beschriebene Szenario stellt beispielhaft eine Situation dar, die unter Betrachtung der vorliegenden Unterlagen als unwahrscheinlich einzustufen ist. Zusammenfassend deuten die Ergebnisse des Szenarios darauf hin, dass auch im Falle eines Vorhandenseins einer Kleischicht unterhalb der geplanten Leitungstrasse sowie einer Verfüllung des darüber anstehenden Kolkes zu erwarten ist, dass an der Dükerleitung keine Schäden entstehen. Es ist jedoch zu prüfen, ob die oben genannten Verformungen in Kombination mit anderen Einwirkungen die zulässigen Einwirkungen bzw. Verformungen überschreiten.



Die Ergebnisse des beschriebenen Szenarios lassen sich auf ähnliche Fälle, wie zum Beispiel der Entwicklung eines Kolkes, übertragen. Weiterhin ist für eine grobe Abschätzung aufgrund der Deutlichkeit der Ergebnisse eine Extrapolation unter Berücksichtigung von Sicherheitsreserven möglich.

melchior + wittpohl Ingenieurgesellschaft

Dipl.-Ing. Torben Supplitt

Dr. rer. nat. Claussen



Anlagenverzeichnis

- Anlage 1 imp GmbH (2014): Arbeitsplan – Eiderquerung bei Tönning mit 110-kV-Drehstromkabeln, LH-13-1434 gemäß Unterlage [1]
- Anlage 2 Bohlen & Doyen (2014) Bohrlinie und Koordinatenliste gemäß Unterlage [2]
- Anlage 3 aQua (2011): Peilplan PN45_Tideeider_km96-8_km99-2.pdf: Tideeider – km 96,8 bis km 99,2 – Peil Nummer 45/11 – Aufnahme vom 06.09.2011 gemäß Unterlage [3]
- Anlage 4 Neumann (2014): Geologischer Schnitt, Anlage 3 gemäß Unterlage [4]